

HEMP 시스템의 설계 요소 분석

이선의*, 김진영*, 박우철*

Analysis of Design Elements in HEMP Systems

Sun Yui Lee*, Jin Young Kim* and Woo Chul Park*

요 약

본 논문에서는 HEMP의 신호 특성을 설명하고 HEMP 방호시설에 영향을 미치는 요소들을 분석한다. 실제 시설 구축에 이용하기 위한 차폐룸의 규격을 정하기 위해 필요한 요소들을 찾는다. 수신 안테나의 거리와 주파수를 변화시켜 차폐 정도를 측정한다. 기준이 되는 미국 규격문서와 측정값을 비교하고 측정방법을 간소화해본다. 차폐룸 내부를 3가지 조건으로 만들어 변화에 따른 차폐 정도를 측정한다. 정방향 측정과 역방향 측정의 차이를 살펴보고 차폐룸 측정에 영향을 미치는 요소를 찾는다.

Key Words : HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse), SE(Shielding effectiveness),

ABSTRACT

In this paper, we explain the signal characteristics of HEMP and HEMP protection factors that affect the facilities are analyzed. We find the necessary elements of the physical facilities available for building. Shielding effects were measured by changing frequency and the distance of receiving antenna. Each measured value was compared to U.S. standard and measuring method was simplified. shielding effects were measured by three different conditions of shielding room. Find the difference between forward measurement and reverse measurement and factors which affects the measurement in shielding room.

I. 서 론

최근 대전자전 무기체계가 이슈가 되고 있다. 강력한 전자 기파를 방사하여 주변의 전자기기를 무력화 시키는 기술을 오래 전부터 많은 연구가 되어 왔다. 하지만 최근에는 기존의 EMP(Electromagnetic Pulse)보다 더 강력한 HEMP(High-altitude Electromagnetic Pulse)에 대하여 연구 되고 있다[1].

HEMP에 대하여 설명하면 약 1.4MT급 핵탄두를 장착한 미사일을 발사하여 고도 30km 높이에서 폭발시켜 강력한 전자기장을 발생시켜 지구표면의 거의 1000km 범위에 모든 전자기기를 파괴하는 위력을 가진다. 강력한 전자기장이 발생 되는 원리는 핵탄두가 공중 30km서 폭발하면 강력한 감마 레이 펄스가 핵폭발 지점에서 발생하게 된다. 그 감마 레이 펄스는 대기권의 20~40km 지점의 대기층의 공기분자와 충돌을 일으키게 된다. 그 충돌이 있는 후의 Compton 전자가

발생된다. 1 MeV 이상의 에너지를 지닌 Compton 전자는 지구의 자기장과 다시 충돌하게 되고 이때 Compton 전자가 이온화 되면서 수십 kV의 높은 피크점을 가지는 전자기장 펄스를 생성하게 된다[2]. HEMP는 3가지 과형으로 구분할 수 있다. 첫째로 E1은 빠른 감마레이가 ns시간 동안 방사 되는 것이다. 방사된 감마레이는 지구의 자기장에서 이온화 되고 전자기장을 생성해 퍼져 나간다. 둘째 E2는 감마레이가 지구 자기장과 충돌한 후 Compton 전자가 생성된다. 전체적으로 가장 넓은 범위의 HEMP 신호 구간이고 E1구간보다 낮은 크기를 보인다. 이 구간에서는 중성자 비탄성 감마 HEMP라 불리고 10~15km 고도에서 Compton 전류를 발생시켜 강한 전자기장을 발생 시킨다. 마지막으로 E3 구간은 이온화된 공기로 인해 마그네틱 필드가 생성되는 구간이고 거의 1/100초 내에 확산된다[3].

