THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2014 Apr.; 25(4), 426～433.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.4.426
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

해군 함정에서의 EMP 영향 및 대책

Electromagnetic Pulse Coupling into Naval Warship and Protective Measures

양 진 호 · 남 상 욱

Jin-Ho Yang · Sang-Wook Nam

요 약

고고도 핵폭발로 인해 고고도 전자기 펄스(HEMP)가 발생한다. 본 논문에서는 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에 제시된 HEMP 파형이 해군 함정의 복사성 결합 통로와 전도성 결합 통로를 통해 입사할 때 침투하는 침투 전계 특성을 비교 검토하였다. 또한, 두 가지 종류의 결합에 대한 효과를 분석하고, 방호 대책을 제시하였다. 시뮬레이션 결과, IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소의 기준보다 저주파수 대역을 제외하고 침투전계가 크므로 좀 더 엄격한 기준으로 볼 수 있고, 따라서 IEC 61000-2-9의 기준을 해군내 HEMP 기준으로 제시하였다. 최종적으로 HEMP 방호 대책으로 차폐 코팅, 허니컴 통풍구, TVS 소자 등을 이용하여 미국방부 기준에 부합하는 것을 확인하였다.

Abstract

The high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) generated by a high-altitude nuclear explosion. This paper presents the comparison of electric field penetration in Bell laboratories and IEC 61000-2-9 standard when HEMP source penetrates through Naval Warship conducted coupling path and radiated coupling path. Also we analyze the effects of two kinds of coupling and propose Protective measures. Simulation results confirm IEC 61000-2-9 standard is more strict than the Bell Laboratories standard except for a lower frequency band, so we proposed IEC 61000-2-9 standard as a Naval HEMP standard. Finally, we offer the protective measures such as the shielding coating, Honeycomb ventilation, TVS in order to meet the military criteria.

Key words: EMP, HEMP, Front-Door/Back-Door Coupling, Shielding Effectiveness, Navy

Ⅰ. 서 론

1967년 7월 미항공모함 Forrestal 함상에서 출격 준비가 끝난 전투기의 유도탄 작동 회로가 함상 레이더신호에 의한 전자파 간섭으로 유도탄이 발사되어 대형 폭발사고가 있었다[1]. 또한, 최근 우리 해군 함정이 전자기 장애로 인해 항해 중에 기관이 정지하는 사례도 있었다. 앞으로 해군에 도입되는 첨단 전자 장비가 늘어감에 따라 전자기 장애 또는 전자기 펄스에 대한 대책이 중요함에도 아직 전자파 차폐에 대한 관심이 저조한 것이 사실이다. 이는 지난 2012년 국감 브리핑에서는 민주당 의원이 국방부로부터 제출받은 표 1의 '전자파 차폐 대상부대 및 전자파 방호능력 구비 현황' 자료를 보면 알 수 있다[2].

본 논문을 통해 고고도 전자기 펄스(HEMP)가 해군 함

「본 연구는 미래부가 지원한 2013년 정보통신 · 방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음」
서울대학교 전기정보공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)
· Manuscript received December 5, 2013 ; Revised February 19, 2014 ; Accepted February 24, 2014. (ID No. 20131205-122)
· Corresponding Author: Sang-Wook Nam (e-mail: snam@snu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

표 1. 전자파 차폐 대상 부대 및 구비 부대 현황
Table 1. Status of electromagnetic shielding military targets and constructed military unit.

구분	대상부대	구비	진행/예정	미구비
계	221	3	32	186
육군	143	1	2	140
해군	31	-	1	30
공군	39	-	26	13
국직	8	2	3	3

정에 미치는 영향을 살펴보고, 미흡한 분야에 대해 그 대책을 제시하고자 한다.

Ⅱ. 전자기 펄스 기본개념 및 관련이론

2-1 HEMP 특성 및 형태

HEMP(High Altitude Electromagnetic Pulse)는 고고도 핵전자기 펄스로 EMP가 핵폭발에 의해 발생한 경우를 의미한다. HEMP의 전계는 다른 지속시간을 가지는 초기 HEMP, 중기 HEMP, 말기 HEMP 등 3개의 성분으로 복합적인 구조를 가진다. 광범위한 전자장비에 가장 위험한 초기 HEMP를 기준으로 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에서는 아래와 같은 식으로 정의하고 있다.

$$E(t) = KE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

식 (1)에서 t는 시간을 나타내고, 각각의 감쇠 정수 및 진폭에 관한 파라미터들은 표 2에 나타내었다. 그림 1은 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에서 제시하고 있는 HEMP 파형의 시간영역 특성을 나타내고 있다[3].

