

방송통신정책연구 11-진흥-나-18

우주전파환경 변화에 따른 고출력 전자파 피해 대책 연구

(Solutions for Mitigating the Potential Damage by High
Altitude Electromagnetic Pulse of High Power
Electromagnetic(HPPEM) Caused by Space Weather
Variations)

김 남/이대영

2011. 12

연구기관 : 한국전자파학회



이 보고서는 2011년도 방송통신위원회 방송통신발전기금 방송통신정책연구사업의 연구결과로서 보고서의 내용은 연구자의 견해이며, 방송통신위원회의 공식입장과 다를 수 있습니다.

제 출 문

방송통신위원회 위원장 귀하

본 보고서를 『우주전파환경 변화에 따른 고출력 전자파의
피해 대책 연구』의 연구결과보고서로 제출합니다.

2011년 12월

연구기관 : 한국전자과학회

총괄책임자: 김 남 (충북대학교)

참여연구원: 이대영 (충북대학교)

이승우 (충북대학교)

임영태 (충북대학교)

박미연 (충북대학교)

이지희 (충북대학교)

신대규 (충북대학교)

이승엽 (전남대학교)

목 차

요약문	vii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 우주전파환경과 고출력 전자파	3
제 1 절 우주전파환경	3
1. 태양활동, 지자기 폭풍, 전리층 지수등에 대한 개요	3
2. 우주전파환경의 재난가능성	11
제 2 절 고출력 전자파	17
1. 고출력 전자파 연구동향	18
2. 고고도 전자파 펄스 특징	27
3. HEMP-E3	30
제 3 절 우주전파환경과 고출력 전자파의 상관관계	33
1. HEMP-E3와 지자기 폭풍 발생으로 인해 유도된 전기장 펄스의 유사성	33
2. 지자기 폭풍 발생으로 유도된 전기장 펄스	37
3. 우주전파환경에 따른 피해사례 분석	47
제 3 장 우주전파환경 변화에 따른 고출력 전자파 피해 대책 방안	56
제 1 절 고출력 전자파 피해 대책 조사	57
1. HEMP/HPEM 관련 시험 기술 기준	57
2. 방호 대책 기술 동향	59
3. HPPEM/HEMP 대책	61
제 2 절 미국 EMP위원회 보고서 조사	71
1. 전력시스템에서의 EMP 영향 및 대책	71

2. 다른 사회 시설에 대한 EMP 취약성 및 대책	81
제 4장 우주전파환경 위험지수의 고찰	88
제 1 절 대표적 우주전파환경 지수	88
제 2 절 기존 우주환경 지수의 한계	91
제 3 절 일반인을 위한 우주전파환경 지수 개발의 필요성과 어려움	94
제 5장 결론	96
참고문헌	100

표 목 차

<표 2-1> 대표적인 우주환경에 의한 피해 사례	16
<표 2-2> 고출력 전자기파와 관련된 사례	22
<표 2-3> 미국의 HPEM 발생 장치 연구동향	23
<표 2-4> 러시아의 HPEM발생 장치 연구동향	24
<표 2-5> 기타 유럽국가의 HPEM 발생 장치 연구동향	24
<표 2-6> 일본 및 중국의 HPEM 발생 장치 연구동향	25
<표 2-7> IEC SC77C에서 발행한 국제표준화 규격 현황	25
<표 2-8> ITU-T SG 5에서 진행 중인 표준화 작업 현황	26
<표 2-9> 우주환경 교란에 따른 피해 사례	51
<표 3-1> 일반 정보 기술 장비에 적용되는 내성 권고 규격	58
<표 3-2> 미 국방성의 전자파 방호와 관련하여 발간한 대책 기술에 관한 규격	60
<표 3-3> 전자파 차폐 효과 판단 기준	62
<표 3-4> 우리나라의 전력, 정보통신, 위성의 구축 및 자산 비용	87

그 립 목 차

[그림 2-1] 플레어 발생으로 나타나는 전자기 에너지 방출	4
[그림 2-2] 코로나 질량 분출의 예	5
[그림 2-3] 태양에서 방출되는 코로나 질량 방출(CME)의 물리적 구조	5
[그림 2-4] 상단의 두 그림은 지자기 폭풍 지수 Dst	7
[그림 2-5] 태양 흑점수 Rz, 전리층 지수 foF2, 전파 플럭스 F10.7의 지수 예	8
[그림 2-6] 태양 흑점 그래프와 지자기 폭풍 발생	9
[그림 2-7] foF2의 교란 예	10
[그림 2-8] 1989년 발생한 지자기 폭풍으로 인한 정전 사태와 변압기 파손	13
[그림 2-9] 2003년 할로윈 스톰 당시 남아공의 변압기 파손	14
[그림 2-10] 2003년 할로윈 스톰 당시 영국의 전력시스템에 유기된 전류	14
[그림 2-11] Diehl EM Emitter	20
[그림 2-12] Russian car-pulser	21
[그림 2-13] 고고도 전자파펄스에 의한 세 가지 형태의 파형(시간대 전계강도)	28
[그림 2-14] 고고도 전자파펄스에 의한 세 가지 형태의 파형(주파수대 전계강도)	28
[그림 2-15] 핵폭발 시 발생하는 MHD-EMP의 두 가지 형태	30
[그림 2-16] 핵폭발로 인해 발생하는 BEMP에 의해 생성되는 Magnetic bubble	31
[그림 2-17] 애플의 멀티스크린 전략	33
[그림 2-18] IEC 61000-2-9 문서에서의 HEMP E3 모델의 파형	34
[그림 2-19] 태양폭풍 발생 시 368km떨어진 전송선로에 유도된 전압	35
[그림 2-20] 지자기폭풍과 HEMP-E3의 지자기장 펄스 비교	35
[그림 2-21] 핵폭발 시 지구 중심으로 향하는 전자파의 흐름	36
[그림 2-22] 1989년 3월 태양활동 극대기시 지자기폭풍 발생 결과 분석	36
[그림 2-23] 자기폭풍 지수 Dst와 전파연구원 지자기 관측소의 H 성분사이의 비교	38

[그림 2-24] 스칸디나비아 반도의 IMAGE 네트워크에서 관측한 지상 자기장 X, Z 성분의 변화와 관측소 위치	39
[그림 2-25] ACE 위성이 관측한 태양충 정보와 Dst 지수	40
[그림 2-26] 할로윈 스톰 발생을 보이는 Dst 지수 변화	41
[그림 2-27] 그린란드 지역의 지상 자기장 관측 네트워크	42
[그림 2-28] 2003년 10월 30일 그린란드 지역에서의 관측한 지상 자기장 변화	42
[그림 2-29] 2003년 10월 30일 그린란드 지역에서 관측한 자기장 변화율	43
[그림 2-30] 2003년 10월 30일 그린란드 지역 지상 자기장 변화에 대한 통계	43
[그림 2-31] 2003년 10월 30일 그린란드 지역에서 도출된 전기장	44
[그림 2-32] 자기폭풍에 대한 aa값과 자기장 수평성분 변화율	44
[그림 2-33] EBR 관측소에서 도출된 2003년 할로윈 스톰 동안의 전기장	45
[그림 2-34] 전리층 전류와 돌발폭풍에 의해 유도된 지상 전기장의 비교	46
[그림 2-35] 할로윈 스톰으로 인해 Vandellos 지하철의 변압기에 야기된 GIC	47
[그림 2-36] 자기폭풍의 발생 강도와 GIC 사이의 상관관계	47
[그림 2-37] 위성통신 두절 발생과 Dst, F10.7 및 foF2 지수 상관관계	48
[그림 2-38] 위성에서 관측한 고에너지 대전입자 플럭스와 자기장 변화	48
[그림 2-39] 2003년 10월 29일~30일 사이에 발생한 거대한 자기폭풍	49
[그림 2-40] 정전 현상의 발생 시점에 Dst 지수 변화	50
[그림 2-41] 2011년 2월 14일~16일 사이의 Kp지수, Dst지수, F10.7 플러스	50
[그림 3-1] 현대 사회 기반 시설의 상호 연계성	56
[그림 3-2] 고고도 전자파 펄스에 의한 과도 전기장에 대한 내성요구사항	58
[그림 3-3] 노르웨이 지하 인프라 시설	61
[그림 3-4] 전력시스템 구조	71
[그림 3-5] 지자기 폭풍으로 인한 변압기 파손	75
[그림 4-1] 1980년부터 2011년 사이의 여러 지수 비교	89
[그림 4-2] SDO 위성의 태양 이미지	90
[그림 4-3] 태양풍 속도, Kp, Dst, AE 지수 비교	90
[그림 4-4] 태양 흑점 사이클과 우주환경 교란 지수 사이의 연관성	91

요 약 문

1. 우주전파환경 변화에 따른 고출력 전자파의 피해 대책 연구

2. 연구 목적 및 필요성

현대의 사회기반 시설은 정보화 및 자동화에 따라 편의성을 추구하기 위하여 많은 전자·통신장비와 상호 연계되어 운영되고 있다. 이러한 네트워크가 구축된 상태에서 한쪽 시설이 고장난 경우 많은 산업·경제적 피해가 발생할 수 있으며, 사람들에게 많은 불편함이나 심각하게는 인명 피해를 초래하게 될 수 있다. 특히, 전세계적으로 60억명 이상이 사용하고 있으며, 우리나라에서도 사용자가 1인당 1대를 넘어선 통신장비의 경우, 막대한 영향을 초래하게 될 것이다. 따라서 사회 전반의 제반 운영시스템 중 하나가 마비되면 연쇄적으로 위협을 받게 된다.

최근 세계적으로 이슈가 되고 있는 태양 흑점의 변화로 인한 지자기 폭풍 발생 등으로 지구의 통신망이나 전력망 등에 심각한 손상을 입는 피해 사례가 보고되고 있으며, 이와 유사한 영향으로 핵폭발로 인한 고고도 전자파 펄스나 인위적으로 고출력 에너지를 순간 방출하여 수 ~ 수십 킬로미터 내의 전자기기를 무력화 시킬 수 있는 고출력 전자파 펄스가 있다. 이러한 고출력의 전자파 펄스는 국가의 전체 시스템을 한 순간에 마비시킬 수 있어, 선진국에서는 이미 이에 대한 대비방안 연구가 진행되었고, 미국은 대비방안을 마련하였다. 특히, 전력망은 고출력 전자파 펄스에 매우 취약하고, 대책 마련이 시급한 실정이다. 이렇게 거의 모든 정보통신 장비 및 시설 등이 전력망과 통신망에 연결되어 운영되고 있어, 고출력 전자파 펄스에 대한 사회 기반시설의 방호대책 마련이 필요하다.

따라서 우주전파환경과 고출력 전자파 발생환경을 정확히 파악하고, 두 환경 사이의 상관관계를 분석할 필요가 있다. 또한, 고출력 전자파로 인한 피해 사례 등을 조사하여, 태양의 흑점 폭발 등의 우주전파환경 변화로 인한 피해를 예측할 필요성이 있다. 이를 종합적으로 분석하기 위해서, 국내·외에서 연구된 내용을 조사 및 분석하여 정리하고, 피해 사례

를 바탕으로 대책 방안에 대해서도 조사하여 방안을 마련할 필요성이 있다. 그리고 국가의 중요 기간시설의 피해를 최소화하기 위한 방안을 마련할 필요성이 대두되고 있다.

3. 연구의 구성 및 범위

연구는 크게 3단계로 진행되었다. 1단계로 우주전파환경과 고출력 전자파에 대해 기본적인 개념, 이론, 상관관계 등을 비교·분석하였으며, 2단계로 우주전파환경 변화에 따른 유도된 전자기장 펄스의 피해 대책 방안을 마련하기 위하여 고출력 전자파 피해 사례 및 대책을 조사하고, 미국 EMP 위원회에서 미의회에 보고한 내용을 정리하였으며, 이를 통하여 우리나라에서도 대비가 필요함을 언급하였다. 3단계로 현재 우주전파환경의 변화에 따른 위험을 사전에 파악하고 분석할 수 있는 대표적인 위험지수를 조사 및 분석하였다.

우선 우주전파환경에서 태양활동, 지자기 폭풍, 전리층 지수 등에 대해 정의하였고, 태양 흑점과 태양의 F10.7 플럭스 그리고 foF2 사이의 상관관계에 대해 분석하였다. 그리고 우주전파환경의 변화에 따른 재난 발생의 가능성을 알아보기 위하여, 국내·외적으로 발생한 사례에 대해 조사하여 보았다. 특히 태양활동이 극대기인 시점에 시설물이나 인공위성에 발생한 다양한 사례를 조사하여, 발생 원인을 분석하였다. 그리고 고출력 전자파의 발생원인, 피해 사례, 연구 동향 등에 대해 조사하였다. 고출력 전자파는 핵폭발로 발생하는 HEMP와 인위적으로 고출력 전자파를 발생시키는 HPEM이 있는데, HEMP의 E3 단계와 지자기 폭풍 발생으로 인해 유도된 전기장 펄스의 발생 패턴이나 영향 등의 측면에서 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 HEMP-E3와 지자기 폭풍으로 유도된 전기장 펄스의 상관관계를 수학적으로 간략하게 비교 및 분석하였고, 각각의 발생으로 인한 피해사례를 조사하였다.

우주전파환경 변화에 따른 유도된 전자기장 펄스의 피해 대책 방안을 마련하기 위하여 HEMP와 HPEM를 보호하기 위한 기술기준이나 시험기술기준을 조사하였다. 특히, 고출력 전자파에 대한 방호 대책 기술에 대한 국내·외 연구 동향과 대책기술에 대한 연구 내용을 조사·분석하였다. 또한, 미국 EMP 위원회에서 미의회에 보고한 보고서를 입수하여 정리하였다. HEMP-E3 단계의 펄스가 유입시 가장 취약하고, 중요 사회기반 시설 중 가장 보호해야 할 전력망을 주로 조사하였으며, 이외에 통신설비, 에너지설비, 운송, 은행 등의

설비를 보호하기 위한 방안을 조사하였다.

마지막으로 대표적인 우주전파환경 지수에 대해 조사하였다. 우주전파환경의 피해를 최소화하기 위해서는 예보 및 경보 시스템의 운영이 필요한데, 이를 위해 우주환경 교란 현상을 분석해야 하며, 이는 자기폭풍 발생, 서브스톰 발생, 방사선 벨트 대교란이 있다. 이러한 교란들은 자기권 및 전리층의 우주환경 교란과 직간접적으로 연관되어 있다. 이러한 교란을 나타내는 지수가 Dst, AE(또는 AL), Kp이다. 본 연구에서는 이에 대해 정의하고, 지수들의 상관관계에 대해 분석하였다. 또한, 기존 우주환경 지수의 한계에 대해 언급하고, 일반인들에게 친숙한 우주전파환경 지수 개발의 필요성과 현재 상황에서의 어려움에 대해 언급하였다.

4. 연구 내용 및 결과

본 연구에서는 HEMP/HPEM과 같이 고출력 전자파의 연구 및 이에 대한 대책과 지자기 폭풍 같은 우주전파환경의 변화에 따른 지구 통신망, 위성망, 전력망 등의 피해 사례 등에 대해 조사하였고, 태양 흑점의 폭발과 같은 우주환경변화에 따른 지구 주변의 복사환경 변화에 대한 상관관계를 연구 및 조사하였다.

일반적으로 고출력 전자파 펄스는 전자 장비를 물리적으로 파괴시킬 수 있을 정도의 강력하고 순간적인 전자기적 충격파를 일컫는다. 이러한 고출력 전자파는 핵폭발로 인한 HEMP(high altitude electromagnetic pulse)가 대표적이며, 최근 전기·전자기술의 발달로 지상에서 의도적으로 전자파 장애 현상을 일으킬 수 있는 장비를 개발하였는데, 이를 HP-EM(high power electromagnetics)라고 한다. 고출력 전자파는 국가의 전체시스템을 한 순간에 마비시킬 수 있으며, 이에 대한 대비방안을 마련해야 한다. 더구나 고출력 전자파를 발생시킬 수 있는 기기가 개발되었으며, 최근에는 소형화되어 온라인을 통해 유통 및 판매되면서 고출력 전자파에 대한 위협성이 커지고 있다. 중요한 것은 이러한 고출력 전자파로 인한 피해가 핵폭발이나 인위적인 전자파 장치가 아닌, 우주전파환경의 변화로 인해 일어날 수 있음을 많은 연구를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 고출력 전자파의 연구 동향을 조사하고 정리하였으며, 고고도 전자파 펄스에 대하여 원리를 조사하고 지자기 폭풍과의 상관관계를 조사 및 분석하였다.

고출력 전자파 펄스가 시설에 유입되는 경우 E1(초기), E2(중기), E3(말기)의 총 3단계로 영향을 주게 되는데, E1은 수십 kV/m의 전기장이 약 100 나노초 동안 영향을 주며, E2는 수백 V/m의 전기장이 약 1 밀리초 동안 영향을 주며, 마지막 E3는 수십 mV/m의 전기장이 약 수십초 동안 유입된다. 즉, E1은 강력한 에너지가 순간적으로 영향을 주는 것이고, E3는 크지 않은 에너지가 비교적 오랜시간 영향을 주는 것이다. 영향을 미치는 주파수 대역을 보게 되면, E1은 기가헤르츠 대역까지 영향을 주며, E2는 키로헤르츠 대역, E3는 헤르츠 대역(약 100 Hz 정도)까지 영향을 주게 된다. 즉, E3가 전력선에 유입될 경우 영향을 주게 되어, 막대한 피해를 초래할 수 있다는 것이다.

EMP는 핵전자기펄스(NEMP)와 비핵전자기펄스(NNEMP)로 구분된다. 핵전자기펄스는 핵폭발이 발생될 때 방출되는 대규모의 전자기파를 이용하는 방식으로 피해 영역이나 정도가 넓고 치명적이지만, 이는 핵폭발을 이용하는 것이기 때문에 핵폭발의 통제가 매우 어렵다는 단점이 있다. 비핵전자기펄스(NNEMP)는 크게 화학에너지에 의한 펄스전력을 이용하는 EMP 폭탄, 전기에너지에 의한 반복적 펄스전력을 이용하는 HPM(high power microwave) 무기 등이 있다. EMP 폭탄은 핵폭탄이 터질 때 발생하는 강력한 전기장이 컴퓨터, 전자기기를 무력화하는 현상을 이용한 것으로 전력공급선, 통신케이블, 공기정화용 통로, 빈 공간 등을 통해 침입해 들어가 전기 공급선과 변압기, 전원이 켜져 있는 모든 제품에 많은 양의 전자기파를 만들어 일시에 사회기반 시설을 마비시키는 장비이다. 고출력 전자파 펄스에 대한 방호 대책은 경계 구역에 따라 각기 다른 대책 기법이 사용되며, 각각의 구역을 외부 공간, 건물, 방, 장비 등으로 구분하여 필요한 보안 조치를 하고, 요구되는 대책을 강구해야 한다. 이러한 대책에 전형적으로 전자파 차폐, 전원선 및 신호선 필터, 그리고 과도 전류 및 전압에 대한 선형 대책부품 및 비선형 대책부품 등이 요구 된다. 이러한 피해에 사전대비 하기 위하여 미국에서는 EMP 위원회를 설치하여 국가의 중요 기반 시설에 대한 취약성 및 대응 방안을 강구하고 있다. 또한, 유럽연합, 일본 등에서도 고출력 전자파에 대한 방호 대책 및 가이드라인을 만들고 있으며, 전자파 펄스 공격을 테러로 간주하여 대응방안을 마련하고 있다.

태양의 흑점 활동이 극대기로 되면서 지구의 지자기에 영향을 주게 되면, 고출력 전자파 펄스가 유입되는 것과 유사한 영향이 발생된다. 태양폭발이 일어나면 강한 엑스선과 극자외선이 생기는데, 이러한 파장은 지구 전리층까지 도착해 전자의 밀도를 높하게 되며, 이

로 인해 통신이 두절될 수 있다. 즉, 전리층은 30 MHz보다 짧은 주파수의 전파를 반사하는 성질을 가지고 있는데, 이러한 특성을 이용하여 원거리 통신이 이루어진다. 하지만, 태양의 흑점폭발로 인하여 전리층에 있는 전자의 밀도가 변하거나 자기장폭풍 때문에 전리층이 교란되면 통신 장애가 발생하게 되는 것이다. 현재 우리가 사용하는 위성통신뿐 아니라 위성을 활용한 항법 시스템은 여러 곳에 사용되고 있는데, 사용되는 신호는 모두 전리층을 통과하므로 전리층의 밀도가 변하거나 교란되면 통신장애가 생기거나 항법시스템에 문제를 일으킨다. 이렇듯 지자기 폭풍이나 태양활동 등 우주환경변화가 지구에 영향을 주기 때문에 우주환경변화와 지구 복사환경 변화에 대한 상관관계를 알기 위해 2000년부터 2010년까지 10년 동안 발생한 지자기 폭풍을 조사하고 정리하였다. 지자기 폭풍은 Dst 최소값이 -50 nT를 넘어서는 경우로 기준을 정하고, 보통 하는 관례에 따라 지자기 폭풍 사건을 선정하였다. 그 결과 2000년부터 2010년 사이에 214건의 지자기 폭풍을 선정하였고, 이는 연 평균 11.5 건의 발생률을 의미하며, 이 중에서 2000년부터 2005년 사이에 191건이 발생하여 전체의 약 89%를 차지하고, 2006년부터는 그 발생이 현격히 감소하였는데 이는 태양 흑점 감소기와 일치하는 결과이다. 가장 강한 지자기 폭풍은 2003년 11월 중에 발생한 것으로서, Dst 최소값이 -422 nT에 이르렀다.

지자기 폭풍 발생 기간에 대해 태양 전파 플럭스 F10.7 및 전리층 foF2 지수를 조사한 결과, 특정한 경우에 지자기 폭풍 동안 foF2의 값에 심한 교란이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 지자기 폭풍 중과 폭풍 전후에도 많은 교란이 있고, 이때 foF2의 값이 크게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 시간으로 보면 태양 흑점 수와 F10.7 플럭스량의 변화, foF2 지수 사이에 양성적 비례 관계가 명확하다는 것을 알 수 있었다. 또한 흑점수가 많은 태양 극대기 기간에 지자기 폭풍 발생 빈도도 높는데, 2000년부터 2004년 정도의 기간 동안 지자기 폭풍 발생 빈도가 집중적으로 높고, 그 이후에는 크게 떨어진 것을 확인할 수 있었다. 그런데, 이러한 “long-term” 상관관계에 비해, 특정 지자기 폭풍이 발생할 때 태양 플럭스 변화량, foF2 지수 변화 사이의 “short-term” 상관관계는 분명치 않다.

피해 사례의 조사는 고출력, 고고도 전자기적 교란을 중심으로 이루어졌으며, 태양 폭발이나 지자기 폭풍 발생과 관련된 통신교란 사례, 위성의 궤도 및 자세 교란 사례, 지상 변전소, 변압기 피해 사례 등을 조사 대상으로 연구하였다. 사례를 조사한 결과 지자기 폭풍이 발생하였을 때 일부 지역에서 통신 장애, 전력망 장애 등 피해가 발생했음을 알 수 있

었다. 이는 지자기 폭풍에 의해 유도된 전자파펄스로 인해 발생하는 것이며, 미국 EMP 위원회보고서 및 고출력 전자파관련 자료를 분석한 결과 지자기폭풍으로 인해 유도된 전기장은 HEMP-E3와 전계강도는 다르지만 유사한 파형을 가진다는 것을 알 수 있었다. 또한 피해 측면에서도 환경적으로 유사한 점을 감안하면 고출력 전자파에 대한 전력, 통신 기타 사회시설의 보호대책은 동시에 지자기 폭풍으로 부터의 시스템 보호 대책이 될 것이라고 분석된다.

미국 EMP위원회 보고서에 의하면 강력한 태양폭풍은 국가에 엄청난 금전적 손실을 가져올 뿐 아니라 복구에 있어서 긴 시간이 필요로 한다. 더욱이 우주환경변화로 발생하는 자연적인 고출력 전자파 펄스의 공격은 피할 수 없다. 이에 미국의 SEC, 일본의 NCIT, 유럽연합의 ESA, 호주의 IPS 등 각각의 기관에서는 우주 환경 연구를 활발히 진행하고 있으며 그에 따른 예보와 경보를 체계적으로 시행하고 있다. 국내는 각 연구기관 별로 우주환경에 대한 자료를 잘 축적하고 있으나, 각 기관별 협력을 통한 예보 및 경보 시스템을 갖춘 상황은 아니다. 따라서 각 기관의 장점을 살려 전문화된 연구 결과와 우주환경 자료들을 통합, 관리하여 체계적인 예보 및 경보시스템을 갖추어야 한다.

연구를 통하여 2000년부터 2010년까지 발생한 지자기 폭풍(Dst 지수)과 2.8 GHz 전파 플럭스 변화량, 그리고 foF2 전리층에 대한 임계 주파수 값의 변화를 비교·분석 완료하였으며, 그 결과로 지자기 폭풍의 발생으로 인한 전리층 교란의 확률을 정량적으로 도출하였다. 또한, 대표적인 우주환경 지수를 재검토 하고, 우주전파 모니터링에 가장 효율적인 지수를 제안하였다. 마지막으로 흑점 극대기에는 Dst 지수를 활용하고, 극소기에는 Kp와 AE 지수를 활용할 것을 제안하였으며, 세 가지 지수의 예측 모델을 도입하여 수정 보완 후 전파연구원 우주전파환경 예·경보 시스템에 추가 할 것을 제안하였다.

5. 정책적 활용 내용

- 국가 기간 시설의 우주 전파 교란에 의한 국가 비상계획 수립을 위한 기초 자료로 활용
- 고출력 전자파 펄스 발생에 대한 대처 방안 수립을 위한 기초 자료로 활용
- 지자기 폭풍과 지구의 복사환경 변화에 대한 상관관계 파악을 위한 기초 자료로 활용

- 우주 전파 환경의 변화로 인해 발생할 수 있는 피해를 최소화하기 위한 방안 마련의 기초 자료로 활용
- 대국민 홍보를 위한 구체적인 우주전파 활동지수(표) 개발에 필요한 기초 자료로 활용

6. 기대효과

- 고출력 전자파에 의해 국가 기간시설 및 주요 시설 보호를 위한 제도개선
- 고출력 전자파 펄스(HPeM) 및 고고도 전자파 펄스(HEMP)의 복구 방안 마련을 위한 제도도입
- Dst, Kp, AE 등 대표적 우주전파 환경 지수의 예측 모델 개발

SUMMARY

1. Solutions for Mitigating the Potential Damage by High Altitude Electromagnetic Pulse of High Power Electromagnetic (HPEM) Caused by Space Weather Variations

2. Objective and Importance of Research

The infrastructures are merged and managed with other infrastructures for the convenience according to the information industry and the automatic control. If any infrastructure is broken under construction of the network, various industrial and financial damages could be occurred. In addition, the electric power and communication facilities are one of the most important infrastructures. The functioning of society and the economy is critically dependent upon the availability of electricity.

Recently, some cases report that the geomagnetic storms occurred by varying the sunspots have damaged to the electric power facilities, the communication facilities, and the satellites. Similarly, the HEMP (high altitude electromagnetic pulse) occurred by explosion of the nuclear and the HPEM (high power electromagnetics) caused by artificially emission of the high power energy from the devices have been developed. Generally, these pulses are called the high power electromagnetic pulse (EMP). The EMP could make powerless state of all electric and electronic devices within few kilometers. These are the critical issue in the world, and the advanced nations have already researched the prepared program. Therefore, the research is needed to grasp a point of the space weather and the EMP environment, and to analyze the relationship of them. In addition, the examples of the damage caused by the EMP are investigated,

and then expectations of the damage caused by the space weather variation have to be reported. For synthetically analyzing these contents, we surveyed and classified many research results and damaged examples from other countries.

3. Contents and Scope of the Research

The researches in the space weather and the EMP environment were in progress by 3 steps. In the first step, the basic concept, theory, and relationship for the space weather and the EMP are defined and compared. In the second step, the damaged examples and countermeasure of the EMP for preparing the solution of induced electromagnetic pulse are researched and classified. Also, the congress report, which is published by an EMP committee in US government, is surveyed. In the third step, we researched and analyzed the representative dangerous index to recognize the risk by the space weather variation in advance.

We defined the sun activity, the geomagnetic storm, and the ionosphere index of the space weather, and analyzed the relationship among the sunspot, the F10.7 flux of the sun, and the foF2. Moreover, the relationship between the geomagnetic storm and the HEMP-E3 level is proved by the mathematical formulas because two different activities have very similar performances, i.e., the occurrence patterns and effects of the induced electromagnetic pulse. To minimize the damage of the space weather, the management for a forecast and an alarm system is needed. Therefore, the disturbances of the geomagnetic storm, sub-storm, and radiation belt are analyzed. These disturbance indexes are Dst, AE (or AL), and Kp. In this research, we defined and analyzed the disturbance indexes.

4. Research Results

We researched the high power EMP study, the damaged examples caused by the space weather, and the geomagnetic storm occurred by the explosion of the sunspot. Usually, the EMP is a strong and momentary electromagnetic shock wave to destroy the electric and electronic devices physically. The HEMP (high altitude electromagnetic pulse) occurred by the explosion of the nuclear is the typical source, and recently HPEM (high power electromagnetics) has developed for the artificial electromagnetic pulse on the ground. Therefore, the research trends of the EMP are surveyed and classified. The principle of the HEMP is researched, and the relationship between the HEMP-E3 level and the geomagnetic storm is analyzed. The electromagnetic pulse could be paralyzed the infrastructures, home and company devices, and all electronic devices. So, we have to prepare the solution for protection of the EMP. Generally, the electromagnetic shielding, various filters, and the protection devices are needed. In the US, Japan, and EU, they are preparing the guidelines for the protection program.

The US Congress report presents the results of the Commission's assessment of the effects of a high altitude electromagnetic pulse (EMP) attack on the critical national infrastructures and provides recommendations for their mitigation. The electromagnetic pulse generated by a high altitude nuclear explosion is one of a small number of threats that can hold our society at risk of catastrophic consequences. The increasingly pervasive use of electronics of all forms represents the greatest source of vulnerability to attack by EMP. Electronics are used to control, communicate, compute, store, manage, and implement nearly every aspect of civilian systems. When a nuclear explosion occurs at high altitude, the EMP signal it produces will cover the wide geographic region within the line of sight of the detonation. This broad band has the capability to produce widespread and long lasting disruption and damage to the critical infrastructures that underpin the fabric of society. Electrical power is necessary to

support other critical infrastructures, including supply and distribution of water, food, fuel, communications, transport, financial transactions, emergency services, government services, and all other infrastructures supporting the national economy and welfare. Should significant parts of the electrical power infrastructure be lost for any substantial period of time.

The sunspot activity is related to the geomagnetic activity of the earth. The induced electromagnetic pulse occurred by the geomagnetic storms is similar with the EMP. The explosion of the sunspot makes to change the density of the electrons on the ionosphere of the earth. This problem could be blocked the communication between the base-stations and the satellites or the satellites or base-stations. For analyzing the problem, the occurred geomagnetic storms for a decade (2000 ~ 2010) are surveyed and classified. The guidelines for an impact are using the Dst index. If the minimum value of the Dst index is more than -50 nT, we classified that the geomagnetic storms are occurred. As the analysis results, the Dst index is equal to the decrease duration of the sunspot. For the index of F10.7 flux and foF2, foF2 values has violent disturbance during the occurrence of the geomagnetic storms. Accordingly, the variation of the F10.7 flux and the foF2 index has occurred by changing the number of the sunspots. However, 'short-term' relationship is not clear among the geomagnetic storm, F10.7 flux, and foF2 index.

5. Policy Suggestions for Practical Use

- The reference data for establishment of the national plans by the space disturbance of the infrastructures
- The reference data for establishment of the plans to prepare the high power electromagnetic pulse
- The reference data for grasping the relationship between the geomagnetic storm and

the earth radiation environment

- The reference data for preparing the solution of the damages by varying the space weather
- The reference data for developing the space weather activity index

6. Expectations

- The improvement of systems for national infrastructures to protect the high power EMP
- The introduction of systems for preparing the repair methods of HPEM and HEMP
- The development of the prediction models for the space weather activity index

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Chapter 2. Space Weather and High Power Electromagnetics Research

Space Weather

High Power Electromagnetics

Space Weather and High Power Electromagnetics Relationship

Chapter 3. High Power Electromagnetics Measures for Space Weather Variation

Research on Damage Measures of High Power Electromagnetics

Research on US Congress Report by EMP Committee

Chapter 4. Study on Damage Index of Space Weather

Typical Space Weather Index

Limits of Conventional Space Weather Index

Necessity and Difficulty of Development of Space Weather Index for General Public

Chapter 5. Conclusion

제1장 서론

정보통신 산업의 발달로 전기·전자 기기의 개발뿐만 아니라, 다양한 통신 방식이 개발되고 있다. 이처럼 정보통신 기술의 발달로 인하여 현대의 사회기반체제의 통신, 운송, 금융 등 전분야가 통합되고 상호 밀접한 관계를 유지하는 유비쿼터스 환경으로 변화하고 있다. 이와 관련된 장비는 더욱 소형화되고 정보 공유화를 위해 상호 연관되어 자동화 방식으로 전환되고 있다. 따라서 국가 사회 전반의 제반 운영시스템 중 어느 하나가 마비되면 연쇄적으로 위협을 받게 될 것이다.

고출력 전자파는 국가의 전체시스템을 한 순간에 마비시킬 수 있는 재앙 같은 존재로 여겨지고 이에 대한 대비방안 연구가 많은 나라에서 활발히 이루어지고 있다. 더구나 요즘은 고출력 전자파 발생기가 소형화되고 심지어 인터넷을 통해 유통, 판매되면서 고출력 전자파에 대한 테러 위협이 더욱 커지고 있음을 연구 본문을 통해 확인할 수 있으며, 이에 대한 대책에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 고출력 전자파의 발생이 일반적으로 핵폭발이나 인위적인 전자파 발생장치로부터 일어날 수 있지만, 최근 태양의 활동으로 유사한 영향이 발생할 수 있다는 연구결과가 보고되면서 큰 이슈가 되었다.

