

측정된 전자파 차폐율을 이용한 시스템 내부 침투파형 예측

Estimation of the Penetrated Pulse using Measured Shielding Effectiveness

강 래 충*

Rae-Choong Kang

Abstract

The HEMP has very short rising time with several tens of kV/m, and very dangerous to almost of the electronics. And the certain level of EMP shielding effectiveness is necessary for most of the systems and equipment. In EMP shielding effectiveness, the peak value and the rising time in the system are the most considerable parameters. In order to find out these parameters, we need to estimate the pulse shape in time domain. In this paper, we propose the methods to estimate the penetrated pulse in time domain using measured shielding effectiveness and digital filter modeling technique. The validity of the Digital filter modeling technique is verified by the HFSS.

Keywords : High-altitude ElectroMagnetic Pulse(HEMP, 전자기펄스), Penetrated Pulse(내부 침투 펄스), Shielding Effectiveness(SE, 전자파 차폐율)

1. 서론

고고도 핵 폭발시 발생하는 HEMP는 매우 짧은 상승시간과 수십 kV/m의 침투치를 가지고 있어 첨단 전자기기 및 정보통신기에 매우 위협적인 존재이다. 따라서 전자장비를 보호하기 위해서는 전자파 차폐가 필수적이며, 이에 대한 차폐 규격 및 시험 절차가 MIL-STD-188-1/2에 제시되어 있다. 해당 규격서에 제시되어 있는 방법으로 주파수별 차폐율(SE : Shielding Effectiveness)를 측정 할 수 있다. 하지만 최근 발표된 논문¹에 따르면 실제로 전자장비에 영향을 주는 전자파

의 주요 파라미터는 상승시간과 침투치인 것으로 밝혀졌는데¹, 이를 알기 위해서는 시스템 내부 침투파형을 시간 축에서 볼 필요가 있다. 하지만 차폐율 측정 결과는 주파수 축의 값이기 때문에, 실제로 시스템 내부로 침투되는 전자파의 파형을 알 수 없다.

이를 해결하기 위해 Shi Lihua의 논문²에서는 Loop 안테나로 측정된 차폐율 값을 이용해 디지털 필터를 설계하여 HEMP파형을 설계된 필터에 통과시켜서 내부 침투파형을 예측하였다². 하지만 논문에서 측정된 차폐율 값이 10kHz~140kHz 대역으로, 수백 MHz까지 대부분의 에너지가 존재하는 HEMP에서는 최소 1GHz까지의 측정이 필요하다. 또한 내부 침투파형을 보다 정확히 예측하기 위해서는 평면파에 대한 차폐율 값이 필요하며, Loop 안테나로 측정된 차폐율의 값은 근접장(Near Field) 조건에 대한 차폐율 값이기 때문에 정

† 2011년 10월 10일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 강래충(raechoong.kang@add.re.kr)

확하지 못한 결과를 도출한다.

따라서 본 논문은 3가지 종류의 안테나(Loop, Biconical, Logperiodic)를 이용해 10kHz~1GHz까지 차폐율을 측정하며, 측정된 차폐율 값 중 근접장 조건으로 측정된 Loop 안테나 영역에 대해서 평면파 차폐율로 보상한다. 그 후에 보상된 차폐율에 위상 지연 정보를 더하여 차폐율 필터를 설계한다. 설계된 차폐율 필터에 HEMP 파형을 통과시킴으로써 내부 침투파형을 예측하는 방법을 제안한다.

이 방법은 시스템에 대한 차폐율 필터를 얻은 후에는 어떠한 입력 파형이 시스템에 입사 하더라도 간단한 연산에 의해 내부 침투 파형을 구할 수 있다는 장점이 있다.

2. 고고도 전자기 펄스(HEMP)의 정의

미 군사규격 MIL-STD-464A 및 국제 전자기술위원회 규격 IEC-61000-2-9에서는 고고도(지상 약 30km 이상의 고도) 핵 폭발 시 지상에서 관측되는 전자기 펄스를 초기, 중기, 말기로 구분하고 있으며, 그 중 상승시간이 가장 빠르고 전계 세기가 가장 큰 초기 HEMP 파형을 이중지수함수로 정형화하였다.