표 2. 초기 HEMP 파형의 파라미터
Table 2. Early HEMP waveform parameter.

구분	Bell Labs	IEC 61000-2-9
E_0(kV/m)	50	50
K	1.05	1.30
$\alpha(s^{-1})$	4×10^6	4×10^7
$\beta(s^{-1})$	4.76×10^8	6×10^8
상승 시간	4.6 ns	2.5 ns
FWHM	184 ns	23 ns

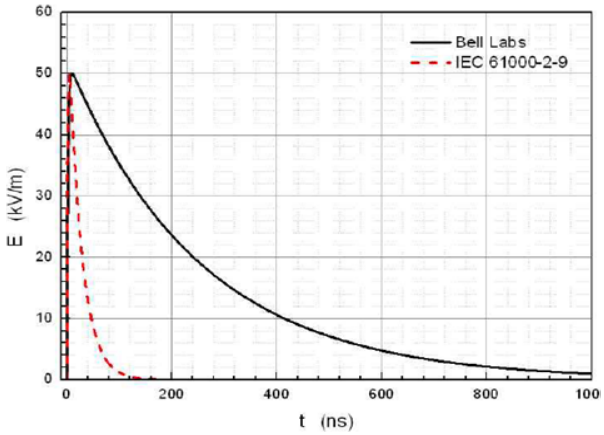

그림 1. HEMP 파형 특성의 두 기준
Fig. 1. Two kinds of HEMP waveform standard.

2-2 복사성/전도성 결합

전자기 펄스는 대상 장비나 회로에 결합되는 결합효과를 일으키는 두 가지 경로가 있다. 첫 번째는 복사성 결합이고, 두 번째는 전도성 결합이다. 복사성 결합은 EMP 에너지가 Aperture와 slot 등 개구같이 열린 공간을 통해 유입되어 장비와 결합하는 것을 의미하고, 전도성 결합은 안테나와 회로 등 전기적 POE(Points of Entry)를 통해 EMP 에너지가 유입되어 장비와 결합하는 것을 의미한다[4],[5].

Ⅲ. 전자파 차폐 이론 및 기준

3-1 차폐 효율(Shielding Effectiveness)

복사성 결합에 의한 피해 기준인 차폐 효율은 미국 국방부에서 제시한 기준으로 차폐 요구 성능은 그림 2와 같으며, 차폐 효율은 식 (2)와 같이 정의된다[6].

$$SE = 20Log_{10}\frac{E_i}{E_t} \quad (2)$$

식 (2)에서 E_i는 차폐가 없을 때의 전계의 크기, E_t는 차폐가 이루어졌을 때 전계의 크기이다. 미국 국방부 기준의 차폐 요구 성능을 보면 주파수 범위별로 조금씩 차이가 있지만, 결론적으로 모든 주파수 범위에서 차폐 효율 80 dB 이상을 만족해야 전자장비의 오작동 및 파괴 현상을 방지할 수 있다. 이것은 일반적인 사항이며, 국방시

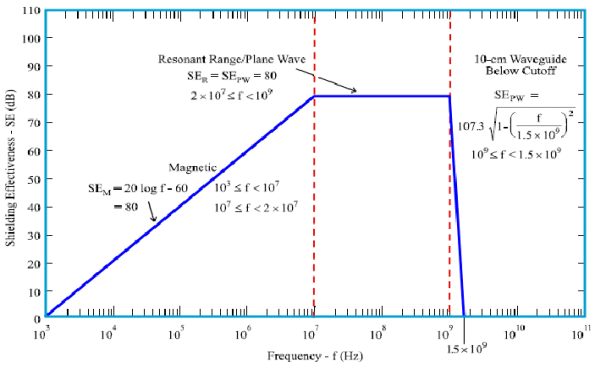

그림 2. 미국방부 기준 차폐 요구 성능
Fig. 2. Requirement of shielding performance of U.S. Department of Defense.