본 논문에서는 STD(Software Test Description)표준, IEC(International Electrotechnical Commission)표준과

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-(H0301-13-1005) 광운대학교 전자공학과 소속 유비쿼터스 통신 연구실 (*sunyui12@naver.com), (*jinyoung@kw.ac.kr), 접수일자: 2013년 7월 31일, 재접수일자: 2013년 11월 26일, 수정완료일자: 2013년 12월 15일, 최종게재확정일자 : 2013년 12월 16일

MID(Military Standard)의 표준을 토대로 HEMP를 방어하기 위하여 중요시설의 차폐효과를 나타내는 SE(Shielding Effectiveness)값을 측정한다. 본문에서 SE값에 영향을 주는 도체 내부에서의 전자파 감소에 대해서 설명하고 실제 차폐를 구성한 후 안테나를 이용하여 송신한 파워가 차폐물 내부에서 얼마만큼의 감소를 보이는지를 SE값으로 표현한다. SE값의 영향을 미치는 안테나의 높이, 거리, 각도를 다르게 하여 측정하였다. 그리고 측정 방식을 내부 Rx 외부 Tx의 정방향과 내부 Tx 외부 Rx의 역방향을 실험하여 그 차이점을 비교 분석하여 차폐시설의 방호성 검증을 간소화하기 위한 근거를 제시한다. 그리고 본 논문에서는 측정방법을 간소화하고 외벽 콘크리트의 길이를 줄이는 방법에 대하여 설명한다.

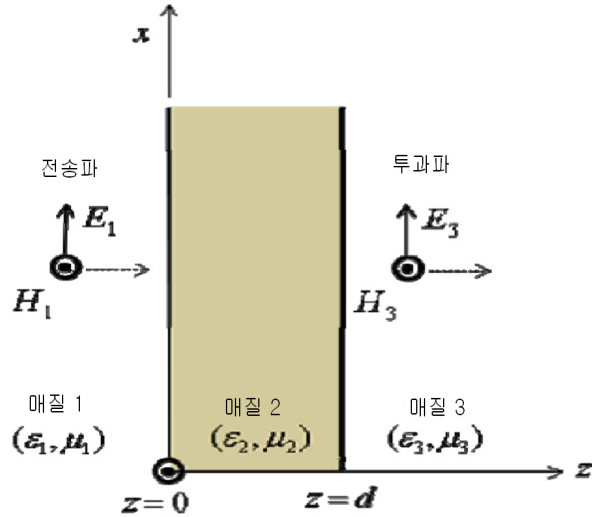


그림 1. 서로 다른 매질을 통과한 전자파의 세기.

II. HEMP 방호시설의 고려사항

전자파는 다른 매질이 존재하는 환경으로 입사할 때에는 그 매질의 고유 특성에 따라 반사, 투과, 굴절 되는 특성을 보인다. 전자기학에서 평면파의 특성을 살펴보면 그림 1과 같이 매질 1에서 2로 평면파가 입사 되고 다시 매질 3으로 투과한 전자파의 세기는 다음 식과 같이 표현 된다.

$$E_3 = \frac{1}{2} \left\{ (\Gamma + 1) + \frac{\eta_2}{\eta_1} (1 - \Gamma) \right\} E_1 e^{-j\beta_2 d} e^{j\beta_3 d} + \frac{1}{2} \left\{ (\Gamma + 1) - \frac{\eta_2}{\eta_1} (1 - \Gamma) \right\} E_1 e^{-j\beta_2 d} e^{j\beta_3 d}, \quad (1)$$

식 (1)의 Γ 는 반사계수 $(\eta_2 - \eta_1) / (\eta_2 + \eta_1)$ 이고 η_1, η_2, η_3 는 매질의 고유 인피던스 $\sqrt{\mu_{1,2,3} / \epsilon_{1,2,3}}$ 이다. 여기서 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 와 μ_1, μ_2, μ_3 는 각각 매질의 유전율, 투자율이고 d 는 매질의 두께를 나타낸다. E_1 는 입력 전계장도이다.