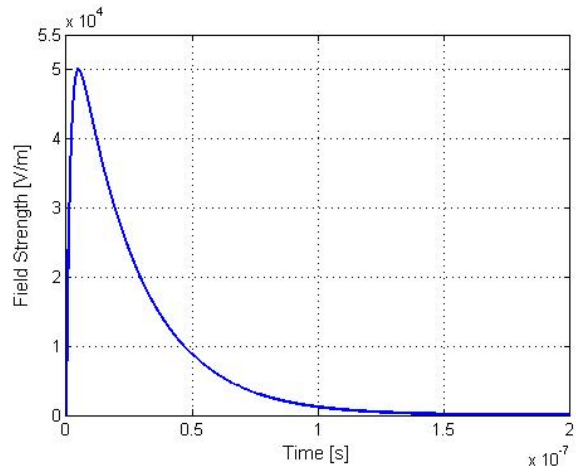
$$E_i(t) = E_0 \times (e^{-at} - e^{-bt}) \quad [\text{V/m}] \quad (1)$$

여기서, $E_0 = E_{01} \times k_{01}$ [V/m], $E_{01} = 5,000$, $k_{01} = 1.3$,
 $a = 4 \times 10^7$ [s⁻¹], $b = 6 \times 10^8$ [s⁻¹]

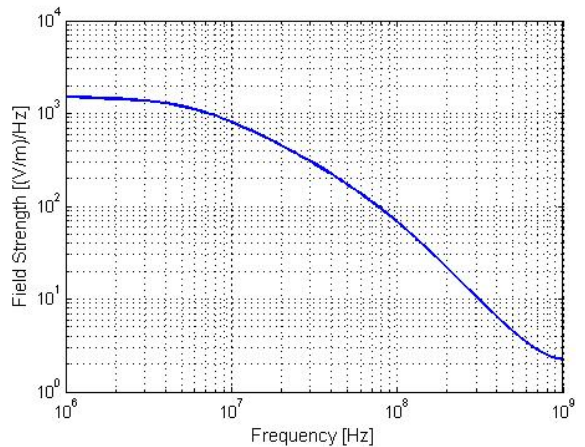
식 (1)의 Fourier Transform 변형식은 (2)와 같이 표현된다. Fig. 1은 식 (1)과 (2)에 대한 파형을 그래프로 나타낸 것이며, 시간 영역(a)에서는 침투치 50kV/m, 상승시간 2.47ns, 펄스폭 23ns을 가지는 단 펄스 형태로 나타나며, 주파수 영역(b)에서는 DC 성분을 포함하고 100MHz 이상에서는 펄스 크기가 급격히 감소함을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 HEMP파형을 입사파형으로 사용하며, 샘플링 주파수를 2GHz로 하여 1GHz까지 표현된 HEMP 펄스를 사용 한다.

$$E_i(\omega) = \int_0^{\infty} E_i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$



(a) 시간 영역



(b) 주파수 영역

Fig. 1. HEMP 펄스 표현

3. 시스템 내부 침투 전자파 예측

측정된 차폐율을 이용해 HEMP 입사파형에 대한 시스템 내부 침투 파형을 예측하기 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 시스템의 차폐율 측정(10kHz~1GHz).
- 2) Loop 안테나를 이용해 근접장 조건에서 측정된 차폐율을 평면파 차폐율로 보상.
- 3) 2번에서 보상된 차폐율값을 이용해 디지털 필터를 설계한다.
- 4) 설계된 필터에 HEMP 파형을 통과시킨다.

전체적인 예측 절차는 Fig. 2와 같다.

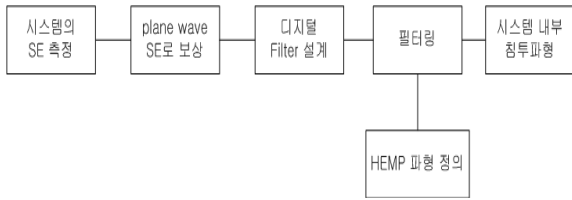


Fig. 2. HEMP 침투 파형 예측 절차

가. 시스템의 차폐율 측정

본 논문에서 적용한 차폐율 측정 절차는 MIL-STD-188-125-2 미국방규격으로, 이 규격서에는 핵전자기 펄스 환경에서 이동형 C4I 무기체계에 대한 대책기술, 요구 시험항목, 검증방법 및 합부 판정기준 등이 제시되어 있다. 그 중에 차폐효과 시험은 핵전자기 펄스 환경 하에서 C4I 셀터 내부에 탑재된 장비들의 핵전자기 펄스 신호로부터 방호하기 위한 것으로, 최소 요구 조건(80dB 수준, 1GHz이하)을 규정한다^[4].