태양활동은 주로 태양의 흑점 폭발이 강력해 지면서 지자기에 영향을 주는데, 태양의 코로나 물질분출(CME)이나 플레어의 발생에 기인된다. 지구로 방사되는 코로나의 양이 많아지면서 지구 지자기활동에도 더욱 큰 영향을 주게 된다. 이러한 우주전파 환경의 변화로 인해 발생할 수 있는 다양한 피해 사례를 조사 및 정리하였다. 사례 조사 결과, 고출력 전자파로 인하여 모든 시스템이 동시에 마비될 경우 국가 및 사회 기능은 회복 불능의 상황을 초래할 수 있으므로 이에 대한 대비 방안이 필요하다는 결론을 얻었으며, 태양 흑점 폭발로 유사한 상황이 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 우리나라의 태양활동 극대기는 2013년으로 예상되고 있으며, 이에 대한 준비가 필요한 실정이다.

이러한 상황을 파악하고 대비하기 위하여 2009년 미백악관에서는 미국에 구축된 전력망이 고출력 EMP에 매우 취약하다는 것을 확인하고, 대책을 마련하는 청문회를 개최하였다. 또한, 전력망을 비롯하여, 통신, 금융, 공공시설 등 전체 사회기반시설에 대해

고출력 EMP 발생에 따른 피해 상황을 시뮬레이션하고, 피해 상황 및 복구 방안 등에 대해 종합적인 대책안을 마련하여 미의회에 보고하였다. 각 나라에서도 고출력 전자파에 대한 대응 방안, 가이드라인을 만드는 등 대비를 하고 있다.

지상에서 의도적으로 전자파 장애를 발생시키는 고출력 전자기파에 대해 대비책을 마련하고, 해결 방안을 준비하고는 있다지만, 핵폭발 등으로 발생하는 고고도 전자파 펄스 및 태양 흑점 폭발, 태양폭풍 등 태양활동으로 인한 대책은 거의 전무한 실정이다. 특히, 우주전파환경의 변화를 미리 정확히 예측하고, 영향으로 인한 기반시설의 피해를 예측하는 것은 거의 불가능하다. 다만 태양활동이 일정한 주기를 갖고 활동을 하고 있으므로 이러한 통계적 데이터를 중심으로 분석해야 한다. 따라서 우주전파환경의 변화에 대한 예측도 중요하지만, 피해 발생시 즉각적인 대처로 국민들의 불안감을 해소하고, 재산손실 등의 피해를 최소화 하는 방안을 모색해야 한다.

이러한 우주전파환경의 변화로 인해 발생하는 전자파 펄스는 의도적인 전자파 펄스와 유사한 성격을 갖고 있어, 의도적인 전자파 펄스를 분석하고 대비 방안을 마련하면, 강력한 태양 흑점 폭발이나 지자기 폭풍이 발생되었을 때 즉각적인 대처가 가능할 것이다. 특히 지자기폭풍과 고출력 전자파의 E3 단계가 매우 밀접한 상관관계를 갖고 있으며, 이를 분석하게 되면 지자기폭풍이 강력하게 발생할 경우, 발생할 수 있는 피해에 대해 예측하고 대비가 가능하다. 특히 사회기반시설에서 가장 중요한 통신망 및 전력망의 고장 및 파손 등의 피해를 최소화할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 고출력 전자파에 대해 연구하고 지자기폭풍과의 상관관계를 분석하였다. 또한, 고출력 전자파가 발생할 경우 피해 상황과 대책 방안에 대해 조사하였으며, 지자기 폭풍 같은 우주전파환경 변화에 따른 지구의 통신망, 위성망, 전력망 등의 피해 사례, 태양의 흑점의 발생 같은 우주환경변화와 지구 주변의 복사환경 변화에 대한 상관관계를 연구 및 조사하였다.

제2장 우주전파환경과 고출력 전자파

제1절 우주전파환경

1. 태양 활동, 지자기 폭풍, 전리층 지수 등에 대한 개요

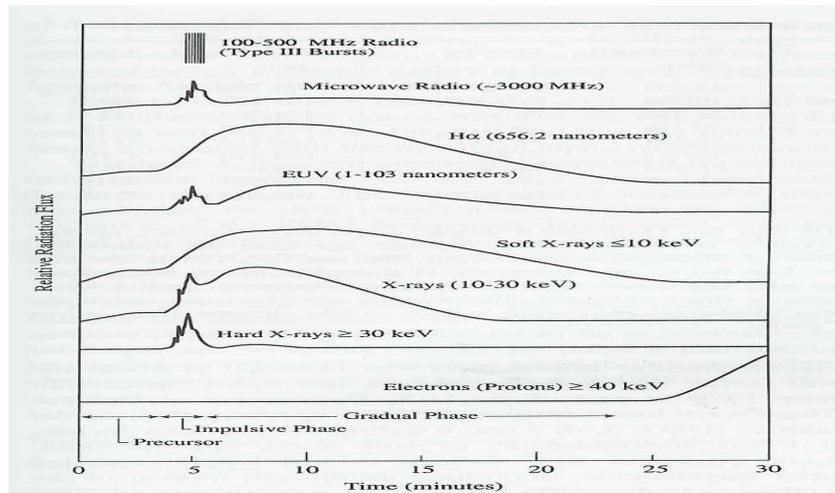
가. 태양활동

태양은 전자기파와 플라즈마 입자를 항상 분출하는 항성인데, 그 분출 정도가 급격히 증가하는 폭발적 현상이 종종 발생한다. 대표적으로 코로나 질량 분출(Coronal Mass Ejection) 현상과 플레어(Flare) 현상을 들 수 있다. 이러한 격변적 활동이 발생하면 불과 수 분 사이에 수천 만 톤의 질량과 약 10^{25} Joule의 에너지가 방출된다. 이것은 수 천만 개의 핵폭탄 강도에 맞먹는 것으로 보고되었으며, 지구를 비롯한 태양계 내의 모든 천체와 공간은 이러한 고출력 폭발 현상에 노출되어 있다. 이와 같은 폭발적 활동은 태양 흑점의 출현 정도에 비례하는 것으로 잘 알려져 있다. 태양 흑점 수는 일정한 주기성이 있는 것으로 연구되었고, 지난 2000년부터 2001년 즈음에 최대 수를 보였다가 차츰 감소하였으며, 주기에 따라 다음 2013년 즈음에 다시 최대 수를 보일 것으로 예상하고 있다. 이것은 원래 11년 마다 찾아오는 다음 흑점 극대 시점 보다 조금 늦은 것으로 보고 있다. 다가오는 태양 흑점 극대기에 지구는 또 한 번 거대한 태양 폭발 현상에 노출 될 것으로 염려되며, 고출력 전자기 펄스 형태의 교란이 예상된다. 코로나 질량 방출이나 플레어가 발생하면 그 영향이 지구에 직접적으로 미치게 되는데, 그 영향의 모습은 여러 가지로 나타나게 된다. 대표적으로 지자기 폭풍의 발생, 태양 전파 폭발로 인한 지구 근접 공간의 직접적 전자기파 교란, 지구 주변 공간의 물리적 교란으로 인한 전리층 상태 변화 등을 들 수 있다.

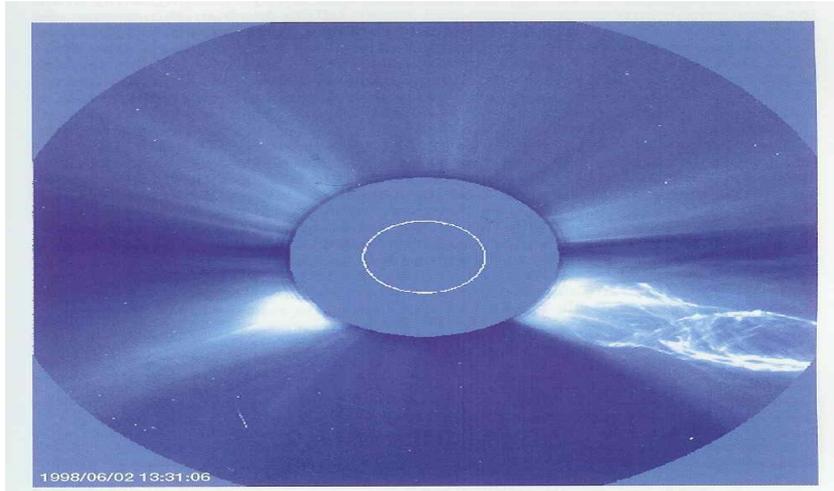
아래 [그림 2-1]은 플레어 발생으로 나타나는 전자기 에너지 방출을 여러 파장 대에 대해 보여 주고 있으며, 전파 영역부터 X-선 영역까지 넓은 전자기 스펙트럼 영역에 걸쳐 에너지 방출이 됨을 볼 수 있다. [그림 2-2]는 코로나 질량 방출의 모습을 SOHO 위성에서 관측한 것이다. 태양의 광구 표면을 코로나그래프라는 디스크로 가려서 외곽의

열은 코로나 층의 활동을 관측하도록 된 것이며, 이 그림은 아래쪽 좌우 방향으로 발생한 코로나 질량 분출의 모습을 잘 보여 주고 있다. 특히, 오른쪽 아래 부분으로 방출되는 거대한 코로나 질량 방출과 왼쪽 아래의 다소 작은 이벤트가 보인다. [그림 2-3]은 이러한 코로나 질량 방출의 물리적 구조를 설명하는 스케치가 되겠다. 거대한 자기장 다발 혹은 루프 속에 태양 코로나 플라즈마 입자들이 갇혀 있고, 이 자기장 다발은 주변 자기장 보다 강한 자기장 이며, 태양을 탈출 하여 태양계 공간으로 빠른 속도로 진행하게 되는데, 그 결과 진행 방향 앞에 충격파가 발생하게 된다. 이러한 자기장 구름 (Magnetic cloud)이 지구로 향해, 지구 자기권에 충돌하게 되면 자기 폭풍을 야기 시킨다.

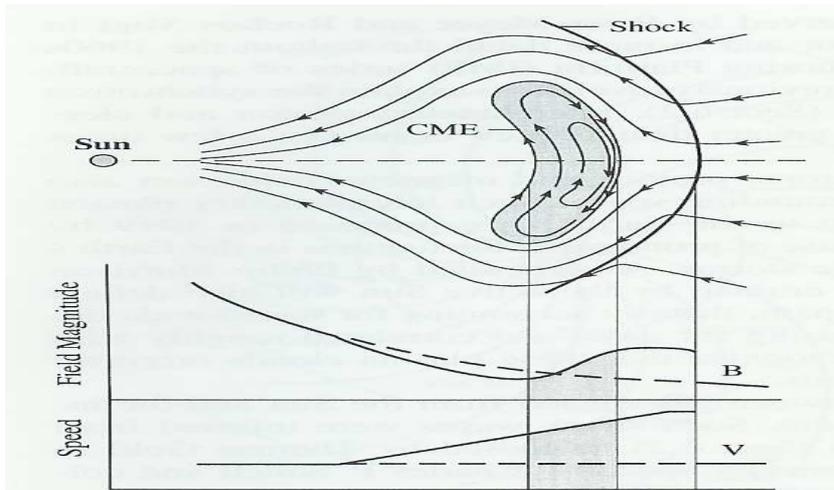
[그림2-1] 플레어 발생으로 나타나는 전자기 에너지 방출



[그림 2-2] 코로나 질량 분출의 예



[그림 2-3] 태양에서 방출되는 코로나 질량 방출 (CME)의 물리적 구조



(1) 태양 전파, 2.8GHz (10.7cm), 플럭스 변화

플레어 현상은 전파에서부터 시작하여 X-선 및 감마선 영역까지 넓은 전자기 스펙트럼에 걸쳐 강력한 전자기 에너지를 방출한다([그림 2-1] 참고). 플레어의 발생은 태양 흑점이 있는 바로 위 코로나 공간에서 시작된다. 흑점은 보통 근접하여 놓인 쌍으로 존재하는데, 두 흑점 사이는 자기장 다발로 연결되어 있다. 이 자기장 다발 속에 고에너지 대전 입자들이 갇혀 있게 된다. 이러한 코로나 층에 갇혀 있는 대전 입자들이 전자기학적인 전파방출 물리에 의해 전파 영역에서 전자기파를 방출하는데, 흑점이 많아 질 수록 해당 전파 플럭스 양은 많아지게 된다. 이때 최대 플럭스를 보이는 주파수가 대략 2.8GHz에 해당하며, 따라서 2.8GHz 전파 플럭스는 태양 흑점 및 해당 활동의 주요 지수로 사용되곤 한다. 현재 전 세계적으로 2.8 GHz 전파 플럭스를 관측하여 자료가 제공되고 있는 곳이 여러 곳 있다. 아래 [그림 2-4]에 예를 보였다.

(2) 지자기 폭풍

태양의 급격한 변화 중 코로나 물질 방출은 지구 자기권에서 지자기 폭풍을 발생시키는 주요 요인으로 잘 알려져 있다. 코로나 물질 방출은 태양 자기장이 둘러싼 거대한 플라즈마 덩어리인데, 이것이 지구 자기권에 도달하여 충돌하면, 지구 주변과 지상 자기장의 급격한 변화와 오로라 발광 및 전리층 변화 등을 야기하게 된다. 편의상 지자기 폭풍의 발생은 Dst 지수로 간단히 모니터 된다. [그림 2-4]에 실제 우리 연구에서 얻은 지자기 폭풍 발생 예를 보였다.

(3) 전리층 지수

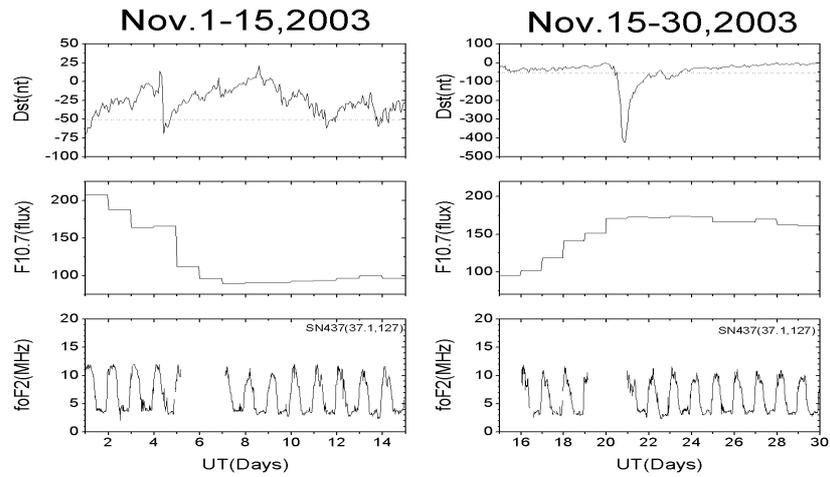
태양 활동과 지자기 폭풍의 발생은 전리층 전자 밀도를 변화 시킨다. 이는 전리층 밖 자기권에 존재하는 대전 입자와 전자기 교란이 전리층 까지 침투하여 발생하는 것으로 보면 된다. 이 결과 전리층에 기반한 전자기파 통신이 영향을 받을 수 있다. 전자 밀도가 가장 높은 F2 층의 임계 주파수를 나타내는 foF2는 F2 층의 상태 변화를 모니터링해 주는 주요 지수이다. 이 지수는 지구상 여러 관측소에서 관측, 및 산출되어 제공되고 있다. 가령 국내의 경우 오산, 안양 등 관측소에서 산출한 foF2 값이 존재한다. 아래

[그림 2-4]를 참고하면 된다. 중간의 두 그림은 태양 2.8 GHz 전파 플럭스를, 아래 두 그림은 전리층 임계 주파수 foF2를 나타낸다. 여기서 foF2 값은 오산 관측소에서 얻은 것이다.

(4) 태양 흑점, 태양 F10.7 플럭스, foF2 사이의 관계

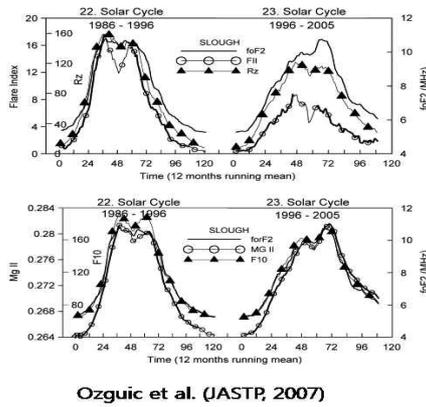
이 세 가지 인자 사이에는 높은 상관관계가 있다. 아래 [그림 2-5]가 이것을 잘 보여 주고 있다. 즉, 태양 흑점 수가 많을수록 태양 활동이 활발하므로, 2.8 GHz 전파 플럭스가 증가하는 경향이 뚜렷하고, 이러한 태양 활동에 직접, 간접적 영향에 의해 전리층 임계 주파수 값도 증가하는 장기적 경향도 나타난다.

[그림 2-4] 상단의 두 그림은 지자기 폭풍 지수 Dst



[그림 2-5] 태양 흑점수 Rz, 전리층 지수 foF2, 전파 플럭스 F10.7의 지수 예

Long term relationship among foF2, Rz, and F10.7 flux



- foF2 at the Slough (51.5N) ionosonde station
 - Rz :sunspot number
 - F10: Solar 10.7 cm flux
 - FII: solar UV variability using the Mg II absorption feature at 280 nm
 - FI: solar flare index, total energy emitted by the flare, available for general use in NGDC
- (ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/INDEX/).

Ozguic et al. (JASTP, 2007)

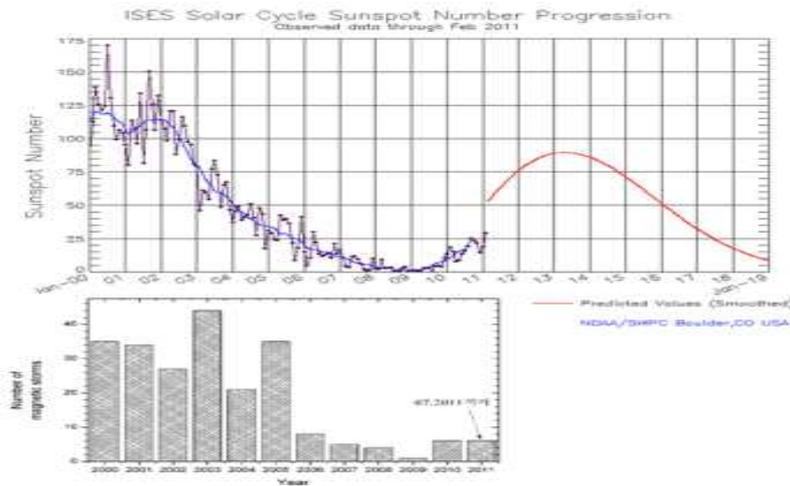
나. 지자기 폭풍 발생

2000년에서부터 2010년 사이에 발생한 지자기 폭풍을 조사하고, 정리하였다. 지자기 폭풍은 Dst 최소값이 -50 nT를 넘어서는 경우로 기준을 정하고, 보통 하는 관례에 따라 지자기 폭풍 사건을 선정하였다. 그 결과 2000년부터 2010년 사이에 214건의 지자기 폭풍을 선정하였다. 이는 연 평균 11.5건의 발생률을 의미한다. 이중에서 2000~2005년 사이에 191건이 발생하여 전체의 약 89%를 차지하고, 2006년부터는 그 발생이 현격히 감소하였는데 이는 태양 흑점 감소기와 일치하는 결과이다. 가장 강한 지자기 폭풍은 2003년 11월 중에 발생 한 것으로서, Dst 최소값이 -422 nT에 이르렀다.

앞에서 설명하였듯이 [그림 2-4]는 선정한 지자기 폭풍 사건 두 경우를 보인 것이다. 오른쪽 그림의 것이 위에서 언급한 가장 강한 지자기 폭풍 사건이다. 그림에서 상단의 두 그림은 Dst 지수를 나타내고, 아래 두 줄의 그림은 각각 F10.7 플럭스와 한국의 오산 관측소에서 얻은 foF2 지수를 보여 주고 있다. foF2 지수는 잘 알려진 일변화를 보여 주고 있다. 즉, 관측소가 자전하면서 밤낮에 따라 주기적으로 달라지는 임계 주파수의 변화를 잘 반영하고 있다. [그림 2-6]은 태양 흑점 그래프와 지자기 폭풍 발생 통계를

보여주고 있다. 최종적으로 선정된 지자기 폭풍을 데이터를 정리하였고, 이를 바탕으로 여러 가지 다른 우주환경 지수를 비교 분석 할 수 있으며, 또한 이 지자기 폭풍 기간 동안 발생한 구체적 피해 사례와의 대응 관계를 조사하는데도 유용하게 활용할 것이다.

[그림 2-6] 태양 흑점 그래프와 지자기 폭풍 발생



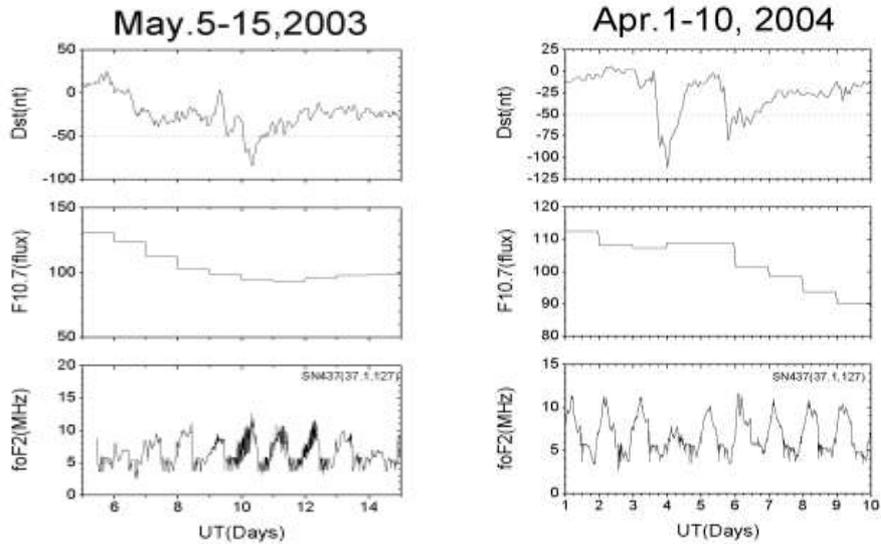
다. 지자기폭풍 기간의 태양 전파플렉스 F10.7 및 전리층 foF2 지수 조사

위의 [그림 2-4]에서 보인 것처럼, 모든 지자기폭풍 기간 즈음에 대해 F10.7 플렉스와 foF2 지수를 조사하였다. foF2 지수는 가능하면 한국 관측소에서 얻을 수 있는 경우로 우선하였는데, 주로 오산과 안양 관측소 값을 얻을 수 있었다. 그 외에는 외국, 특히 주로 아시아권에서 관측이 이루어진 경우로 구성된다. 그러나 일부 지자기 폭풍 날짜 중에는 foF2 자료가 없기도 하여 자료 정리에 누락되어 있다. 이러한 경우는 전체 지자기 폭풍 기간의 30%가 넘는 정도를 차지한다. 자료가 있는 경우의 절반 이상은 오산이나 안양의 자료로 구성되어 있다. [그림 2-4]의 경우에는 잘 나타나지 않지만, 어떤 경우에는 지자기 폭풍 동안 foF2의 값에 심한 교란이 분명히 보이기도 한다. 아래 [그림

2-7)은 이러한 경우에 대한 두 예를 보이고 있다. [그림 2-7(a)]의 경우 5월 9~13일 사이에 많은 교란이 있음을 분명히 볼 수 있다. [그림 2-7(b)]의 경우는 강력한 지자기 폭풍이 진행 중인 4월 4일 전후로 foF2의 값이 크게 변한 것을 볼 수 있으며, 그 다음에 이어지는 4월 6일 전후 지자기 폭풍 중에도 다소의 변화가 나타난다. 이 두 경우 모두 오산의 전리층 관측 자료에서 얻은 것이다. 따라서 이러한 경우 우리나라 상공 전리층의 교란이 분명했음을 짐작하게 한다.

그러나 지자기 폭풍이 발생 한다고 해서 항상 전리층이 전 지구적으로(global) 교란을 받는지는 확실치 않다. 이에 대한 판단을 위해 전 지구적으로 얻을 수 있는 모든 관측소의 foF2를 조사 하였다. 그 결과 214건의 자기폭풍 중에서 약 56%의 건에 대해 최소한 한 곳의 관측소의 foF2가 심하게 교란되었다. 이러한 점을 정량적으로 정리하기는 다소 난해하지만, 관측 데이터가 없는 경우를 고려 할 때, 이와 같은 통계적 수치는 상당히 많은 경우에 foF2가 교란 받는다고 결론을 낼 수 있다.

[그림 2-7] foF2의 교란 예



(a) 2003년 5월 5일~15일

(b) 2004년 4월 1일~10일

한편, 위의 [그림 2-5]에서 설명 하였듯이, 긴 시간으로 보면, 태양 흑점 수와 F10.7 플럭스 량의 변화, foF2 지수 사이에 양성적 비례 관계가 명확하다. 또한 흑점수가 많은 태양 흑점 극대기 기간에 지자기 폭풍 발생 빈도도 높다. 이것은 위에서 이미 언급하였다. 즉, 2000~2005년 정도의 기간 동안 지자기 폭풍 발생 빈도가 집중적으로 높고, 그 이후에는 크게 떨어진다. 그런데, 이러한 "long-term" 상관관계에 비해 특정 지자기 폭풍이 발생 할 때 태양 플럭스 변화량, foF2 지수 변화 사이의 "short-term" 상관관계는 분명치 않다.

2. 우주전파환경의 재난가능성

태양폭발이 일어나면 강한 엑스선과 극자외선이 생긴다. 이런 파장은 지구 전리층까지 도착해 전자의 밀도를 높이는데, 이 때문에 통신이 끊어질 수 있다. 전리층은 30 MHz보다 짧은 주파수의 전파를 반사하는 성질을 가지고 있다. 이런 성질은 원거리 통신에 이용돼 왔다. 그런데 태양폭발 때문에 전리층에 있는 전자의 밀도가 변하거나 자기장폭풍 때문에 전리층이 교란되면 통신에 장애가 온다. 현재 우리가 사용하는 위성통신뿐 아니라 위성을 활용한 항법 시스템은 여러 곳에 사용되고 있다. 이런 신호는 모두 전리층을 통과하고 있으므로 전리층의 밀도가 변하거나 교란되면 통신장애가 생기거나 항법시스템에 문제를 일으킨다.

1989년 캐나다 퀘벡 지역에서 태양 폭발로 인한 지자기 폭풍이 원인이었다. 변압기가 모두 타버려 9시간 동안 정전되었다. 1998년 무선호출기 통신위성인 갤럭시4는 태양에서 나온 고에너지 입자의 영향으로 작동 불능 상태가 됐다. 그 결과 미국 전역에서는 무선호출기가 불통되고 관련 통신시설이 마비되는 진통을 겪었다. 1998년 국제우주환경예보학회는 지난 25년간 태양 폭발로 인해 발생한 19개 민간위성의 대체 비용, 8개 민간위성의 기능 저하, 군사위성 손실액과 보험 배상액 등을 합한 결과, 예상되는 피해액이 1년에 약 25억 달러 이상일 것이라고 추정한 바 있다. 2003년 10월말 태양 폭발이 일어남과 동시에 미 우주 환경 센터를 비롯한 각국의 우주환경 관련기관과 업체들은 서둘러 위성들이 위험에 처할 수 있음을 경보했다. 대전입자가 밀려들어와 상층 대기권의 밀도가 변하면 위성이 고도를 유지하는데 어려움을 겪거나 내부 반도체 회로에도 이상

이 생길 수 있기 때문이다. 이에 따라 우리나라 위성을 포함한 많은 위성들이 태양 폭발 기간 동안 기기의 운영을 최소화하고, 필수적인 최소한의 동작만을 하게끔 운영됐다. 그럼에도 불구하고 24시간 태양을 관측하는 미 해양대기국의 ACE위성에서는 대전입자의 속도를 측정하는 장비가 문제를 일으켰다가 복구됐다. 일본에서도 통신위성인 고다마호가 일시적으로 교신이 중단됐다가 복구됐고, 환경관측위성 미도리 2호도 25일 이후 교신이 두절됐다. 우리나라에서도 지난해 10월말의 태양 폭발로 무궁화위성이 정상궤도를 지키기 위해 연료를 다량 소진하고 있어 수명이 단축될 우려가 있다는 가능성이 보도됐다. 2003년 5월과 6월에 걸쳐 발생한 태양 폭발도 우리나라를 비롯한 세계 곳곳에서 단파통신에 방해를 일으킨 바 있다.

태양폭풍은 대기권 밖의 우주비행사나 인공위성에 직접적인 영향을 미친다. 고에너지 입자에 노출된 우주비행사는 생명에 위협을 받고, 인공위성은 훼손되거나 수명이 단축될 수 있다. 또 태양폭풍은 지구자기장을 압축시키고, 고에너지 입자 일부는 지구 극지방의 대기권 상층부로 들어온다. 이렇게 들어온 태양폭풍은 지구 자기권을 변형시켜 지자기폭풍을 일으키고 극지방에 오로라를 만든다. 지구자기 폭풍이 일어나면 지상에서 운용되는 방송통신 시스템은 물론 전력과 지상·항공의 전자기기 사용에도 영향을 줄 수 있어 각별한 주의가 요구된다. 특히 인공위성의 전자장비와 태양 전지판 등이 폭발의 피해를 받으면 위성의 수명과 궤도 등이 달라지고, 신호감소나 잡음이 발생할 우려가 있기 때문에 위성운용 관련 기관과 업체는 대비를 해야 한다.

1981년 우주왕복선 콜롬비아 호에 탑승했던 우주인은 지구를 선회하는 중에 260 km 상공 대기의 온도가 정상치를 훨씬 벗어난 사실을 관측했다. 당시 측정온도는 2,200K(K는 절대온도)로 평상시의 1,200K를 훨씬 웃돌았다. 이렇게 상층 대기가 가열되면 팽창하기 때문에 지구 대기는 우주 밖으로 더 확장 된다. 따라서 우주선과 대기의 마찰이 증가하고, 덕분에 인공위성을 낮은 고도로 끌어내리는 결과도 초래한다. 1989년에 미 위성 추적소가 1만개가 넘는 위성의 궤도를 추적하지 못했던 것도 바로 이런 현상으로 위성들이 계산된 궤도에서 벗어났기 때문이다. 또한 1982년 11월에 발생한 태양플레어는 고에너지 양성자를 다량 방출했다. 이때 운량을 조사하는 GOES 4호 기상위성의 가시광선 및 적외선 spin-scan radiometer가 45분 동안 작동을 멈추었다. 그리고 태양활동 극소기인 지난 1997년 1월 미국 AT&T사의 통신방송위성인 텔스타 401호의 기능이 상실됐던

것이 대표적인 피해 사례로 꼽히고 있다. 또한 대규모의 자기 폭풍 또한 지구의 영향을 미친다. 지난 1994년 1월에는 강한 전자의 이상증가로 캐나다 위성에 장애가 생겨 전화 두절 및 TV, 라디오 수신 불능 사태가 발생했던 경우도 있고 지난 1991년 4월에는 자기 폭풍으로 미국의 핵발전소 변압기가 파손된 사례도 있다. 1940년 3월에 발생한 자기폭풍은 미국 미네소타 주 미네폴리스 시의 거의 80%에 해당하는 시외전화선을 불통되게 했으며, 1958년 2월 에 발생한 자기폭풍은 웨스턴 유니온 사(社)의 North Atlantic 전신 케이블 에 심각한 장애를 유발했다. 그리고 Bell 전화회사의 경우는 뉴펀들랜드에서 스코틀랜드까지 대서양횡단 케이블에 의한 음성 통신의 장애가 발생했다. 1972년 8월에는 Bell 전화회사의 일리노이스 주 플라노 시와 아이오와 주 캐스캐이드 시를 연결하는 동축케이블을 30분간 불통시켰다.

[그림 2-8] 1989년 발생한 지자기 폭풍으로 인한 정전 사태와 변압기 파손



자료:William Radasky,HEMP, IEMI and Severe Geomagnetic Storm Effects on Critical Infrastructures, 2011

이외에 지난 1989년 3월 자기폭풍 및 열권의 대기밀도 증가로 인해 미국, 일본, 캐나다 등 여러 국가의 위성 기능이 일부 파손됐고, 캐나다의 송신시설에 이상이 생겨 2만 MW의 전력이 손실됐던 일도 있다. 1989년 이후에 발생한 사건을 살펴보면 1991년 6월

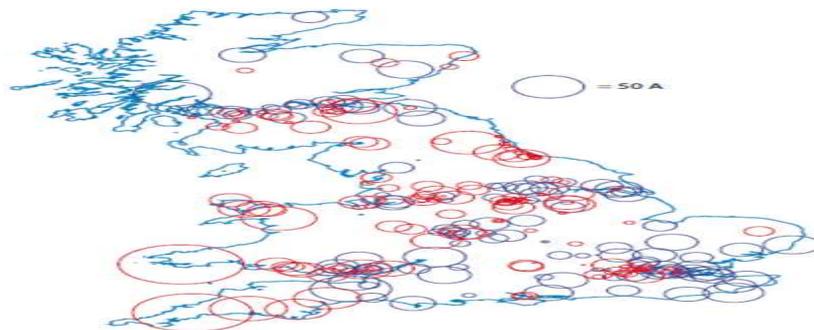
에 발생한 태양 활동의 변화로 인해 펜실베이니아 지역에 수일 동안 영향을 주었으며, 전자설기기, 통신시스템 등이 피해를 입었다. 2000년 7월에 발생한 Bastille dat storm은 강력한 G5 지자기 폭풍이었으며, 이로 인해 GPS 시스템, 전력회사에 피해가 발생하였으며, 텍사스 남쪽에서 오로라가 관측되기도 했다. 2003년에는 10월에는 할로윈 스톰(Halloween storm)이 발생하였으며, 이로 인해 위성, 통신, 전력망에 영향을 끼쳤다.