매질 1, 3은 자유공간의 특성을 따르고 매질 2는 도체를 가정한다. 매질의 특성에 따라 입사되는 전자파는 도체에서 대부분 반사 되지만 일부는 입사되어 통과 한다.

평면파를 토대로 HEMP를 설명하는 이유는 30~40km에서 핵폭탄이 폭발하여 방사되어 오는 HEMP 펄스는 지표면에 도달할 시에는 거의 평면파와 가깝게 된다. 이를 방호하기 위해서는 광범위한 영역에서 100kHz 이상의 주파수를 커버하는 방호시설이 필요하다. 이를 위하여 주요시설은 도체로 모든 시설을 감싸는 형태가 되어야 한다.

도체 표면으로 입사하는 전자기장을 살펴보면 도체 표면에서 반사되는 것과 통과하는 두 가지 파형이 존재한다. 하지만 도체의 전도성이 높을 경우 거의 전자기장이 통과하지 못한다. 이때의 전자기장의 세기가 e^{-1} 배가 되는 길이를 skin depth라 한다.

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{w \sqrt{\mu \epsilon}} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

식 (2)의 $\tan \delta$ 은 전자파의 감쇠를 결정짓는 손실계수라 하고, ω 는 $2\pi f$ 이고, ϵ 는 permittivity, μ 는 물질의 permeability이다. 만약 $\tan \delta$ 가 높은 전도성이 큰 금속의 경우 식 (3)과 같이 근사할 수 있다.

$$\delta \cong \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \quad (3)$$

식 (3)에서 σ 는 금속의 전도성이다. skin depth가 금속에서는 σ 와 주파수가 클수록 짧아지는 것을 알 수 있다. 다음으로 전자파의 차폐정도를 나타낸 SE는 다음과 같이 정의 된다.

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{|A_{OUT}|}{|A_{IN}|} \right) dB, \quad (4)$$

식 (4)는 입사되는 전기장의 세기와 매질을 통과하는 전기장의 세기의 비를 dB로 나타낸 것이다. 식 (4)의 A_{IN} 은 입사되는 전자기장의 세기이고, A_{OUT} 은 투과된 전자기장의 세기이다. 위에서 설명한 바를 정리하면 매질의 고유 인피던스 값이 높으면 반사가 잘되고 매질의 전도성이 높을수록 감쇄가 잘 일어나 SE값이 높아진다.

IEC 표준에 따르면 0.01mm 두께에 매질의 종류와 주파수에 따른 SE 값을 그림 2로 나타내었다 [4]. 그림 2를 보면 구리와 알루미늄은 도전율이 낮고 주파수에 따른 SE 특성이 덜 민감하다. 하지만 철의 경우 도전율이 높고 주파수에 따른 SE 특성이 주파수가 높을수록 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

실제 방호시설을 구축할 경우 0.01mm의 구리, 알루미늄,

철 등의 도체는 충분히 높은 SE값을 80dB이상 갖기 때문에 유용한 방호소재로 보인다.

방호시설은 도체뿐 아니라 외벽의 콘크리트로 건설되기 때문에 콘크리트에 의한 감쇠도 고려하여 시공해야 하는 도체 외벽의 두께와 적합한 소재를 결정하여야 한다.