차폐효과는 다음 식 (3)과 같이 정의된다^[4].

$$SE = 20\log \frac{V_c}{V_m} \quad (3)$$

여기서, “ V_c ”는 차폐가 없는 상태에서 측정된 기준 신호(Reference Level)의 값이고, “ V_m ”은 차폐가 있는 상태에서 측정된 값을 의미한다.

본 논문에서 측정된 차폐율의 대상은 이동형 chamber room이다. 측정 형상 및 사용 안테나, 주파수 대역은 Fig. 3과 Table 1에 나타나있다. 측정은 우선 자유공간 상에서 두 안테나의 거리를 2.5m로 맞추고 기준신호를 측정한다. 그리고 차폐가 있는 상태에서 수신값을 측정하여 식 (3)을 이용하여 이동형 chamber room의 차폐율을 계산한다.

안테나는 규격서에 제시되어 있는 테로 Loop, Biconical, Log-periodic 세 종류의 안테나를 이용하며, 10kHz부터 1GHz 까지의 차폐율을 계산한다.

Fig. 4는 시험 시스템에 대해 측정된 결과 이다.

고주파로 갈수록 차폐율이 높아짐을 알 수 있다. 이는 저주파에서 Loop 안테나를 이용해 측정된 차폐율이 평면파에 대한 차폐율이 아니고 근접장에 대한 차폐율이기 때문에 실제 평면파에 대한 차폐율 보다 낮은 값을 나타내고 있기 때문이다.

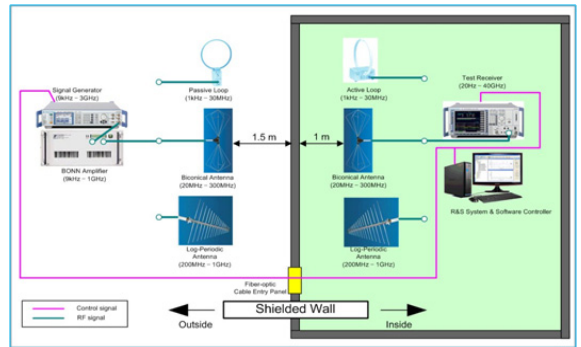


Fig. 3. 차폐율 측정 시험 형상

Table 1. 안테나별 측정 주파수

안테나	주파수
Loop	10kHz ~ 30MHz
Biconical	30MHz ~ 300MHz
Log-periodic	300MHz ~ 1GHz

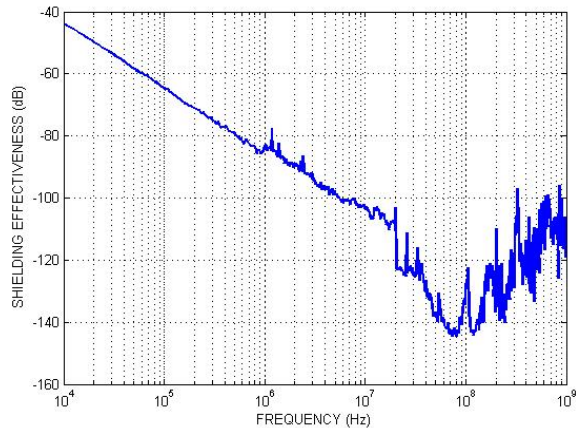


Fig. 4. 이동형 chamber room의 차폐율

나. 평면파 차폐율로 보상

평면파에 대한 차폐율을 구하기 위해서는 측정 안테나의 거리를 충분히 길게 하여 안테나 source의 파동 임피던스를 평면파의 임피던스(= 377ohm)와 같게 만들어 주면 된다. 하지만 이 방법은 송신파위의 제한으로 측정할 수 있는 차폐율의 범위가 작기 때문에 현실적이지 못하다.