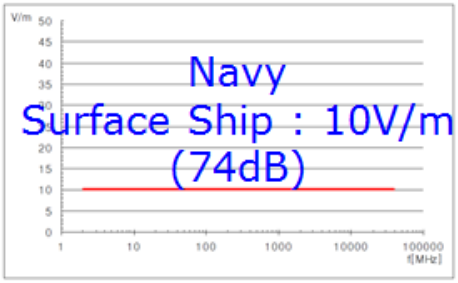

그림 3. 해군 수상함정 차폐 요구 성능
Fig. 3. Requirement of shielding performance of naval surface warship.

설과 민수시설의 기준이 다르고, 육/해/공군의 기준도 차이가 있다. 왜냐하면 국방시설이 민수보다 좀 더 견고하게 제작되고, 육/해/공군의 활동영역(지상/바다/하늘)의 차이로 전자파의 반사 형태도 조금씩 다르기 때문이다. 따라서 본 논문의 주제와 연관된 해군 수상함정의 기준(MIL-STD-461E, RS103)을 살펴보면 그림 3과 같이 모든 주파수 영역에서 차폐 효율 73.9 dB(약 74 dB) 이상이 요구된다.

3-2 Pulse Current Injection 테스트

전도성 결합과 관련된 기준인 PCI 테스트는 펄스 전류를 외부 케이블에 인가, 차폐벽 내부로 유입되는 양이 허용한계치 이내인지 검증하는 테스트이다. HEMP의 세 가지 형태 중 초기 HEMP가 그림 4와 같이 이중 지수 함수

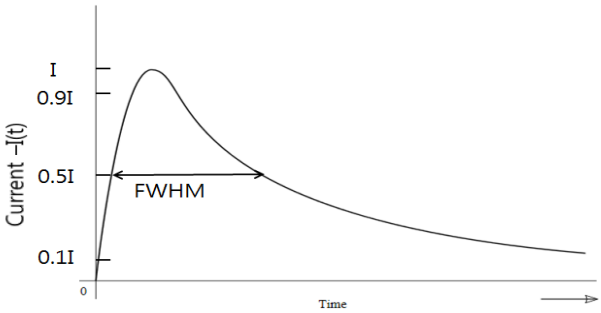

그림 4. 이중 지수 함수 파형
Fig. 4. Double exponential waveform.

표 3. 사이트 간의 상용 전력 선로에 대한 PCI 시험파형
Table 3. PCI test waveforms.

구분	E_1	E_2	E_3
상승 시간	≤ 20 ns	≤ 1.5 μs	≤ 0.2 s
펄스폭	500~550 ns	3~5 ms	20~25 s
진폭	2,500 A	250 A	1,000 A
잔류 전류 기준	1 A	1 A	1 A

의 임펄스 파형을 가지고 있으며, HEMP 보호 시설의 성능을 평가하는데 일반적으로 적용하고 있는 MIL-STD-188-125-1에서 규정된 전도성 HEMP 신호의 파형은 표 3과 같다[7].

위의 이중 지수 함수 형태의 전도성 HEMP 파형에서 2,500 A는 HEMP가 케이블에 결합할 수 있는 최대값이다. 미국방부 기준MIL-STD-188-125-1에서는 각각의 경우에 따라 허용한계치가 다르게 나타나 있는데, 본 연구의 주제범위인 송수신 안테나의 경우 방호 대책을 적용하였을 때 내부에서 잔류 전류 1 A 이하를 만족하여야 한다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 및 분석

4-1 해군 함정 모델링 및 EMP 결합 경로

그림 5는 해군에서 작전 중인 군함을 해군의 협조를 받아 모델링한 것이다. EMP 결합에 직접적인 영향을 줄 수 있는 유리창, 환풍구(전부, 후부)는 제원에 기초하여 직접 모델링하였고, 안테나의 경우는 케이블의 종류 및 길이를 확인하여 모델링하였다. 함정을 이루고 있는 전체