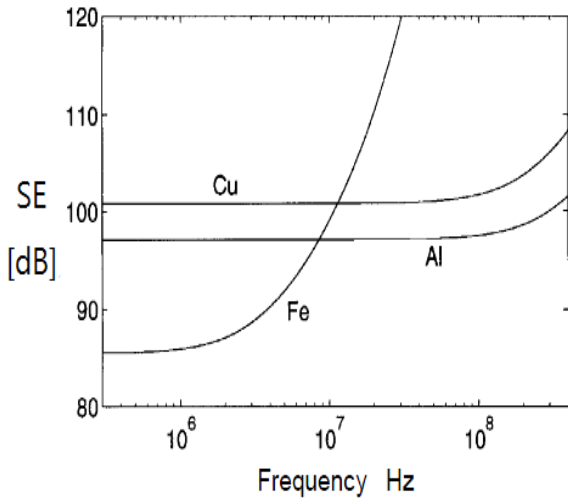


그림 2. 두께 0.01mm의 구리, 알루미늄, 철의 주파수에 따른 SE.
(구리: $\sigma = 58 \times 10^6 S/m, \mu_r = 1$, 알루미늄: $\sigma = 38 \times 10^6 S/m, \mu_r = 1$, 철: $\sigma = 10 \times 10^6 S/m, \mu_r = 400$)

III. HEMP 방호시설의 SE 측정

1. EMP 방호시설 차폐효과

이미 지어진 주요시설의 EMP 방호시설을 구축하여 그 효과를 측정하기 위해서는 주파수에 따른 각 SE값의 측정이 필요하다. 그리고 방호시설의 환기를 위하여 환기구도 고려하여 시공을 하여야 한다. 또한 외부에서 연결되는 모든 케이블은 대 EMP 방어 필터를 장착하여야 한다[5].

HEMP는 E1에서 높은 short pulse가 도달하고 E2에서 지속적인 전자기파가 오기 때문에 순간적인 영향인 E1은 전자기기의 내부 회로를 태우며 다음 도달하는 E2 시간에서의 지속적인 전자기파는 전력망을 공격한다. 따라서 중요시설은 외부와 연결된 모든 케이블은 필터와 E1을 방어하기 위한 도체 외벽이 필요하다.

그 시설의 측정은 미국의 MIL 규격에 따르면 굉장히 다양한 측정과정을 요구한다. 측정방법은 외부의 Tx 안테나를 배치하고 내부의 Rx 안테나를 배치해 전자기파의 감쇄정도를 측정하는 것이다. 또한 내부 시설을 무수히 많은 격자로나누고 일일이 그 격자 내부에서의 SE값을 측정한다. 그리고 시설의 외벽을 두께 2.05m의 콘크리트 두께를 두고 그 안쪽을 도체로 감싸야하는데 이럴 경우 상당한 공간 손실을 주게 되어 많은 비용을 부담해야 한다. skin depth는 식 (2)에

서 그 물질의 유전율과 손실 탄젠트가 클수록 작아진다. 콘크리트의 특성을 보면 물-시멘트비에 따른 전자기 특성 변화는 1970년도부터 많이 시도 되어 왔다.

본 연구에서는 콘크리트의 전자기 특성에 가장 큰 변화를 미치는 포화도에 따른 전자기 특성 변화를 요구한다. 포화도 평가를 위하여 91일 이후의 정육면체 시편 (50 × 50 × 50mm)을 수중에 침지된 상태에서 꺼낸 뒤, 표면의 물을 닦아내고 바로 포화도의 변화에 따른 전자기 특성을 가정하였다. 전도율의 경우는 주파수가 커질수록 증가하고 유전상수의 경우는 감소하는 것으로 알려져 있고 포화도 100%와 20% 수준에 대한 측정이다. 다공성 매질인 콘크리트는 수분 포화도가 높을수록 전자파 감쇄효과가 큰 것을 알 수 있다.

따라서 차폐물의 SE값을 결정하는 요소는 외벽 콘크리트의 수분함량에 따른 전도성과 두께, 도체 외벽의 전도성과 두께, 외부 환경과의 고유 인피던스 차이에 의한 반사계수로 결정된다.

2. EMP 방호측정결과

본 연구에서는 차폐효과를 측정하기 위하여 외부에서 송신안테나를 두고 내부에 수신안테나를 두는 고전적 방법과 측정을 간소화하기 위하여 내부에 송신안테나를 두고 외부에 수신안테나를 두는 두가지 방법을 측정하고 차이점을 분석하였다. 실험 수행 시 안테나의 각도, 높이, 거리의 오차에 의해 측정 조건이 달라지면 결과 값이 달라지기 때문에 고정된 측정 조건이 필요하다.