Biconical 안테나 및 Log-periodic 안테나를 이용한 측정은 평면파에 대한 측정이며, Loop 안테나를 이용한

측정은 근접장 조건의 차폐율 측정이다^[4]. 따라서 Loop 안테나의 차폐율 측정 결과에 대한 보상이 필요하다. R. L. Monroe은 그의 보고서에서 변환식을 다음과 같이 계산하였다^[5].

다음 식 (4)~(10)은 차폐 시스템에 대한 차폐율을 측정 없이 예측하는 식이다.

$$SE = R + A + B \quad (4)$$

$$R = 20 \log \frac{|k+1|^2}{4|k|} \quad (5)$$

$$A = 8.686 \alpha t \quad (6)$$

$$B = 20 \log \left| 1 - \frac{(k-1)^2}{(k+1)^2} e^{-2(1+j)\alpha t} \right| \quad (7)$$

$$k = \frac{Z_{wave}}{Z_{shield}} \quad (8)$$

$$\alpha = \sqrt{\pi \mu \sigma f} \quad (9)$$

$$Z_{shield} = \sqrt{\frac{j2\pi \mu f}{\sigma}} \quad (10)$$

t : 차폐 두께

여기서 평면파에 대한 차폐율(SE_{EMP})과 Loop 안테나에 대한 차폐율(SE_L)을 식 (4)~(10)을 이용해 각각 구하면 식 (11)~(12)와 같다.

$$\begin{aligned} SE_{EMP} &= R + A + B \\ &= 20 \log \frac{|k_{EMP}+1|^2}{4|k_{EMP}|} + 8.686 \alpha t \\ &\quad + 20 \log \left| 1 - \frac{(k_{EMP}-1)^2}{(k_{EMP}+1)^2} e^{-2(1+j)\alpha t} \right| \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} SE_L &= R + A + B \\ &= 20 \log \frac{|k_L+1|^2}{4|k_L|} + 8.686 \alpha t \\ &\quad + 20 \log \left| 1 - \frac{(k_L-1)^2}{(k_L+1)^2} e^{-2(1+j)\alpha t} \right| \end{aligned} \quad (12)$$

평면파에 대한 차폐율로 보상해 주기 위해서 SE_{EMP} 와 SE_L 의 차이(δ)를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta &= SE_{EMP} - SE_L = 20 \log \left(\frac{|k_{EMP}+1|^2 4|k_L|}{4|k_{EMP}| |k_L+1|^2} \right) \\ &\quad + 20 \log \left[\frac{\left| 1 - \frac{(k_{EMP}-1)^2}{(k_{EMP}+1)^2} e^{-2(1+j)\alpha t} \right|}{\left| 1 - \frac{(k_L-1)^2}{(k_L+1)^2} e^{-2(1+j)\alpha t} \right|} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$k_{EMP} = \frac{Z_{EMP}}{Z_S} \quad (14)$$

$$k_L = \frac{Z_L}{Z_S} \quad (15)$$

일반적인 차폐제의 경우 다음의 조건이 성립한다.

$$|k_{EMP}| \gg 1 \quad (16)$$

$$|k_L| \gg 1 \quad (17)$$

따라서 (13)식은 다음과 같이 간단해 질 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= 20 \log \left(\frac{|k_{EMP}|}{|k_L|} \right) + 20 \log \left(\frac{|1 - e^{-2(1+j)\alpha t}|}{|1 - e^{-2(1+j)\alpha t}|} \right) \\ &= 20 \log \left(\frac{|k_{EMP}|}{|k_L|} \right) = 20 \log \left(\frac{|Z_{EMP}|}{|Z_L|} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 Z_{EMP} 및 Z_L 은 다음과 같이 주어진다^[5].

$$Z_{EMP} = 377 \Omega \quad (20)$$

$$Z_L = 377 \left(\frac{j\beta r - \beta^2 r^2}{1 + j\beta r - \beta^2 r^2} \right) \quad (21)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (22)$$

r : Loop 안테나에서 차폐재 까지의 거리

이렇듯 SE_{EMP} 와 SE_L 는 source의 파동 임피던스 차이에 의해 차폐재에서 반사되는 전자파의 크기가 다르

기 때문에 발생한다.