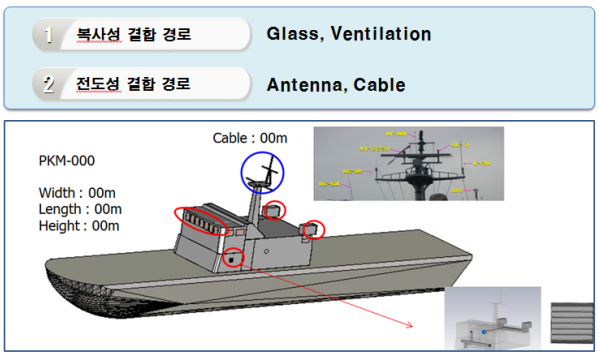

그림 5. 해군 함정 모델링 및 EMP 결합 경로
Fig. 5. Naval warship modeling & EMP coupling path.

의 Material은 철(Lossy metal, Electric Conductivity: 5.8×10^6 [S/m])이다. 실제 크기의 함정을 그대로 모델링하여 시뮬레이션을 진행하기에는 Simulator의 특성상(mesh 수의 제한, 시뮬레이션 시간 과다 등) 무리가 따르고, 또한 EMP에 의해서 전압, 전류가 유기되는 것은 전자장비이므로 전자·통신 장비가 집중되어 있는 곳을 확인하였다.

그림 6의 왼쪽을 보면 전체 구조 가운데 점선으로 표시된 부분이 조타실(레이더, 통신기, 조타기 등), 통신실(통신 전자장비 수신단)이 위치해 있으므로 그곳의 격실을 중심으로 모델링을 하였고, 전자파 측정 지점(Probe)은 조타실과 통신실 공간상 임의의 중앙지점에 위치하였다. 경계조건은 그림 6의 오른쪽처럼 점선 아래 부분은 철판으로 이루어진 하부 갑판 구조물이기 때문에 PEC로 가정하여 E_t=0으로 적용하였고, 그 외 부분은 자유공간(Freespace)으로 적용하였다.

4-2 Excitational Signal

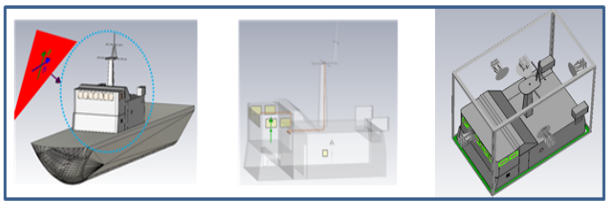

그림 6. 전자파 측정 위치 및 함정 주변 경계조건
Fig. 6. Measurement location of electromagnetic wave & boundary condition around naval warship.

Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 각각의 HEMP 파형 기준이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구를 통해 침투하는 침투 전계의 특성을 비교 검토한 논문이 있다[3]. 논문에 따르면 IEC-61000-2-9 기준이 Bell 연구소 기준보다 10 MHz 이하의 낮은 주파수 대역을 제외하고 침투 전계가 크지만, 침투 전계의 주파수 특성 경향은 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 한편, 본 논문은 참고문헌 [3]과 상황이 다른데, 시뮬레이션상 위의 두 기준으로 확인 결과, IEC 기준이 Bell 연구소 기준보다 9 MHz 이하의 저주파 대역을 제외하고, 침투 전계는 조타실과 통신실 각각 28 %, 34 % 정도 큰 것을 확인했다. 따라서 본 논문에서 외부 HEMP 파형은 IEC 61000-2-9에서 정의한 파형을 적용하였고, 정면에서 입사함을 가정하였다.

4-3 시뮬레이션 결과

4-3-1 복사성 결합 결과

방호 대책이 적용되지 않았을 경우, 조타실과 통신실의 차폐 효율을 각각 계산해 보면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그래프에서 보듯이 수상함정에 요구되는 차폐 효율 74 dB를 일부 저주파수 대역을 제외하고 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전자 장비에 오작동 및 파괴현상을 일으킬 가능성이 높다고 말할 수 있다.