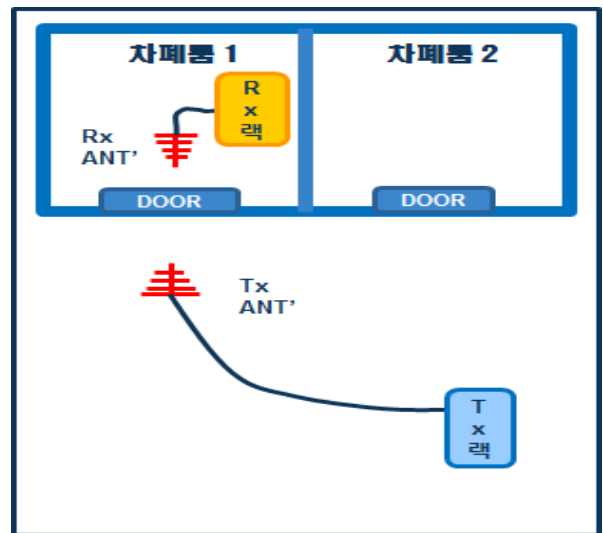


그림 3. 정방향 실험구성.

그림 3은 측정을 수행한 실험구성이다. 수신안테나를 차폐물 내부에 위치시키고 정방향으로 측정을 수행하였다. 내부의 수신안테나의 거리를 31cm 거리에 고정하고 송신안테나의 거리를 31, 91, 121, 151, 181, 205cm로 변화시켜서 측정을 수행하였다. 그림 4는 송신안테나의 거리를 변화시켜 SE

값을 측정하는 것이다. STD와 MIL은 미국 표준문서에 나온 SE값을 나타낸다. 결과 값을 보면 가까울 경우 낮은 주파수에서는 SE값이 높아지고 주파수가 높아질수록 안테나의 거리에 따른 영향이 적어지는 것을 알 수 있다.

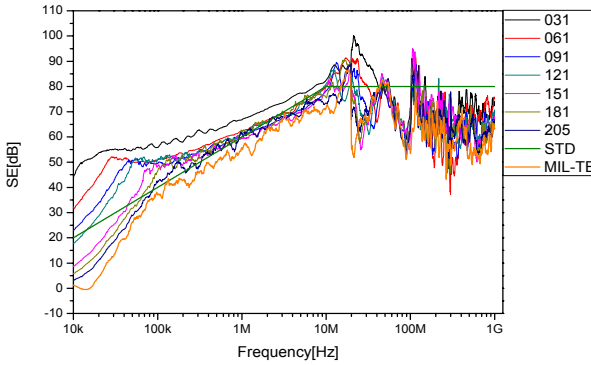


그림 4. 정방향 측정결과.

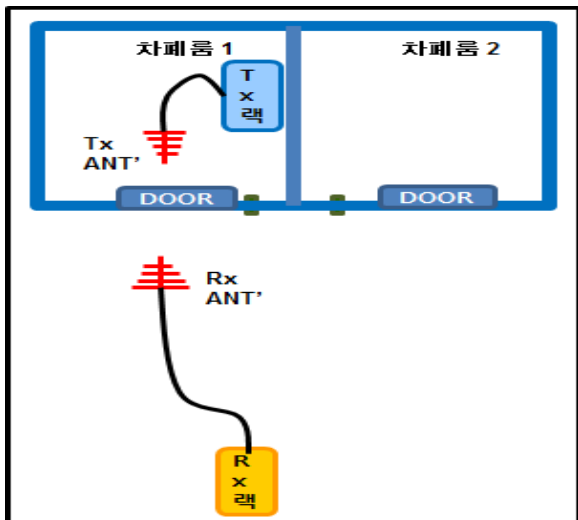


그림 5. 역방향 실험구성.