따라서 평면파에 대한 차폐율(SE_{EMP})은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SE_{EMP} = SE_L + \delta = SE_L + 20 \log \left(\frac{|Z_{EMPA}|}{|Z_L|} \right) \quad (19)$$

다음 Fig. 5는 측정된 차폐율을 식 (19)에 의해 delta (δ) 만큼 보상해준 것이다. 저주파 부분의 차폐율이 고주파 부분과 비슷한 수준으로 높아졌음을 알 수 있다.

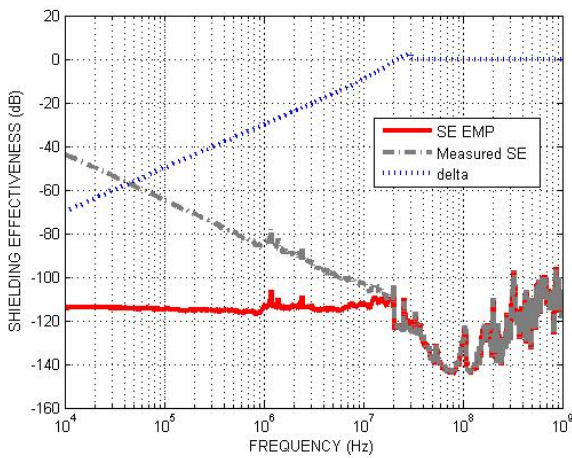


Fig. 5. 측정된 차폐율의 보상

다. 차폐율 필터 설계

측정에 의해 차폐율 값을 얻고, 평면파와 loop 안테나의 파동 임피던스 불일치로 인한 차이를 보상해 주었다. 다음 단계는 주파수별로 얻어진 차폐를 이용해 필터를 설계하는 것이다. 필터 설계가 필요한 이유는 측정에 의해 얻어진 차폐율은 크기 응답에 대한 정보만을 포함하며 위상 지연에 대한 정보는 존재하지 않기 때문이다. 본 논문에서는 시스템이 선형적이라는 가정 하에 선형 위상 IIR filter를 설계한다. 필터의 설계는 우선적으로 다음의 E(error)를 최소화 하는 것을 목적으로 한다.

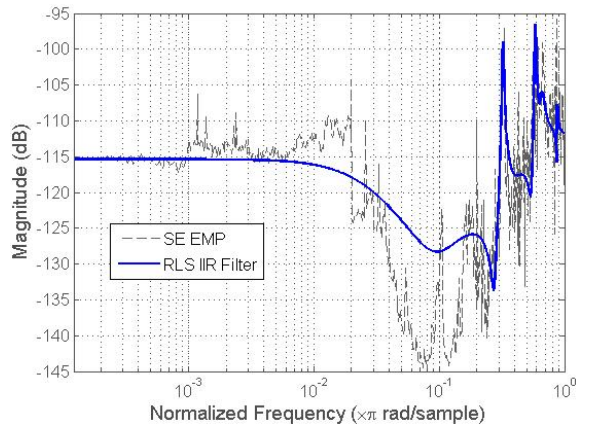
$$E = \int_w [W(w)(|H(w)| - SE(w))]^2 dw \quad (20)$$

여기서 W(w)는 weighting 이며, H(w)는 설계된 필터의 response, SE(w)는 실제 측정후 보상된 차폐율 값이

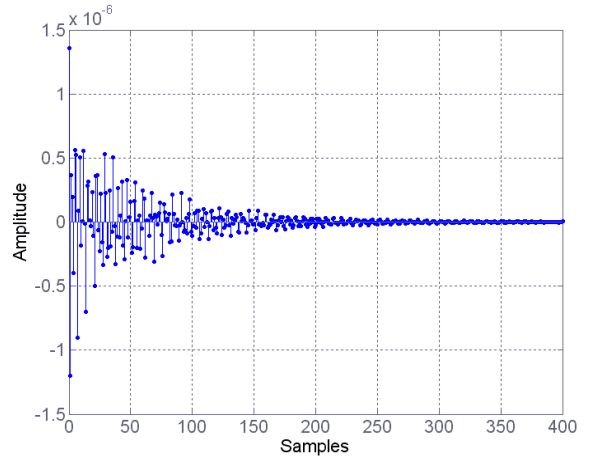
다. W(w)는 전 주파수 대역에 차이가 없이 1로 설정하였다. 사용된 IIR 필터링 방법은 RLS IIR, Least P-norm IIR 두 가지로, RLS IIR에서는 P가 2가 되고, Least P-norm에서는 128에서 최적화 되었다.