4-3-1-1 복사성 피해신호 대책 및 적용결과

먼저, 복사성 EMP 방호 대책을 시뮬레이션을 통해 확

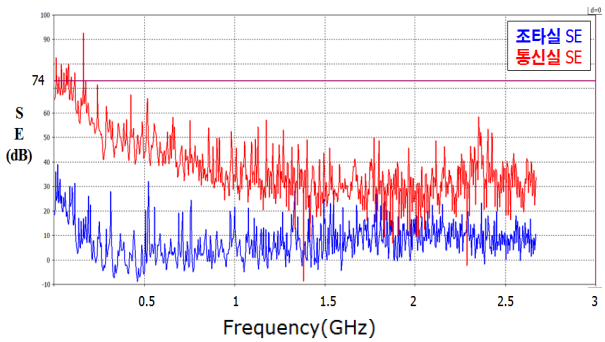

그림 7. 조타실/통신실의 차폐 효율(SE)
Fig. 7. Shielding effectiveness of bridge/commroom.

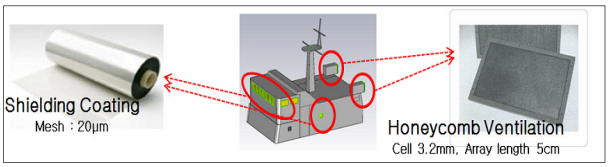

그림 8. 복사성 EMP 방호 대책
Fig. 8. Protective measures of EMP radiated coupling.

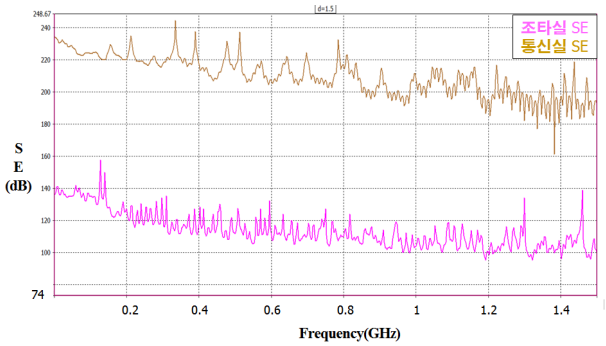

그림 9. 복사성 EMP 방호 대책 적용후 SE
Fig. 9. SE after applying protective measures of EMP radiated coupling.

인하였다. 미국방부 기준인 MIL-STD-188-125-1을 만족시키기 위해서 그림 8과 같이 차폐 코팅을 실내 및 실외에 붙이고, 통풍관에 Honeycomb 모양의 통풍관을 적용하였다[8].

차폐 코팅 재료는 구리이며, mesh로 이루어져 있고, mesh 간격은 20 um이다. Honeycomb 통풍관은 cell 간격이 3.2 mm이고, Waveguide-Below-Cutoff 원리에 의거 Array length는 5 cm로 정하였다. 위와 같이 EMP 취약 개소에 대한 방호 대책을 적용한 결과, 차폐 효율은 그림 9와 같이 수상함정 요구 성능인 74 dB를 전 주파수 대역에서 만족함을 확인하였다.

4-3-2 전도성 결합 결과

4-3-2-1 CST-CS Simulator 정확도 분석

시뮬레이션의 정확도를 확인하기 위하여 함정의 동축케이블을 모델링하기에 앞서 1.5 m의 동축케이블(RG-58)의 감쇄 상수(α)를 이론 및 인터넷 계산기, CST-MW로 확인하고, 그것을 CST-CS와 비교하였다.

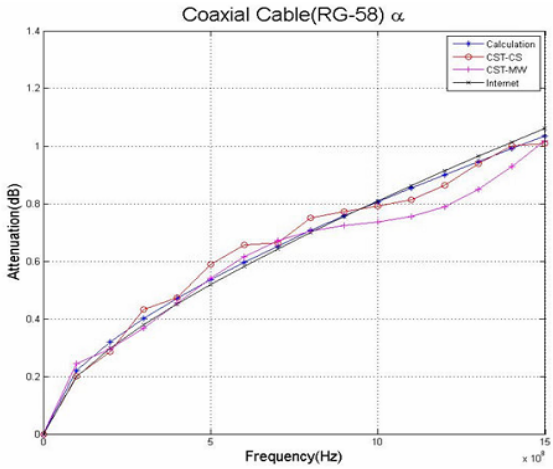

그림 10. 1.5 m 동축케이블의 감쇄 상수
Fig. 10. Attenuation constant of coaxial cable(1.5 m).

