

체계 수준 HEMP 내성 시험을 위한 시험파형 계측 기법 연구

여 세 동^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제7기술연구본부

A Study on the Measurement Method of Test Waveform for System-level HEMP Immunity Test

Saedong Yeo^{*,1)}

¹⁾ The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 22 October 2018 / Revised 3 January 2019 / Accepted 8 February 2019)

ABSTRACT

High-altitude ElectroMagnetic Pulse(HEMP) is a high-power electromagnetic pulse caused by nuclear explosions at altitudes above 30 km. This pulse can cause serious damage to the electrical/electronic device. Therefore, there are a lot of studies on the effects of HEMP in the literature. When conducting studies on the effects of HEMP, it is essential to measure the simulated HEMP. Depending on the need for measurement, this paper focuses on the HEMP measurement method. This paper proposes a measurement method using frequency domain compensation to extract the correct waveform and solves the offset problem more efficiently than the conventional methods. The proposed method is verified by experiment using HEMP simulator and measurement system in ADD.

Key Words : HEMP(고고도 전자기 펄스), Transfer Function(전달 함수), Frequency Domain Compensation(주파수 영역 보상), Offset(오프셋)

1. 서론

현대 사회는 스마트폰의 사용이 대중화 될 정도로 소형화 및 집적화가 이루어진 전기/전자 매체들에 둘러싸여 있다. 이러한 전기/전자 매체는 핵폭발로 인해 발생하는 강력한 전자기 펄스(EMP, Electromagnetic Pulse)에 매우 취약하다. 특히, 30 km 이상의 고도에서

의 핵폭발로 인해 생성되는 고 고도 전자기 펄스(HEMP, High-altitude Electro-Magnetic Pulse)는 반경 수십에서 수백 km에 걸쳐 금속성 물질에 유기되어, 각종 전기/전자 매체로 이루어진 사회 기간망들을 마비시켜 국가에 심각한 피해를 초래한다¹⁻³⁾. 그에 따라, HEMP 환경 하에서 운용되는 전기/전자 장비들은 HEMP에 대한 적절한 방호대책이 요구된다⁴⁾. 이러한 방호대책을 수립하기 위해서는 HEMP를 모사할 수 있는 시뮬레이터를 갖추고, 이를 이용한 측정 및 분석이 필수적이다. 그에 따라, 국방과학연구소에서는 EADS

* Corresponding author, E-mail: ysd1990@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

Casa CN-235 항공기급 대형 체계 수준 HEMP 시험을 수행할 수 있는 시뮬레이터를 확보하였다. 이를 통해 HEMP를 인가하였을 때, 체계 내부에 유기되는 전압 및 전류를 측정하고, 측정치를 바탕으로 적절한 방호 대책을 수립할 수 있다. HEMP에 대한 군사용 무기체계의 방호 및 검증에 관한 요구조건은 MIL-STD-464C에 명시되어 있으며, 이를 위한 시험절차는 MIL-STD-188-125-1, 2에 자세히 기술되어 있다⁵⁻⁷. 본 논문에서는 국방과학연구소의 HEMP 시뮬레이터와 같이 대형 체계를 위한 시뮬레이터를 운용 할 때, 시험과형을 계측하는 기법에 대해 중점적으로 다루고자 한다.

대부분의 국내 HEMP 계측 시스템의 경우, 장비 수준의 내성을 살펴보기 위한 목적으로 시간 영역에서의 보상을 통한 계측이 이루어진다. 하지만, 시간영역에서의 보상은 계측 경로 상의 장비들의 주파수 응답 특성을 고려하지 않기 때문에 상대적으로 보상의 정확성이 떨어진다고 볼 수 있다. 실질적으로 각종 무기체계의 HEMP에 대한 영향성 분석을 위해서는 체계 내부에 유기되는 전압 및 전류를 정확하게 측정하는 것이 필요하다. 특히, 측정하려는 신호가 광대역 신호일 때 주파수 영역에서의 보상이 더욱 요구되는데, Fig. 1에서 보이는 전형적인 HEMP 파형³에 대한 주파수 응답 특성을 살펴보면 Fig. 2와 같이 광대역 신호임을 알 수 있다.

HEMP 시험 파형의 계측은 전통적으로 D-dot 센서, BALUN(BALUnced to UNbalunced), 적분기, 동축케이블, 오실로스코프를 이용하여 계측이 이루어진다. 하지만 동축케이블을 사용할 경우 HEMP에 노출된 길이