[그림 2-9] 2003년 할로윈 스톰 당시 남아공의 변압기 파손



자료: J.M. Tora, L.Serrano, J.J. Curto, J.R. Regue, Geomanetically Induced Currents in a Power Grid of Northeastern Spain from EBR observatory records, 2011

[그림 2-10] 2003년 할로윈 스톰 당시 영국의 전력시스템에 유기된 전류



자료: Alan Thomson, Space weather and power grids, 2010

태양활동으로 인한 피해 사례는 최근에도 일어났다. 2011년 2월 15일 오전 11시 경 태양의 흑점이 5년 만에 대폭발해 군·원양어선·항공기 통신 AM라디오 방송 등에 사용되는 단파(HF) 통신이 일시 중단되는 일이 발생했다. 이는 지구 대기의 전리층으로 유입된 태양 고에너지 입자들이 전리층의 높이를 변화시키거나 이온화를 증가시켰기 때문이다. 중국관영 신화통신에 따르면 중국 남부지역에서도 이번 흑점 폭발과 그에 따른 플라즈마 방출로 15일 단파 무선통신 장애가 발생했다. 중국 상공에서 갑작스런 전리층 교란 현상이 나타났다. 2011년 6월에는 범상치 않은 수준의 태양 폭발이 7일(현지시간) 미항공우주국(NASA)에 관측되면서 8일쯤 위성통신과 전력망 등에 미세한 장애가 생길 수 있다고 미국 기상청이 밝혔다. 기상청 우주기상예보센터는 이번 태양 폭발이 2006년 2월 이래 최대 규모의 방사선 폭풍을 일으켜 하루 이틀간 중간 규모의 지구자기 폭풍을 야기할 것으로 보인다고 전했다. 지구자기 폭풍의 규모는 G1(경미)에서 G2(중간급) 사이이며, 시작 시점은 8일 오후 2시(한국시간 9일 오전 3시) 쯤이 될 것이라고 각각 예고했다. 우주기상예보센터에서는 지구 자기 폭풍이 GPS(위성항법시스템) 시스템을 운용하는 위성과 전력망에 다소 문제를 일으킬 수 있다고 발표했으며, 남·북극을 지나는 항공편의 경우 관제 당국과의 소통에 문제가 생기지 않도록 하기 위해 항로조정을 할 수도 있을 것이라고 했다.

지구자기 폭풍은 태양 폭발을 비롯한 여러 요인으로 인한 지구 자기권의 일시적인 혼란을 의미한다. 태양 폭발 발생 후 일반적으로 24~36시간 후 태양풍의 충격파가 지구 자기장을 강타, 지구자기 폭풍을 일으키는 것으로 알려져 있다. <표 2-1>은 2000년까지 Joe(2000)의 자료를 기본으로 대표적인 우주환경에 의한 피해사례를 정리한 것이다. 우주환경의 변화는 <표 2-1>에서 보는 바와 같이 무선 및 위성 통신, 위성체계, 위성궤도 그리고 지상 전력시스템 등과 같이 우주공간 및 지상에 설치된 최첨단 기기의 성능과 신뢰성에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 우주비행사 및 비행 승무원의 안전을 위협하는 등 다양한 경제 및 사회적 손실을 유발한다. 따라서 이에 따른 대비가 필요하다.

<표 2-1> 대표적인 우주환경에 의한 피해사례

발생일	피해내용	원인
1940년 3월 24일	-미국의 미네소타 주 미네폴리스시 80%에 해당하는 시외전화선 불통 -미국의 뉴잉글랜드, 뉴욕, 온타리오, 펜실베이니아, 미네소타 지역과 캐나다 퀘벡시의 전기 공급 차질	대규모 자기폭풍
1958년 2월 9~10일	-미국의 Western Union사와 North Atlantic 전신케이블에 심각한 장애 -미국의 Bell 전화회사의 대서양 횡단구간의 대서양 횡단케이블에 음성통신 장애 발생 -캐나다 토론토시 일시적인 정전	자기폭풍
1972년 8월 4일	-미국의 Bell 전화회사의 일리노이스주 플라노시와 아이오와주 캐스캐이드시 간의 연결 동축케이블의 30분간 불통 -캐나다의 BC주의 수력발전소 변압기의 기능마비	강력한 자기폭풍
1982년 11월 26일	-운량(cloud cover)조사용 GOES4 기상위성의 가시광선 및 적외선 spin-scan radiometer가 45분간 작동 멈춤 *이 기간 동안에 강력한 폭풍우가 미국캘리포니아 주 해안을 강타하는 기간 동안에 일어났기 때문에 문제점 부각	태양플레어에서 방출된 고에너지 양성자
1989년 3월 13~14일	-HF대는 전 세계적으로 거의 사용이 불가했고, VHF 방송은 비정상적으로 멀리 전파하고 심한 전파 간섭 현상을 유발 -일본 위성의 이중이여 명령회로가 절반 파손 -미국 NASA가 운영하는 인공위성 궤도가 3 mile(5 km)나 낮아짐(위성수명 단축) -캐나다의 퀘벡주 전역 송전시설에 2만 MeW의 전려손실 야기 *이로 인해 수백만 주민에게 전력공급의 차질을 야기 했는데 문제발단에서 송전시설 마비까지 약 90초간 소요 *태양 흑점 극대기에 일어난 우주환경 영향의 최대사건	강력한 자기폭풍과 대기 밀도 증가
1991년 4월 29일	-미국 Main주 Yankee 핵발전소 변압기가 심각하게 파손	자기 폭풍
1994년 1월 20~21일	-캐나다의 인공위성 Anik E1, Anik E2와 Intelsat-K의 고장으로 전화, TV 및 라디오가 수 시간 동안 장애 *인공위성 궤도상에서 전자밀도가 장시간동안 증가 -동계올림픽대회에서 일본선수의 high-jump 스키 도중 일본의 통신위성(BS-3a) Single Event Upset 현상 방송장애가 발생하여, 장면 수신 불가	강력한 전자 이상 증가

발생일	피해내용	원인
1997년 1월 6~10일	-미국의 AT&T사의 통신, 방송위성 Telstar 410호의 기능상실로 수백만 시청자들에 대한 CATV 중계 중단 *태양 흑점 극소기에 일어난 우주환경 영향의 최대사건	고 에너지 하전입자 유출
2000년 7월 14일	-미국의 기상위성인 GOES위성의 가시광 및 적외선 카메라에 영향 -태양풍을 관측하는 ACE 위성의 이온 검출기 장애 -SOHO 위성의 태양 전지판 성능저하 -WIND 위성의 태양풍 센서에 영향 -일본 ACGA위성의 수명 단축 -일본 AKebono 위성의 전자장비 고장	태양 프로톤 현상과 고층대기의 밀도증가 고에너지 입자
2000년 10월 26일	주요 항공사의 HF통신 장애로 극 항로에서는 다른 항로로 변경운항	4차례의 태양플레어
2001년 4월 15일	-디트로이트-북경 간 항로변경으로 도착지연 -연속 이틀간 뉴욕에서 홍콩 간 항로 변경으로 운항시간지연	태양활동에 의한 HF 통신두절
2003년 10월 28일	-미국의 화성탐사 위성인 오딧세이의 radiation 측정 장비 손상 -일본의 화성탐사위성인 노조미 위성의 장애 -호주전역에서 HF통신 교란	고에너지 하전입자 유입 태양 플레어

자료: 1940~1997년은 전자연구소 "태양폭발 등 우주전과환경 변화에 대비한 대응방안 연구", 2006, 2000~2003년 자체정리

제2절 고출력 전자파

고출력 전자파펄스는 전자 장비를 물리적으로 파괴시킬 수 있을 정도의 강력하고 순간적인 전자기적 충격파를 말한다. 고출력 전자파 펄스는 지상 40 km 이상에서의 핵폭발에 의해 발생하는 HEMP(high altitude electro- magnetic pulse)와 지상에서 의도적으로 전자파 장애 현상을 일으킬 수 있는 고출력 전자기파(HPEM: high power electromagnetics)으로 분류한다. 자연적으로 발생하는 낙뢰에 의한 전자파펄스(LEMP: lightning EMP)와 근접 정전기 방전(ESD: electrostatic discharge)도 고출력 전자기파에

속한다.

1. 고출력 전자파 연구동향

가. 국외 고출력 전자파 연구

1990년대 후반 러시아에서 고출력 전자기파에 노출된 PC의 피해사례가 발표되면서 의도적인 EMP와 HPM에 대한 기술 개발의 필요성이 대두면서 미국, 러시아 등 많은 나라에서 의도적인 EMP/HPM 등 고출력 전자기파 무기 개발을 하기 시작 했고 뿐만 아니라 반도체 소자 등을 이용한 다양한 신호 및 출력 형태의 소형 발생기 개발에도 매진하고 있다. EMP는 핵전자기펄스(NEMP: nuclear EMP)와 비핵전자기펄스(NNEMP: non-nuclear EMP)로 구분된다. 핵전자기펄스는 핵폭발 시 방출되는 대규모의 전자기파를 이용하는 방식으로 피해영역이나 피해정도가 넓고 치명적이지만 이는 핵폭발을 이용하는 것이기 때문에 핵폭발의 통제가 매우 어렵고 고가라는 단점이 있다. 비핵전자기펄스는 크게 화학에너지에 의한 펄스전력을 이용하는 EMP 탄, 전기에너지에 의한 반복적 펄스전력을 이용하는 HPM 무기 등이 있다. EMP 탄은 핵폭탄이 터질 때 발생하는 강력한 전기장이 컴퓨터, 전자기기를 무력화하는 현상을 이용한 것으로 전력공급선, 통신케이블, 공기정화용 통로, 빈 공간 등을 통해 침입해 들어가 전기 공급선과 변압기, 전원이 켜져 있는 모든 제품에 많은 양의 전자기파를 만들어 일시에 사회기반 시설을 마비시키는 장비이다. HPM 무기는 항공기, 함정, 차량에 탑재되는 1 기가 와트(GW) 이상의 전파교란 장비이다.

2000년대에 접어들면서 미국, 러시아, 중국 등 핵보유국을 중심으로 EMP폭탄 개발이 가속화 되었다. 러시아에서는 3_{MH} 이라는 약어의 고출력 전자기파 관련 중점 기술을 개발하면서 비밀리에 고출력 전자기파 무기 개발을 추진하였다. 러시아는 로켓포용 EMP 탄약을 연구 개발 중이며, 러시아 내의 여러 RAS(Russia Academy of Science) 중 Institute of Electrophysics, Institute of High Current Electronics, Ioffe Physico-technical Institute 등에서 연구 개발이 이루어지고 있으며, 특히 Ioffe 연구소는 고출력 반도체를 이용한 소형 HPM을 개발하여 Megalmpuse 및 FID Technology 등의 업체에 기술 이전하여 상용화 개발을 추진하고 있다. 러시아 Ioffe연구소에서 개발한 기술을 이전 받은 FID Technology GmbH에서 제작 판매하고 있고, 또한 미사일 관련 군

수업체인 DIEHL Munitions system에서는 가방 형태의 소형 휴대용 장비를 개발하였다.

미국은 현재 토마호크(Tomahawk) 순항미사일 탄두에 EMP탄을 적용하는 체계, JADM 유도시스템을 적용한 항공기 투하용 유도 EMP탄을 개발 중에 있으며, 이라크 전에서 개발 중인 시험용 EMP폭탄을 사용하였다. 미 공군에서는 HPM 무기 및 HEL(High Energy Laser)무기를 포함한 DEW(Directed Energy Weapon)을 적극적으로 개발하고 있는 것으로 알려져 있다. 미국은 육·해·공군의 예산지원 하에 MURI(Multidisciplinary University Research Initiative)프로그램으로 Maryland 대학, Texas Tech 대학 등의 몇 개 대학에서 관련 기술을 개발하고 있으며, 공군은 자체연구실에서 자체 연구 개발을 수행하고, 개발업체로는 Bae system, L3 Comn 및 APELC 등이 참여하고 있다. 현재는 Damped Sinusoidal 방식 등을 적용하여 수 기가와트 급의 HPM이 개발되고 있다.

미국과 러시아는 전자기기를 무력하게 만드는 전자파 펄스를 활용한 우주무기도 개발하고 있다. 강력한 전자파가 순간적으로 일어나면서 모든 전자기기가 일시에 마비되는 방식을 이용 적국의 인공위성을 파괴하는 킬러위성을 개발했다. 무게가 1~100 kg인 이 위성은 평소 적국의 인공위성을 따라 궤도를 돌다가 목표로 돌진해 인공위성을 파괴 적국의 통신과 방송국 기능을 무력화 시킨다. 또한 중국도 2000년 적의 위성을 따라다니다 돌진하여 파괴하는 실험에 성공하기도 했다.

중국에서는 Northwest Institute of Nuclear Technology와 Jiaotong 대학이 공동으로 개발하고 있는 것으로 알려져 있다. 2011년 7월 세계일보에 실린 기사를 인용하면 중국이 대만에서 분쟁이 발생했을 때 미국이 개입하는 것을 막기 위해 전자기파(Electromagnetic pulse) 탄두를 개발 중이라고 미 육군이 보고서를 통해 밝혔다. 중국은 비교적 낮은 고도(30~40 km)에서 폭발시켜 대만을 비롯하여 주변 지역의 전자·통신기기를 무력화시키는 EMP 탄을 개발 계획 중에 있다고 한다.

기타 유럽국가 영국, 프랑스, 독일, 노르웨이 등에서도 비밀리에 고출력 전자기파 무기와 고출력 전자기 펄스 발생 장치를 연구, 개발 중인 것으로 추정되고 있다. 영국의 Sowerby Research Center, 네덜란드의 NTO, 스위스의 Spiez, 벨기에의 Royal Military Academy 등의 기관들에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다. 독일도 일부 대학에서 연구 중이고, 프랑스에서는 IEM이라는 약어의 고출력 전자기파 관련 중점 기술을 개발하

면서 비밀리에 고출력 전자기파 무기 개발을 하고 있다. 특히, 우크라이나 Karazin Kharkov 국립대에서는 러시아 Ioffe 연구소에서 개발한 반도체 소자(DSRD: Drift Step Recovery Diode)를 사용하여 고출력 전자기 펄스 발생 장치를 개발하고 있다. 2004년에 노르웨이의 'Defence Research Establishment'에서는 HPM에 의한 정보기기의 파괴 및 동작 불량 가능성을 실험적으로 확인 한 바 있다. 군사 강대국들은 특정 목표지역의 전자기기를 무력화 시킬 수 있는 HPM 무기 개발에 주력하고 있고, 이중에서도 E-Bomb는 실용화 단계에 있는 것으로 알려 있으며, HERF(High Energy RF) Gun은 비밀공작에 사용되고 있는 것으로 추정되고 있다. 주로 군사적 목적으로 개발되어 왔던 고출력 전자기파 발생 장치가 근래에 들어서는 작은 크기로 보다 큰 출력을 내는 소형 고출력 전자기파 발생 장치로 민간에서 개발 인터넷상에 유통되고 있다.

[그림 2-11] Diehl EM Emitter

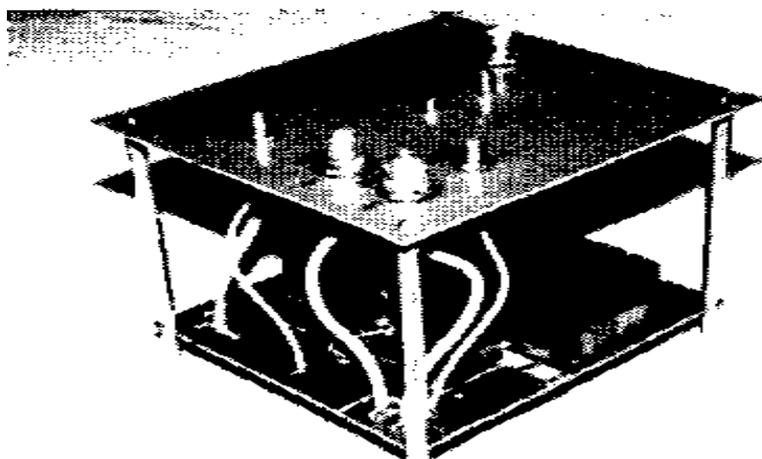


자료: William Radasky, HEMP, IEMI and Severe Geomagnetic Storm Effects on Critical Infrastructures, 2011

실제 [그림 2-11]에서 볼 수 있는 손가방 정도 크기의 고출력 전자기파를 발생시킬 수 있는 장치가 러시아에서 개발되고 독일에서 상품화되어 전시회에 출품된 바 있다. 이 장치는 거리 1 m에서 120 kV/m 정도의 전기 강도를 갖는 350 MHz 감쇠 진동 정현파를 등방성으로 발생시킬 수 있으며, 지향성 출력을 갖도록 변형 제작도 가능하다. 또한 초당 5개의 펄스를 30분간 연속 동작시킬 수 있다. 특히 이 발생 장치는 크기가

50×50×20 cm³에 불과하고, 28 kg의 무게 밖에 되지 않기 때문에 불 순적 목적을 가진 자가 쉽게 보호 대책이 필요한 전자통신 장비의 최 근접 구역까지 접근하여 고출력 전자기파를 발생시킬 수 있다.

[그림 2-12] Russian car-pulser



자료: 정연춘, 전자파 보안 기술 동향, 2010

[그림 2-12]에서 보인 장치는 인터넷에서 “car stopper pulser”로 광고 되고 있는데, 50 Ω 부하 양단에 2.5 kV의 전압을 1.7 ns의 펄스폭과 700 ps의 상승 시간을 갖는 펄스로 인가할 수 있는 장치이다. 이 장치는 고속으로 반복하여 사용하기 위해서는 냉각 부품을 불소에 담가 사용하도록 되어있다. 이 장치는 원자력 발전소 같은 매우 중요한 사회 기반 시설의 보안 구역 근처로 무단 접근하는 자동차를 정지시키기 위해서 사용되고 있는 것으로 알려져 있다. 이 밖에 다양한 고출력 전자기파 발생 장치가 인터넷 상으로 유통이 되고 있다.

<표 2-2>은 현재까지 개발된 몇 종류의 위협적인 고출력 전자기파 발생 장치(HPEM source)들이다. <표 2-2>에서 볼 수 있듯이 고출력 전자기파 발생 장치에는 미 공군연구소(AFRL: Air Force Research Laboratory)에서 개발한 100 m 거리에서 53 kV/m의 전

계강도를 발생시킬 수 있는 JOLT와 같이 트레일러에 싣고 다니는 것부터 정전기 방전 권총처럼 쉽게 휴대할 수 있는 것까지 매우 다양하고, 수백 MHz에서부터 수십 GHz까지 매우 넓은 주파수 대역에서 동작하는 장치가 있다.

<표 2-2> 고출력 전자기파와 관련된 사례

위험 종류	공격기기의 예제	세기	주파수 대역
Electromagnetic wave attack-radiated	JOLT	500 kV/m @ 100m	300 MHz~10 GHz
	IRA(Hi-tech)	12.8kV/m @ 100m	300 MHz~10 GHz
	Commercial radar (mid-tech)	60 kV/m @ 100m	1~10GHz(1.285 GHz)
	Navigation radar	385 V/m @ 100m	1~10 GHz(9.41 GHz)
	Magnetron generator	475 V/m @ 10m	1 GHz~3 GHz
	Amateur wireless device	286 V/m @ 1m	100 MHz~3 GHz
Electrostatic discharge attack	Compact amateur wireless device	169 V/m @ 10cm	100 MHz~3GHz
	Illegal CB radio	573 V/m @ 10m	27 MHz
	Stun gun	500 kV	100 MHz~3 GHz
Electromagnetic wave attack-conducted	Lightning-surge generator	50 kV(charging voltage)	1.2/50, 10/700
	Compact lighting surge generator	10 kV(charging voltage)	1.2/50, 10/700
	CW generator	100 V~240 V/4kV	1Hz~10 MHz
	Commercial power supply	100 V~240V	50/60 Hz

자료: 정연춘, “전자파 보안 기술 동향”, 2010

<표 2-3>, <표 2-4>, <표 2-5>, <표 2-6>은 각 기관별, 국가별 고출력 전자기파 발생 장치의 개발 연구동향을 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 미국이 가장 활발하게 군,

기업, 연구소, 대학 등의 다양한 곳에서 여러 고출력 전자기파 발생장치를 연구하고 있고, 러시아는 이 분야에서 매우 독보적인 위치에 있으며 특히 이론적인 기초가 잘 이루어져 있다. 이외에도 유럽국가 우크라이나, 영국, 프랑스 또한 중국, 일본 등에서도 활발히 개발 연구 되고 있다.

<표 2-3> 미국의 HPEM 발생 장치 연구동향

기관	부서	지역	비고
University of New Mexico	Electrical and Computer Engineerin	Albuquerque, NM	BWO
AFRL	Directed Energy	Kirtland AFB, NM	Vircator, MILO, RKO
AFWL			Vircator
SNL		Albuquerque, NM	MILO, Reltron
SLAC		SLAC	RKA
NRL	Plasma Physics Division	Washington DC	RKA Gyrotron
LANL			RKA, virvator
Maxwell Physics International	Albuquerque Division	Albuquerque, NM	RKA, relativistic magnetron
Mission Research Corporation		Newington, VA	RKA
University of Michigan	Nuclear Engineering & Radiological Sciences Dept	Ann Arbor, MI	Gyrotron
Microwave Science		Lafayette, C	Relativistic magnetron
Cornell University	School of Electrical Engineering	Ithaca, NY	Relativistic TWT, Gyrotorn
CPI		Palo Alto, CA	Gyrotorn
University of Maryland	Institute for Plasma Reserach	College Park, MD	Gyrotorn, BWO, plasma-filled BWO
UCI	Dept of Physics & Astronomy	Irvine, CA	Plasma-filled BWO
Army Research Laboratory	Source Physics Branch	Adelphi, MD	Plasma-filled BWO
Hughes Research Laboratories		Malibu, CA	PASOTRON
Texas Tech	Dept. of Electrical &	Lubbock, TX	Vircator

기관	부서	지역	비고
	Computer Engineering		

자료: 전파연구원, “고출력 과도전자파 발생에 따른 정보기기 보호 기술에 관한 연구”, 2004

<표 2-4> 러시아의 HPEM 발생 장치 연구동향

기관	부서	지역	비고
Institute of High Current Electronics		Tomsk	BWO
Institute of Electrophysics		Ekaterinburg	BWO
Russian Academy of Science	High Energy Research Investigation Center	Moscow	BWO
GYCOM		Nizhny Novgorod	Gyrotron
General Physics Institute (Lebedev)		Moscow	Gyrotron, Relativistic Cerenkov plasma maser
Institute of Applied Physics		Nizhny Novgorod	Gyrotron, BWO

자료: 전파연구원, “고출력 과도전자파 발생에 따른 정보기기 보호 기술에 관한 연구”, 2004

<표 2-5> 기타 유럽국가의 HPEM 발생 장치 연구동향

국가	기관	부서	지역	비고
우크라이나	Ukrainian Physics Technical Institute		Kharkov	Plasma-filled device
영국	Culham Laboratory	Culham Electromagnetics and Lightning Ltd.	Abingdon, Oxfordshire	MILO
프랑스	CEG		Gramat	Reltron
	TTE			Gyrotron

자료: 전파연구소, “고출력 과도전자파 발생에 따른 정보기기 보호 기술에 관한 연구”, 2004

<표 2-6> 일본 및 중국의 HPEM 발생 장치 연구동향

국가	기관	부서	지역	비고
일본	Toshiba	Corporate Research & Development Center	Kawasaki	Gyrotron
	JAERI	Naka Research Establishment	Mukoyama	Gyrotron
중국	Northwest Institute of Nuclear Technology	High-Power Microwave Research Group	Xi'an	BWO
	LAPCM			MILO

자료: 전파연구소, “고출력 과도전자파 발생에 따른 정보기기 보호 기술에 관한 연구”, 2004

또한 IEEE, IEC, ITU-T 등에서 관련 연구 활동 및 표준화 활동을 활발히 진행하고 있다. <표 2-7>과 <표 2-8>은 이에 관련 표준화 문서를 정리해 놓았다.

<표 2-7> IEC SC77C에서 발행한 국제표준화 규격 현황

HEMP 관련 규격	
문서 번호	제목
61000-1-3	The effects of high-altitude EMP(HEMP) on civil equipment and system
61000-2-9	Description of HEMP environment-radiated disturbance basic EMC publication
61000-2-10	Description of HEMP environment-conducted disturbance
61000-2-11	Classification of HEMP environments
61000-4-23	Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances
61000-4-24	Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance basic EMC publication

61000-4-25	HEMP immunity test methods for equipment and systems
61000-4-32	High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium
61000-5-3	HEMP protection concepts
61000-5-4	Immunity to HEMP-specifications for protective devices against HEMP radiated disturbance-basic EMC publication
61000-5-5	Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance-basic EMC publication
61000-5-7	Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)
61000-6-6	HEMP immunity for indoor equipment

HPEM관련 규격

문서번호	제목
61000-1-5	High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems
61000-2-13	High-power electromagnetic (HPEM) environments-radiated and conducted
61000-4-33	Measurement methods for high power transient parameters

자료: 정연춘, "전자파 보안 기술 동향", 2010

<표 2-8> ITU-T SG 5에서 진행 중인 표준화 작업 현황

문서	문서 제목
K.sec	Guide for the application of electromagnetic security requirements-basic recommendation
K.hemp	Application of requirements against HEMP to telecommunication systems
K.hpem	requirements against HEMP to telecommunication systems
K.leakage	Test method and requirements against information leakage through unintentional EM emission
K.secmiti	Mitigation methods against EM security threats

자료: 정연춘, "전자파 보안 기술 동향", 2010

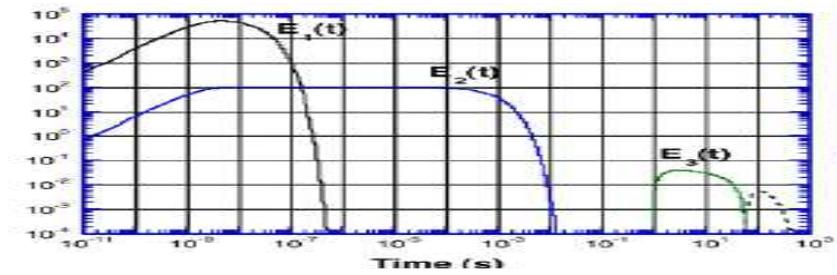
나. 국내에서 고출력전자파 연구

우리나라는 군사적 목적으로 핵폭발에 의한 고고도 핵 전자기파(HEMP)에 많은 관심을 갖고 있다. 현재 EMP 폭탄 제조기술을 보유한 국가는 미국, 러시아, 중국 등 일부에 불과하다. 강력한 전자기 펄스를 방출해 적의 전자 시스템 등을 무력화 시키는 EMP 폭탄이 국내기술로 개발됐다. 2009년 7월 반경 국방과학연구소(ADD)가 폭발 반경 100 m 이내의 전자기기 및 장비를 무력화하는 초보 단계 EMP 탄의 성능 실험에 성공, 개발했다. 국방과학연구소(ADD)는 2014년을 목표로 피해 반경 1 km로 확장하는 EMP 폭탄을 개발 중에 있다. 또한 국방과학연구소(ADD)는 고출력 전자파(HPM) 폭탄도 개발하고 있다. 일명 'e폭탄'으로 불리는 HPM 폭탄은 20억 와트의 전력을 방출해 반경 약 300 m 이내의 모든 전자제품을 파괴할 수 있다. 탄두에서 나온 강력한 음파진동이 환기통로나 안테나를 통해 적의 지하병커로 흘러 들어가 전자장비의 마이크로칩 등을 파괴해 사용하지 못하게 한다. 이외에 서울대, 광운대, 포항공대, 전기 연구소 등에서 소형 고출력 전자기파 발생장치에 대한 연구가 제한적으로 이루어지고 있다. 하지만 EMP, HPM 등의 고출력 전자기파 무기에 대한 방호 대책기술 연구는 매우 빈약한 실정이다.

2. 고고도 전자파 펄스 특징

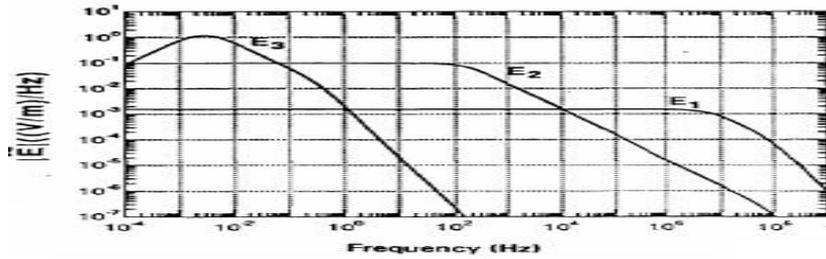
HEMP는 단일 펄스로 기술되지 않고 나노초에서 수백초의 여러 파형으로 구성된다. 수년간의 연구결과 HEMP는 3가지 주된 파형으로 구성되며, 다양한 생성과정과 대기구조에 따라서 발생하는 것이 확인되었다. [그림 2-13]과 [그림 2-14]는 IEC에 의해서 정의된 관련 주된 파형을 설명하고 있다. 초기(early-time)파형은 그림에서 E1으로 표시되었으며, 중기(intermediate-time)파형은 E2로 그리고 말기(late-time)파형은 E3로 표시하였다. 세 가지 파형의 펄스폭이 각각 약 100나노초, 1밀리초, 10초 정도이다. [그림 2-13]에서 각 파형의 피크 값은 각각 50 kV/m(E1), 100 V/m(E2), 40 mV/m(E3)이다.

[그림 2-13] 고고도 전자파펄스에 의한 세 가지 형태의 파형(시간대 전계강도)



자료: 장동원,최형도,“전자기펄스 표준화 동향 연구”,2010

[그림 2-14] 고고도 전자파펄스에 의한 세 가지 형태의 파형(주파수대 전계강도)



자료: 장동원,최형도,“전자기펄스 표준화 동향 연구”,2010

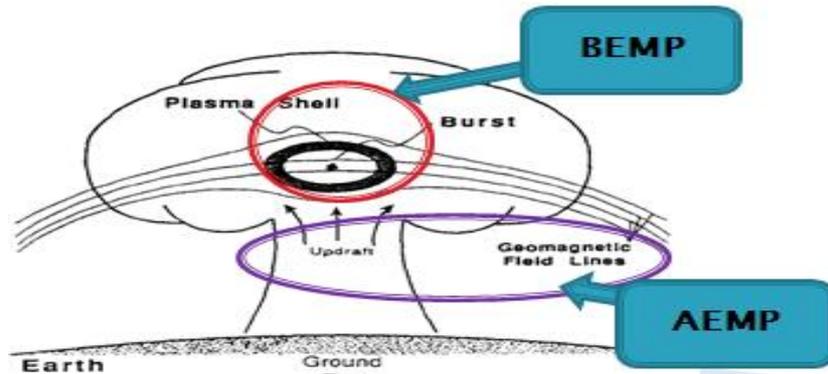
이 파형들의 중요한 특성은 지구의 매우 큰 면적을 동시에 광속으로 전파되어 노출시킨다는 것이며, 이는 각 특성이 인식되는 한 일련의 단일 점 특성을 극복하도록 설계된 전력선 통신망과 같은 대규모 통신망에 특별한 어려움을 만든다. 예를 들면 단일 고고도 폭발은 전력의 한 사이클($1/60 \text{ Hz} = 16.7 \text{ ms}$) 동안에 미국 미시시피강 동부 대부분을 HEMP의 위험에 전력망을 노출시키게 된다. 전체 전자계 파형은 일부 전자시스템에는 직접적인 위협을 주지만 E2와 E3파형이 포함된 HEMP는 파장이 매우 긴 장거리 선로에 접속된 시스템에만 관계한다.

초기 E1파형은 컴퓨터와 같은 장비의 외부 케이스에 있는 구멍을 통해서 직접 침투한다는 점에서 다소 다르며, 회로보드 레벨에서 중대한 전류 및 전압을 유도한다. 이 전압은 장비 케이스의 차폐 효과에 따라서 손상을 주며 장비에 오동작을 일으킨다. 초기 HEMP 파형은 쉽게 장비에 부착된 전력선, 신호선 등과 같이 짧은 도선과 결합하여 큰 전류와 전압을 유도해서 장비 내부로 전도된다. E1 파형에서 전자계는 정전기 방전에서 발생된 것과 매우 흡사하다. ESD(Electrostatic Discharge)계는 마이크로미터에서부터 10 cm까지의 거리에서 약 10 kV/m이다. 또한 상승시간(rise time)은 0.7 ns이며 펄스폭은 30 ns이다. 자연계에서 관찰되는 전도천이에서 대부분의 장비는 전기적으로 빠른 과도 파형에 노출되는데, 이는 주로 전기 변전소에서 발생되며 전력망을 통해서 여러 곳으로 전파된다. 이러한 대표적인 EFT(Electric Fast Transient)파형은 침투치가 약 4 kV에 다르며, 5 ns 동안에 상승해서 전자장비의 위치에서 50 ns 동안 감쇠된다. E2파형은 낙뢰에 의해 생성된 전자계와 파형이 비슷하며 낙뢰지점 근처에 전계강도가 100 kV/m 레벨에 이른다. 그러나 이 전자계는 낙뢰지점으로부터 급속하게 감소된다. 펄스폭은 양전 낙뢰에서 약 100 μ s에서 1 ms 정도 된다. HEMP의 E2 전계강도는 매우 낮으나 거리에 따라서 크게 변화하지 않는다. E2 전자계는 매우 긴 전력선이나 통신선에 문제를 일으킬 가능성이 있다. E3 HEMP파형은 수초에서 수백 초 동안 지속되는 지자기 태양폭풍에 의한 전자기장과 유사한 파형을 가지지만 침투치 전계강도는 지자기폭풍보다 훨씬 더 크다. 큰 규모의 지자기 폭풍은 1 V/km정도의 전자계를 생성할 수 있으며, 이 레벨은 1989년 3월 13일에 퀘벡 수력전력회사에서 경험했던 지역적 전력망 정전을 일으킬 수 있다. 세 가지 HEMP 파형을 자연적 방해와 등가적으로 비교할 때, E1과 E3 HEMP 파형 침투치는 자연 노출 레벨보다 크기가 매우 더 크다. 일반적으로 전자장비는 ESD와 EFT 위협을 견디도록 보호를 요구하며 표준화된 고주파 EMC 시험을 수행한다. 하지만 표준 EMC 시험 레벨은 E1 HEMP에 의해서 생성되는 레벨보다 매우 낮다. E3 HEMP에 의해서 전력망이 매우 큰 지자기 폭풍 위협에 의해 붕괴되며 이때 매우 높은 피크 레벨을 갖게 된다. 그러므로 큰 규모의 지자기 폭풍에 대한 보호는 어려우며, 현재에는 일부 전력 망 운용자에 의해서 완전하게 구현될 수 없다.