그림 10에서 보듯이 각각의 결과가 경향성이 같고, 수치도 거의 일치함을 알 수 있는데, 특히 이론과 인터넷 계산기의 결과는 식 (3)의 서로 같은 수식을 사용함으로 결과가 정확히 일치함을 알 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{R_s}{\eta \ln\frac{b}{a}}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right)+w\epsilon''\eta}\right) \tag{3}$$

그리고 CST-CS를 이용하여 그림 11에서처럼 Input에 고정 주파수의 파워를 넣고, Output에서의 파워 감쇄를 확인하고, 같은 방법으로 0~1.5 GHz까지 100 MHz 간격으로 Sweep하여 주파수별 감쇄 상수를 확인한 결과, 그림 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

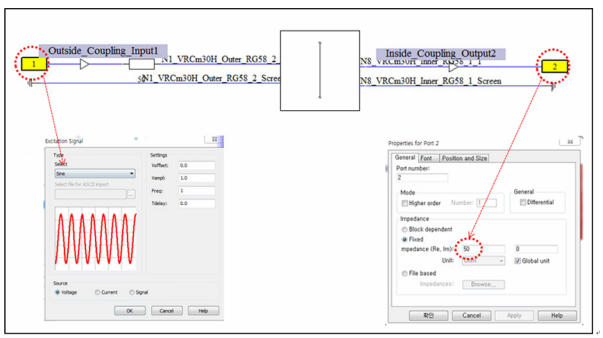

그림 11. CST-CS를 이용한 동축케이블의 회로도
Fig. 11. Schematic of coaxial cable using CST-CS.

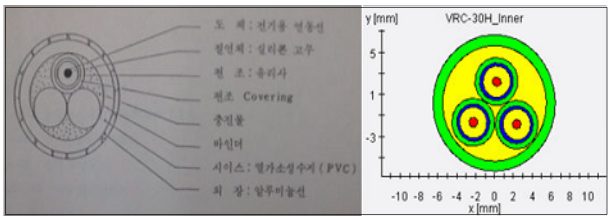

그림 12. 함정의 안테나 케이블 및 모델링
Fig. 12. Antenna cable of naval warship & modeling.

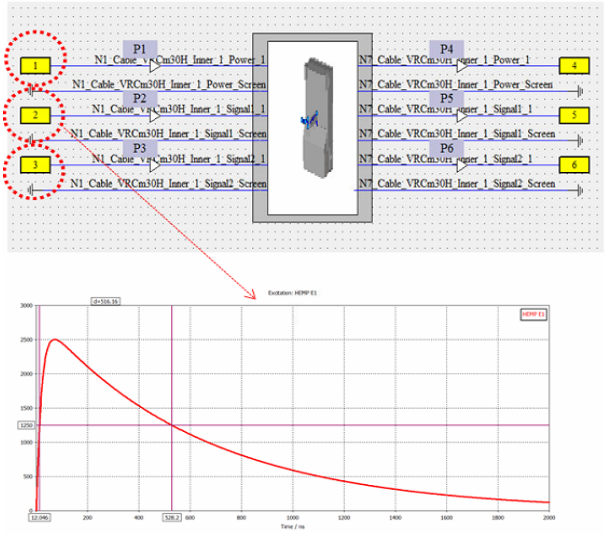

그림 13. 함정 안테나 케이블 회로도 및 인가 파형
Fig. 13. Schematic of naval warship antenna cable & excitational signal.

4-3-2-2 함정의 안테나 케이블 결합 결과

함정 안테나 Cable을 그림 12와 같이 세 개의 동축케이블이 묶음으로 되어 있으며, 앞서 검증된 CST-CS로 모델링하였다.

위 모델링(그림 12)을 바탕으로 CST-CS를 이용하여 회로도로 연동하면 그림 13과 같이 나타나고, Ⅲ장에서 제시한 전도성 HEMP 신호를 인가하였을 때 함정 내부에서의 잔류 전류를 측정하였다.