실제 공개된 MIL 규격을 보면 10kHz 이하의 차폐 효과는 고려하지 않는 것을 알 수 있다[6]. 가장 중요한 구간은 20MHz에서 1GHz 영역의 평면과 구간에서 SE 값이 80dB 이상을 가져야 한다. 따라서 실험결과 주요 구간에서 MIL 규격과 높은 유사성을 보였다. 다음으로 측정과정을 간소화하기 위하여 내부에 송신안테나를 배치하여 실험을 구성하였다. 그림 5은 역방향 실험구성이고, 그림 6은 역방향의 측정 결과이다. 정방향보다 MIL 규격과 상당한 편차를 보이는 것을 보아 실험 오류가 있는 것으로 보인다. 따라서 편차가 발생한 원인을 찾기 위하여 실험구성을 변화시켜 재측정을 하였다. 정방향과 다른 점은 차폐룸은 내부의 난반사로 인하여 측정장비에 영향을 미치는 것이다. 다시 실험을 구성하면 그림 7과 같다.

그림 8은 Tx-Rx 정방향, Rx-Tx 역방향의 측정 SE값을 표시한 것이다. 측정값을 비교하면 낮은 주파수 영역에서 SE값이 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 내부 차폐룸의 난

반사에 의한 안테나 특성의 저하로 인한 것으로 보인다. 실제로 이 값을 얻은 후 다시 정방향으로 측정을 하게 되면 역방향보다 더 높은 값을 얻는 것을 알 수 있다.

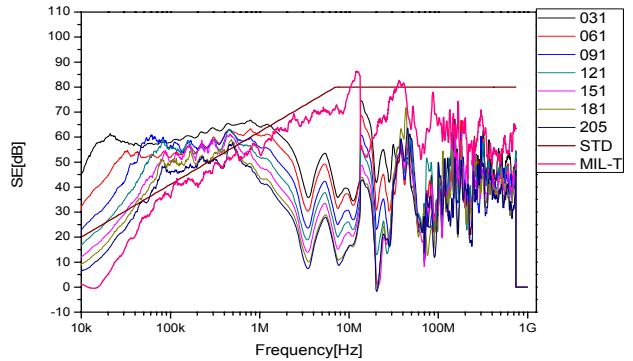


그림 6. 역방향 측정결과.

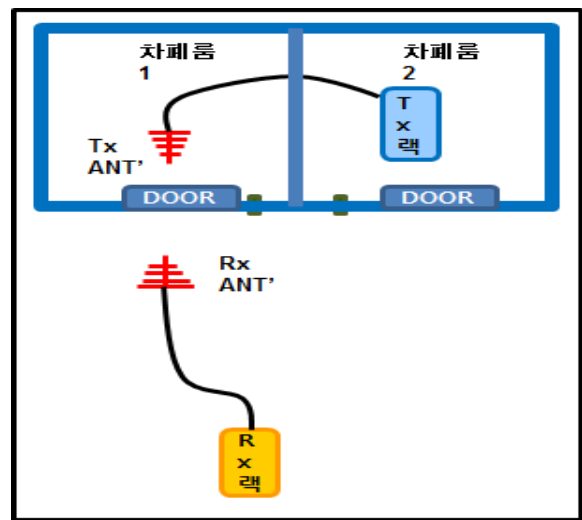


그림 7. 역방향 송신부 장비 차폐 실험구성.

난 반사의 영향을 고려하여 차폐룸의 SE 값을 얻기 위하여 다시 실험 구성을 바꾸어 실험을 실시하였다. 그림 9와 그림 10은 차폐룸의 난반사를 없앤 측정 결과를 얻기 위하여 내부를 전자파 흡수 소재로 감싸고 실험한 그림이다.