실제 필터 모델링은 Matlab의 Filter Design Toolbox를 이용한다.

Fig. 6, 7은 각각 RLS IIR 방법 및 Least P-norm IIR 방식으로 필터를 설계한 것이다. 점선은 측정 후 보상된 차폐율 값이고 실선이 실제 필터의 크기 응답이다. 그림에서 보는 바와 같이 어느 정도 실제 차폐율 값과 일치되는 필터를 설계할 수 있다. 정확히 일치시키는 것은 가능하지만, 그렇게 될 경우 필터가 unstable 특성을 갖게 되고 결과는 발산하게 된다.

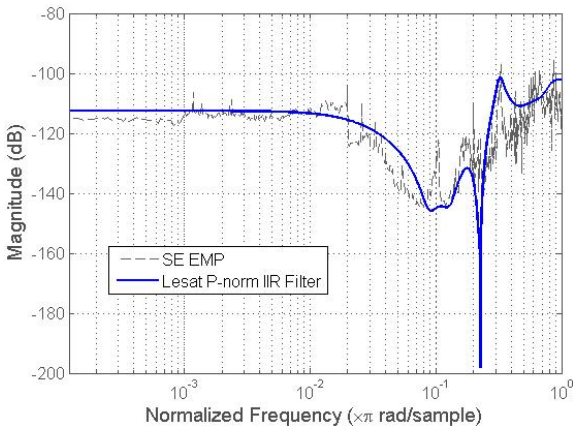


(a) 주파수축

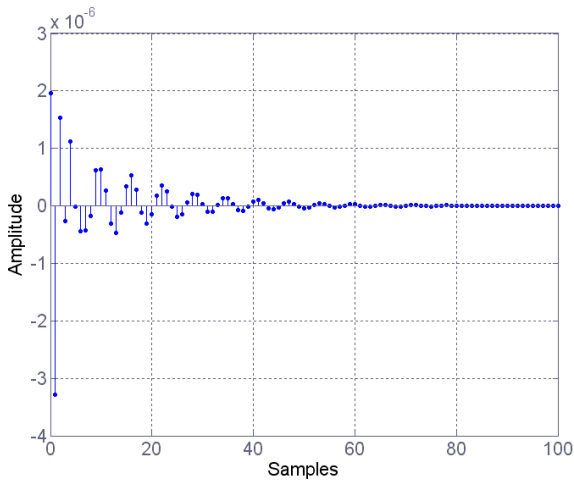


(b) 시간축

Fig. 6. RLS IIR 필터



(a) 주파수축



(b) 시간축

Fig. 7. Least P-norm IIR Filter

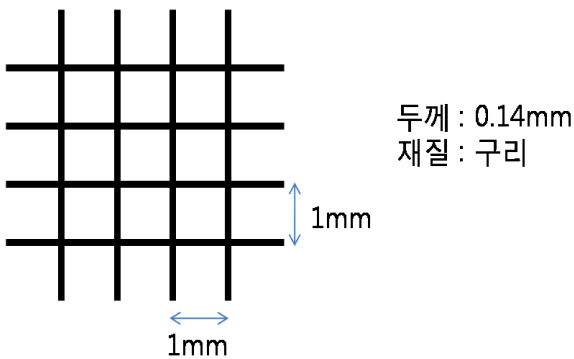


Fig. 8. 격자 Mesh 사양

크기응답을 이용해 선형 위상을 생성하는 필터 모델링에 대한 검증은 위해 HFSS를 이용했다. 우선 다음 Fig. 8과 같은 격자 mesh의 차폐율을 HFSS로 구하여 크기와 위상 정보 구한다. 여기에 HEMP 파형을 필터링 한 것이 Fig. 9에 점선으로 표현되어 있고, 크기 정보만을 이용해 필터를 설계해 HEMP 파형을 필터링 한 결과가 실선으로 표현되어 있다. Fig. 9의 결과를 보면 두 그래프의 침투치와 상승 시간이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