P1～P3는 신호를 인가하는 input, P4～P6는 함정 내부에서의 잔류 전류를 측정하는 output이다. 안테나 케이블을 통해 유입된 최대 진폭 2,500 A의 HEMP 신호는 그림 14에서 보듯이 2,390 A로 진폭이 감소하였음을 확인하

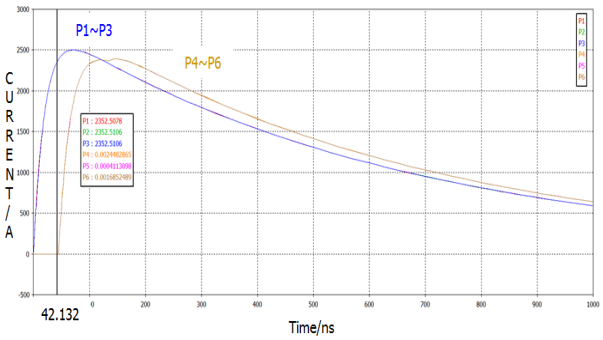

그림 14. 함정 안테나 유입 전류 input 및 output
Fig. 14. Input and output of injection current of naval warship antenna.

였다. 이는 동축케이블의 감쇄 상수로 인한 결과이며, 8.5 m의 케이블을 통과하면서 output 결과는 그래프에서 보듯이 42.132 ns만큼 Time delay가 발생하였다.

동축케이블의 Time delay 식에 따라 결과를 비교하면 다음 식 (4)와 같다.

$$\tau_d = 3.33\sqrt{\epsilon_r}\ \mathrm{ns/m} \tag{4}$$

동축케이블의 유전체는 폴리에틸렌으로 ϵ_r(유전율)이 2.3이다. 따라서 식 (4)에 대입해 보면 42.925 ns의 결과를 얻는데, 시뮬레이션 결과와 일치한다. 함정 내부에 2,390 A의 잔류 전류는 송수신 안테나 허용 전류 한계치인 1 A에 비해 너무 큰 수치이고, 이러한 전류가 내부로 유입되면 안테나 신호 처리 system은 오작동 및 고장 발생 가능성이 커진다.

4-3-2-3 전도성 피해신호 대책 및 적용결과

전도성 피해 신호 대책은 그림 15와 같이 TVS 소자를 적용하였다. TVS 소자는 Transient Voltage Suppression Diode로 정전기 방전이나 유도 부하 스위칭 혹은 유도 방전에서 발생하는 전기적 과도 상태로부터 약한 회로를 방지하기 위해 사용하는 소자이다. TVS의 원리는 회로의 손상을 줄 만큼의 과도한 전류가 유입되면 TVS가 즉시 “제한전압(Clamping Voltage)”이라고 불리는 안전전압을 제한시키고, 동시에 잠재적인 회로 손상전류를 전도시킴으로써 더 이상의 보호요소가 되지 못하도록 하는 것이다.

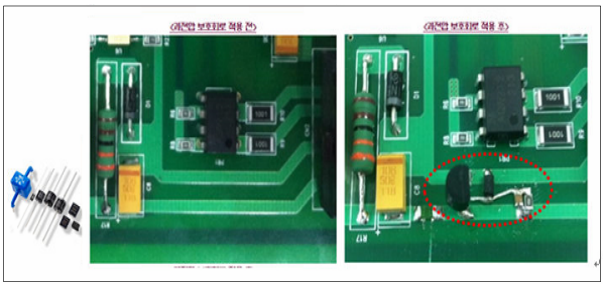

그림 15. 전도성 피해신호 대책 TVS 소자
Fig. 15. TVS diode.

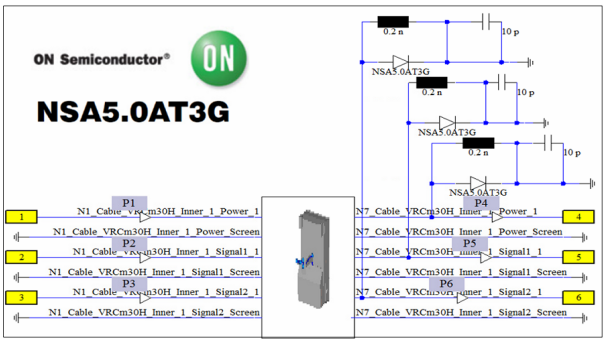

그림 16. TVS 소자를 적용한 회로도
Fig. 16. Schematic using TVS diode.

CST-CS를 이용하여 ㈜ On Semiconductor에서 제공하는 TVS NSA5.OAT의 Datasheet를 바탕으로 그림 16과 같이 회로도를 구성하여 결과를 확인하였다.