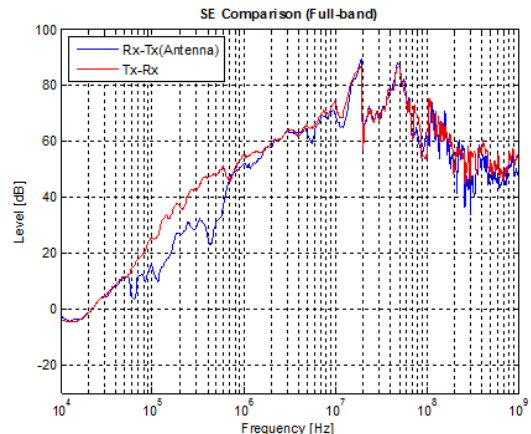


그림 8. 정방향과 역방향의 SE 값 비교.

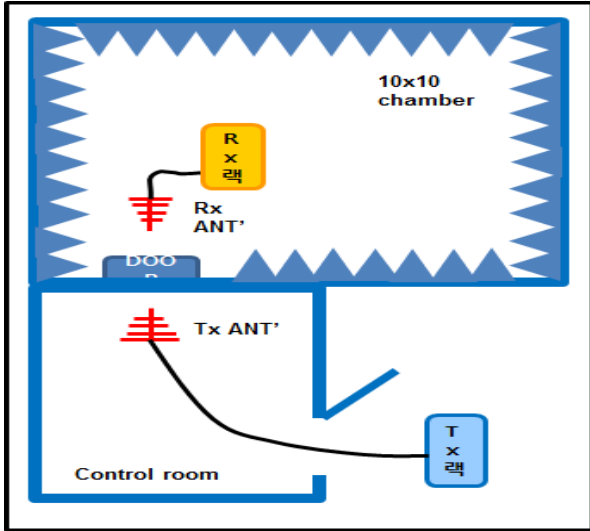


그림 9. 무반사 정방향 실험구성.

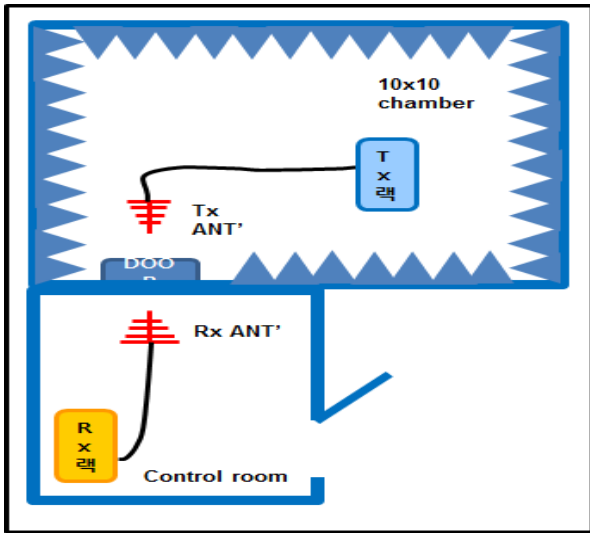


그림 10. 무반사 역방향 실험구성.

전파가 입사 되는 방호시설의 금속 부분만이 전자파 흡수 물질이 입혀있지 않고 나머지 공간에서는 안테나가 반사 되어 안테나 특성이 나빠지는 것을 막기 위하여 전자파 흡수물질을 부착하여 실험한 것이다. 그림 11의 측정 결과 앞에서 실험한 결과와 저주파 대역의 SE값이 더 유사하게 나온 것을 확인할 수 있다. 실험 결과 차폐룸 내부의 Tx 안테나를 배치하여 시험할 경우 외부 도체를 반사하여 안테나로 돌아오는 난반사 파에 의해서 안테나 성능을 저하시켜 SE값에 영향을 주는 것으로 보인다. 따라서 건설된 차폐시설의 방호 성능을 정확히 측정하기 위해서는 실험에서 보인 것처럼 난반사의 영향을 줄이기 위하여 실험 장비의 난반사 영향을 줄여 측정하여야 한다. 또한 안테나의 주변의 도체가 위치할 경우 성능 저하를 보이기 때문에 난반사로 인한 안테나 성능 저하를 고려하여 외부 도체벽의 SE값을 측정하여야 한다.