3. HEMP-E3

HEMP의 E3파형(MHD EMP: magneto hydro dynamic EMP)는 1~10초 동안에 발생하는 Bubble EMP(BEMP)와 10~300초 동안 발생하는 Atmospheric heave EMP(AEMP) 두 종류가 있다. BEMP와 AEMP는 지자가 영역에서 다른 물리적 특성변화, 작용에 의해 발생되지만, 지자기장에 미치는 영향은 비슷하다. 또한 E3파형(MHD-EMP)은 지자기 폭풍에 의해 발생한 전기장과 발생기원은 다르지만 유사한 파형을 가지며 마찬가지로 지자기장에 영향을 끼친다.

[그림 2-15] 핵폭발 시 발생하는 MHD-EMP의 두 가지 형태



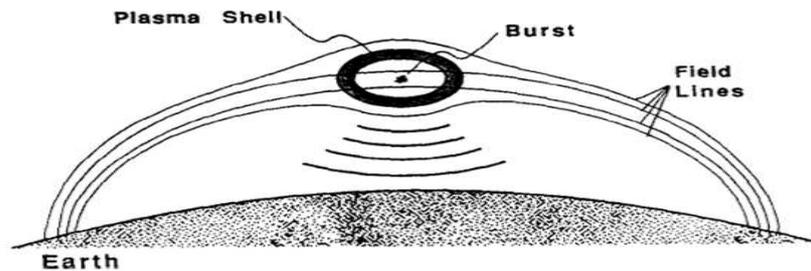
자료:M.Rabinowitz,A.P.Meliopoulos,E.N.Glytsis and G. J. Cokkinides,"NUCLEAR MAGNETOHYDRODYNAMIC EMP, SOLAR STORMS, AND SUBSTORMS",1992

가. Bubble EMP(BEMP)

E3 파형(MHD-EMP)의 두 종류 중 1~10초 동안 발생하는 파형을 BEMP라고 부른다. 여기서 B는 magneto hydrodynamic(전자유체) bubble이다. 이 magnetic bubble은 이온화 된 핵폭발 잔해물이 이동하면서 셀을 형성, 팽창하면서 만들어진다. 핵폭탄의 폭발 시 높은 온도와 엄청난 양의 x-ray에 의해 핵폭탄잔해물이 증발과 이온화 된다. 이온화된 물질이 초기 속도 10^6 m/sec을 가지며 빠르게 이동하면서 플라즈마 셀(plasma

shell)을 형성하게 된다. 플라즈마 셸은 전도성이어서, 플라즈마 셸 안에 전류가 생기며, 셸 안에 자속이 렌츠의 법칙에 의해 지구 자기장의 변화를 상쇄시키는 방향으로 생성된다. 플라즈마 셸은 점점 커지지만, 그 셸의 전류는 초기 작았던 셸의 작은 플럭스 양으로 플럭스를 낮추려 한다. 이는 외부자기장이 가해져 자기장이 변화하면 전자의 전류의 흐르는 속도가 달라지면서 유도기전력이 생기고 유도기전력은 외부자기장에 의한 효과를 상쇄하는 방향으로 발생하여 생기는 도체의 반자성 반응 때문이다. 플라즈마 셸이 점점 커지면서, [그림 2-16]처럼 셸은 바깥쪽에 플럭스를 집중시키면서 지구의 자기장을 밀어내 변화시키며, 셸 안에는 플럭스가 거의 없게 된다. 점점 팽창하는 플라즈마 셸은 셸 바깥의 자기압 $B^2/2\mu$ 와 공기 점성에 의한 공기제동현상에 의해 팽창을 멈추게 된다. 즉, 자기압과 잔해물질의 운동에너지가 같게 되었을 때 플라즈마 셸의 팽창 현상이 멈추게 되며, 자기장이 셸 안으로 들어가게 된다.

[그림 2-16] 핵폭발로 인해 발생하는 BEMP에 의해 생성되는 Magnetic bubble



자료: M. Rabinowitz, A. P. Meliopoulos, E. N. Glytis and G. J. Cokkinides, "NUCLEAR MAGNETOHYDRODYNAMIC EMP, SOLAR STORMS, AND SUBSTORMS", 1992

몇 개의 간단한 계산을 통해서 magnetic bubble의 크기를 구할 수 있다. 또한 크기뿐만 아니라 복사강도, 방사 효율, 최대출력밀도, BEMP로부터 방사되는 전계의 크기를 알 수 있다. BEMP에 의해 형성된 magnetic bubble은 지자기장을 밀어내며 팽창하게 된다. 지자기 영역에 형성된 magnetic bubble은 bubble의 외부영역에서의 에너지와 공기제동과 같은 공기 점성효과를 무시하는 전도성 플라즈마 셸의 운동에너지가 같아질 때 팽창을 멈추면서 최대 크기에 도달한다. 다음 수식은 magnetic bubble이 쪼개지거나

비틀림 없이 구 형태를 유지한다고 가정하고, 공기 제동 효과를 무시한다.

$$\int_0^v \frac{B^2}{2\mu} dV = \frac{\langle B^2 \rangle}{2\mu} \int_0^v dV$$

$$= \frac{\langle B^2 \rangle}{2\mu} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) = T$$

B^2 : magnetic bubble내부의 교란되지 않는 지자기 영역의 자속밀도의 제곱값

V : magnetic bubble이 팽창을 멈추었을 때의 bubble의 최대 부피

μ : 투자율

R : magnetic bubble의 반지름

T : 전도성 폭발 잔해물의 초기 운동에너지

위에 수식을 R영역에서 다시 정리하면, magnetic bubble의 반지름을 구하는 수식을 얻을 수 있다.

$$R = \left[\frac{3\mu T}{2\pi \langle B^2 \rangle} \right]^{1/3}$$

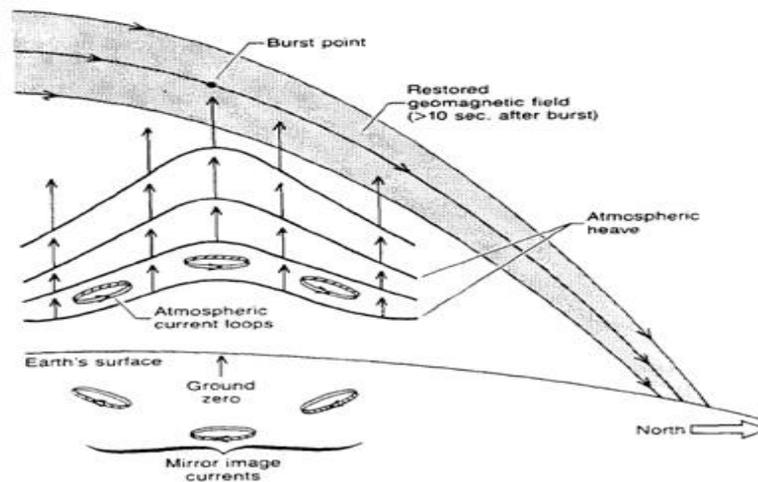
평균 복사 전력은 식 $\langle P \rangle = fT/t$ 로 구할 수 있다.

나. Atmospheric heave EMP(AEMP)

E3 파형의 두 종류 중 10~100초 동안 발생하는 파형을 AEMP라 부른다. AEMP는 폭탄의 폭발 열로 인해 이온화된 공기가 지자기 영역 쪽으로 들어 오르면서 발생한다. 폭발에 의해 방사되는 에너지의 70%가 이온화된 공기, x-ray인데 이 과정에서 [그림2-17]에서와 같이 지구의 전리층에 전류루프를 형성하며, 동시에 전류루프의 거울이미지를 지구에 형성한다. AEMP로 인한 지자기장의 영향은 폭발 점으로부터 10⁶ m이상 떨어

진 지점까지 영향을 주며 약 100초 동안 지속된다. 전계 값은 0.001~0.03 V/m 주파수는 0.01 Hz로 낮다.

[그림 2-17] 핵폭발로 인해 발생하는 AEMP



자료: M. Rabinowitz, A. P. Meliopoulos, E. N. Glytys and G. J. Cokkinides, "NUCLEAR MAGNETOHYDRODYNAMIC EMP, SOLAR STORMS, AND SUBSTORMS", 1992

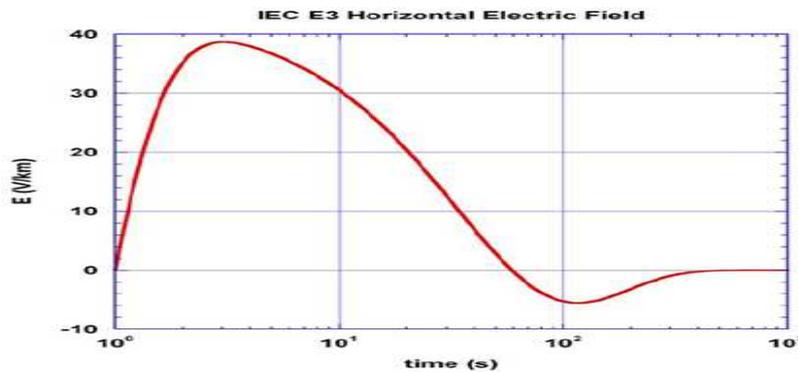
제3절 우주전파환경과 고출력 전자파의 상관관계

1. HEMP-E3와 지자기 폭풍 발생으로 인해 유도된 전기장 펄스의 유사성

HEMP-E3(늦은 시간) 파형은 다음 [그림 2-18]과 같이 전기장 파형이 1/20초 파형으로 정의되었다. 이 전기장은 지구 내에서 만들어지기 때문에 변압기의 중성단자를 통해 접지되어있는 고전압전송선로와 같은 전도체에 영향을 끼친다. [그림 2-18]에서와 같이 E3의 첨두치 전계강도는 40 V/km이고, 이는 전류를 유기시킨다. 유도전류는 전력망 전

체에 심각한 치명적인 손상을 끼칠 수 있다. 지자기 폭풍의 경우, 태양풍과 지구자기장의 커플링에 의해 발생하는데 이 주기적인 폭풍은 [그림 2-19]처럼 HEMP-E3파형과 유사한 전기장파형을 만들어낸다. [그림 2-19]는 1989년 태양폭풍이 발생하였을 당시 5월 12일~13일 동안 368 km 떨어진 전송선로에 유도된 전압을 Magnetic Observatory Fiirstenfeldbruck에서 기록한 것이다.

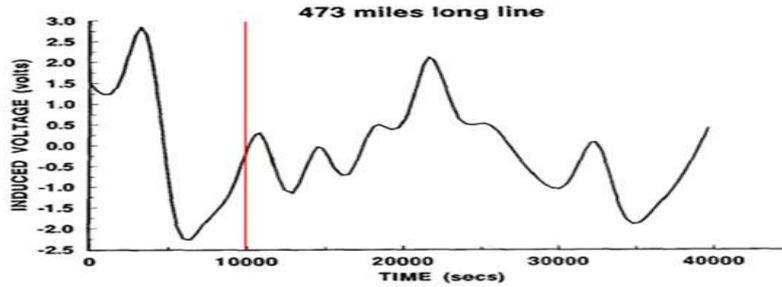
[그림 2-18] IEC 61000-2-9 문서에서의 HEMP E3 모델의 파형



자료:IEC/TR61000-5-8, "Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 5-8: Installation and mitigation guidelines HEMP protection methods for the distributed infrastructure, 2009

전형적으로 지자기 폭풍으로 인한 유도전기장은 강력한 폭풍동안 첩두치 전계강도가 1 V/km로 E3보다 전계강도는 낮지만 정말 강력한 폭풍의 경우 전계강도가 최대 5 V/km로 도달하거나 그 이상이기도 하다. 첩두치가 1 V/km인 지자기폭풍의 경우 유도 전류의 첩두치가 20 A이다. 이 수준은 고전압변압기를 포화상태로 만들기에 충분하다. 그러나 이 레벨은 40 V/km의 첩두치 전계강도를 갖는 E3의 유도전류 보다는 낮은 수준이다. 시간종속성(the time dependence)에 관하여 둘을 살펴보면, 두 파형 모두 몇 초 만큼의 짧은 상승시간을 갖고, 약 몇 분의 펄스폭을 갖는다. 물론 약간의 다른 특징을 보여주기도 한다.

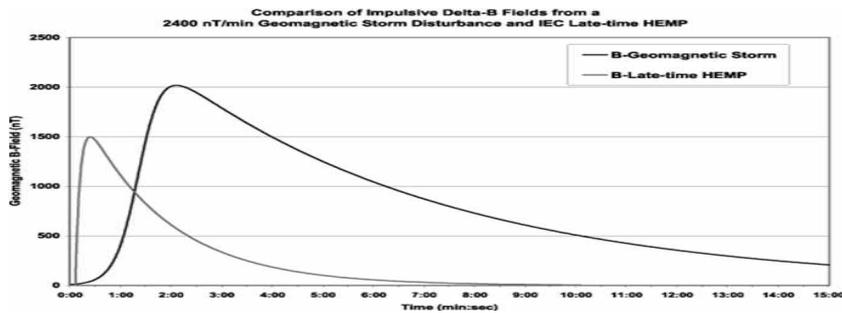
[그림 2-19] 태양폭풍 발생 시 368km 떨어진 전송선로에 유도된 전압



자료: M. Rabinowitz, A. P. Meliopoulos, E. N. Glytis and G. J. Cokkinides, "NUCLEAR MAGNETOHYDRODYNAMIC EMP, SOLAR STORMS, AND SUBSTORMS", 1992

[그림 2-20]은 분당 2400 nT 정도의 강력한 지자기 폭풍이 발생했을 때, 그로 인해 기 인하는 지자기장 펄스와 고위도 핵폭발로 인해 발생하는 HEMP E3(Late time)일 때 나타나는 지자기장 펄스를 비교한 그림이다. 펄드의 크기가 차이를 보이지만, 펄스의 패턴 이 상당히 비슷하다는 것을 확인할 수 있다.

[그림 2-20] 지자기폭풍과 HEMP-E3의 지자기장 펄스 비교



노출 범위관점에서 살펴보면 HEMP-E3의 유효수준은 250000 km^2 의 넓이 범위를 커

시스템 영향의 관점에서 살펴보면, HEMP-E3와 지자기 폭풍은 시스템에 유도전기장을 유기시켜 손상을 입힌다. 사례를 통해 이를 살펴보면, 1989년 발생한 퀘벡의 정전사태는 지자기 폭풍으로 인한 1 V/km 수준의 유도전기장으로 인해 발생되었다. HEMP-E3의 경우, 소련의 고고도 핵폭탄 실험을 실시하였는데, 600 km내의 지상 및 지하 매설 전력선과 통신선로 손상, 각종 전력선의 절연체 훼손, 디젤발전기 및 각종 안테나 시스템 기능 고장 현상이 발생하였는데, 이는 핵폭발로 인한 5 V/km 수준의 유도전기장에 의한 피해라고 분석되었다.

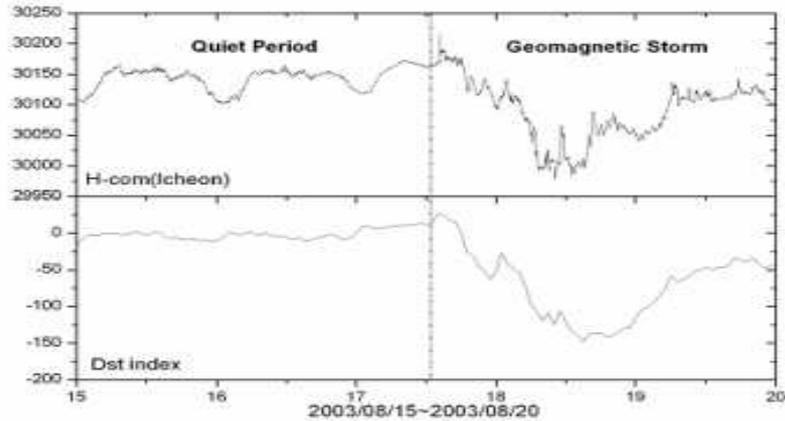
2. 지자기 폭풍 발생으로 유도된 전기장 펄스

가. 자기폭풍 및 그 외 우주환경 교란으로 유도되는 전류와 지상자기장 변화

자기폭풍이나 서브스톰이 발생하면 지구근접 우주공간과 전리층에 강한 전류가 몇 가지 형태로 새로 형성되거나 존재하던 전류가 갑자기 증가하거나 감소하게 된다. 대표적으로 자기폭풍이 발생하면 지구 주위 우주 공간을 환 모양으로 흐르는 환 전류가 급격히 증가한 후 서서히 감소한다. 이는 잘 알려진 바와 같이 Dst 지수의 감소와 증가(회복)로 나타난다. 이것은 환 전류의 증감에 의해 발생한 섭동 자기장이 지구적도 근처에서 잘 나타난 것으로 보면 된다.

[그림 2-23]은 전형적인 자기폭풍이 발생할 때 이를 대략적으로 나타내는 Dst 지수와 실제 중 저위도(이천) 지자기 관측소가 목격한 H 성분의 변화를 비교하여 보여주고 있다. Dst 지수는 1시간 평균치이기 때문에 이천 지자기 관측소의 고분해 관측 자료에서 보이는 짧은 time scale의 교란이 나타나지 않고 있다. 실제로는 이러한 미세 변화는 local 지자기 관측소 마다 경도, 위도의 위치에 따라 그 변화가 크게 다를 수 있다. 이는 자기폭풍 동안 교란 받는 우주 공간 및 전리층 전류계가 매우 복잡하기 때문이다. 사실은 Dst 지수 변화 속에는 단순히 환 전류의 교란 효과 외에도 다른 전류계의 교란 효과도 늘 복합적으로 섞여 있다.

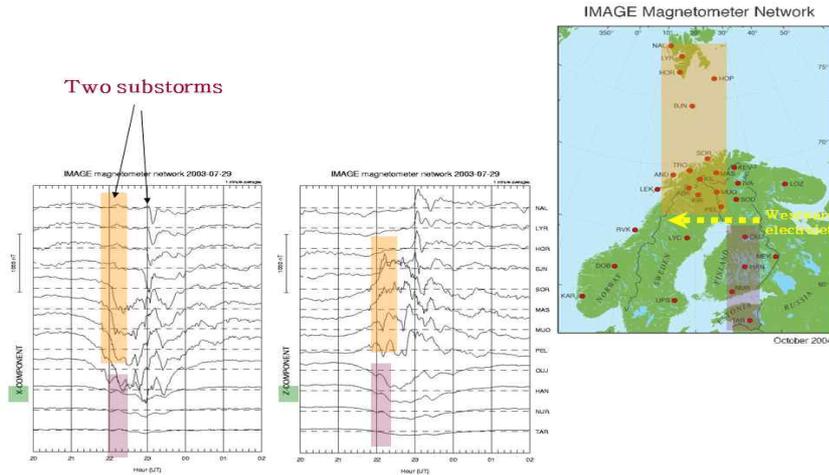
[그림 2-23] 자기폭풍 지수 Dst와 전파연구원 지자기 관측소의 H 성분사이의 비교



또한 자기폭풍은 고위도에서 전리층 전류(electrojet)의 변화를 야기한다. 전리층 전류는 대략 고도 100 km 내외에서 오로라 위도 지역에서 수평으로 흐르는 것을 말한다. 전리층 전류의 변화는 지상에서 자기장의 변화로 나타난다. 실제로는 지상 자기장의 변화를 분석하여 전리층 전류에 대한 정보를 역으로 추적하여 구하여야 한다. 전리층 전류 교란은 서브스톰의 발생을 통해서도 항상 나타난다. 사실은 자기폭풍이 발생하는 동안 강력한 서브스톰이 동반하여 발생한다.

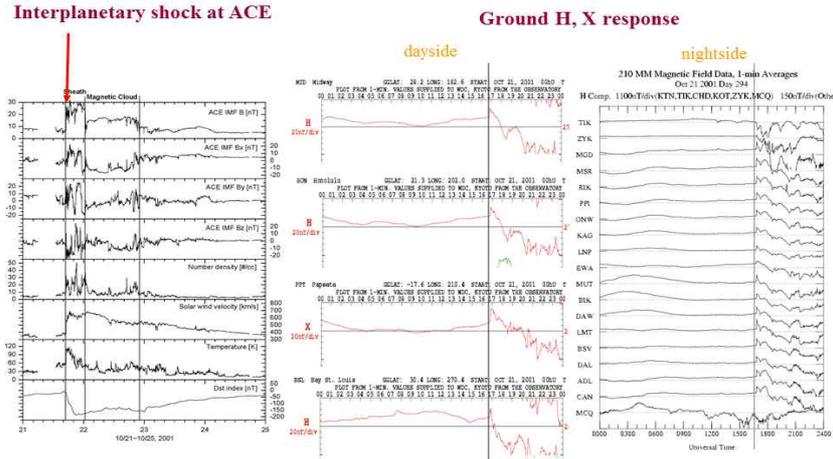
[그림 2-24]는 스칸디나비아 반도 근처 상공을 지나는 전리층 전류 형성에 의해 교란된 지자기 변화를 IMAGE 지자기 관측소 네트워크에서 관측한 것을 보이고 있다. 그림에 표시한 바와 같이 두건의 서브스톰 발생이 있었다. 왼쪽 두 패널은 여러 관측소에서 나타난 X, Z 성분의 변화를 각각 보이고 있다. 오른쪽의 IMAGE 관측소 그림에 표시한 위치에 전리층 전류가 서쪽 방향으로 (westward electrojet) 강하게 형성되어 나타난 것으로 해석 할 수 있는데, 이와 같은 교란 형태는 서브스톰이나 자기폭풍 중 나타나는 전형적인 모습이다.

[그림 2-24] 스칸디나비아 반도의 IMAGE 네트워크에서 관측한 지상 자기장 X, Z
성분의 변화와 관측소 위치



또 다른 예로서, [그림 2-25]는 태양풍 충격파가 자기권에 충돌 했을 때 나타나는 지 자기 변화를 보이고 있는데, 지역 관측소에서 남북 방향의 대낮과 야간 자기장 성분의 변화를 보여준다. 그림의 왼쪽은 ACE 위성이 관측한 자기장, 밀도, 속도, 온도 등의 태양풍 정보와 Dst 지수를 나타내고 가운데는 대낮에 지역 지자기 관측소에서 남북방향의 지자기장 변화를 오른쪽은 야간에 지역 관측소에서 남북 방향의 지자기장 성분의 변화를 나타낸다. ACE 데이터를 보면, 모든 물리량이 매우 급격히 거의 불연속적으로 변하는 시간에 충격파가 목격되었는데 첫 번째 수직선으로 표시하였다. 이때는 Dst 지수가 급격히 감소하기 직전에 해당함을 볼 수 있다. 이것이 지구 자기권에 대략 1640 UT에 충돌 하였고, 대낮지역 및 야간지역 자기 관측소 모두에서 급격한 자기장 증가로 나타나고 있다(수직선으로 표시한 시간). 이러한 변화는 거의 펄스 형태에 가깝다. 이것은 자기권계면 전류(Magnetopause current)의 급증에 의한 것이다.

[그림 2-25] ACE 위성이 관측한 태양풍 정보와 Dst 지수



나. 자기폭풍으로 인한 지상에서의 전기장 유도

위에서 보인 형태의 지상에서의 자기장 변화는 전기장을 유도한다. Faraday 법칙에 따르면, 지상에서의 유도 전기장은 지상 자기장 변화에 대략 다음같이 연결된다.

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} \approx \frac{\partial E_y}{\partial z}$$

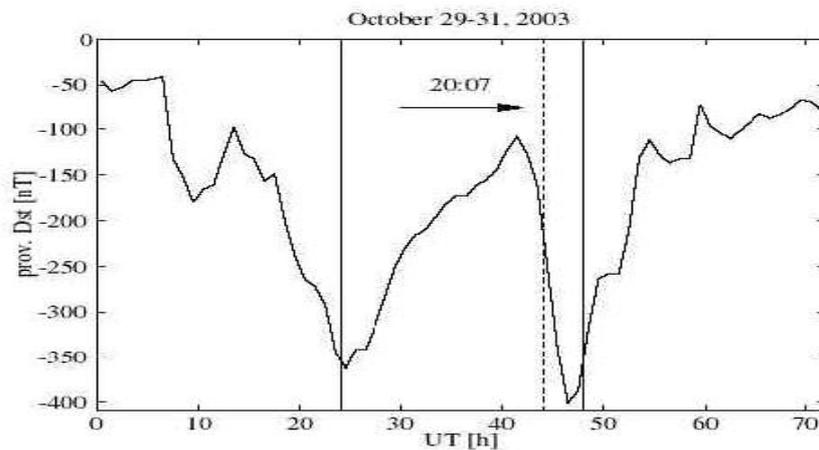
여기서, H 는 남북 방향의 수평성분을 나타내며, E_y 는 동서방향의 전기장 성분을 나타낸다. 이 식을 유도하는데 수직방향의 변화는 수평방향의 변화에 비해 무시되었다. 이 식을 지상에서부터 전리층 100 km까지 적분하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$E_y(0) \approx E_y(100km) - 100km \frac{\Delta H}{\Delta t}$$

여기서 $E_y(0)$ 와 $E_y(100 km)$ 는 각각 지상과 고도 100 km에서의 전기장을 의미한다. 따라

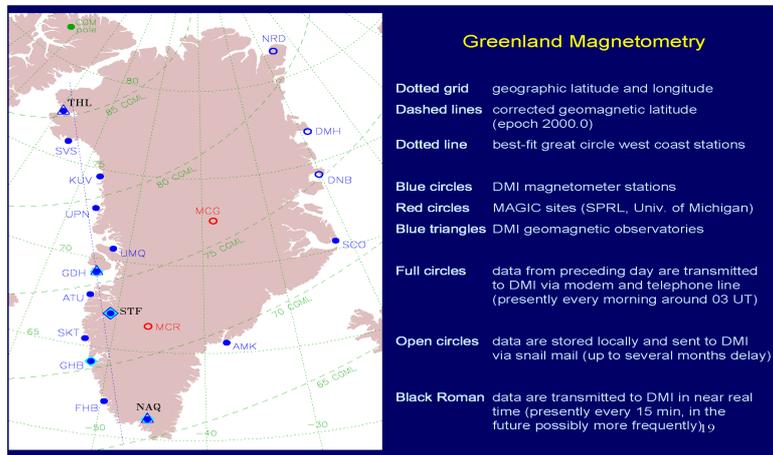
서 지상에 유도된 전기장의 세기는 자기장 수평성분의 시간 변화에 따라 결정된다. 물론 자기폭풍이나 서브스톰에 의해 발생하는 전리층 전류(electrojet)에 의한 지상자기장의 변화는 상황에 따라 다르다. 그러나 평균적으로 1 분당 수십 - 수백 nT의 변화가 발생하는 경우가 흔하다. 또한 전리층이나 자기권의 전기장은 수-수십 mV/m (혹은 V/km)의 크기로 나타난다. 한 예로, 자기권 야간지역 고위도 지방에서 서쪽방향의 강한 전리층 전류가 시작되어 발생하는 교란의 경우를 생각하자. 구체적인 값으로 $E_y(100 \text{ km})=10 \text{ mV/m}$, 그리고 $\Delta H/\Delta t = -100 \text{ nT/min}$ 으로 선택하면 (여기서 - 기호는 서쪽 방향의 전류에 의해 남북방향 수평성분이 감소하는 상황을 나타낸다), $E_y(0)$ 는 대략 10 mV/m가 된다. 실제로 자기폭풍 발생과 관련된 대개의 경우 지상에 유도되는 전기장의 세기는 대략 수-수십 mV/m 수준이 될 것으로 예상할 수 있다. 이와 같은 이론적 예측을 실제 관측 사건으로부터 확인 할 수 있다. 가령, 가장 대표적인 예로 2003년 10월 말 경에 발생한 할로윈 스톰을 생각해 보자. 아래 [그림 2-26]에 자기폭풍 지수 Dst를 볼 수 있다. Dst 지수의 최소값이 거의 -400 nT 근처까지 내려가는 것을 볼 수 있는 매우 큰 사건이었다.

[그림 2-26] 할로윈 스톰 발생을 보이는 Dst 지수 변화

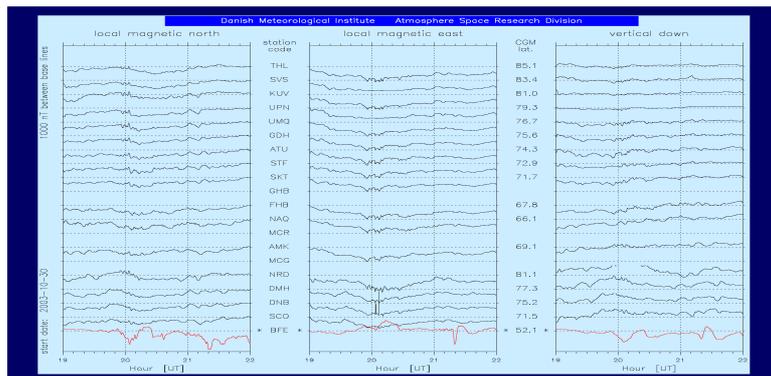


이때 지상 자기장의 변화를 살펴 볼 수 있는데, [그림 2-27]에 J. Watermann으로부터 인용한 그린란드 지역 자기장 관측소를 나타내었고, [그림 2-28]에 2003년 10월 30일 19-22UT 동안 관측된 지상 자기장의 변화를 보였다.

[그림 2-27] 그린란드 지역의 지상 자기장 관측 네트워크



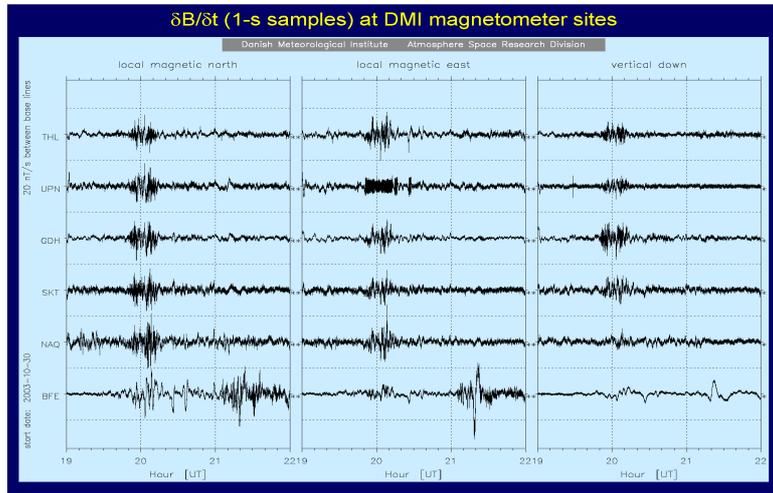
[그림 2-28] 2003년 10월 30일 Greenland 지역에서 관측한 지상 자기장 변화



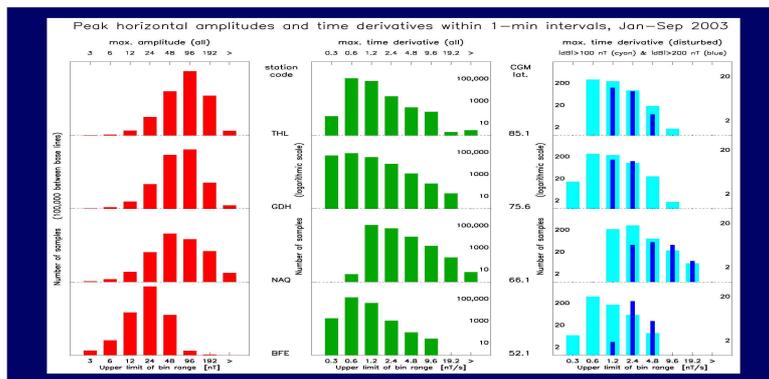
이로부터 도출한 자기장의 변화율(nT/s)을 [그림 2-29]에 보였다. 또한 [그림 2-30]에

자기장 변화에 대한 통계를 보였다. 이 결과를 보면, 20 UT 근처에서 급격한 변화를 보이는데, 또한 자기장의 변화율이 수 nT/s 범위 안에 놓이는 것을 알 수 있다. 위의 이론적 논의에서 사용한 값도 이러한 범위 안에 있는 것이었다.

[그림 2-29] 2003년 10월 30일 그린란드 지역에서 관측한 지상 자기장 변화율

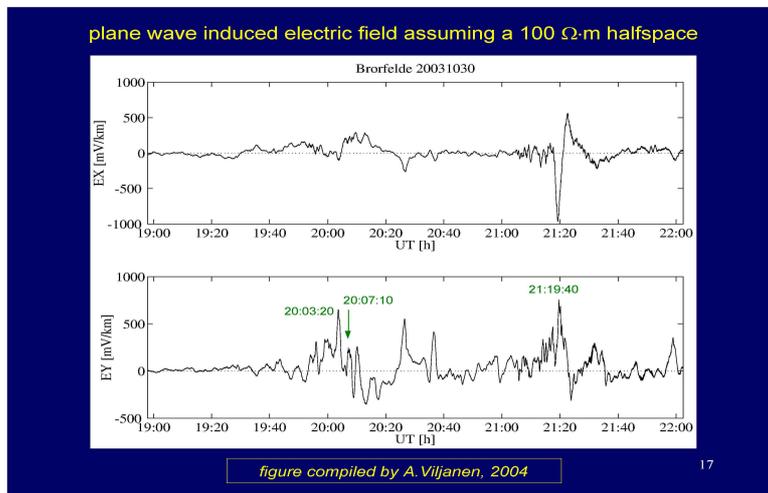


[그림 2-30] 2003년 10월 30일 그린란드 지역 지상 자기장 변화에 대한 통계



또한 [그림 2-31]에는 한 관측소 위치에서 도출된 전기장 값을 보이고 있다. 20 UT 근처의 시간에 최대 600-700 mV/km (즉, 0.6-0.7 mV/m)의 E_y 값을 보이고, 21:20 UT 근처에는 E_x 의 최대값이 -1000 mV/km (즉, 1 mV/m) 정도에 이르는 것을 볼 수 있다. 이것은 위의 이론적 예측치보다 다소 낮은 값이다.

[그림 2-31] 2003년 10월 30일 그린란드 지역에서 도출된 전기장



[그림 2-32] 자기폭풍에 대한 aa값과 자기장 수평성분 변화율

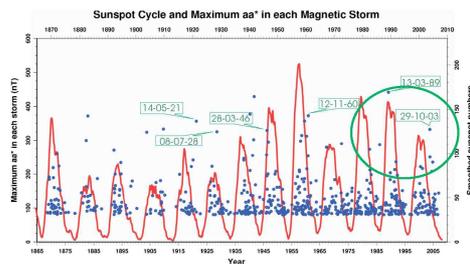


Fig. 3. Large storms identified by the peak in the 24-h running average of the aa index, overlain with monthly smoothed SSN. The largest storms recorded at EBR and those during the last three solar cycles that provide large rates of change are indicated. [Adapted from Thomson et al., 2010].