위 회로도(그림 16)를 바탕으로 시뮬레이션 결과, 그림 17에서 보듯이 P4~P6에서 잔류 전류 0.8 A를 나타내어 미국방부 송수신 안테나 잔류 전류 1 A 이내의 기준을 만족함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

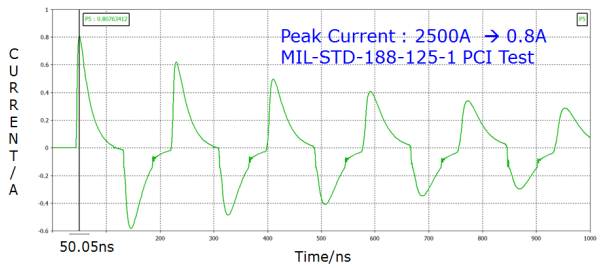

그림 17. TVS 소자를 적용후 내부 잔류 전류 결과
Fig. 17. Inside residual current output after applying TVS diode.

Ⅴ. 결 론

본 논문을 통해 HEMP 기준 중 함정으로의 침투 전계가 상대적으로 크게 나타나는 IEC 61000-2-9 기준을 해군의 HEMP 기준으로 제시하였다. 또한, 두 경로를 통해 침투하는 HEMP 중 복사성 결합은 차폐 코팅, Honeycomb 통풍관을 이용해 차폐 효율(SE) 74 dB 이상을 만족하였고, 전도성 결합은 TVS 소자 등을 회로에 삽입하여 내부 잔류 전류 0.8 A로 기준에 충족하는 방호 대책을 확인하였다. 본 연구를 통해 해군 함정은 철로 수밀이 되어 있어 방수, 화학·생물학 가스 방호에 유리하지만, EMP와 같은 전자기파는 전자기적으로 개구면으로 볼 수 있는 유리창과 안테나를 통해 주로 입사되므로 설계시 이 부분에 대한 방호를 반드시 고려해야 한다. EMP 측정(장비 손상)의 제한으로 실측정이 불가한 점은 아쉽지만, 미래 함정을 대상으로 실측정의 연구가 진행될 것으로 기대한다.

References

[1] 김영수, "EMI/EMC 기술 동향 분석", 한국과학기술정보연구원, 2003년 10월.

[2] 안규백, "우리 군 EMP 방호능력 매우 미비", 2012년 10월 5일자 News1.

[3] 임병진, 정성우, 조병두, 김기채, "HEMP 파원에 의한 무한 도체 평판 개구의 침투 전계 특성", 한국전자파학회논문지, 21(12), pp. 1454-1459, 2010년 12월.

[4] Hui-cheng Xia, Shi-liao Zhang, and Jian-zho Maou, "Analyze on the EMP weapon damage to the ship electronics system", *Fire Control & Command Control*, vol. 35, no. 7, 2010.

[5] Kelong Zhen, Shanwei Lv, and Yan Zhang, "Research on damage of intense electromagnetic pulse to radar receiving system", *Global Symposium on Milimeter Waves (GSMM)*, 2012.

[6] Military Standard - "High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) protection for ground-based C4I facilities performing critical, tine-urgent missions, Part 1 fixed facilities", *MIL-STD-188-125-1*, Dept. of Defense, Washington, DC. Apr. 2005.

[7] 장태헌, "HEMP 전도성 방해 펄스 전류 주입(PCI) 케이블의 영향 분석", 한국전자파학회논문지, 24(8), pp. 772-780, 2013년 8월.
[8] 이원길, "EMP 방호 대책과 소요 기술", 한국전자파학회지 전자파기술, 24(1), pp. 79-96, 2013년 1월.
[9] Edoardo Genovese, "Real world cable modeling in CST studio suite", *CST Workshop Series 2010*, Feb. 2010.

양 진 호

2004년 3월: 해군사관학교 전산과학과 (이학사)
2012년 2월~현재: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
[주 관심분야] FDTD, EMP

남 상 욱

1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)
1990년~현재: 서울대학교 전기공학부 교수
[주 관심분야] 마이크로파 능동/수동 회로 설계, 안테나 및 전파전파, 전자파 수치해석 등