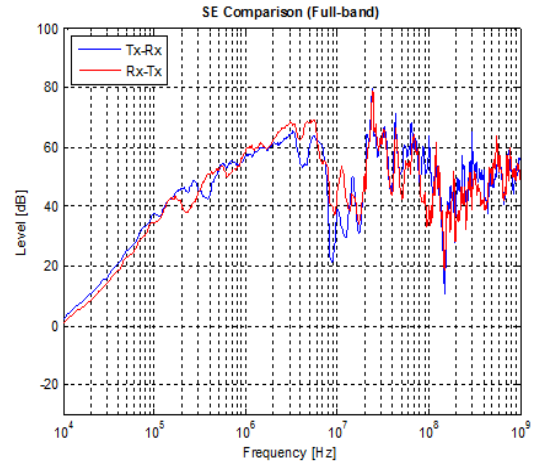


그림 11. 무반사 정방향 및 역방향 SE 값 비교.

IV. 결론

건축자재는 수분함량이 높을수록 차폐성능이 좋다는 사실을 알 수 있다. 실제로 높은 전도성을 가지는 구리판의 경우 아주 적은 양으로도 전자파를 막을 수 있지만 건설비용의 문제로 사용하지 않는다. 실제 방호시설에 사용하는 철판의 두께는 2mm~5mm이다. 방호시설의 성능을 검증하기 위하여 정 방향으로 측정을 실시한다. 내부 도체벽의 송신 안테나의 전계강도를 고려하여 역 방향으로 측정을 하면 복잡한 절차 없이 검증을 할 수 있다. 그래서 차폐룸의 SE값 측정 시에는 차폐룸 내부의 위치한 장비의 감소정도를 고려하거나 외부 전자파의 영향을 받지 않는 장비를 사용하여야 한다. 또 안테나의 전계강도 분포치에 따른 영향 분석을 통해서 안테나로 돌아오는 전자기파는 안테나의 성능을 저하시키므로 안테나의 특성 저하를 고려하면 안테나 위치를 바꿔 측정한 결과 약간의 오차가 발생 되는 것을 해소하면 효율적인 측정 방법이 개선된다는 것을 입증 하였다.

참고 문헌

- [1] C. E. Baum, "EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: An interim categorization," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-20, no. 1, pp. 35-53, Feb. 1978.
- [2] J. C. Giles and W. D. Prather, "Worldwide high-altitude nuclear electromagnetic pulse simulator," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 3, pp. 475-483, June. 2013.
- [3] C. E. Baum, "Simulator types and facilities," *Miscellaneous Simulator Memos*, Memo 7, Feb. 1976.
- [4] C. E. Baum, "From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics," *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 6, pp. 789-817, Jun. 1992.

- [5] C. Longmire, "On the electromagnetic pulse produced by nuclear explosions," *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. 26, no. 1, pp. 3 - 13, Jan. 1978.
- [6] MIL-STD-188-125-2, Mar. 1999.

저자

이 선 의(Sun Yui Lee)



- 2013년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업
- 2013년 2월~현재 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> : 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신, 양자통신

김 진 영(Jin Young Kim)

중신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 4G 이동통신

박 우 철(Woo Chul Park)



- 2011년 2월 : 아주대학교 NCW 학과 (박사)
- 2011년 3월~현재 : KTR 전자파연구소(EMP 팀장)
- 2006년 4월 : 방위사업청 서기관 (위성통신팀장)

· 1996년 8월~06. 2월 : AirMedia(주) 연구소장

· 1994년 2월~96. 8월 : AirTouch(주) 연구소

<관심분야> : 위성통신시스템설계, 모바일이동통신, 고출력전자기과