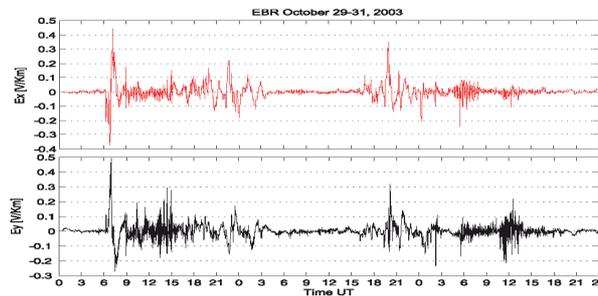
Date	Peak aa (nT)	Peak dH/dt (nT/min)
14 May 1921	680	135
15 Jul 2000	440	112
13 Jul 1982	497	110
13 Mar 1989	715	92
29 Oct 2003	715	83
26 Jul 2004	228	82
28 Mar 1946	656	70
06 Nov 2001	306	64
05 Jun 1991	363	64
13 Nov 1960	568	55
09 Nov 2004	363	55
08 Nov 1991	578	50
08 Jul 1928	656	50

Tab. 1. Largest rates of change in H at EBR

또 다른 여러 자기폭풍에 대해 유사한 분석이 가능하다. [그림 2-32]는 J. Torta가 제

시한 데이터이며, 왼쪽에 태양 흑점 수 (빨간색 선)와 aa지수(파란색 점)를 보이고 있고, 몇 개의 주요 자기폭풍 발생 날짜를 별도로 표시하고 있다. 또한, [그림 2-32]의 오른쪽은 이러한 주요 자기폭풍에 대해 aa값과 자기장 수평성분 변화율(nT/min)의 최댓값을 정리하여 보이고 있다. 먼저, 흑점수가 많을 때 aa지수가 높은 이벤트가 몰려 있음을 쉽게 볼 수 있다. 또한 선택한 자기폭풍 동안의 자기장 수평성분 변화율은 최저 50 nT/min에서 최고 135 nT/min임을 볼 수 있다. 위의 이론적 논의에서 사용한 값도 이러한 범위에 대략 해당 된다.

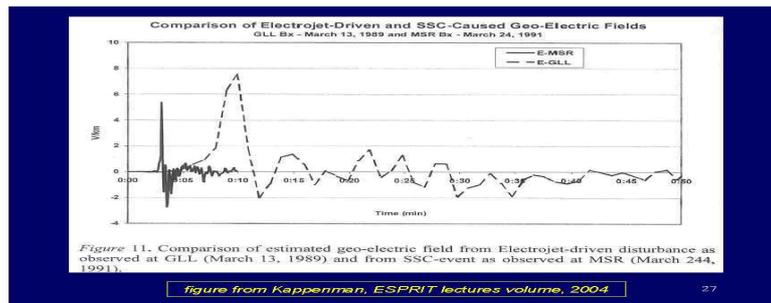
[그림 2-33] EBR 관측소에서 도출된 2003년 할로윈 스톰 동안의 전기장



위에서 보인 것과 마찬가지로, 2003년 10월 Halloween storm에 대해 또 다른 지상 관측소(EBR)에서 도출된 전기장 값을 [그림 2-33]에 보이고 있다. 전기장 값이 대략 -0.5에서 +0.5 mV/m 범위 안에 놓이는 것을 볼 수 있다. 이러한 범위는 위의 [그림 2-31]에서 보인 Brorfelde 관측소의 값과 유사하다. 한편, 원리적으로는 지상에서의 전기장 유도는 그 원인이 무엇이든 간에 자기장이 급격히 변하기만 하면 나타날 수 있다. 자기폭풍이나 서브스톰의 발생은 항상 전리층 전류의 급격한 변화(기존 electrojet의 증가나 새로운 electrojet의 형성)를 동반한다. 위에서 보인 예들이 이러한 경우에 해당한다. 그런데 때로는 자기폭풍의 발생시각 바로 전에 강한 Storm Sudden Commencement(SSC)가 앞서 나타나 지구 자기권을 때리게 되기도 한다. 혹은 자기폭풍과 상관없이 강한 태양풍 동압력 전선(front)이 존재 할 수 있는데, 이것 역시 지구 자기권에 충돌하기도

한다. 이러한 것들은 많은 경우 위의 [그림 2-25]에서 보인 것과 같은 태양풍 충격파나 그와 유사한 불연속면(discontinuity front)에 해당한다. 어쨌든 이러한 경우 자기권 및 지상 자기장은 급격한 변화를 겪게 되고, 이에 따라 지상에서의 유도 전기장이 발생 할 수 있다. 사실 이러한 경우가 자기폭풍 동안에 발생하는 경우보다 더욱 급격하고 충격적인 전기장을 발생 시킬 수 있다. [그림 2-34]은 J. Watermann으로부터 인용한 데이터이며, 전리층 전류(electrojet)에 의해 유도된 지상 전기장과 SSC에 의해 유도된 지상 전기장의 비교를 보이고 있다. 두 경우 모두 유도된 전기장이 수 mV/m 수준인 것은 공통적인 특징인데, SSC의 경우는 매우 짧은 시간 간격(수 초)동안에만 전기장이 강력히 발생하고 electrojet의 경우는 전기장이 더 오랜 시간 지속되는 효과를 낳는다. electrojet에 의한 전기장은 그 지속 시간이 총 수 십 여분 가능 하지만, 펄스 하나의 시간 간격은 불과 수분을 넘기지 않는 것이 전형적인 모습이다.

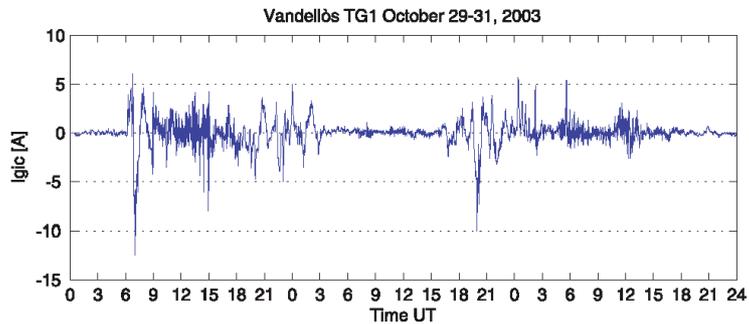
[그림 2-34] 전리층 전류와 돌발폭풍에 의해 유도된 지상 전기장의 비교



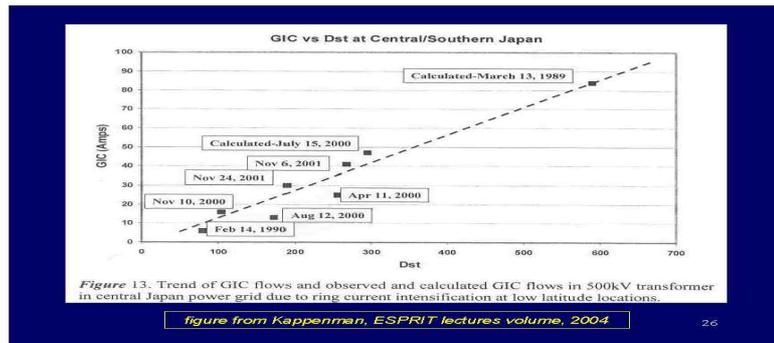
지상에 유도된 전기장은 송유관이나 전력망 등에 유도 전류 GIC를 발생 시킬 수 있다. J. Torta에 의해 유도 전류의 계산 예를 [그림 2-35]에 보였다. 이것은 2003년 Halloween storm의 경우에 지구 표면의 전도도를 0.001 S/m로 가정하고 Vandellos 지하철의 변압기에 야기된 GIC를 도출한 것인데, 전류의 세기가 수 A의 범위 안에 놓인 것을 볼 수 있다. 또한, [그림 2-36]은 자기폭풍의 강도 Dst 크기와 GIC 크기의 비례 관계를 잘 보여주고 있다. 결론적으로 자기폭풍이나 서브스톰, 혹은 태양풍 충격파 등이

자기권에 충돌하면 수-수십 mV/m의 유도 전기장이 지상에 발생 할 수 있고, 이것은 수 A 급의 유도 전류를 야기 할 수 있는 것으로 보인다. 또한, 자기폭풍의 강도와 유도 전류는 상당한 수준의 비례 관계가 있어 보인다.

[그림 2-35] 할로윈 스톰으로 인해 Vandellòs 지하철의 변압기에 야기된 GIC



[그림 2-36] 자기폭풍의 발생 강도와 GIC 사이의 상관관계



3. 우주전파환경에 따른 피해사례 분석

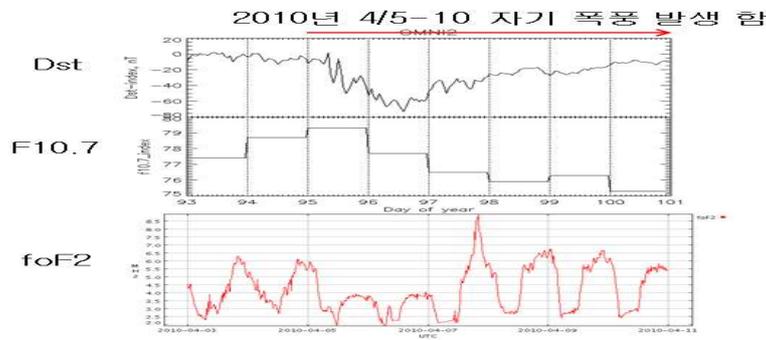
피해 사례로서는 본 연구 과제의 당초 목표와 취지에 맞는 고출력, 고고도 전자기적 교란을 중심으로 조사하였다. 특히, foF2 지수 변화뿐만 아니라 태양 폭발이나 지자기 폭풍 발생과 관련된 통신교란 사례, 위성의 궤도 및 자세 교란 사례, 지상 변전소, 변압

기 피해 사례 등을 조사 대상으로 삼았다.

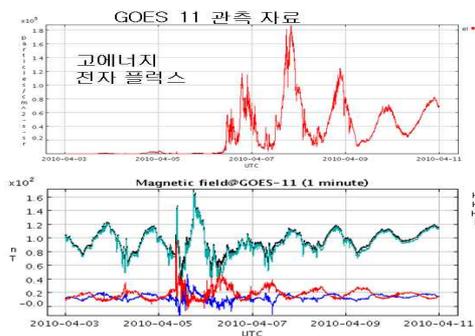
가. 2010년 4월 5일 통신위성 Galaxy 15 연락 두절

Intelsat이 운영하고 있는 위성과의 교신이 두절 되었는데 이때 중간 규모의 지자기 폭풍이 발생 하였다. 아래 [그림 2-37]은 Galaxy15 통신 두절이 발생한 즈음의 지자기 폭풍 지수 Dst와 F10.7 및 foF2 지수를 보여준다. 지자기 폭풍 시점을 전후 하여 태양 전파 2.8GHz 플럭스의 증감이 분명하며, foF2의 교란도 매우 심하게 나타났다.

[그림 2-37] 위성통신 두절 발생과 Dst, F10.7 및 foF2 지수 상관관계



[그림 2-38] 위성에서 관측한 고에너지 대전입자 플럭스와 자기장 변화



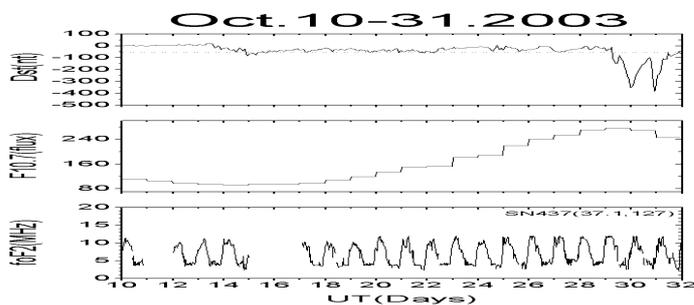
4월 5일에 정치궤도 과학위성 GOES 11에서 매우 과격한 우주환경교란 현상이 관측 됨.
GOES 11의 경도상 위치 → Galaxy와 비슷
따라서 Galaxy 통신위성 역시 유사한 우주환경교란 현상에 노출 되었음에 틀림 없음

Galaxy15의 피해 원인을 추적하기 위해 정지궤도 GOES11 위성의 고에너지 대전입자 플럭스와 자기장 변화에 대한 관측 자료를 [그림 2-38]에서 보여준다. [그림 2-38]은 Galaxy 15 통신 위성의 연락 두절 즈음에 정지 궤도 위성 GOES 11이 정지궤도에서 관측한 고에너지 대전입자 플럭스와 자기장 변화를 나타낸 것이다. 그 결과, 강력한 서브스톰 현상이 발생하여 고에너지 대전 입자의 급증을 야기 하였고, 이와 더불어 정지궤도 자기장도 심하게 교란되었다. Galaxy 15는 GOES 11과 경도가 비슷한 위치에 놓인 위성이므로, 이와 같은 강력한 우주환경 교란이 Galaxy 15의 피해를 야기했을 것으로 추정된다. 따라서 이 사례는 격변적인 지자기 폭풍과 관련된 고고도 고출력 전자기 교란의 대표적 예가 되겠다.

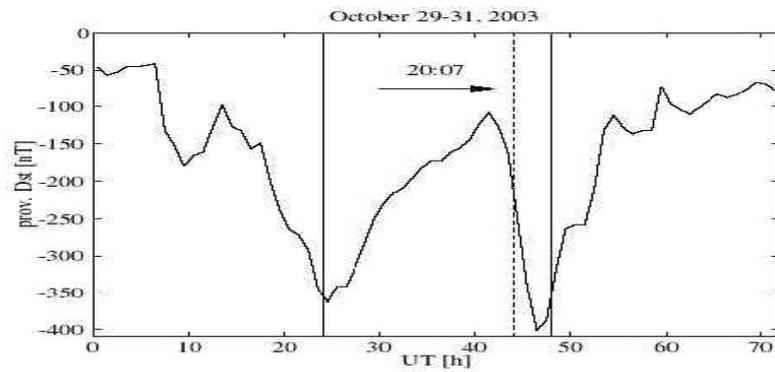
나. 2003년 10월 30일 Malmö blackout

남부 스웨덴에서 20:07 UT부터 20-50분 정도 지속된 피해 사례가 있었다. 이 사건은 1989년 캐나다 퀘벡에서 발생한 거대한 blackout 사건이 후 발생한 주요 사건이었다. 아래 [그림 2-39]에서 볼 수 있듯이 이 즈음에 Dst 최저값이 -400 nT에 육박하는 거대한 자기 폭풍 발생이 있었다. 아래 [그림 2-40]에 정전(blackout) 현상이 발생한 시점을 Dst 지수 변화 속에 수직 점선으로 명확히 나타내었다. 또한, [그림 2-39]을 보면 이 즈음에 태양 전파 F10.7 플럭스의 증가도 확실히 보인다. 한편, 한국의 오산에서 관측한 foF2 지수에는 큰 교란은 없는 것으로 보인다.

[그림 2-39] 2003년 10월 29일~31일 사이에 발생한 거대한 자기폭풍



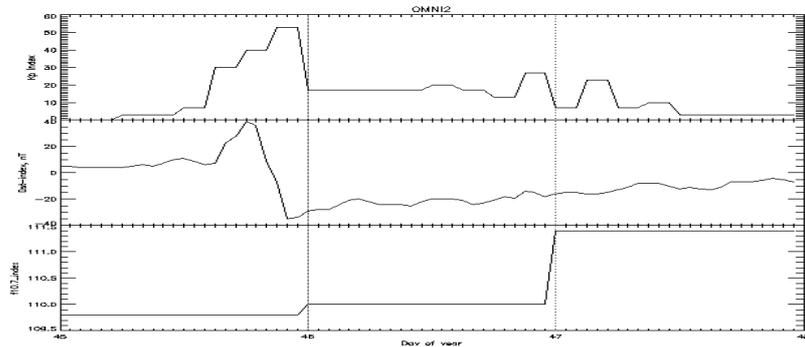
[그림 2-40] 정전 현상의 발생 시점에 Dst 지수 변화



다. 2011년 2월 15일에 중국 남부 단파통신 장애

아래 [그림 2-41]은 2011년 2월 14일부터 16일 24:00시까지의 Kp 지수, Dst 지수, F10.7 플럭스를 보여준다. 2월 14일 오후부터 강한 지자기 교란이 시작 되었는데, 그 뒤를 따르는 지자기 폭풍 자체는 그다지 강한 이벤트가 아니었다. 반면 지자기 폭풍 후반에 전파 플럭스 증가가 현저히 나타나고 있다.

[그림 2-41]. 2011년 2월 14일~16일 사이의 Kp 지수, Dst 지수, F10.7 플럭스



라. 통계적 조사

<표 2-9>는 2000~2008년 사이의 피해사례와 관련된 것으로 보이는 우주환경 교란을 정리한 것이다. 여기서 조사된 피해사례는 다수가 인공위성의 오작동이나 통신 교란 등에 해당된다. 또한, 각각의 피해사례에 대해 태양의 격변적인 활동 발생 여부, foF2 교란 여부, 자기폭풍 발생 여부, 서브스톰 발생 여부를 조사하였다. 제한된 관측 자료 때문에 완전한 조사가 이루어 질 수 없었던 경우를 제외하고, 거의 모든 결과를 표에 정리하였다. 많은 경우 태양의 플레어와 같은 격변적 활동의 발생과 연관되어 있고, 또한 예상과는 달리 서브스톰의 발생과도 상당히 연관되어 있는 것으로 보인다.

<표 2-9> 우주환경 교란에 따른 피해 사례

발생일	태양 격변활동 발생 여부	foF2 변화 여부	Storm 발생 여부	Substorm 발생 여부	피해사례
2000.02.12	02.10 Flare C등급 5개 02.11 Flare C등급 2개 02.12 Flare C등급 1개/M등급 1개	0	20:00 (-133nT)		무궁화1호 위성 자세 불안정 위성 추적 신호 신틸레이션 현상 발생 온세통신 Internet의 신틸레이션
2000.04.06	04.04 Flare C등급 4개/M등급 1개 04.05 Flare C등급 1개 04.06 Flare C등급 2개/M등급 1개	0	16:00 (-288nT)		무궁화 1호 위성 자세 불안정

발생일	태양 격변활동 발생 여부	foF2 변화 여부	Storm 발생 여부	Substorm 발생 여부	피해사례
2000.04.28	04.26 Flare C등급 8개 04.27 Flare C등급 1개 04.28 Flare C등급 2개				
2000.07.14	CME 07.12 Flare C등급 2개/M등급 4개/X등급 1개 07.13 Flare C등급 9개/M등급 5개 07.14 Flare C등급 4개/M등급 2개/X등급 1개	15일	10:07:37 20:23:32 23:29:29		Goes 기상 위성의 가시광 및 적외선 카메라에 영향 태양풍을 관측하는 ACE위성의 이온 검출기 장애 WIND위성의 태양풍 센서 성능 저하 일본 ASCA위성의 수명단축 Akebono위성의 전자 장비 고장 무궁화3호 64시간 동안 적외선 센서, 자이로 센서 잡음 발생 무궁화 1호 약간의 궤도 조정 필요
2000.10.26	10.24 Flare C등급 2개 10.25 Flare C등급 6개 10.26 Flare C등급 6개			1:59:20 19:56:32	주요 항공사의 HF통신 장애로 극항로에서 다른 활로로 변경 운항
2001.04.15	CME 04.14 Flare C등급 5개/M등급 1개 04.15 Flare C등급 7개/X등급 1개			02:55:07 12:46:17	HF 통신 두절
2002.04.21	04.19 Flare C등급 8개			03:41:11 21:18:25	일본 노조미 위성 통신시스템과 전력 시스템 손상

발생일	태양 격변활동 발생 여부	foF2 변화 여부	Storm 발생 여부	Substorm 발생 여부	피해사례
	04.20 Flare C등급 10개 04.21 Flare C등급 4개/X등급 1개				NASA Genesis위성의 별추적장비 4회 작동 중지
2002.06.27	06.26 Flare C등급 2개				Aqua위성 증가된 양성자 플럭스에 의해 하루 동안 안전모드
2003.10.25	10.23 Flare M등급 3개/X등급 2개 10.24 Flare C등급 7개/M등급 4개 10.25 Flare C등급 11개/M등급 3개				일본 인공위성 미도리 2호와 교신 두절
2003.10.28 -30	10.26 Flare C등급 1개/M등급 2개/X등급 2개 10.27 Flare C등급 8개/M등급 5개 10.28 Flare C등급 5개/X등급 1개 10.29 Flare C등급 4개/M등급 2개/X등급 1개	29일	29일 7:00 (-383nT)		호주전역에서의 HF통신교란, 호주동부지역 HF신호감지 오산 미 공군기지 HF수신 일부두절 극항로 HF수신교란 무궁화위성태양전지판 성능감소, 주요장비 운 용중단 아리랑 1호 위성 고도 감쇠율이 평소의 6배 이상 증가 미국의 화성탐사 위성 오딧세이의 radiation 측정 장비손상 일본화성탐사위성인 노조미위성 장애 kodama상업 위성11일간 안전모드

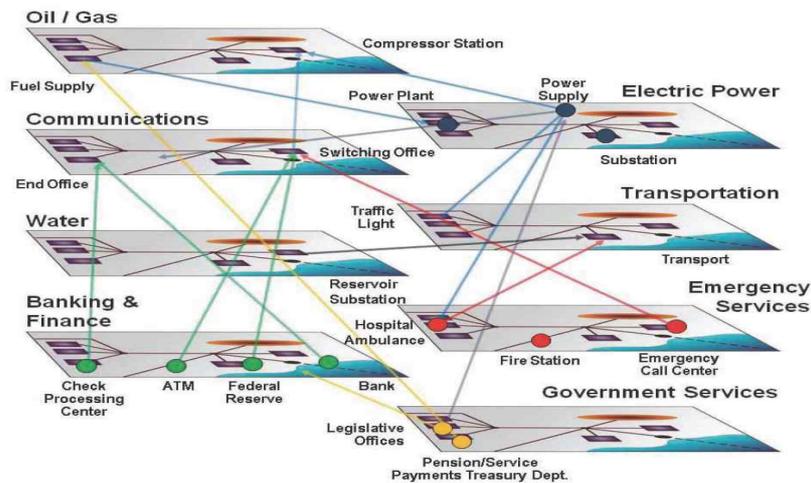
발생일	태양 격변활동 발생 여부	foF2 변화 여부	Storm 발생 여부	Substorm 발생 여부	피해사례
	10.30 Flare C등급 6개/M등급 2개				
2005.01.10	01.13 Flare C등급 9개 01.14 Flare C등급 26개/M등급 4개			22:47:46	Intelsat 804 Electric anomaly total loss
2005.01.15	01.15 Flare C등급 12개/M등급 6개/X등급 2개	16일		12:15:41 13:41:00 15:00:04 16:46:13 19:28:31	GP-8 과학위성 별추적장비 작동 일시정지
2005.05.21	고에너지 전자 플러스 증가		18:00 (-105nT)	10:41:20 19:24:47 23:24:21	Opyus B1 Primary SCP 작동 중지
2005.07.22	고에너지 전자 플러스 증가				JCSAT 1B위성 자세 불안정
2005.08.10	고에너지 전자 플러스 증가		8:00 (-53nT)		Eutelsat W1위성 자세 불안정 후 10시간 교신 두절
2005.09.14	09.12 Flare C등급 9개/M등급 4개 09.13 Flare C등급 9개/M등급 1개/X등급 2개 09.14 Flare C등급 8개/M등급 1개			14:03:40	Koreasat2위성 자세불안정으로 인해 90분간 교신 두절
2005.09.23	09.23 Flare C등급 1개			23:15:50	MTSAT 1R 위성 6시간동안 통신두절

발생일	태양 격변활동 발생 여부	foF2 변화 여부	Storm 발생 여부	Substorm 발생 여부	피해사례
2005.09.29	고에너지 전자 플러스 증가			09:30:48	Yamal202위성자세불안정, 소프트 웨어의 결 함으로 인해 24시간 교신 두절
2006.04.16	고에너지 전자 플러스 증가				MTSAT 1R위성 탑재한 컴퓨터 오작동으로 20시간 교신 두절
2006.09.22	09.22 Flare C등급 1개 고에너지	23일			Intelsat802이상 현상
2006.10.09	전자 플러스 증가				W3A Temporary 교신두절
2006.10.23					PAS-68수시간동안 교신두절
2007.03.13	고에너지 전자 플러스 증가				Hotbird 2 power subsystem에 이상 현상
2007.07.03	고에너지 전자 플러스 증가				Solidaridad 10시간동안 교신두절
2008.01.09	01.07 Flare C등급 1개			01:55 06:55 11:28	KazSat 7시간동안 교신두절
2008.06.08	고에너지 전자 플러스 증가				KazSat1위성 탑재한 컴퓨터 오작동
2008.06.14	고에너지 전자 플러스 증가				EchoStar2 Power system 오작동으로 전체 손 실
2008.09.04	고에너지 전자 플러스 증가		3일 23:00 (-51nT)		무궁화5호 위성의 통신서비스 중단 민간, 군의 통신서비스 중단 발생
2008.09.14	고에너지 전자 플러스 증가				무궁화3호위성에 Single event upset발생

제3장 우주전파환경 변화에 따른 고출력 전자파 피해 대책 방안

2003년 8월에 미국과 캐나다의 동부 연안에서 발생한 대규모의 정전 사고로 인해 뉴욕에서 수천 명이 지하철에 갇히고, 도로 교통이 마비되는 사례가 있었다. 이러한 정전 사고는 통신망이나 무선망에 영향을 주지 않기 때문에 사고 대책이 비교적 빠른 시일 내에 가능했다. 그러나 고출력 전자파 펄스에 의한 영향은 전력망, 통신망을 비롯한 거의 모든 전자 기기 장비에 영향을 미치기 때문에 사고 대책이 불가능할 정도로 막대한 피해를 미친다. 현대 사사의 기반 시설이 정보화, 자동화에 따라 많은 전자 통신 장비가 상호 연계되어 있기 때문에 어느 한 분야의 고출력 전자파 펄스에 의한 사고 영향은 연동된 다른 분야의 운영에도 영향을 미친다.

[그림 3-1] 현대 사회 기반 시설의 상호 연계성



자료: 정연춘, 전자파 보안 기술 동향, 2010

[그림 3-1]은 미국 하원에서 발간한 EMP Commission의 2004년 보고서에 서 제시한 그림이다. [그림 3-1]에서 볼 수 있듯이 정부서비스(Government Services)는 전력망, 통

신망, 금융망, 수송체계 등과 연동되어 있으며, 따라서 EMP에 의해 어느 한 분야라도 오동작 한다면 정부 서비스에 막대한 지장을 초래하게 된다. 따라서 이에 대한 철저한 대비가 필요하다. 또한 지자기 폭풍 발생 시 유도되는 전기장 환경 및 피해, 영향은 EMP-E3와 유사하므로 EMP로부터의 시스템 보호, 복구 및 완화 등의 대책은 동시에 지자기 폭풍과 같은 우주환경변화에 대한 보호대책이 될 것이다.

제1절 고출력 전자파 피해 대책 조사

1. HEMP/HPEM 관련 시험 기술 기준

현재 민수 전자 통신 장비에는 고출력 전자파 펄스에 대한 시험 요구가 국제적으로 전혀 이루어지지 않고 있으며, 단지 개별 기기 상호간의 전자파 방지를 위해 전자파 적합성 시험만을 적용하고 있다. <표 3-1>은 CISPR 24 문서에서 제시한 현재 정보 기술 장비의 함체에 적용되고 있는 시험 기준이다. <표 3-1>에서 볼 수 있는 것처럼 3 V/m의 전기장에 대한 내성을 80 MHz ~ 1 GHz의 주파수에 적용하고 있음을 알 수 있다. 또한 방위산업 장비도 마찬가지로 미국의 방산 규격인 MIL STD 461의 요구사항을 따르고 있다. 이 규격에서는 플랫폼의 종류에 따라 각기 다른 전계 강도에 대한 내성을 요구하고 있는데, 항공기 및 선박의 외부 노출 부분에 대해서는 200 V/m의 비교적 강한 전계 강도를 요구하고 있지만 대부분의 지상 장비와 선박의 갑판 아래에 있는 장비에 대해서는 10 V/m ~ 50 V/m 정도의 전계 강도에 대한 내성을 요구하고 있다. 특히 [그림 3-2]와 같은 고고도 전자파 펄스에 대한 시험 요구 사항이 규정되어 있지만, 매우 제한적으로 적용 되고 있다. 고출력 전자파 펄스에 대해서는 MIL STD 464A에서 전자기적 환경 영향 평가 차원에서 다루고 있는데, 그동안 제기된 고출력 전자파 펄스에 대한 위협을 고려하여 HPM과 DE (Directed Energy)에 대한 시험 요구사항의 표준화 작업이 마무리되어 새로 출간할 MIL STD 464B에 포함시킬 예정이다.

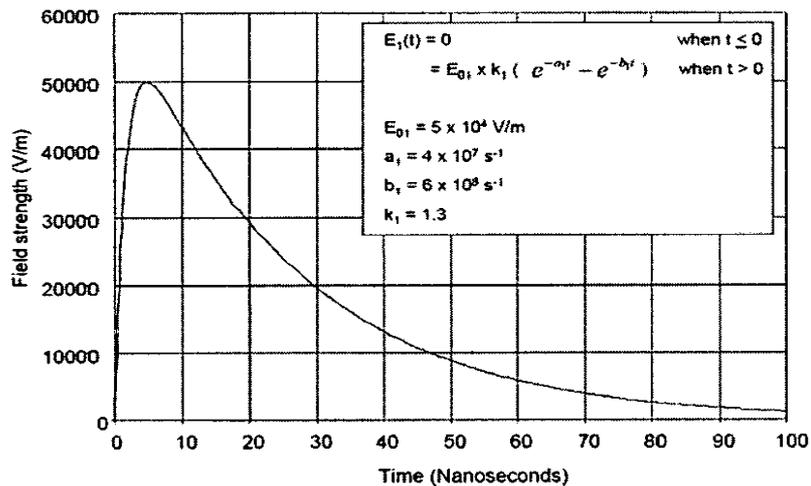
<표 3-1> 일반 정보 기술 장비에 적용되는 전자파 내성 권고 규격

	환경적 현상	시험내역	단위	기본 표준	성능 기준
1.1	전원 주파수 자기장	50 or 60 1	Hz A/m (r.m.s)	IEC 61000-4-8	Annex A Annex B
1.2	무선 주파수 전자기장 진폭조정	≤80~1,000 3 80	MHz V/m AM(1kHz)	IEC 61000-4-3	Annex A
1.3	정전기 방전	4(접촉방전) B(공기방전)	kV kV	IEC 61000-4-2	Annex B

- 1) 오직 CRT 모니터, 홀소자, 다이내믹 마이크, 자기장 센서 등과 같은 자기장에 영향을 받기 쉬운 장치를 포함하는 장비에 적용한다.
- 2) 주파수 범위는 상세히 명시되어 있다.
- 3) 시험은 80 MHz 이하의 주파수에서 시작하지만, 26 MHz 미만은 적용되지 않는다.

자료: 정연춘, "전자파 보안 기술 동향", 2010

[그림 3-2] 고고도 전자파 펄스에 의한 과도 전기장에 대한 내성요구사항



자료: 정연춘, 전자파 보안 기술 동향, 2010

2. 방호 대책 기술 동향

고출력 전자파 펄스에 대한 방호 대책은 경계 구역에 따라 각기 다른 대책 기법이 사용되며, 각각의 구역을 외부 공간, 건물, 방, 장비 등으로 구분하여 필요한 보안 조치를 하고, 요구되는 대책을 강구해야 한다. 이러한 대책에 전형적으로 전자파 차폐, 전원선 및 신호선 필터, 그리고 과도 전류 및 전압에 대한 선형 대책 부품 및 비선형 대책 부품 등이 요구 된다. 고출력 전자파 펄스 방호 대책 기술과 관련하여 미군과 NATO의 기술 기준 이외에 IEC, 미국 ANSI, 일본 IST 등의 표준화 단체에서도 상용 장비·시설에 대한 방호 기술 기준을 제정 중에 있다. 특히 미국은 군, 행정부, 의회, 표준기관, 학계, 민간업체 등에서 고출력 전자파 펄스 대응 방안을 모색하고 있으며, 의회 내에 EMP 위원회를 설치하여 국가의 중요 기반 시설에 대한 대응 방안을 강구하고 있다. 미국과 유럽연합은 고출력 전자파 펄스 공격을 평상시에도 테러로 간주하여 대테러 방안에 포함시키고 있으며, 고출력 전자파 펄스 방호 규격 및 가이드라인 문서를 발간하였다.

<표 3-2>는 미국방성에서 전자파 방호와 관련하여 발간한 대책 기술에 관한 규격 등이다. EMP 방호 측면에서 살펴보면 미국은 국토안보부에서 전력, 통신, 운송 등의 중요 인프라시설보호(CIP: Critical Infrastructure Protection)에 대한 테러(EMP 포함)위협 분석과 방어 임무를 담당하고 있다. 또한 국토안보부 산하 FEMA에서 70년대부터 EMP 방호를 주관하고 있는데, 비밀문서로 분류된 EMP 방호 가이드, FEMA CPG-12 "Electromagnetic Pulse Protection Guidance" 및 민간 중요통신설비에 대해 지원을 하고 있다. 미 하원에서는 2001년에 EMP Commission을 설립하여 중요 인프라에 대한 EMP 취약성, 피해 복구 능력, 방어 강화 가능성 및 비용 등을 평가하고 대응 권고안을 제시하도록 하고 있으며 2004년과 2008년에 많은 내용의 보고서를 발간한 바 있습니다.