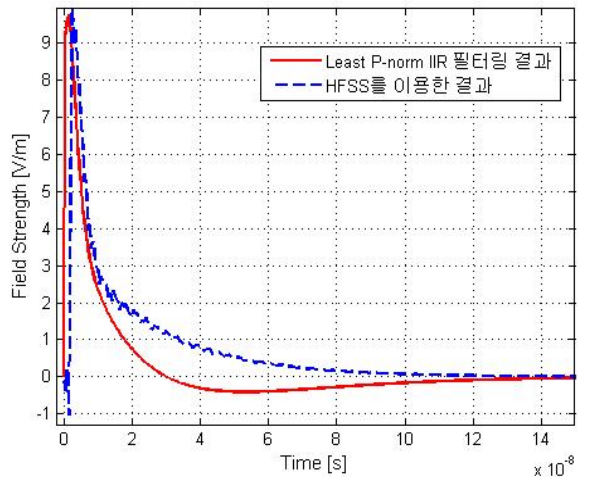


Fig. 9. 필터 모델링과 HFSS필터의 결과 비교

라. 필터링

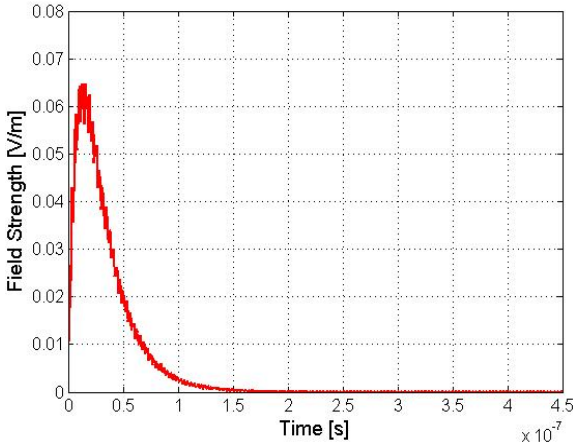
‘가.’에서 정의한 HEMP 파형을 ‘라.’에서 설계한 필터에 통과 시키면 시스템 내부의 필드를 예측할 수 있다.

$$Y(w) = E_i(w)F(w) \tag{21}$$

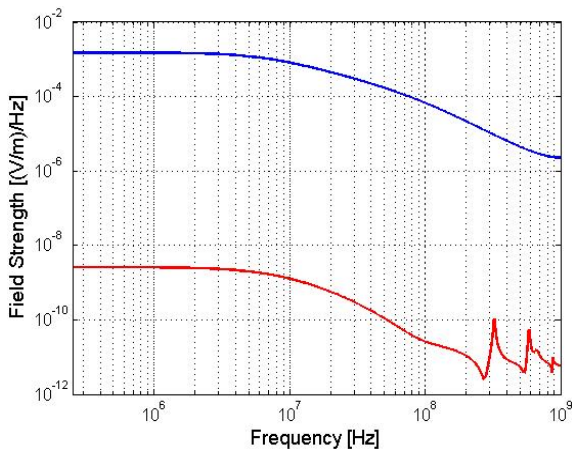
$$y(n) = F^{-1}[Y(w)] \tag{22}$$

여기서 F(w)는 ‘라.’에서 설계된 차폐 필터이며, Y(w)는 내부 침투 필드를 주파수 축으로 표현한 것이다. 식 (22)를 이용해 Y(w)를 역변환 해주면 내부 침투 파형을 구할 수 있다. 다음 Fig. 10, 11은 2가지 종류의 필터를 사용해서 예측한 내부 파형을 보여주고 있다. Table 2는 HEMP 입사파형과 시스템 내 침투 파형을 적용된 2개의 필터(RLS IIR, Lesat P-norm IIR)의 필터링 결과와 비교해서 보여주고 있다.