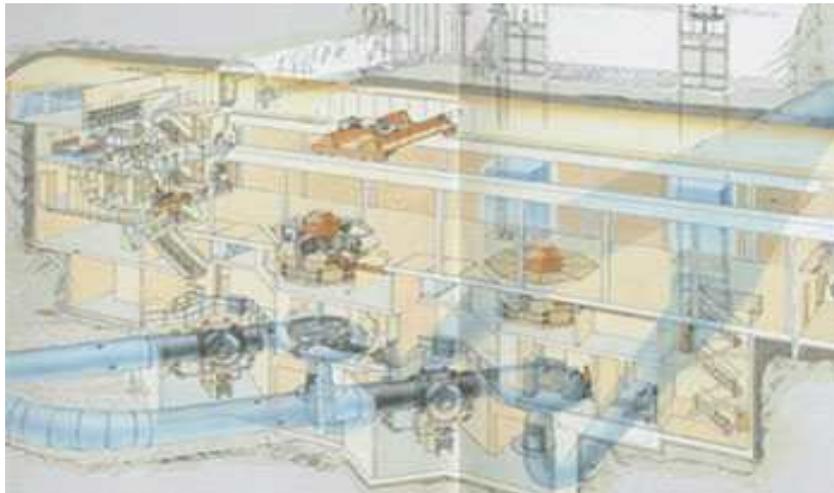
<표 3-2> 미 국방성의 전자파 방호와 관련하여 발간한 대책 기술에 관한 규격

문서 번호	년도	문서명	비고
EP 110-3-2	1990	Engineering and design electromagnetic pulse(HEMP) and tempest protection for facilities	취소
MIL-STD-188-125	1990	High-altitude electromagnetic pulse(HEMP) protection for fixed and transportable ground-based C ⁴ I facilities performing critical, time-urgent missions	취소
MIL-STD-188-125A	1994	상동 VOLUME 1: Fixed facilities	취소
MIL-STD-188-125-1	1998	상동 PART 1: Fixed facilities	공개
MIL-STD-188-125-2	1999	상동 PART 2: Transportable systems	공개
MIL-HDBK-423	1993	High-altitude electromagnetic pulse(HEMP) protection for fixed and transportable ground-based C ⁴ I facilities VOLUME 1: Fixed facilities, VOLUME 2: Ground-mobile and transportable facilities	비공개

자료: 정연춘, "전자파 보안 기술 동향", 2010

유럽연합의 경우 2006년 3월 21일에 "New European Approaches to Counter Terrorism"을 발표하면서 대테러 방안에 EMP 방호를 포함시킨 바 있다. 노르웨이에서는 [그림 3-3]과 같은 EMP 방호를 위한 지하 인프라시설을 구축하고 있으며, EMP 방호 규정으로서 NORFO SL 238 및 239를 시행하고 있다. 일본에서는 2004년 10월에 독립행정법인 정보통신 연구기구(NICT)의 협력 하에 IST Study Group에서 누설 전자파와 침입 전자파 위협에 대처하기 위한 "전자파 보안 가이드라인" 문서를 발간한 바 있다.

[그림 3-3] 노르웨이 지하 인프라 시설



자료: 재난포커스(www.di-focus.com), “제5의 재앙, EMP 신년 좌담회,” 2011

3. HPEM/HEMP 대책

고출력 전자파 펄스에 대한 방호 대책은 경계 구역에 따라 각기 다른 대책 기법이 사용되며, 각각의 구역을 외부 공간, 건물, 방, 장비 등으로 구분하여 필요한 보안 조치를 하고, 요구되는 대책을 강구해야 한다. 이러한 대책에 전형적으로 전자파 차폐, 전원선 및 신호선 필터, 그리고 과도 전류 및 전압에 대한 선형 대책 부품 및 비선형 대책 부품 등이 요구 된다.

가. EMP 차폐

핵폭발 및 전자기 펄스 무기로부터 발생된 EMP관련 전자기 방호벽 및 방호장치를 갖춘 최소 차폐효과를 확보하기 위해서는 철 또는 구리와 같은 전도성이 높은 물질을 이용하여 방호벽을 밀폐된 형태로 구축해야 하며, 특히 유의할 것은 밀폐 형 차폐 처리 시 벽체, 천정, 바닥표면 등 모든 부분들이 상호 전자기적으로 연결되어 전자기 밀폐성능을 갖추어야만 한다. <표 3-3>은 전자파 차폐효과의 판단기준을 나타낸 것이다. 표

3-3과 같이 전자파 차폐 효과를 나타내는 단위는 dB로 나타낸다. 차폐 처리된 후와 차폐 처리되기 전의 전자계 강도비로 나타내며, 20 dB의 차폐 효과는 전자파의 양이 1/10, 40 dB의 차폐 효과는 전자파의 양이 1/100로 감소한 상태를 의미한다.

<표 3-3> 전자파 차폐 효과 판단 기준

(단위: dB)

차폐 효과(dB)	의미
0~10	거의 없음
10~30	있음
30~60	양호
60~90	우수
90~120	최고 기준

자료: 오택수, "전자파 차폐용 고분자 복합재료", 1991

차폐처리 된 후에 최소 EMP 차폐효과 요구수준을 갖추었는지 판단하기 위한 성능시험은 당연히 실시되어야 하는데, 차폐 성능 시험은 모든 시설 및 장치의 정상적인 작동 상태 하에서 실시되어야만 한다. 수락시험(Acceptance Test) 과정에서 발견되는 각종 결함사항은 교정되어야 하고, 재시험을 통하여 요구되는 성능이 충족 되도록 해야 한다.

나. 등전위 접지면 형성 및 접지 처리

등전위 접지면 형성 및 접지처리와 관련된 기술적인 대책을 제시하면, 접지 처리 시 가장 중요한 것은 등전위 접지면에 접지 처리하는 것이다. 방호벽, 방호장치, 방호벽 내부에 설치 운용되는 각종 장비(기기) 또는 지상에 고정하여 설치 운용하는 국가 기간 전력 공급체계(발전소 및 송전체계), 유선 및 통신체계(유선, 무선, 위성, 라디오 등), 통신체계와 연계된 금융 체계, 국가 수송체계(공중통제, 철도 및 교통체계 등), 항만체계, 전력공급 체계와 연계된 국가비상체계(병원, 경찰, 소방서), 대기권 밖의 우주체계를 통제하는 지구국, 군 관련 전략무기와 C⁴체계들은 MIL HDBK 4419의 지침에 의거 등전

위 접지면에 접지되어야 한다. 여기서 중요한 것은 각종 장비(기기) 또는 체계들의 접지 처리 시 각각 독립적으로 접지되는 것이 아니라 EMP 차폐와 등전위 접지면을 형성할 수 있도록 방호벽 차폐 처리된 내부 표면에 전기적으로 연결시켜야만 한다. 그러나 전자기 방호벽 외부에 설치 또는 운용될 장비용 접지는 차폐처리 된 외부 표면에 전기적으로 연결되거나 별도의 접지시설에 연결되어야만 하는데, 차폐 처리된 외부 표면에 전기적으로 연결 시 적어도 접지연결용 케이블은 출입구 설치지역에 배치되도록 하는 것이 적절하다. 왜냐하면 EMP 차폐 및 모든 접지 케이블 연결처리 시 또 다른 EMP 유입구를 만들지 않기 위해서이다.

다. EMP 유입지점의 방호대책

EMP 유입지점과 관련하여 일반적으로 분류하면 건축물의 출입구/출입문/통로, 각종 배관(통풍구/냉난방 공조시설 등), 전기 및 통신선로 배선 인입용(RF통신용 안테나 연결 케이블용 등)으로 구분할 수 있다.

(1) 건축물/출입문/통로 방호대책

먼저 건축물의 출입구에 대한 기술적인 대책으로 EMP 유입 가능한 출입구는 단일화 하는 것이 적절하다. 물론 운용의 목적상 2개 이상의 출입구 설치가 불가피 할 경우 최초 설치하고자 하는 출입구와 180°, 90°배치 방향으로 추가하는 것이 바람직하다. 그 이유는 방호가 필요한 각종 장비(기기) 및 체계들의 설치 공간과 출입구간의 이격 거리를 비교적 신장시키기 위함이며, EMP 유입구를 최소화하기 위함이다.

두 번째는 인원 출입구와 통로와 관련된 기술적인 대책이다. 모든 인원들이 이용하는 출입구 및 통로에 대한 EMP 방호대책으로는 전도성 도파관 차단 주파수 적용 기술과 차폐 처리된 2중 출입문 구조를 갖추도록 하는 도파관형 출입구 및 통로구조로 설계하는 방안과 전도성 현관 차폐처리와 차폐처리 된 이중 출입문 구조를 갖추도록 하는 현관형 출입구 및 통로 구조로 설계하는 방안이 있다. 여기서 공통으로 적용 가능한 것은 2중 출입문 설계 시 출입문간 90°의 각도를 유지하도록 반영하는 것이다. 주 통로의 경우 반드시 도파관 차단 주파수기술을 활용하는 것, 그리고 출입구 설치 방향으로 모

든 전기적은 방호대책과 케이블 배선용 배관처리가 되도록 해야 한다.

세 번째는 EMP 방호대책과 관련하여 통로 크기도 고려되어야 한다. 도파관형 통로의 크기(폭)는 왕래 인원수를 고려하여 가급적 최소의 크기로 그리고 도파관형의 복도 길이도 최단거리를 고려하되 단면적 대각선 길이의 5배 이상이 되도록 설계하는 것이 적절하다. 설계 관점에서 도파관형 복도 내부에 전력선, 배관 또는 기타의 다른 전도성 물질이 설치되지 않도록 설계해야 하는데, 만약 통로에 전력선의 배선이 불가피할 경우는 금속성 덕트를 함몰형태로 설치한 후 덕트 내부로 배선해야 한다. 모든 함몰형태의 덕트와 기타 다른 지하 매설용 덕트 등은 일정 간격으로 통로 차폐시설과 전기적인 연결이 되도록 조치해야 한다. 방호벽과 동일하게 차폐 처리하여 차폐 최소 요구 수준을 충족해야 하고, 통로에 설치되는 출입문의 경우 높이 또는 폭이 2.44 m보다 클 경우 적어도 최소 차폐효과는 충족되어야 한다. 출입문의 크기 또는 폭이 2.44 m보다 작은 경우에는 최소한 공진 범위와 평면과 차폐 효과는 충족될 수 있기 때문에 2.44 m보다 클 경우에 비하여 크게 고려요소로 작용 되지는 않는다. 차폐 처리된 시설물의 외부 출입문의 경우 바람이 날리는 먼지(낙진)와 기타 다른 자연 영향 요소(비, 눈 등)에 노출될 수 있기 때문에 막을 수 있는 성능을 갖추어야 한다. 부가적으로 출입문의 경우 항상 EMP 방호수준을 유지하기 위하여 자동형과 수동형의 내부 잠금장치 등을 설치하여 운용하는 것이 바람직하다.

(2) 각종 배관(통풍구/냉난방 공조 시설 등)방호 대책

건축물 출입구 또는 방호벽 차폐 처리부분을 관통하여 각종 장비에 연결되어야 하는 케이블 배관, 통풍구, 냉난방 공조시설 등과 관련된 EMP 유입구에 대한 방호대책을 강구해야 하는데 이와 같은 방호대책을 기술적으로 제시하면 전자기파 유입차단을 위한 차폐조치와 도파관 차단주파수 기술이용에 의한 유입 차단조치를 혼합한 방호대책을 적용할 수 있다. 먼저 배관에 관련된 사항을 보면, 배관은 건축물의 EMP 차폐 처리된 벽체부분을 관통해야 한다. 사용되어야 하는 배관은 절연성(비전도성)물질로 제작된 배관이 아닌 금속성(전도성)물질로 제작된 배관을 사용할 수 있도록 설계되어야 한다. 그 이유는 건축물의 차폐 처리된 벽체부분을 관통시켜야 하는데 절연성물질을 사용할 경우

차폐효과의 요구수준을 충족시킬 수 없기 때문이다. 그래서 절연성물질로 제작된 배관의 사용은 통제되어야 한다. 물론 배관을 설치한 후 최소 EMP 차폐효과 요구 수준을 충족해야 한다. 단일 금속성 배관, 통풍구, 냉난방 공조시설 등을 위하여 필요한 배관 설계 시 전자기파 유입 차단을 위한 차폐조치로써 직경의 크기가 10 cm이하로 하여야 하고, 도파관 차단 주파수 기술이용에 의한 유입 차단조치로 길이는 직경의 5배 이상이 되어야 한다. 또한 Honeycomb 형태의 배관을 이용할 경우 각 Cell별 가로, 세로, 길이 기준을 고려하여 설계해야 한다. 왜냐하면 1.5 GHz 주파수까지 차단시킬 수 없으며, 1 GHz 주파수까지 저어도 80 dB감쇠시키는 차폐효과를 획득할 수 없기 때문이다.

건축물 차폐 처리된 벽체부분을 관통시켜야 하는 배관 설계 시 배관의 내부 직경과 배관 내 각 Cell의 가로 및 세로 크기는 최소한 1.5 GHz 주파수까지 차단시킬 수 있는 도파관 차단 주파수 적용기술이 적용된 배관을 선택할 수 있도록 반영되어야 하며, 배관의 길이는 1 GHz 주파수에서 적어도 80 dB 감쇠시킬 수 있는 수준의 길이가 되어야만 한다. 그리고 배관과 건축물(시설물)의 EMP 차폐 처리된 벽체 간 전도성의 연속성이 유지될 수 있도록 용접처리가 되도록 설계되어야 한다. 설계관점에서 EMP 유입구에 대한 배관의 설치 개수는 가급적 20개 이하, 통풍구 HEMP 유입구에 대한 배관 설치 수는 10개 이하로 제한하고 있으며, 비록 배관이 권고되고 있는 규격을 충족하였다 할 지라도 추가적인 조치 없이 케이블 등을 배선해서는 안된다.

(3) 전력 공급 및 통신선로 배선 관련 방호대책

EMP 차폐 처리된 건축물 벽체 부분을 관통해야 하는 모든 전력 공급업체, 통신체계, 기기 통제용 케이블등과 관련하여 EMP 방호대책을 강구해야 한다. EMP 차폐 처리가 된 시설물 벽체의 차폐효과가 전기 및 통신선로 배선을 위한 EMP유입구로 인하여 최소 EMP 차폐 요구수준 이하로 감소되어서는 안된다. 또한 통풍구 및 냉난방 공조시설 등에 대한 EMP 유입구에 대한 방호대책을 마련했다 하더라도 전기 또는 통신 케이블을 통풍구 및 냉난방 공조시설로 관통시켜 배선해서는 안된다. 전기 및 통신용 케이블의 경우 EMP에 의한 전도성 불필요 또는 기능 장애 신호가 유입될 수 있기 때문이다. 그래서 이에 대한 대책이 강구되지 않으면 시설물 벽체의 차폐효과, 통풍구 및 냉난방 공조시설의 방호대책 등과 관계없이 EMP에 의한 피해 발생이 가능하기 때문이다. 전기

및 통신용 EMP 유입구에 대한 방호대책을 마련해야 한다. EMP에 의한 불필요 또는 피해유발 신호를 억제 또는 감쇠시킬 수 있는 별도의 장치를 갖추어야 한다. 즉 EMP에 의해 유기되는 전도성 신호의 방호장치가 마련되어야 한다.

① 전력 공급 배선관련 대책

전력 공급 EMP 유입구에는 EMP에 의해 유기될 수 있는 전도성 불필요 신호를 억제 또는 감쇠시키는 장치를 사용해야 한다. 또한 전력 공급용 케이블을 시설물 내부로 배선할 경우 주 방호벽 외부로부터 적어도 16 m 정도의 길이로 매설 처리하는 것도 권고하고 있다. MIL-STD에 제시하고 있는 전력 공급 EMP 유입구의 방호용 장치 성능 수준을 살펴보면 먼저 2,500 A 단락회로 전류, 20 ns이하의 상승시간, 500 ~ 550 ns의 FWHM, 60 Ω 이상 되는 신호원 임피던스인 Norton Source는 주 방호벽 내부 과도 신호충격이 10 A이상 되지 않아야 하고, 성능 저하 또는 기능저하를 유발시키지 않아야 한다. 두 번째는 250 A 단락회로 전류, 1.5 μ s이하의 상승시간, 3 ~ 5 ms의 FWHM, 60 Ω 이상 되는 신호원 임피던스인 Norton Source는 방호벽 EMP 유입구 방호용 기기 외부 터미널에 연결되는 것으로 실내 과도 신호 충격이 성능 저하 또는 기능저하를 유발시키지 않아야 한다. 여기서 두 가지 기준을 제시하는 것은 유입되는 EMP에 의해 유기되는 신호 유형이 펄스폭과 상승시간에 따라 대책이 서로 다르기 때문이다. 만약 방호벽 EMP 유입구 방호용 장치가 적합성 요구수준을 갖추기 위해 내부 충격 한계기준을 충족시키도록 설계될 수 없다면 별도의 특수 방호용 방호대책이 검토될 수도 있으며, 설계 목적상 EMP 상황이 발생된다면 상용 전력 공급 장치에 대해서 전력을 자동으로 차단하거나 경보음 발생동안 수동으로 단절시킬 수 있도록 설계해야 한다.

② 음성용 및 데이터용 회선에 대한 대책

차폐처리 된 혹은 처리되지 않은 표준 음성용 데이터용 회선은 전자기 방호벽 외부에서 광케이블로 전환되어야 하고, EMP 차폐 처리된 벽체를 광케이블로 관통되어야 한다. 전자기 방호벽 외부의 광학전자장비는 사용되는 음성 또는 데이터 회선의 용도가 중요할 경우 특수 방호대책을 사용하여 보호해야만 한다. 광케이블 EMP 유입구는 도파관 차단 주파수 기술 적용 방호장치로 보호해야 한다. 광케이블 포설을 위한 배관의 내

부 직경은 도파관 차단 주파수 기술을 적용하여 적어도 1.5 GHz이하의 주파수는 차단될 수 있도록 제한해야 한다. 또한 도파관의 길이는 1 GHz 주파수에서 적어도 80 dB 이상 감쇠시킬 수 있는 충분한 길이가 되어야 한다.

광케이블 포설용 배관 내에 도체나 도체성 물질이 도파관을 통하여 유입되도록 설계해서는 안되며, 도파관 차단 주파수 기술을 적용한 방호용 장치에는 부주위에 의해 전도성 물질이 유입되는 것을 방지하기 위해 덮개처리 하거나 비전도성 물질로 채워져야 한다. 그러나 광케이블로 전환할 수 없는 비표준 음성용과 데이터용 회선은 EMP 차폐 처리된 시설물에 관통시키는 것이 불가피할 경우 방호벽 과도전류 억압/감쇠 장치가 사용되어야 한다. 설계관점에서 최대 약 20개 정도의 비표준 음성 및 데이터용 회선을 EMP 차폐 처리된 시설물을 관통하도록 조치하는 것은 무방하나 회선수가 증가될 경우는 추가 조치방안을 강구하여야 한다.

비표준 음성용과 데이터용 회선에 대한 EMP 유입구의 방호용 장치가 어느 정도의 성능을 갖추어야 하는지 MIL-STD에서 제시하고 있는 기준으로 살펴보면 방호벽에 설치되는 EMP 유입구 방호용 장치는 $500/\sqrt{N}$ 또는 500 A 단락회로 전류 중 큰 전류, 20 ns이하 상승시간, 500 ~ 550 ns FWHM, 60 Ω이상 Source 임피던스를 갖추어야 한다. 방호벽 EMP 유입구 방호용 장치는 시설물 외부의 단말기와 연결되는 도체를 방호벽에 관통시키기 위해 사용되는 것으로 잔류 내부 과도전류 충격이 0.1 A이상 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 한다. 그러나 방호벽 외부에 설치되어 운용될 단말기에는 250 A 단락회로 전류, 1.5 μs이하의 상승시간 3 ~ 5 ms의 FWHM, 10Ω 이상의 Source 임피던스를 갖는 EMP 유입구 방호용 장치를 설치하여 과도현상의 신호충격으로 성능저하 또는 기능저하를 방지시켜야 한다.

③ 각종 기기 및 장치들의 통제용 회선 방호 대책

차폐 처리된 또는 차폐 처리되지 않은 각종 기기 및 장치들의 통제용(전기 또는 통신용) 회선을 방호벽에 관통시키지 위해서는 과도전류억제 또는 감쇄 장치를 설치해야 한다. 그러나 설계 목적상 시설물 EMP차폐 처리된 방호벽을 관통시키는 회선 수는 최소화해야한다. 각종 기기 및 장치들의 통제용 회선에 대한 방호용 장치의 성능 수준을

MIL-STD에서 제시하고 있는 기준으로 살펴보면 먼저 90 V이하 전압용으로 사용 될 통제용 회선에 대한 방호용 장치는 $5000/\sqrt{N}$ 또는 500 A 단락회로 전류 중 큰 전류, 20 ns이하 상승시간, 500 ~ 550 ns FWHN, 60 Ω 이상 Source 임피던스를 갖추어 방호벽 EMP 유입구 반호형 장치에는 잔류 내부 과도전류 충격이 1 A 이상 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 한다. 만약 방호벽 EMP 유입구 방호용 장치가 작동신호에 의해 간섭 없이 잔류 내부 전류충격을 견딜 수 있도록 설계될 수 없다면, 90 V이하 전압용과 마찬가지로 특수 방호용 별도의 공간이 확립되어야 한다. 그러나 제한된 EMP 차폐 처리된 시설 내부 공간에서 한정된 각종 기기 및 장치의 통제용 회선이 외부 노출 부분이 5 m이하인 경우, 회선에 연결된 외부용 단말기가 물리적으로 작은 경우, 회선에 연결된 외부용 단말기가 이외 다른 전기적 전도체 또는 금속성 배관에 연결되어 있지 않은 경우, 그리고 회선에 연결된 외부용 단말기가 지하 또는 지상으로 시설물 EMP 차폐 처리된 부분과 직접 연결되어 있는 경우 방호벽에 설치될 방호용 장치의 요구 성능은 90 V 이하 전압에서 제한된 통제용 및 통신용 회선에 설치되어야 할 방호벽 HEMP 유입구 방호용 장치는 잔류내부과도 전류충격이 0.1 A 이상 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 한다. 또한 90 V이상 전압에서 제한된 통제용 및 통신용 회선에 설치되어야 할 방호벽 HEMP 유입구 방호용 장치는 잔류 내부 과도 전류 충격이 1 A 이상 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 한다.

④ RF통신용 안테나 연결케이블 방호대책

차폐 처리된 또는 차폐 처리되지 않은 안테나 연결케이블을 방호벽에 관통시키기 위해서는 과도전류 억제 또는 감쇄장치를 설치해야 한다. MIL-STD에 제시되어 있는 안테나 케이블에 대한 방호용 장치 수준 성능 기준을 살펴보면, 먼저 방호벽 과도전류 억압 및 감쇄장치는 RF통신 안테나 연결 케이블을 신호 전송용으로 사용될 수 있도록 설치되어야 하고, 케이블 자체 차폐기능 발휘를 위하여 시설물 EMP 차폐 처리된 부분에 용접형태로 접속 처리 되어야 한다. 수신전용 안테나 종단부에 설치될 EMP 방호용 장치의 경우 0.1 A 이상 유입되지 않도록 차단능력을 갖추어야 하고 방호벽 내부 장비 손상 또는 성능저하 현상이 발생되지 않도록 해야 한다. 즉, 수신전용 안테나의 정상적인 작

동상태에서 일정 크기의 진폭과 파형을 갖는 펄스가 주입되었을 경우 수신전용안테나 중단부에 설치될 EMP 방호용 장치의 경우 0.1 A 이상 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 하고, 방호벽 내부 장비 손상 또는 성능 저하 현상이 발생되지 않도록 해야 한다.

안테나 연결용 케이블의 방호용 장치는 요구되는 과도 전류 역압 또는 감쇠 수준을 달성하기 위해 방호벽 EMP 유입구 방호용 장치에 연결되어 사용된다. 만약 안테나 방호를 위해 잔류 내부 과도 전류 충격 제한사항을 작동중인 통신에 간섭 없이 만족 시킬 수 있도록 설계할 수 없다면 별도의 특수한 방호용 대책을 마련해야 한다. 송신전용 안테나 또는 송수신 겸용 안테나 연결용 케이블에 일정 크기의 진폭과 파형을 갖는 펄스가 주입되었을 경우 안테나 중단부에 설치될 EMP 방호용 장치는 신호 전송용 안테나 연결 케이블의 내부 도체에 1 A 이상의 잔류 과도전류충격신호가 유입되지 않도록 하고, 케이블의 차폐도체에서는 0.1 A 이상의 전류 과도전류 충격신호가 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 하고 방호벽 내부 장비 손상 또는 성능저하현상이 발생되지 않도록 해야 한다. 만약 안테나 연결 케이블 방호를 위해 잔류 내부 과도전류 충격제한사항을 작동중인 통신에 간섭 없이 만족 시킬 수 있도록 설계할 수 없다면, 별도의 특수한 방호용 대책을 마련해야 한다.

안테나 연결용 케이블 적용 기준은 지표면을 기준으로 지하에 매설되었느냐와 지상에 노출되어 설치되었는지 여부에 따라 다르다. EMP 차폐 처리된 시설 외부 공간에 설치된 안테나에 연결된 매설케이블의 외부도체에 연결되어 설치될 EMP 유입구 방호장치는 800 A 단락 회로 전류, 20 ns 이하 상승시간, 500 ~ 550 ns FWHM, 60 Ω 이상 Source 임피던스를 갖는다. 이 EMP 유입구 방호장치는 안테나 케이블의 내부도체에 잔류내부 과도 전류 충격이 0.1 A 이상 유입되지 않도록 차단능력을 갖추어야 하고, 시설물 방호벽의 EMP 유입구 방호용 장치의 손상 또는 성능 저하를 초래하지 않아야 한다. 또한 안테나에 연결된 지상노출 케이블의 차폐부분에 연결되어 설치될 EMP 유입구 방호장치는 5000 A 단락회로 전류, 20 ns 이하 상승시간, 500 ~ 550 ns FWHM, 60 Ω 이상 Source 임피던스를 갖는다. EMP 유입구 방호장치는 안테나 케이블의 내부 도체에 잔류 내부 과도 전류 충격이 0.1 A 이상 유입되지 않도록 차단 능력을 갖추어야 한다.

라. 전원선 및 신호선 필터

HEMP용 전원필터회로에서 중요한 것은 전류 용량이다. 일반적으로 HEMP방호 시설의 전기용량이 수천 A에 이르기 때문에 부스 바 형태의 굵은 전선에 인덕턴스를 증가시키는 것은 한계가 있어 비드형태나 10 Tum미만의 인덕터와 관통 형 컨덴서를 이용하여 설계한다. 그러나 회로로 보면, HEMP 신호 특성 펄스의 상승시간이 약 10 ns이하로 매우 빠르므로 과전압 보호소자가 정상적으로 동작하기 위해서는 부하 측에 시간지연이 요구되므로 인덕턴스값은 수백 μH 이상은 되어야 한다. HEMP필터 설계와 제작에 있어 저주파에서 요구 감쇠량을 만족시키는데 어려움이 있겠으나 주의만 기울이면 MIL-STD-188-125를 만족하는 필터 설계 및 제작에는 어려움이 없다.

전원필터 설계에 있어 가장 중요한 것은 과전압 보호소자의 손상여부를 자동 판단하는 기능과 교체가 용이해야 하며, 접지 간 접촉이 면접촉 구조가 되도록 설계되어야 한다. 또한 어떤 경우든 부하 측 임피던스가 과전압 보호 회로 측 임피던스에 비해 충분히 높도록 설계되어야 한다.

마. 과전압 보호 소자

HEMP과전압 보호소자의 전류 내량은 수천 A까지 크고, 응답속도는 ns정도 빨라야 하며, 교체가 용이해야 하는 조건을 만족해야 한다. 이 조건들을 만족하는 소자로서는 어레스터(surge arrester)와 고압세라믹컨덴서(varistor)를 이용하여 2단으로 구성하거나 하나의 부품으로 구성해야 하는 경우 디스크 크기가 큰 ZnO계통이 바람직하다. 중요한 것은 HEMP 전류가 5,000 A까지 시험하므로 선이 아닌 면이 접속되도록 해야 한다는 것이다. 과전압 보호소자의 선정에 있어 기억해야 할 것은 순시 과전압의 크기 즉, 진폭을 크게 고려하지 않아도 되나 2 ~ 3회만 HEMP펄스를 인가 시험해도 해당 부품의 성능이 급격하게 저하되어 설계값을 만족시키지 못한 다른 것에 유의해야 한다. 또한 ZnO의 동작 시 절연파괴로 절연불량이 나면 전원투입이 안될 수 있으므로 기계적 자기 개방기능이 요구된다.

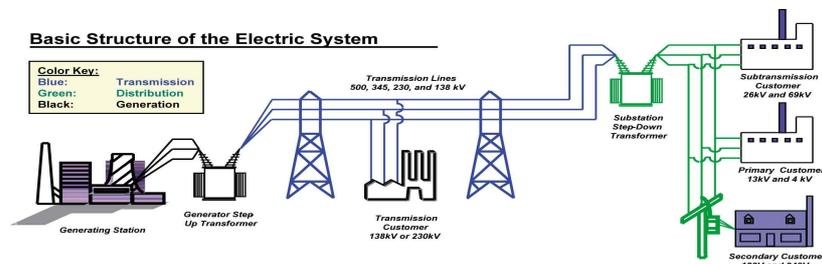
제2절 미국 EMP 위원회 보고서 조사

1. 전력시스템에서의 EMP 영향 및 대책

미국 사회의 모든 사회시설, 경제시설은 절대적으로 전력시스템에 의존하고 있다. 전기가 없으면 음식품의 손상, 생산 중단, 물, 연료 공급 중단 등 경제활동의 대부분의 마비를 초래하게 된다. 미국 헤리티지재단의 보고서에 의하면 전자파 펄스에 의해 하루 동안 전력시스템 손상에 따른 피해는 약 7조원에서 10조원 정도의 사회적 비용이 초래될 것으로 예측하고 있다.

현대 사회의 대부분의 사회기반시설이 전력시스템에 의존하고 있는 것처럼 역으로 전력시스템도 전력시스템 내부 요소, 구성 요소들 간 서로 상호의존성을 갖는다. 따라서 다른 어떠한 사회기반시설 보다 전자파 펄스에 대한 집적적인 공격에 매우 취약하다. 또한 소규모의 전자파 펄스 공격을 받아 전력시스템이 완전히 파괴되지 않았다하더라도 그 피해는 매우 심각한 결과이며 국가 사회, 보안 시스템에 매우 위협적이다. 전력시스템은 다음 [그림 3-4]와 같이 세 개의 주요 시설로 구성되어있다. 세 가지의 주요 구성 요소는 발전소(generation), 송전소(transmission), 배전소(distribution)이다. 미국 EMP위원회 보고서는 각 시설 별 EMP취약성과 대책 방안을 분석했다.

[그림 3-4] 전력시스템 구조



자료: Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse(EMP) Attack, 2004

가. EMP 노출에 대한 전력시스템의 취약성

(1) 발전소

발전소는 부하의 손실, 전기적 결함, 상호 연결되어 있는 전력시스템의 트립 현상, 또는 주파수편이현상이나 기계의 작동중지로 인한 외부 전원 손실 등에 대비하여 자체적인 보호시스템을 갖추어 설계된다. 보호시스템이 잘 작동한다면 위의 경우가 발생한다 하더라도 발전소에 피해를 주지 않는다. 2003년 8월 14일에 발생한 정전사태를 포함하여 이전에 정전사태로 인한 발전소에 약간의 피해를 주는 사례가 발생해왔다. 그러나 드물다 할지라도, 발전소를 통해 다중제어시스템의 고장이 발생하기도 한다. 따라서 광범위에 영향을 주는 EMP로 인한 발전소의 피해를 통계적으로 예측할 수 있다.

E2와 E3는 발전시스템에 직접적인 위협요소로 평가되지 않기 때문에, 가장 취약한 문제는 E1이 유도로 인한 발전소 제어 시스템의 장애이다. E1 펄스는 피해손상 제어 또는 보호 시스템 구성요소를 포함한 발전소의 보호 및 제어 시스템을 망가트릴 수 있으며, 트립 현상과 트리거 현상을 야기한다. 전류, 온도, 압력, 주파수와 다른 물리적 매개 변수들은 제어 시스템에 의해 감시된다. 이것들은 같은 시스템에서 독립적으로 측정이 되며, 발전소의 트립 오프 현상이나, 셧다운 현상(shut down: 전원고장, 사고 등으로 인해 시스템의 작동이 중지되는 현상) 일으킬 수 있다.

발전소의 자체 제어 시스템 또는 2차 노드 제어 그리고 중요한 수신기들이 E1에 의해 손상되면 발전소는 심각한 손상을 입는다. 최근의 발전소는 매우 정교하며, 고속의 기계들이다 그리고 이런 발전소에서 발생하는 부적절한 셧다운 현상은 핵심구성요소들을 손상시키거나 파괴시킬 수 있고, 심지어 엄청난 장애의 원인이 되기도 한다. 허나 핵 시설은 시설의 보호 구조 특성 때문에 예외이다. 분석 및 실험 결과 E1은 많은 경우 발전소의 셧다운 현상을 야기하기에 충분한 손상을 가져온다. 적절한 셧다운은 다중 제어기와 스위치의 동시 작동에 의존한다. 손상된 발전소를 복구하는 데는 몇 달에서 몇 년으로 장기간이 걸릴 수 있다. 또한 발전소의 손실은 시스템 전체의 붕괴를 일으킬 수 있고, 완전한 복구를 불가능하게 한다. 발전소의 보호, 제어 장비 제조사의 제한된 평가 수행과 점차 시스템의 컴퓨터 제어로 가면서, EMP 공격에 더 취약해지고 있다. 장치수준에서 보면 발전소 보호 시스템은 전송망의 보호시스템보다 덜 취약하다.

제어 장비, 보호시스템, 센서와 변류기가 EMP에 반드시 노출되지 않는다는 것은 아니지만 그것들은 발전소 내부에 있다. 일반적으로 발전소 건물 외부에는 케이블이 없기 때문에 건물 자체적으로 보호기능을 제공한다. 그러나 내부 케이블의 길이는 약 100 m 일 수도 있다. 케이블트레이 물질과 설치방법에 따라서, 추가적 보호를 제공하거나 그렇지 않을 수 있다. (Cable Tray 케이블을 지지하기 위하여 사용하는 금속제 또는 불연성 재료로 제작된 유닛 또는 유닛의 집합체 및 그에 부착하는 부착재 등으로 구성된 견고한 구조물) 중요한 것은 EMP 민감성에 대한 장치나 부품 수준의 시험이 아니라 전반적인 제어 및 보호시스템의 EMP 취약성 평가이다. 전체적으로 매우 복잡한 현대의 발전소를 테스트하는 것은 불가능하지만, 테스트를 통해 EMP노출로 인한 시스템 동작 및 서비스 복구 능력에 영향을 줄일 수 있다. E1 EMP에 동시다발적으로 모든 발전소가 노출될 경우 상황이 매우 악화된다.

(2) 송전소

대부분의 발전소는 인구밀집지역 밖에 위치하고 때때로 부하로부터 먼 거리에 위치한다. 일반적으로 전기는 효율적인 고전압 전송시스템에서 먼 거리를 흘러간다. 송전시스템은 다른 송전망 운영, 전압 레벨수준, 제어로 구성된다. 전기가 전기를 필요로 하는 곳으로 전송되어야하기 때문에 각 교점에 송전소가 있다. 송전소에서는 전력선을 결합, 스위칭하고, 전압을 상호 연결 되어 있는 다른 변전소의 전압수준으로 바꾸고, 배전소에 보낸다. 송전시스템은 EMP에 매우 취약하다. 송전시스템의 노드, 중심부에서의 변전제어시스템은 발전소의 변전제어시스템 보다 E1 EMP에 더 노출된다. 보호 계전기를 포함한, 제어장치들은 전자기 감쇄기능을 하지 않는 원격구조일 수 있다. 대부분의 변소들은 사람에 의해 제어, 동작하지 않고 수 백 마일 떨어진 전력분배센터로부터 원격조정에 의해 작동한다. 송전소의 변전소의 작동은 전화기, 마이크로파, 전력선 통신, 휴대폰, 위성 폰, 인터넷, 기타 통신장치 등이 포함된 다양한 통신방식에 의존한다.

일반적인 교란관리시스템과 그들의 전파의 관점에서 보면, NERC(북아메리카 전원시스템)은 전화기가 가장 중요한 통신방식이라고 한다. 비록 음성통신이 완전히 중단된다면, 전화기를 이용한 통신방식이 어렵겠지만, 심각한 시스템 손상이 없다면 불가능한 건 아니다. 허나 동시다발적이면서 다중 손상을 일으키는 EMP의 경우 연속적인 작동이 불

가능하게 된다. 작동뿐만 아니라 통신 없는 복구 또한 불가능 하게 된다. 복구를 하기 위해서는 통신이 가장 중요한 방식이다. 마찬가지로 발전소를 포함하여, 첫 번째 중요한 문제는 보호 요소, 특히 보호 계전기의 적절한 기능이고 그 다음은 로컬제어시스템이다. 보호 장치는 고전압 차단기와 고가의 변압기를 보호해야 한다. 변압기 같은 고가의 중요기능을 하는 시스템을 교체하고 수리하는 데는 매우 긴 시간이 걸린다. 또한 커패시터와 무효 전력 발생기와 같은 다른 보호가 요구되는 장치는 변압기와 마찬가지로 기능적인 측면에서 매우 중요하며 비용적인 측면에서 매우 고가이다. E1 EMP는 보호 계전기를 상당 수 손상시키고 파괴할 것이다. 보호계전기에 E1의 손상 또는 열화로 인해 비보호상태에 놓인다면 고가의 장비는 시스템 붕괴 시 생기는 과도전류로 인해 손상을 입을 뿐만 아니라 E2와 E3로 인해 잠재적인 피해를 입을 수 있다. EMP 전계강도보다 낮은 수준에서의 전형적인 보호 계전기의 취약성 실험을 한 결과 심각한 문제를 일으켰다. 고가의 송전장비는 E3 EMP로부터 큰 손상을 입을 수 있을 정도로 매우 취약하다.

E3 파형은 자유롭게 전파하는 E1, E2파형과 달리 상층 대기 핵폭발에 의해 초래된 지구의 자기장에서의 왜곡으로 인한 파형과 유사하다. 지자기장의 왜곡은 매우 효율적인 전송선에 영향을 주며, 유사 직류 전류를 유도시킨다. 긴 전송선에 유도된 전류는 주요 전력시스템을 손상시키기에 충분하다. 변압기가 손상을 입었을 때, 빨리 대처하기 어려운 것은 변압기의 주요 권선에 유사 직류 전류가 흘러들어 고조파와 무효전력을 만들면서 변압기를 포화상태에 이르게 하기 때문이다. 고조파는 잠재적으로 변압기 화재의 원인이 되는 커패시터에서의 가열, 과전류를 야기할 수 있다.

무효전력은 아직 완전히 붕괴되지 않은 상태인 전력망에 손상을 줄 수 있다. 과거에 발생한 사례를 통찰해보면 E3에 의해 만들어지는 유도전류와 유사하지만, 강도는 덜한 GIC(유도기전류)를 유도시키는 지자기폭풍은 보호 장비, 커패시터, 변압기의 파손을 일으켜왔다는 것을 알 수 있다. 다음 [그림3-5]는 지자기 폭풍으로 인한 변압기 파손의 예를 보여준다.

[그림 3-5] 지자기 폭풍으로 인한 변압기 파손



자료: Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse(EMP) Attack, 2004

E1 때문에 보호가 되지 않는 장비나 전체가 아닌 부분적인 보호가 되는 장비의 손상 규모는 클 것이다. E3 문제의 가능성과 범위는 현재 이용 가능한 작은 전송 마진에 의해 악화된다. 변압기가 작동하는 데에 있어 성능적 한계에 가까워질수록 더 작은 지자기 유도전류로 인해 파손될 수 있다. 게다가 최근의 송전용 변전소는 고전압 전송을 다루기 위해 같은 등급의 3상 변압기는 운송하기 너무 큰 이유로 점점 단상 변압기를 사용하고 있다. 3개 위상 변압기 시스템은 균형적으로 작동하기 때문에 GIC에 덜 영향을 받지만, 단상변압기 시스템은 GIC로부터 3개 위상 변압기보다 훨씬 취약하다.

(3) 배전소

대부분의 미국에서 발생한 정전사태는 지역배전소의 물리적인 손상으로 인하여 발생되어왔다. 물리적 손상은 보통 날씨와 같이 자연적으로 발생하였다. 배전시스템에서의 EMP로 인한 손상 피해는 송전시스템에 가해진 것보다 덜 하지만 여전히 부하의 손실을 초래한다. 배전시스템에서 EMP로 인한 주요한 영향은 나무나 금속으로 된 지지대로

부터 전력선을 분리하는 애자(Insulator)에 걸쳐 생기는 E1에 의해 유도된 아킹 현상 (arching)일 것이다.

아킹 현상은 절연체(애자)자체를 손상시킬 수 있고, 몇몇의 경우 삼일유입변압기 (pole-mounted transformer)의 폭발의 결과를 초래한다. EMP로 인한 영향은 전력시스템 관련 다른 시설에 광범위한 손상과 영향을 주므로 손상된 대량의 애자, 삼일유입변압기와 같은 전력망 부품의 신규 제작 및 공급에 따른 복구 지연을 야기한다.

EMP 공격 시 부하의 손실의 중요한 영향은 그것이 동시에 발생한다는 것이다. 그러므로 이는 전체 전력망의 연쇄적인 정전사태와 파손의 결과를 초래할 수 있다. 유사하게, EMP에 의해 손상을 입거나 파괴된 소비자 또는 산업적 전기 장치는 부하의 손실을 유발할 수 있으며, 더 나아가 시스템의 붕괴를 일으킨다.

(4) E1, E2, E3의 시너지 효과

전력시스템에서의 EMP 효과는 근본적으로 E1(초기시간)효과, E2(중간시간)효과, E3(늦은 시간)효과(각각 EMP의 E1펄스, E2펄스, E3펄스에 의해 초래된 효과이다)로 나뉜다. 광범위한 지역에 동시에 발생하는 EMP에 의한 전력시스템에 끼치는 최종적인 영향은 세 개의 펄스의 상호작용에 의한 영향이다. 미국의회는 NERC(북미전기신뢰협의회) 영역 내에 EMP로 인해 손상을 입은 전기시스템은 거의 붕괴될 것이라고 결론을 내렸다. 그러므로 세 개의 펄스 중에 하나 혹은 그 이상 통합된 EMP 펄스는 주파수 독립적인 NERC영역의 전기 공급 시스템을 중단시킬 것이다. 이 손실은 지리적으로 광범위이고 복구는 발전기와 배터리를 백업시키는 단기간 복구가 가능한 응급상황이 아닌 그 이상이 될 것이다. 단기간에서 장기간 지역적으로 손상을 입히는 EMP의 기초적 위협은 전기시스템과 다른 사회시설을 손상으로부터 복구하는데 걸리는 시간이다.

E1으로 표현된 초기시간과형은 1~수 나노초 미만의 범위에서 상승시간을 갖으며 자유롭게 전파한다. E1과형은 SCADA, DCS, PLC와 같은 전자장치뿐만 아니라 통신, 사람이나 공급에 필요한 운송에도 손상을 입히거나 파괴시킨다. E1은 또한 제어시스템, 센서(감지시스템), 통신시스템, 보호시스템, 발전시스템, 연료시스템, 환경적 완화시스템 그리고 이와 관련된 컴퓨터뿐만 아니라 복구능력까지 파괴시킨다. 특히 SCADA는 사람

에 의해 작동하기보단 원격 환경에 의해 작동된다. SCADA의 중요구성요소(부품)는 보통 금속성상자로 덮여져 있지만, 이것은 보호기능을 하는 차폐상자로서 부적합하다. 이러한 금속성 상자는 단지 기후상태나 약간의 물리적인 충격으로부터 보호되기 위해 설계되어져있을 뿐이다. 또한 그런 금속성상자들은 자유공간이나 안테나로부터 잠입해 들어오는 고출력전자기파로부터 전자장치를 보호하게 설계되어있지 않다. E1펄스는 또한 저전압 배전시스템에서의 섬락(flashover)을 일으키고 전기 부하의 즉각적인 광범위한 손실과 필요전선 또는 복구를 위한 대체용 절연체의 손실의 결과를 낳는다.

E2로 표현된 중간시간 파형은 낙뢰의 대지귀환(ground return) 스트로크(stroke)에 의해 발생하는 전자기장에 비해 진폭은 훨씬 낮지만 매우 유사한 파형을 가진다. 전력시스템은 번개에 대비한 기존의 보호 대책을 가지고 있다. 그러나 광범위한 지역에 동시 발생하는 낙뢰(벼락)는 기존의 보호체계를 초과한다. 가장 심각한 위험은 E1펄스 이후 뒤따라서 발생하는 E2의 상호작용이다. 그러므로 번개 보호시스템을 피해 유도된 E1펄스의 손상자리에 E2가 직접적으로 흘러들어와 주요 시스템구성요소에 손상을 입힐 수 있다.

E1, E2 다음에 유기되는 E3로 표현된 늦은 시간 파형은 1분 이상 지속된다. E3파형은 수초에서 수백 초 동안 지속되는 태양 폭풍에 의해 발생하는 지자기 폭풍에 의한 전자기장과 유사한 파형을 가지지만 침투치 전계 강도는 지자기 폭풍보다 훨씬 더 크다. 따라서 E3는 전력시스템에 훨씬 더 심각한 치명적인 손상을 끼칠 수 있다. 과거 발생사례를 살펴보면 태양 폭풍과 그 영향은 E3보다 낮은 전계 강도에서도 전력시스템의 주요 구성요소가 보호시스템을 갖추었음에도 불구하고에 심각한 손상을 입혔다.

EMP는 전력시스템의 지속적인 작동과 전자장치의 작동에 악영향을 끼친다. EMP 위협수준에서 EMP의 각 3개의 펄스파형은 각각 스스로 상호 연결된 전력시스템의 대부분의 기능적 붕괴와 파괴를 일으키기에 충분하다. 모든 EMP 공격에서 세 개의 공격(E1, E2 그리고 E3)은 차례대로 동시에 유입된다. EMP 공격의 주요 영역내의 전력시스템의 기능적 붕괴는 가상적으로 확실하다는 것이 의원회의 평가이다. 게다가 E1파형을 발생시키는 작은 소형무기로 인해 광대한 기능적 붕괴를 초래할 수 있다. EMP 공격으로 인해 순식간에 광범위한 지역에 전력공급이 중단되어 피해를 입고 있는 동안 중요한 점은 손상을 복구하는데 걸리는 시간이 될 것이다.

나. EMP 노출에 대한 보호 및 복구 대책

전력시스템은 광범위 손상을 일으키는 EMP 공격으로부터 보호되어야 한다. 보호체계를 통하여 EMP 취약성수준을 줄이면 EMP 공격으로 인한 피해규모를 줄일 수 있다. EMP 공격 후의 대책 전략은 가능한 빨리 EMP 공격으로부터 전력시스템의 위험을 줄이는 것이다. EMP에 대해 전력시스템에서의 두 가지 중요한 손상완화전략은 보호와 복구이다. EMP 공격 후 대처하기위한 초기의 초점은 사회적 필요를 충족시키는 기능을 하는 전체적 전기시스템의 복구에 맞춰져야한다. 즉 초기 초점은 전력시스템의 각각 구성요소의 복구가 아니라 전반적인 시스템에서의 복구에 맞춰져야한다. 적시의 복구는 보호에 달려있는데, 손상 후 빠른 복구를 위해 중요 부품에 우선적으로 보호가 필수적이어야하고, 마찬가지로 모든 부하에도 보호가 필수적이어야 한다.

보호를 위해서는 성능, 스케줄, 타이밍, 비용 등의 관점에서의 포괄적이고 전략적으로 접근해야한다. 또한 보호는 예상되는 위협의 수준보다 더 높은 수준에서 비용, 시간적으로 효과적인 방법으로 대처해야 할 것이다. 가능한 전력시스템 대부분에서 보호시스템은 정상작동의 신뢰성을 향상시킬 것이고 사회전반에 더 좋은 서비스를 제공하게 될 것이다. 비상전력공급기, 배터리, 대기 연료 공급기, 교체 부품 그리고 인적 자원과 같은 중요 요소의 부족, 모든 사회 시설과 그 시설의 손상이 동시에 발생하면 이 모두는 복구 능력의 붕괴를 초래 하게 되며, 사회 시설의 복구에 필요한 시간이 늘어나게 될 것이다. 따라서 시스템 복구능력이 다른 무엇보다 가장 중요하다.

(1) 보호대책

EMP 공격으로부터 전체전력시스템 또는 고가의 모든 구성요소(부품)를 보호하는 것은 실용적이지 않다. 구성요소에는 제조사, 제조날짜, 디자인 등 다양한 종류가 있다. 지리학적으로 넓은 지역에서의 EMP 공격 후에 그 지역의 전력시스템의 광범위한 붕괴는 피할 수 없다. 심지어 보호되지 않는 시설 및 부품까지도 말이다. EMP로 인한 피해이후 보호의 초점은 빠른 복구를 가능하게 하면서, 주요부하에 동작의 유지 및 복원하는 것이다.

보호방법에는 다음과 같은 기본적인 측면이 있다. 이것들은 집합적으로 복구와 복구 시간을 감소시킬 것이고, EMP로 인한 최종피해규모를 최소화 할 것이다. 시스템에 대한 공격이 물리적이거나 EMP와 같은 전자기적 이거나 사이버든지 다음에 나올 기본적인 보호측면들이 포괄적이고 합리적으로 행해진다면 시간과 비용 측면에서 피해를 최소화 할 수 있다.

- ① 경화를 통하여 고가 자산을 보호하십시오. 특별한 접지에 제공되는 경화나 다른 대책은 변압기, 차단기 그리고 발전기와 같은 큰 고가의 장치를 위한 보호 장치의 기능 동작을 보장하게하고, 손상을 일으키는 E2, E3으로부터 연속하는 충격에 대해 보호 되도록 한다. 전력시스템 복구에 필요한 주요 시스템인 가스공급시스템과 천연가스 수송시스템의 중요 구성장치의 경화를 통한 보호는 강제적이다.
- ② 시스템 붕괴 시 피해를 최소화하기 위해서 전력시스템 운영자가 이용 가능한 전용의 통신기기가 있어야 한다.
- ③ 비상전력공급기와 연료 전달기의 사용을 보호하고, 주요부하의 보호일환으로서 그들의 지속적인 사용을 위해 제공해라.
 - ㉠ 복구의 임계기간을 확장하기 위해 주요 변전소 및 제어시설에 배터리, 현장발전 능력을 향상시켜라. 이 방법은 상대적으로 저비용이며 신뢰성이 보장 될 뿐만 아니라 모든 공격 형태에 대하여 실질적인 보호를 제공할 것이다.
 - ㉡ 인접지역의 급유 비상 발전기를 포함하여, 수송 및 다른 서비스를 위한 연료를 보장하기 위해 기존탱크의 연료가 없는 발전소 주변에 가솔린, 디젤 주유소와 배전시설이 갖추어야 한다.
 - ㉢ 휴게소나 배전시설에서 요구되는 것과 유사하게 철도에 예비발전을 위한 주유소를 요구하라.
 - ㉣ 비상 발전기의 전원, 작동부와 상호 연결된 기계장치들은 EMP 경화 처리되어 있어야 하고 수동으로 동작해한다. 또한 이것은 비상발전기작동 시 주요전력 시스템으로부터 격리되어 있어야하고 EMP 경화처리 되어있어야 한다.
 - ㉤ 정부는 비상사태 시 보존해야 할 국가에 전략적으로 중요한 전기 부하를 결정

하고 명확히 지정해야한다.

- ④ 상호 연결된 시스템을 여러 개의 비동기식 연결 시스템으로 분할한다. 비동기식 연결 시스템의 재구성을 통하여 시스템의 유지를 위한 능력을 보호하는 것이 매우 중요하여, EMP에 의해 손상된 지역 외에 다른 지역에 피해가 입는 것을 막을 것이다. 이는 재정적으로 효율적이고, EMP로 인한 광범위한 범위의 위협에 대하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다.
- ⑤ 부하분산에 쉽게 고립될 수 있는 특정한 송전소와 연결된 자체기동발전소를 더 설치해라. 자체기동발전기는 반드시 EMP 경화 처리되어 있거나 전자장치 및 기기에 의존하지 않고 수동으로 동작되어야 한다.
- ⑥ 복구능력을 향상시키고 확대해라. EMP공격의 충격을 다루기 위한 절차를 개발하고, 인적자원을 이에 대비해 훈련시키고 EMP 대처 절차 훈련과정을 개발하고 정부와 산업단체가 조직적으로 행동해야 한다. EMP 대처 방안을 개발하는 동안, 훈련과 협조가 주요 목적이다.

(2) 회복과 복구

EMP로 인한 전력손실로부터 피해영향을 최소화하는 것에 있어서 주요한 점은 빠른 복구이다. 복구의 첫 번째 단계는 손상을 입은 시스템의 상태와 손상 범위를 확인하고 그 다음 포괄적인 대책 계획을 실행하는 것이다. 앞에서 설명한 보호방안은 EMP 공격 후에 회복 가능한 상태로 시스템을 보존하는 것이 주요 목표이다. 다음은 미국의회보고서에 기술되어 있는 시스템 손상 시 복구를 위한 대응 방법이다. 이 복구방안은 손상을 입은 전력시스템으로 인한 피해 규모 및 영향을 최소화하는 것이 주목표이다.

① 발전소

- ㉗ 손상된 용광로, 보일러, 터빈 또는 발전기를 대체한다.
- ㉘ 여분의 교체부품이 있으면 몇몇 장비를 수리 및 교체해야 한다. 그러나 수리하는데 걸리는 시간은 공격당한 시점의 전력발전소에 이용 가능한 인적자원, 발전소의 유형에 달려있다.

- ㉔ SCADA, DCS 그리고 컴퓨터 제어시스템을 수리하고 시험해야 한다.
- ㉕ EMP 공격 직후 손상되지 않는 주요 부품이 있다면, 수리되거나 손상을 입지 않은 발전소로 부품을 반환한다.
- ㉖ 위에 언급한 사항들은 모두 연료의 이용가능성에 달려있다.

② 송전소 및 관련된 변전소

- ㉗ 회복할 수 없는 상태의 큰 변압기를 교체한다.
- ㉘ 손상을 입은 변압기를 수리한다.
- ㉙ 수동 제어 시스템을 수리한다.
- ㉚ 애드 호크(ad hoc) 통신을 설치한다.
- ㉛ 손상된 보호 시스템을 수리하고 시험한다.
- ㉜ 변전소의 수리와 복구는 피해 지역의 전력 이용가능에 달려있다. 모든 변전소는 명목상 8시간 동안 충분한 정전방지 전력을 위한 배터리를 가지고 있다. 매우 소수의 변전소만이 현장 비상 발전기를 가지고 있다. 국부 전원이 없다면, 다른 비상 전력이 작동을 위하여 변전소로 보내야 한다.
- ㉝ DC단자는 사람에 의해 운영, 조작되어야 한다.

③ 배전소와 관련된 변전소

- ㉞ 섬락 손상을 입은 애자(절연체)를 교체한다.
- ㉟ 주상 변압기(service transformer)를 교체한다.
- ㊱ 복구 시간은 교체부품, 수리를 할 수 있는 인적자원 및 장비에 달려있다.
- ㊲ 변전소 끝단의 부하가 복구(수리)를 필요로 하는 손상을 입을 수 있다는 것을 명심해야 한다.

2. 다른 사회 시설에 대한 EMP 취약성 및 대책

가. 통신시설

통신시설은 현대사회에의 기능적인 면에서 정말 중요하다. 통신은 은행, 운송, 수송, 에너지 배전소와 같은 주요 사회설의 기능을 가능케 하고 상업과 사업을 촉진하며, 인간에게는 편의를 제공하고 응급상황에 대한 대처를 가능하게 하기 때문이다. 미국은

EMP 공격으로부터 국가 통신시설의 주요 부분을 경화처리하기위해 1985년 이후로 대처 방안이 진행되었다. 통신시설의 네 개의 주요 요소는 유선, 무선, 위성, 그리고 라디오이며 이들은 중복된 기능과 다른 EMP에 대한 취약점이 있다. EMP 공격 후, 시스템의 일부 부분은 손상되지 않을 수 있지만, 엄청난 통신량으로 인한 시스템에 과부하가 걸리게 되고 이는 심각한 통신서비스의 저하를 일으키게 된다. 미국 정부는 미국의 국가안전보장 및 비상대비 통신체제를 이미 개발하였다. HEMP 공격의 경우 비상대비 통신체제의 부정적인 영향은 대부분의 시민들이 통신서비스를 이용하지 못하게 될 것이며, EMP로 인한 피해 대처에 있어 문제를 일으킬 것이다. 대부분의 경우에 국가는 시민들에게 연락할 방법이 없게 되고, 지시사항을 전달할 방법이 없게 될 것이다.

EMP로부터 통신시스템을 보호하기 위해서는 원거리통신센터와 스위칭, 전송, 라디오, 전력 장비 등을 포함하는 통신장비가 있는 건물을 차폐해야 한다. 또한 EMP 위협에 대비하여 추가적 차폐와 낙뢰에 대비한 보호시스템을 갖춘 통신센터 및 관련 건물을 설계하도록 해야 한다. 국제 전기통신협회(ITU-T)는 TD611에서 통신장비설치와 장비유형에 따라 IEC SC 777에 의해 정해진 HEMP 표준기준을 적용하도록 권고하고 있고, 통신장비는 여러 레벨에 따라 HEMP 내성시험을 실시해야 한다. EMP로 인한 전력망의 손상 시 발생할 수 있는 정전상태로부터 통신시스템의 영향을 경감하기 위해 주요통신 시설이 장기간, 광범위한 정전사태에 놓인다면 장기적인 연료공급을 우선적으로 해야 한다. 장기적으로 백업발전기를 유지 및 보수를 해야 하고, 유용성 공급전력의 지속적인 손실로 인한 손상을 견디기 위해 원거리통신능력을 향상시켜야 하며 장기간 전력 공급이 없어도 통신서비스를 제공할 수 있도록 시스템성능을 향상시켜야한다.

나. 연료 및 에너지

미국의 연료 및 에너지 생산 및 유통시스템은 작동을 위해 실시간 데이터 흐름을 사용하고 중요한 프로세스를 모니터링하고 오작동에 신속하게 대처하기 위해 전자센서를 사용하는 전자시스템이 크게 의존한다. EMP 공격은 시스템의 광범위 손실을 초래하는 시스템작동정지를 일으키고, 전자제어시스템, 전자센서 등의 전자장비에 치명적인 손상을 입힌다. 전기, 통신부분에서 동시 발생하는 장애는 또한 연료와 에너지의 가용성에도 영

향을 미칠 것이다. 또한 밸브, 펌프를 작동시키고, 전력과 연료를 운반하는데 필요한 기계장치를 구동시키는데 필요한 전력과 연료는 이용할 수 없게 될 것이다. 정유공장에서 조직화작업에 필요한 현장의 인적자원과 이를 둘러싼 환경의 안전을 보장하는 통신이 거의 작동하지 않게 된다. 결국 연료와 에너지의 부족은 통신과 전력과 같은 사회시설의 복구가 되는 기간 동안 지속될 것이다. 결론적으로 EMP공격이 겨울에 발생한다면 미국은 수많은 사상자 및 피해자가 생겨날 것이다. EMP로 인한 피해에 대처하기 위해 에너지정보공유와 분석센터는 연료와 에너지 산업과 관련된 EMP 문제를 다루기 위한 업무를 확대해야한다. 정부는 EMP 공격과 같은 대재앙의 사태를 대비하여 에너지 및 연료의 저장소 및 비축시설을 설립가능성에 대해 검토할 필요가 있다. 국가핵심자원시설의 보호 방안을 마련하고, EMP 공격에 대비한 훈련 및 연구 등을 수행해야 한다.

다. 운송

미국의 교통 및 운송시설, 화물운송, 통근철도, 항공, 차도, 수로 등 이 모든 운송수단은 점점 더 정보기술과 공동정보통신망에 의존하고 있다. 운송시설이 우수한 성능을 내기 위해서 EMP에 취약한 전자장비에 크게 의존해왔다. 마이크로프로세서 제어된 내연기관, 소형무선주파수식별태그가 장착된 화물선적의 전자 트래킹 등이 좋은 예일 것이다. EMP 공격으로부터 미국의 위협을 평가하기위한 미국 의회보고서에서는 EMP 공격으로 인해 미국운송시설이 상당한 손상을 입을 것이라고 결론지었다. 특히 지장차치도로교통은 교착상태를 경험하게 될 것이고, 신호등은 동작하지 않고, 많은 자동차들이 영구적으로 작동불능 상태가 될 것이다. 또한 철도 교통은 운행 정지되며, 항공운항은 안전상의 이유로 운항중지 될 것이다. 비슷하게 항구에서는 전력시스템과 통신시설이 복구될 때까지의 배의 로딩과 언로딩이 중지될 것이다.

EMP로부터 교통수단을 보호하기 위해서는 교통 및 운송의 전자시스템에 EMP 공격을 감시 및 보호할 수 있는 시스템을 구비하도록 해야 한다. 교통제어센터는 도로 및 철도에 대한 EMP 취약성 검사를 실시 및 평가를 수행해야하고 기타 교통수단의 엔진에 대해서도 EMP 취약성 평가를 실시해야한다. 선박의 경우 EMP로 인한 전력 손실의 위협에 대비하여 비상발전기를 구비하도록 하고 발전기의 실용성을 평가해야 한다. 전기를

동력으로 하는 선박의 로딩 및 언로딩 시스템의 취약성 또한 평가되어야 할 것이다. 항공의 경우 EMP 공격 뒤에 관계시스템을 최소한 기본수준으로 복구할 수 있는 시스템이 구축되어야 한다.

라. 은행 및 재정

거의 모든 미국의 경제활동은 전자기술을 토대로 구축된 금융업종에 의존한다. 개인이나 기관의 거래뿐 아니라 국가적 재산을 보존하고 촉진시키는 대부분의 금융거래는 전자적으로 처리되고 기록된다. 게다가 금융시스템은 상호 관련된 사업을 조정하기 위한 통신과 시스템 작동을 위해 필요한 전력시스템에 의존한다. 2001년 9월 11일의 공격은 주요 사회시설의 분열이 금융시장에 직접적인 영향을 주고, 미국금융시스템에 유동성위험을 증가시켰다는 것을 예증했다. 이에 응하여, 미국 연방준비제도이사회는 미국 금융시스템의 이용가능성을 보장하기 위해 EMP 공격 후 당일 복구를 필요로 하는 주요기능을 명확히 정했다. 이 주요기능들에는 상호은행송금기능, 자동화된 어음교환소의 기능, 주요 어음교환소의 유틸리티, 국고자동경매와 처리시스템 동작 등이 포함된다. 이 름 시스템 각각과 시스템 하부 시설들은 EMP에 잠재적으로 취약하다. 이와 같이 EMP 공격에 의해 위협받을 수 있는 금융서비스업계의 모든 조직은 정산과 청산을 명확히 하고, 복구를 위한 재개시스템을 개발 및 구축해야 한다. EMP 공격에 대처하기 위한 시스템 및 매뉴얼을 마련해야한다. 금융업계의 백업사이트는 주 사이트에서 이용하는 같은 사회기반시설(통신, 연료 공급, 운송, 전력 등)과는 독립적으로 운영되어야 한다.

마. 응급구조 서비스

EMP 공격은 주로 컴퓨터와 통신장비 그리고 전기에 의존하는 응급구조서비스에 영향을 줄 것이다. 응급구조 서비스는 또한 교통수단, 예비발전기, 네트워크 장비의 구동을 위한 연료 등에도 의존하는데, 이들 모두 앞에서 언급한바와 같이 EMP에 취약하다. 그러므로 응급구조 서비스는 EMP로 인한 연쇄적인 피해구조의 다른 주요 사회서비스를 나타낸다. 응급구조 서비스는 위와 같이 전력시스템과 통신시스템에 크게 의존하므로 보호 및 복구를 위해 전력 및 통신 설비는 EMP 보호에 대한 기술적인 기준을 만족

해야하고 정부는 EMP 공격에 대해 즉각적이고 장기적인 응급구조 계획과 절차를 마련하며, EMP 노출 동안 또는 노출 후를 대비하기 위하여 대응 가이드라인을 마련해야 한다.

바. 정부의 대처 및 시민보호

EMP 공격이 발생하면 며칠 혹은 그 이상 동안 전력, 통신 등의 서비스가 중단된다. 이는 장기간이 될 수도 있으므로 정부는 이데 대비한 훈련을 실시해야 한다. 시민들이 신뢰할 수 있는 방송채널을 통해 EMP 사태를 알리고 웹사이트를 통해 EMP 또는 지자기 폭풍에 의한 위협에 대비하는 간단한 매뉴얼을 제공하고, 응급상황통신채널로서 웹사이트를 활용할 필요가 있다. eHow(<http://www.ehow.com>) 사이트에서는 EMP 발생 시 대책에 관한 매뉴얼을 제공하고 있다. 이 사이트에는 EMP 공격에 대비하는 방법, 회로를 보호하는 방법, 자동차를 보호하는 방법에 대하여 명시되어있다.

(1) EMP 공격에 대비하는 방법

- ① 컴퓨터에 있는 중요한 정보를 백업하고 모든 전자 장비를 차폐상자(shielding box)로 보호해야 한다. 차폐상자는 도체로 만들어진 속이 비어 있는 밀폐된 상자나 전도성 물질로 만들어진 그물망으로 전기장을 차단시킨다.
- ② EMP에 노출되었을 때 손상을 최소화하기 위해 이용하고 있지 않은 전자장비들의 플러그를 뽑아 놓아야 한다. 차폐박스에 의해 차폐되더라도 전력선이나 파이프를 통해 유입되어 전자 장비를 손상시킬 수 있기 때문이다.
- ③ 서지억제장치를 전원단자와 컴퓨터 단자 사이에 설치해놓아야 한다.
- ④ EMP로 인한 전자장비의 연소가능성에 대비해야 한다.

(2) EMP로부터 회로보호 방법

- ① 동 케이블을 금속제 배관으로 감싸면, 전자파 에너지 유입부를 금속제 배관이 차단한다.
- ② 네트워크 케이블은 중요한 시스템들과 연결되어 있기 때문에 구리 케이블이 아닌 광케이블로 대체해야한다. 구리케이블은 양도체이기 때문에 EMP로 인한 전자파를 흡수 중요장비에 유기시켜 손상을 일으킬 수 있다.

- ③ 구리 망으로 만들어진 차폐상자를 설치한다.
- ④ 전력망으로부터 전자 장비를 이격시켜놓는다.

(3) EMP로부터 자동차보호 방법

- ① 자동차의 타이어압력을 표준상태로 유지해야한다. 모의실험결과 표준압력 타이어가 EMP로부터 차를 보호하는 것으로 분석되었다.
- ② 자동차 차체는 금속본체보다 유리로 된 경우가 더욱 EMP 노출로부터 안전하다.
- ③ 금속이 많은 지역이나 금속으로 된 길을 운전하는 것을 삼가야 한다.

미국 헤리티지재단의 보고서에 의하면 전자파 펄스에 의해 단지 하루만 정전 사태가 일어나도 약 7조원에서 10조원 정도의 사회적 비용이 초래될 것으로 예측하였다. 또한, 미국 EMP 위원회 보고서에 따르면 강력한 태양 활동으로 인한 경제적 피해는 1조에서 2조로 추산되었으며, 약 4~10년의 복구시간이 필요하다고 보고되었다. 우리나라의 경우는 작은 영토에 전력, 통신, 교통 시설 등을 밀집하여 설치하였기 때문에, EMP 등이 발생하게 되면, 매우 큰 피해가 발생할 것으로 예상된다.

<표 3-4>는 통계청 자료에서 인용한 우리나라의 위성, 정보통신, 전력 시스템의 구축 및 자산 비용이다. 표를 보면 알 수 있듯이 국내의 전력, 통신, 위성 시스템의 구축 및 자산 비용이 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 의도적인 장치 및 무기에 의한 전자파 펄스나 태양활동으로 인한 자연적인 고출력 전자파 펄스에 의한 공격 시 경제적으로 대단히 큰 손실을 입는 것을 것이다. 이러한 피해를 대비하기 위하여 우리나라도 미국과 같이 각 사회시설에 대한 전자파 펄스 보호대책을 마련하고, 지자기폭풍으로 인해 발생한 고출력 전자파 펄스로부터 대비하기위해 지자기폭풍 예보 및 경보 시스템을 마련해야 한다.