필터링 결과에서 모두 침투치의 경우 약 115dB 이상 감소하였고, 상승시간은 약 4배 증가하였음을 알 수 있다.



(a) 시간축

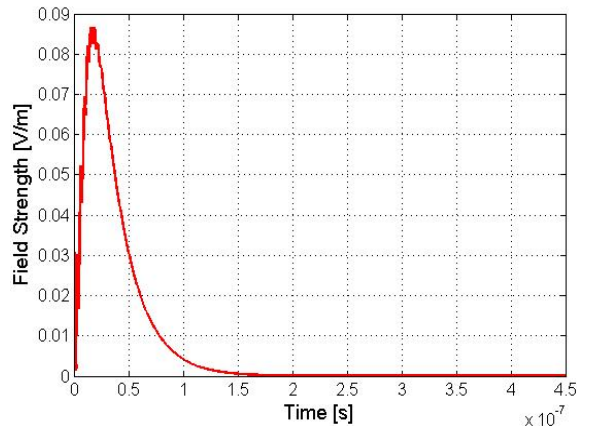


(b) 주파수축

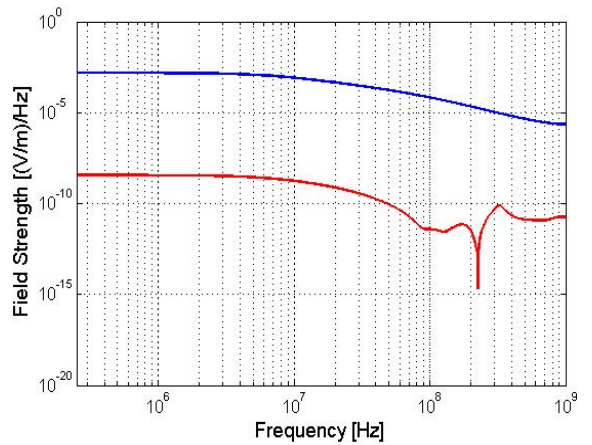
Fig. 10. RLS IIR Filtering

Table 2. 입사파형과 침투파형 비교

필터링	침투치	상승시간
필터링 없음 (HEMP 입사파형)	50kV/m	약 2.5ns
RLS IIR	0.0648V/m	약 9ns
Least P-norm IIR	0.0866V/m	약 12ns



(a) 시간축



(b) 주파수축

Fig. 11. Least P-norm IIR Filtering

4. 결론

HEMP 입사파에 대한 시스템 내부 침투 파형을 시간 축에서 알아보는 것은 시스템에 대한 중요 위협 요인인 상승시간 및 침투치를 바로 알 수 있다는 점에서 의미가 있다.

이를 위해 본 논문에서는 시스템에 대한 차폐율을 near field 조건에서 측정하고 평면파 차폐율로 보상한 후 디지털 필터를 설계하였다. HEMP 입사파형을 설계된 필터에 통과시킴으로써 시스템 내부 침투파형을 예측할 수 있었다. HEMP 입사파형의 경우 50kV/m의 침투치에 약 2.5ns의 상승시간을 보였지만, 시스템 내

부 침투파형은 사용된 2가지 디지털 필터에서 모두 0.1V/m 이하의 침투치와 약 10ns의 상승시간을 보였다. 이러한 정보는 실제 설계에 유용한 자료로 활용될 수 있다.

References

- [1] ZHOU Bihua, GAO Cheng, REN Heming, "The Definition of EMP Shielding Effectiveness", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2003.
- [2] Shi Lihua, Li zhengdong, Li Yanxin, Chen Bin, GaoCheng, Zhou Bihua, "Estimation of the Response of a System From Its Continuous Wave Measurement Results", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2003.
- [3] Neal Tesny, Marc Litz, David Conrad, Lillian Dilks, "Shielding Effectiveness Measurements Applied to Safety Assessment Predictions at Picainny Arsenal", Army Research Laboratory, 2005.
- [4] MIL-STD-188-125-2, "High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection Time-Urgent Missions for Ground-Based C~FIA Cilities Performing Critical", Department of Defense, 1999.
- [5] R. L. Monroe, "EMP Shielding Effectiveness and MIL-STD-285", Harry Diamond Laboratories, HDL-TR-1636, 1973.