<표 3-4> 우리나라의 전력, 정보통신, 위성의 구축 및 자산 비용

(단위: 억원)

시설	비용
전력시스템	약 1,082,440
정보통신	약 743,982
아리랑 1호	약 2,241
우리별 1호	약 38.2
우리별 2호	약 31.2
우리별 3호	약 80
과학기술위성 1호	약 116
무궁화 1호	약 654
무궁화 2호	약 1,352
무궁화 3호	약 2,835
한별	약 743,982

자료: 전력시스템은 전력공사, "한국전력통계", 정보통신은 통계청, "정보통신산업 총괄", 인공위성은 "우리나라 인공위성의 활용 및 피해 사례", 2005

제4장 우주전파환경 위험지수의 고찰

제1절 대표적 우주전파환경 지수

우주환경 피해를 최소화 하기 위해서는 예·경보 시스템의 운영이 필요하며, 전파연구원을 비롯한 국내외 유수의 기관에서 이를 현업화 하기 위해 노력하고 있다. 여기서 예·경보를 효과적으로 하는데 가장 적합한 우주환경 지수에 대한 고찰이 필요하다. 나아가 이러한 지수를 예측 하는 모델의 개발이나 기존 모델의 개량이 필요하다. 먼저, 고고도 고출력 전자기 교란과 관련된 주요 우주환경 교란 현상은 자기폭풍 발생, 서브스톰 발생, 방사선 벨트 대 교란 임을 명심해야 한다. 즉, 웬만한 자기권 및 전리층의 우주환경 교란은 이 세 가지 유형의 교란에 직간접적으로 연관된다. 그렇다면, 이 세 가지 현상을 가장 잘 대변하는 지수를 예·경보 할 수 있어야 의미가 있겠다. 그 세 가지 지수는 Dst, AE(혹은 AL), 그리고 Kp이다.

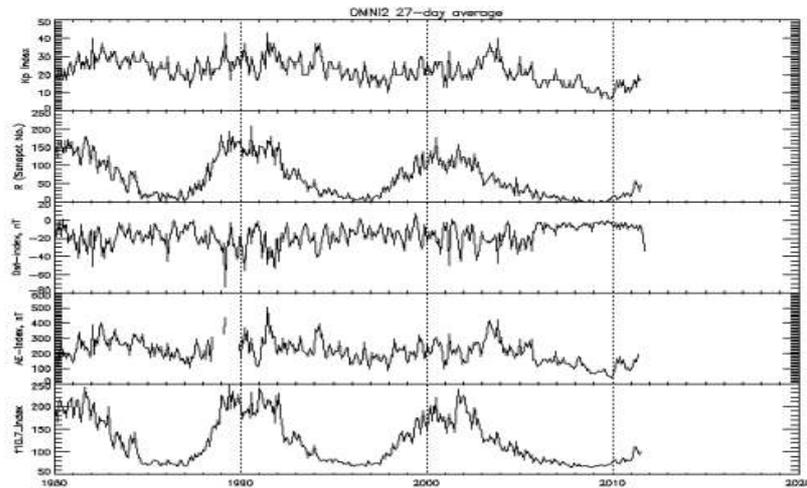
Dst는 지구 적도 근처의 지자기 변화를 대변하며, 환 전류의 발생을 나타내는 지수임이 익히 잘 알려져 있다. 또한, 태양 흑점이 많은 기간에 자기폭풍이 더 자주 발생 한다는 점도 잘 알려져 있다. 따라서 Dst 예측 모델의 필요성은 더 강조할 필요가 없다.

AE(AL)은 고위도 지역의 지자기 변화를 통해 산출되며, 전리층 전류 (electrojet)의 변화를 모니터링 해 준다. 특히 서브스톰이 발생하면 AE(AL)의 강한 변화가 나타나므로, 이 지수의 예측 모델을 통해 서브스톰의 발생 여부를 전달해 줄 수 있다. 하지만, 서브스톰의 발생에 대한 문제는 지수의 예측 문제를 넘어서는 매우 난해한 문제로 남아 있어서 AE(AL) 지수의 정확한 예보 가능성 여부가 아직 분명한 결론을 내기 어렵다.

Kp 지수는 자기위도 45-65도 사이의 전 지구적 지자기 교란을 나타낸다. Kp 지수가 중요한 이유는 방사선 벨트의 교란과 직결된다는데 있는데, 이를 잘 알고 있는 사람은 (전문가들을 제외 하고는) 그리 많지 않다. Kp 지수가 높으면 지구근접자기권 공간내의 대전 입자의 운동에 소위 radial diffusion 현상을 활발히 유도할 수 있고, 이는 곧 방사선 벨트 대 고에너지 대전 입자의 생성 혹은 감소에 중요한 역할을 한다. 따라서 Kp 지수에 대한 정확한 이해와 예보가 필요한 것이다. 또 한 가지 많은 사람들에 의해 간

과 되는 점은, Kp 지수는 태양 흑점수가 줄어드는 단계 (즉, sunspot declining phase, 예를 들면 1992-1994, 2003-2005년)에서 상당히 증가하는 교란 현상을 보인다. 사실은 이때 AE 지수도 비슷한 현상을 보인다. 아래 [그림 4-1]에 이 같은 사실을 보였다. 이 그림에서는 27-day 평균값들을 사용하였는데 이와 같은 특징이 잘 나타나고 있다.

[그림 4-1] 1980년부터 2011년 사이의 여러 지수 비교

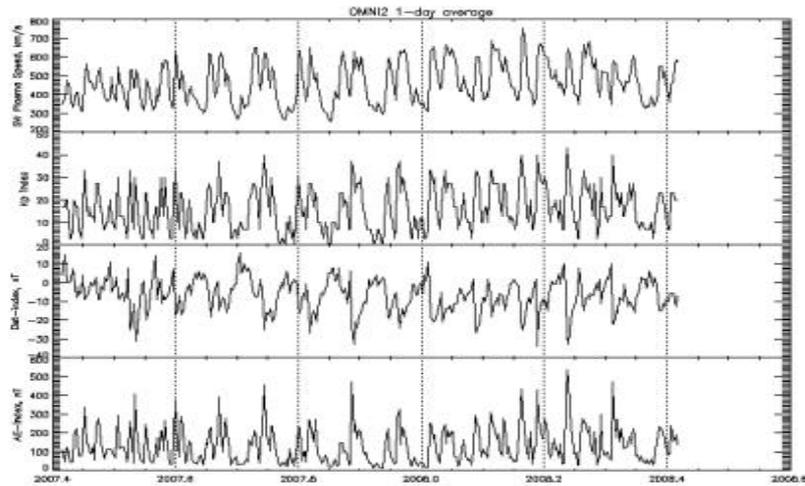


이와 같은 Kp 교란 현상은 solar declining phase 동안에 코로나홀에서 나오는 초고속 태양풍 (high speed stream)과 깊은 연관이 있다. [그림 4-2]에 SDO 위성으로부터 최근 얻은 태양 이미지를 보였는데, 코로나 홀의 위치를 표시하였다. [그림 4-3]는 2007년부터 약 1년간의 태양풍 속도, Kp, Dst, AE 지수를 비교한 것을 보여주는데, 1-day 평균값을 이용하여 1년간의 기간에 대한 close-up view를 보였는데, 초고속 태양풍(가장 위 패널)이 지구 자기권에 충돌하면 Kp 지수는 지속적인 증가 현상을 보인다. 또한 바로 이러한 때 방사선 벨트의 입자 플럭스가 상당히 증가되는 현상을 보인다.

[그림 4-2] SDO 위성의 태양 이미지

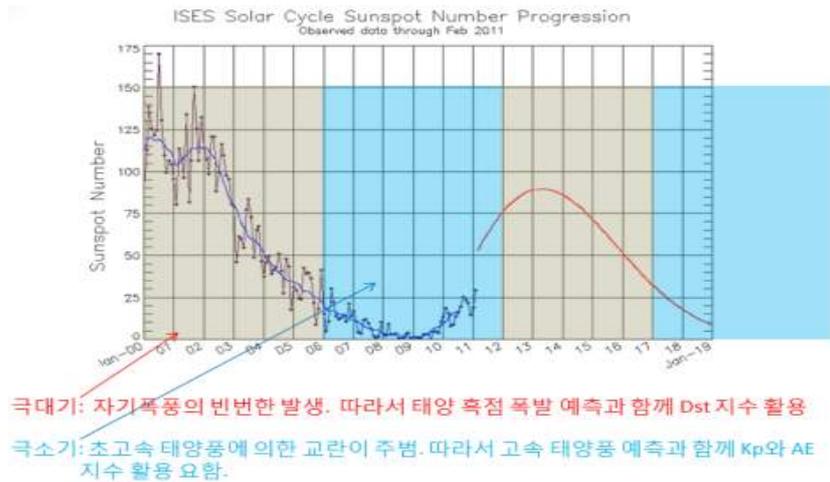


[그림 4-3] 태양풍 속도, Kp, Dst, AE 지수 비교



위의 논의를 바탕으로 아래 [그림 4-4]에 태양 흑점 사이클에 맞춰 필요한 주요 우주 환경 지수에 대해 요약적으로 보였다.

[그림 4-4] 태양 흑점 사이클과 우주환경 교란 지수 사이의 연관성



제2절 기존 우주환경 지수의 한계

일반적으로 우주과학의 전문가가 아니면, 현존하는 우주환경 지수의 의미와 새로운 지수 개발의 어려움을 잘 알지 못하는 경우가 많은데, 이런 사정이 국내 우주환경 예보 업무에 종사하는 사람들에게 제대로 전달되지 못하였다. 앞 절에서 언급한 Dst 지수와 AE(AL) 지수를 예를 들어 설명해 보겠다.

보통 Dst 지수는 단순히 환전류의 변화만을 반영하는 것으로 생각하기 쉽다. 그러나 실제로는 Dst 지수 속에는 환전류 외의 다른 물리적 현상이 복합적으로 들어갈 수 있으며, 이 때문에 완벽한 환전류 지수라고 할 수 없다. 자기 폭풍이 발생하는 주상기(Storm main phase)에는 자기권 꼬리가 매우 길게 늘어진다. 이에 맞춰 꼬리 전류(tail current)가 강하게 증가하게 된다. 이는 환전류가 미치는 영향과 같은 식으로(즉, 같은 방향으로) 저위도 지상 자기장의 감소를 유발한다.(따라서 Dst 지수의 감소에 기여한다는 것이다). 그런데, 자기 폭풍이 진행 중인 도중에 서브스톰이 종종 발생한다. 이때 이미 증가되었던 꼬리 전류는 급격히 감소하게 되는데, 이는 저위도 지상 자기장의 일시적인 증

가로 나타난다.(따라서 Dst 지수의 증가에 기여한다). 그러나 이와 동시에 서브스톰은 고에너지 대전 입자를 양산하게 되는데, 이는 곧 환전류에 합류하게 되어 결과적으로 환전류를 강화시키는 효과를 낳는다. 이 효과는 저위도 지상 자기장의 감소에 기여한다.(즉, Dst 지수의 감소에 기여 한다). 이 뿐만 아니라, 서브스톰이 발생하면, 야간지역 자기장선을 따라 큰 전류가 새벽지역 MLT에서는 지구로 들어가고, 저녁 지역 MLT에서는 지구로부터 나오는 식의 새로운 전류 회로가 형성된다. 이는 서브스톰 발생 전에는 존재하지 않는 새로운 전류 회로로서, 이 회로에 대해 상대적으로 Dst 지수를 산출하는 저위도 자기 관측소가 어느 정도에 위치하느냐에 따라 Dst 산출에 미치는 결과가 달라질 수 있다. 즉, Dst 지수의 감소에 기여하기도 증가에 기여하기도 할 수 있다. 이와 같이 Dst 지수는 순수하게 환전류 만을 대변하는 완벽한 지수가 아님을 전문가들에게는 익히 잘 알려져 있다. 오래전 이 지수가 고안되었을 초기에는 쉽게 자기 폭풍을 모니터링하는 지수이기를 바라고 만들어진 것이다. 그러나 그 후 학자들 사이에서 이 지수가 그다지 간단한 지수는 아니라는 것이 인식되었고, 학문적 차원에서 많은 논란과 연구가 계속되어 왔다.

우주환경 교란과 예·경보의 관점에서 보면, 자기 폭풍이 발생 했는데 큰 피해가 없는 경우도 많고, 또 그 반대로 자기 폭풍이 크지 않은 것 같은데 분명한 피해가 보인 경우도 자주 있다. 사실 우리 연구진의 연구에서도 이러한 사실이 나타났다. 이러한 불일치성의 한 이유는 바로 Dst 지수가 완벽한 자기 폭풍 지수로서 역할을 하지 못하기 때문이다. 그러나 현재로서는 Dst 지수보다 더 나은 자기 폭풍 지수를 제시하기는 어렵다. 즉, 더 나은 대안이 없는 실정이므로, Dst 지수의 예측 모델 개발에 투자하는 것이 차선책 이라고 하겠다.

AE 지수의 경우도 비슷한 설명이 가능하다. 먼저, AE 지수는 AL, AU 지수의 보완적 개념에서 나온 것으로 봐야한다. AL은 Westward electrojet에 의한 오로라 위도 지역에서 지자기 변화 최저값을 AU는 Eastward electrojet에 의한 지자기 변화의 최고값을 매 산출 시각마다 (관측소의 위치에 상관없이) 선정하여 시간 변화 그래프를 그린 결과이다. 따라서 AL은 음의 값을, AU는 양의 값으로 나타나는 것이다. 사실 이 지수가 이런 경로로 산출 된다는 사실을 정확히 알고 있는 사람이 그리 많지 않다. 그러나 무엇보다 중요한 것은, 이 두 지수가 오로라 고위도 지역에서의 지자기 변화를, 따라서 그

상공에서의 전리층 (동서 방향의) 전류를 대변한다는 것이다. 그런데, 주어진 지자기 관측소에 볼 때 지자기 변화는 고위도 electrojet에 의한 변화 뿐 만 아니라 주변의 다른 어떤 전류에 의해서라도 자기 변화가 합해 질 수 있는 것이다. 마치 위에서 Dst의 경우에서와 유사한데, 가령, 환전류에 의한 자기장 섭동은 당연히 저위도에서 가장 강하고 분명하게 나타나지만, 기본적으로는 어디서나 그 영향을 미치게 된다. 따라서 고위도 지역에도 그 영향이 미치게 되며, 따라서 AL, AU의 산출 값 안에 전리층 고위도 electrojet의 영향 뿐 만 아니라, 환전류의 영향도 들어가게 된다. 즉, AL, AU 값이 고위도 전리층 electrojet의 순수한 지수라고 할 수 없는 것이다. 그런데, 다행인 것은 만약 환전류가 지구 주변에 대체로 대칭적으로 흐른다면, 환전류가 미치는 정도는 AL과 AU에 같은 양 만큼 같은 방향으로 미치게 된다.(즉, 모두 감소하는 수평성분 효과). 따라서 AU-AL을 사용하게 되면, 이 대칭적이고 공통적인 환전류의 섭동 효과가 빠지게 되는 것이다. 따라서 고위도 전리층 electrojet의 보다 효과적인 지수가 될 수 있는 것이다. 이것이 바로 AE가 만들어진 계기인 것이다. 그러나 AE든 AU, AL이든 한 가지 치명적인 약점은, 만약 강한 자기폭풍이 발생하면, 전리층 고위도 electrojet이 상당히 중위도쪽으로 이동해 존재 할 수 있다. 이런 경우, AE, AL, AU를 산출하기 위해 운영되는 지자기 관측소는 고위도 지역에 고정되어 있기 때문에, 실제 전리층 electrojet을 제대로 모니터링하지 못하는 상황이 된다. 실제로, AE, AL이 서브스톰 지수로 알려져 있지만, 서브스톰의 발생과 잘 맞지 않는 경우가 종종 발생한다. 따라서 이러한 지수 역시 서브스톰 우주환경의 완벽한 지수가 아닌 것이다. 그러나 이 역시 우리에게는 다른 대안이 없는 것이 현실이며, 전문가들은 이 지수와 더불어 다른 여러 종류의 관측과 측정 자료를 종합하여 사용하고 있는 것이다.

이와 같이 우주환경(자기권 및 전리층)의 변화를 나타내는 대표적 지수조차도 실제로는 매우 복잡한 사연을 안고 사용되고 있다. 이는 기본적으로 태양풍-자기권-전리층 시스템이 여러 복잡한 전류계로 얽혀 연결된 계이기 때문이다. 이 때문에 외부의 어떤 변화도 여러 전류 시스템을 동시에 복합적으로 교란 시키게 되고 이것을 하나의 간단한 지수로 제시하는 것이 거의 불가능에 가까운 것이다. 사정이 이러할 지니 새로운 지수의 개발은 현실적으로 매우 어려운 일이라고 할 수 있다.

제3절 일반인을 위한 우주전파환경 지수 개발의 필요성과 어려움

우주환경 전문가들이 제시하는 다양한 지수와 현재까지 가장 대표적으로 사용되고 있는 Dst, AE, Kp 등의 지수는 일반인들에게는 여전히 어려운 지수임에 틀림이 없다. 분명 일반인들에게 보다 쉽게 전달할 수 있는 간단한 지수의 개발이 궁극적으로 필요한 것은 사실이다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 Dst, AE, Kp 등과 같은 대표적인 기존의 우주환경 지수조차도 분석이 매우 복잡하며, 쉽게 접근할 수 없는 것이 현실이다.

요즘 일상의 기상 예보에서는 비가 올 확률과 습도 등은 물론이고 나아가 친 생활적인 지수(가령, 불쾌지수, 세차지수 등)까지도 제공하고 있다. 그러나 한 가지 분명히 간과해서는 안 되는 것은, 이러한 친 생활적인 지수의 제공이 가능하게 된 배경에는 물리적 차원에서의 기상 예보 모델이 작동하고 있다는 것이다. 이는 아주 오래전부터 개발된 것이다. 반면, 우주환경 분야에서는 아직 완벽한 예보 모델이 그다지 많지 않다. 대표적으로 우리가 사용하는 Dst 지수의 변화를 충분히 일찍 그리고 정밀히 예보하는 모델을 갖고 있는 것이다. 하지만, 이러한 대표적인 지수로도 자기 폭풍이 언제, 어느 정도로 발생하여 어떤 결과를 구체적으로 초래 할지 예보 할 수 없는 것이 실정이다. 또한, AE, AL지수의 변화에 대한 예보가 불가능한 현실이다. 하지만, Dst, AE, AL 지수보다 더 광범위하게 사용되고, 효과적으로 분석할 수 있는 모델은 아직까지 없다고 본다. 앞에서 언급 했듯이 AE, AL은 서브스톱 지수이다. 그런데 서브스톱은 그 발생 자체가 완전히 이해되지 않고 있는 현상이며 전문가들 사이에서 오랫동안 논란으로 남아 있다. 따라서 AE, AL의 정확한 예보를 현 단계에서 기대 할 수 없는 실정이며, 또한, Kp 지수를 예측하고 이를 바탕으로 방사선 벨트 변화를 정확하게 충분히 미리 예보 할 수 없는 실정이다. 방사선 벨트 입자는 통신위성 등의 운영에 중요한 정지궤도 공간까지 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 예보가 매우 중요하지만, 적절한 예보 모델은 아직 존재하지 않는다. 만약 우리가 진정 친 생활적인 우주환경 지수를 원한다면, 대표적 우주환경 변화를 제대로 모사하고 재현하는 물리모델의 완성이 선행되어야 가능한 것이다. 이러한 모델이 아주 고급 수준으로 개발되어 예보 기능이 정말로 가능할 때 우리도 이제 “우주환경으로 인한 불쾌지수” 같은 것을 고안 할 수 있는 것이다. 가령, 기상학 분

야에서는 예보에 성공적으로 활용되는 자료동화 모델을 이미 40여 년 전부터 개발하였다. 반면, 전리층에서는 1980년대부터, 자기권 분야는 겨우 몇 년 전부터 자료동화 모델을 응용하기 시작하였다. 이것이 우주환경 분야의 현재 사정이기 때문에 친 생활적인 지수의 개발은 아직 시기상조라고 하겠다. 국내의 대학과 연구소에서는 우주환경 지수의 배경에 깔린 물리모델의 자체 개발에 더욱 투자해야하며, 이는 분명 시간과 인내심이 필요한 일임을 모두가 인지해야 한다고 본다. 그렇지 않으면 지금과 같이 외국의 모델을 빌려다 그림만 전시하는 수준에서 벗어나기 어려울 것이다.

제5장 결 론

본 연구에서는 HEMP/HPEM과 같이 고출력 전자파 연구, 대책과 지자기 폭풍 같은 우주전파환경 변화에 따른 지구의 통신망, 위성망, 전력망 등의 피해 사례, 태양의 흑점의 발생 같은 우주환경변화와 지구 주변의 복사환경 변화에 대한 상관관계를 연구 및 조사하였다. 고출력 전자파는 국가의 전체시스템을 한 순간에 마비시킬 수 있는 재앙 같은 존재로 여겨지고 이에 대한 대비방안 연구가 많은 나라에서 활발히 이루어지고 있다. 더구나 요즘은 고출력 전자파 발생기가 소형화되고 심지어 인터넷을 통해 유통, 판매되면서 고출력 전자파에 대한 테러위험이 커지고 있음을 연구 본론을 통해 확인할 수 있으며, 이에 대한 대책등도 많이 연구가 되고 있다. 이러한 고출력 전자파로 인한 피해가 핵폭발이나 인위적인 전자파 발생기가 아닌 우주전파환경변화로 인해 일어날 수 있음을 많은 사례나 기사 등으로 확인할 수 있었다.

고출력 전자파펄스는 전자 장비를 물리적으로 파괴시킬 수 있을 정도의 강력하고 순간적인 전자기적 충격파를 말한다. 고출력 전자파 펄스는 지상에서의 핵폭발에 의해 발생하는 HEMP와 지상에서 의도적으로 전자파 장애 현상을 일으킬 수 있는 HPEM으로 분류한다. 자연적으로 발생하는 낙뢰에 의한 LEMP와 ESD도 HPEM에 속한다. 고고도 전자파 펄스(HEMP)는 핵폭발로 인해 유도되는 전자파 펄스를 뜻한다. 이러한 HEMP의 스펙트럼 밀도는 매우 넓은 주파수 대역에 걸쳐 퍼져있으며, 고출력 초단 펄스와 같은 초 광대역 UWB 신호, HPM, HRF 등과 같은 협대역 고출력 전자기파 등이 마이크로파 대역에서의 위협 요인이 되고 있다. HEMP의 영향은 미국과 구소련의 핵폭발 실험으로 알려지기 시작했다.

EMP는 핵전자기펄스(NEMP)와 비핵전자기펄스(NNEMP)로 구분된다. 핵전자기펄스(NEMP)는 핵폭발시 방출되는 대규모의 전자기파를 이용하는 방식으로 피해영역이나 피해정도가 넓고 치명적이지만 이는 핵폭발을 이용하는 것이기 때문에 핵폭발의 통제가 매우 어렵고 고가라는 단점이 있다. 비핵전자기펄스(NNEMP)는 크게 화학에너지에 의한 펄스전력을 이용하는 EMP탄, 전기에너지에 의한 반복적 펄스전력을 이용하는 HPM(High Power Microwave)무기 등이 있다. EMP 탄은 핵폭탄이 터질 때 발생하는

강력한 전기장이 컴퓨터, 전자기기를 무력화하는 현상을 이용한 것으로 전력공급선, 통신케이블, 공기정화용 통로, 빈 공간 등을 통해 침입해 들어가 전기 공급선과 변압기, 전원이 켜져 있는 모든 제품에 많은 양의 전자기파를 만들어 일시에 사회기반 시설을 마비시키는 장비이다. HPM 무기는 항공기, 함정, 차량에 탑재되는 1 기가 와트(GW) 이상의 전파교란 장비다. 2000년대에 접어들면서 미국, 러시아, 중국 등 핵보유국을 중심으로 EMP 폭탄 개발이 가속화 되었다.

고출력 전자파 펄스에 대한 방호 대책은 경계 구역에 따라 각기 다른 대책 기법이 사용되며, 각각의 구역을 외부 공간, 건물, 방, 장비 등으로 구분하여 필요한 보안 조치를 하고, 요구되는 대책을 강구해야 한다. 이러한 대책에 전형적으로 전자파 차폐, 전원선 및 신호선 필터, 그리고 과도 전류 및 전압에 대한 선형 대책 부품 및 비선형 대책 부품 등이 요구 된다. 미국은 EMP 위원회를 설치하여 국가의 중요 기반 시설에 대한 취약성 및 대응 방안을 강구하고 있고, 유럽연합, 일본 등에서도 고출력 전자파에 대한 방호 대책 및 가이드라인을 만들고 있고 전자파 펄스 공격을 테러로 간주하여 대응방안을 마련하고 있다.

태양폭발이 일어나면 강한 엑스선과 극자외선이 생긴다. 이런 파장은 지구 전리층까지 도착해 전자의 밀도를 높이는데, 이 때문에 통신이 끊어질 수 있다. 전리층은 30 MHz보다 짧은 주파수의 전파를 반사하는 성질을 가지고 있다. 이런 성질은 원거리 통신에 이용돼 왔다. 그런데 태양폭발 때문에 전리층에 있는 전자의 밀도가 변하거나 자기장폭풍 때문에 전리층이 교란되면 통신에 장애가 온다. 현재 우리가 사용하는 위성통신뿐 아니라 위성을 활용한 항법 시스템은 여러 곳에 사용되고 있다. 이런 신호는 모두 전리층을 통과하고 있으므로 전리층의 밀도가 변하거나 교란되면 통신장애가 생기거나 항법시스템에 문제를 일으킨다.

지자기 폭풍이나 태양활동 등 우주환경변화가 지구에 영향을 주기 때문에 우주환경변화와 지구 복사환경 변화에 대한 상관관계를 알기 위해 2000년부터 2010년까지의 기간 동안 발생한 지자기 폭풍을 조사하고 정리하였다. 지자기 폭풍은 Dst 최소값이 -50 nT를 넘어서는 경우로 기준을 정하고, 보통 하는 관례에 따라 지자기 폭풍 사건을 선정하였다. 그 결과 2000년부터 2010년 사이에 214건의 지자기 폭풍을 선정하였다. 이는 연평균 11.5 건의 발생률을 의미한다. 이중에서 2000년부터 2005년 사이에 191건이 발생하

여 전체의 약 89%를 차지하고, 2006년부터는 그 발생이 현격히 감소하였는데 이는 태양 흑점 감소기와 일치하는 결과이다. 가장 강한 지자기 폭풍은 2003년 11월 중에 발생 한 것으로서, Dst 최소값이 -422 nT에 이르렀다.

지자기 폭풍 발생 기간에 대해 태양 전파 플럭스 F10.7 및 전리층 foF2 지수를 조사 한 결과, foF2 지수는 가능하면 한국 관측소에서 얻을 수 있는 경우로 우선하였는데, 주로 오산과 안양 관측소 값을 얻을 수 있었다. 그 외에는 외국, 특히 주로 아시아권에서 관측이 이루어진 경우로 구성된다. 그러나 일부 지자기 폭풍 날짜 중에는 foF2 자료가 없기도 하여 자료 정리에 누락되어 있다. 이러한 경우는 전체 지자기 폭풍 기간의 30% 가 넘는 정도를 차지한다. 자료가 있는 경우의 절반 이상은 오산이나 안양의 자료로 구성되어 있다. 자료 분석 결과 어떤 경우에는 지자기 폭풍 동안 foF2의 값에 심한 교란이 분명히 보이기도 하며, 이러한 특성에 대한 보다 조직적인 분석을 수행하고 있다. 오산의 전리층 관측 자료를 얻어 분석한 결과 지자기 폭풍 중과 폭풍 전후에도 많은 교란이 있고, foF2의 값이 크게 변하는 것을 확인할 수 있었다.

시간으로 보면, 태양 흑점 수와 F10.7 플럭스량의 변화, foF2 지수 사이에 양성적 비례 관계가 명확하다. 또한 흑점수가 많은 태양 극대기 기간에 지자기 폭풍 발생 빈도도 높다. 이것은 위에서 이미 언급하였다. 즉, 2000년부터 2004년 정도의 기간 동안 지자기 폭풍 발생 빈도가 집중적으로 높고, 그 이후에는 크게 떨어졌다. 그런데, 이러한 "long-term" 상관관계에 비해 특정 지자기 폭풍이 발생할 때 태양 플럭스 변화량, foF2 지수 변화 사이의 "short-term" 상관관계는 분명치 않다. 본 연구에서는 바로 이러한 점을 중점적으로 추가 연구하고 있다. 피해 사례로서는 본 연구 과제의 당초 목표와 취지에 맞는 고출력, 고고도 전자기적 교란을 중심으로 조사 하였다. 그리고 태양 폭발이나 지자기 폭풍 발생과 관련된 통신교란 사례, 위성의 궤도 및 자세 교란 사례, 지상 변전소, 변압기 피해 사례 등을 조사 대상으로 연구하였다. 사례를 조사한 결과 지자기 폭풍이 발생하였을 때 일부 지역에서 통신 장애, 전력망 장애 등 피해가 발생했음을 알 수 있었다. 이는 지자기 폭풍에 의해 유도된 전자파펄스로 인해 발생하는 것이며, 미국 EMP 위원회보고서 및 EMP관련 자료를 분석한 결과 지자기폭풍으로 인해 유도된 전기장은 EMP-E3와 전계강도는 다르지만 유사한 파형을 가진다는 것을 알 수 있었다. 또한 피해 측면에서도 환경적으로 유사한 점을 감안하면 EMP에 대한 전력, 통신 기타 사회

시설의 보호대책은 동시에 지자기 폭풍으로 부터의 시스템 보호 대책이 될 것이라고 분석된다. 미국 EMP위원회 보고서에 의하면 강력한 태양폭풍은 국가에 엄청난 금액적 손실을 가져올 뿐 아니라 복구에 있어서 긴 시간이 필요로 한다. 더욱이 우주환경변화로 발생하는 자연적인 고출력 전자파 펄스의 공격은 피할 수 없다. 이에 미국의 SEC, 일본의 NCIT, 유럽연합의 ESA, 호주의 IPS 등 각각의 기관에서는 우주 환경 연구를 활발히 진행하고 있으며 그에 따른 예보와 경보를 체계적으로 시행하고 있다.

국내는 각 연구기관 별로 우주환경에 대한 자료를 잘 축적하고 있으나, 각 기관별 협력을 통한 예보 및 경보 시스템을 갖춘 상황은 아니다. 따라서 각 기관의 장점을 살려 전문화된 연구 결과와 우주환경 자료들을 통합, 관리하여 체계적인 예보 및 경보시스템을 갖추어야 한다.

참 고 문 헌

국내 문헌

- 정연춘(2010), 『전자파 보안 기술 동향』, 전자파기술, 한국전자파학회
- 민경찬, 정용관 (2011), 『고고도 핵전자기파/HEMP 방호기술 개발 동향』,주간기술동향, 제 1491호, 한국정보통신산업진흥원
- 정보통신 산업 진흥원(2010), 『전자기펄스 표준화 동향 연구,주간기술동향』 통권, 1464호
- 최호열, 이원빈, 이재복 (1995), 『EMP 필터 제작 및 성능 시험』 한국통신학회 학술대회 논문집 (마이크로파/전파) 제19권 2호, 한국통신학회
- 재난포커스(www.di-focus.com) (2011), 『제5의 재앙, EMP 신년 좌담회』
- 조규표, 천제희 (2007), 『핵 및 전자기 펄스 무기의 EMP 방호 대책 연구(1)』,국방과학논단, 국방과학기술, pp, 52-59
- 조규표, 천제희, “핵 및 전자기 펄스 무기의 EMP 방호 대책 연구(2),” 국방과학논단, 국방과학기술, pp. 54-63, 2007
- 오택수 (1991), 『전자파 차폐용 고분자 복합재료』 고분자과학기술, 2(3), pp.179-190
- 조경석, 문용재, 김연한, 최성환, 김록순, 박종욱, 김해동, 임무택, 박영득, (2004), 『2003년 10월의 태양활동과 우주환경의 영향』,우주과학회지 제21권 제4호, pp. 315-328
- 전파연구소 연구보고서 (2006), 『태양폭발 등 우주전파환경에 대비한 대응방안 연구』
- 전파연구소 연구보고서 (2004), 『고출력 과도전자파 발생에 따른 정보기기 보호 기술에 관한 연구』

해외 문헌

- William Radasky et al (2009), 『HEMP and IEMI Threats, Impacts and Protection』
- Lt. Col. David M. Fiedler (1987), 『Protecting against electromagnetic pulse』, Army Communicator, 1987.
- 2004, 『Report of the Commission to Assess the Threat to the United States form Electromagnetic Pulse(EMP) Attack』

M. Rabinowitz, A. P. Meliopoulos, E. N. Glytsis and G. J. Cokkinides (1992), 『NUCLEAR MAGNETOHYDRODYNAMIC EMP, SOLAR STORMS, AND SUBSTORM S』, International Journal of Modern Physics B, Vol 6, No 20, pp 3353-3380

(2009), High altitude electromagnetic pulse immunity guide for telecommunication centres", ITU-T Recommendation K.79

IEC/TR 61000-5-8 (2009), 『Electromagnetic compatibility(EMC)-Part 5-8: Installation and mitigation guidelines HEMP protection methods for the distributed infrastructure』

Alan Thomson, BGS Edinburgh (2010), 『Space weather and power grids』, Earthwise 26, British Geological Survey©NERC2010 pp66-6

Colin R. Miller (2005), 『Electromagnetic Pulse Threats in 2010』, ADA463475

● 저 자 소 개 ●

김 남

- 연세대학교 전자공학과 졸업
- 연세대학교 전자공학과 석사
- 연세대학교 전자공학과 박사
- 현 충북대학교 전자정보대학 교수

이 대 영

- 연세대학교 천문우주학과 졸업
- 미국 Rice 대학 천문학 석사
- 미국 Rice 대학 천문학 박사
- 현 충북대학교 천문우주학과 교수

방송통신정책연구 11-진흥-나-18
우주전과환경 변화에 따른 고출력 전자파의
피해 대책 연구

(Solutions for Mitigating the Potential Damage by High
altitude Electromagnetic Pulse of High Power
Electromagnetic(HP-EMP) Caused by Space Weather
Variations)

2011년 12월 일 인쇄

2011년 12월 일 발행

발행인 방송통신위원회 위원장

발행처 방송통신위원회

서울특별시 종로구 세종로 20

TEL: 02-750-1114

E-mail: webmaster@kcc.go.kr

Homepage: www.kcc.go.kr

인 쇄 예원사