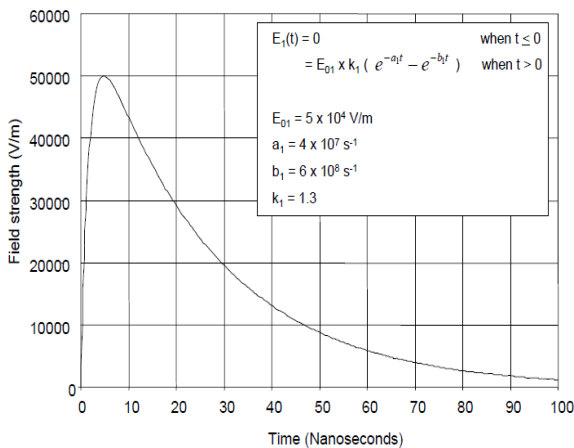


Fig. 1. Typical HEMP waveform in time domain

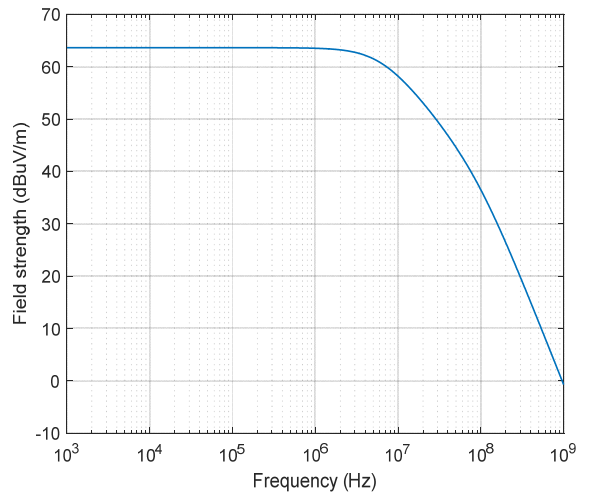


Fig. 2. Frequency response of typical HEMP waveform

가 길어질수록 결합(Coupling)으로 인해 측정 파형의 왜곡이 심화된다. 이러한 문제는 특히 대형 체계 수준의 시험 시스템에서 두드러지기 때문에 동축케이블의 사용은 최소화해야 한다. 그에 따라 외부 전자기 신호에 영향을 거의 받지 않는 광케이블을 시험 영역에 포설하여 신호를 측정한다⁸⁻¹⁰. 광케이블을 사용할 경우, 광신호와 전기신호간의 변환을 위해 광전변환기의 사용이 불가피하다. 그런데, 광전변환기의 입출력은 광전변환기의 손상을 막기 위해 상당히 낮은 수준의 신호를 유지해야한다. 그에 따라 일정 수준 이상의 신호를 요하는 적분기는 사용하는데 어려움이 존재한다. 만약 적분기를 광전변환기의 사용 전 단계에서 이용하고자 하더라도 일반적인 적분기는 뒷단 소자의 입력 임피던스가 1 MΩ 정도로 높을 때 정상적으로 동작하는 반면, 뒷단 소자인 광전변환기의 입력 임피던스는 50 Ω이므로 여전히 사용하기 어렵다. 그러므로 광전변환기 사용 시 소프트웨어 상에서 수치적으로 적분하는 방식을 취하는 것이 합리적이다. 그런데, 이러한 적분 방식을 이용하게 되면 오실로스코프 자체의 오프셋(Offset)으로 인해 파형의 왜곡이 발생한다. 이를 기존에는 오실로스코프 상에서 육안으로 오프셋을 보상 후 적분을 취하거나¹¹, 적분파형에서 curve fitting 기법을 이용하여 보상이었다¹². 하지만 기존의 이러한 방식들은 사람의 육안을 이용한다는 부정확함과, 매 측정 때마다 파라미터 변경 작업이 불가피하다는 단점이 존재한다. 이를 본 논문에서는 주파수 영역에서의 DC(Direct Current) 성분 제거를 통해 효율적으

로 오프셋을 보상하고, 계측 경로상의 장비들의 주파수 응답 특성을 고려한 보상을 통해 정확한 계측 파형을 추출할 수 있음을 제안하였다. 이에 관한 검증은 Fig. 3에 보이는 국방과학연구소의 HEMP 시뮬레이터를 이용한 실험을 통해 이루어졌다.

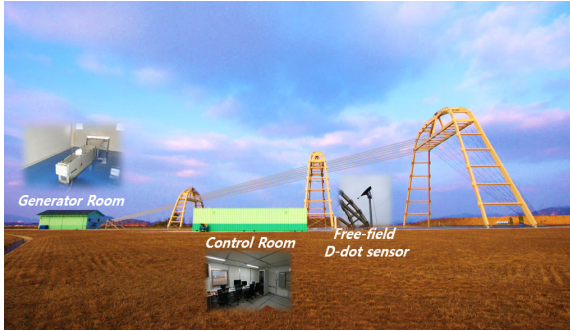


Fig. 3. HEMP Simulator in ADD

2. HEMP 계측 시스템

펄스를 계측하기 위해서는 D-dot 센서 및 B-dot 센서와 같은 미분센서를 필요로 하는데, 이들은 각각 전계 및 자계 변화율을 측정하는 센서이다. 이 센서를 통해 습득한 변화율의 신호를 전계 및 자계값으로 변환하기 위해서는 일반적으로 적분기가 사용된다. 하지만 서론에서 언급한 이유로 적분기를 사용하지 않는 대신 소프트웨어 상에서 수치적으로 적분을 하도록 구성하였다. 센서를 통해 습득한 전압 신호가 오실로스코프까지 전달되는 경로는 Fig. 4와 같으며, 각 구성요소별 역할은 하위 절에서 기술하였다.

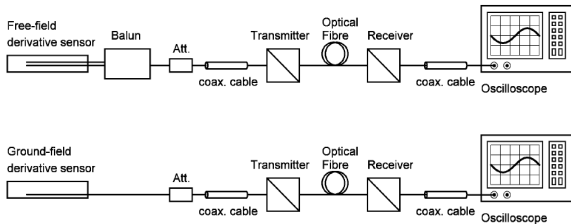


Fig. 4. Signal measurement chain

2.1 D/B-dot 센서

D-dot 또는 B-dot 센서는 빠른 변화율을 가지는 전기장 또는 자기장을 시간영역에서 계측하기 위해 사

용되는 센서이다. 센서의 출력 값은 전기장 또는 자기장의 변화율 함수로, 센서의 전달함수가 선형성을 갖는다고 볼 수 있는 차단주파수 이하의 구간에서 측정이 가능하다^[14]. 이러한 구간에 대해 선형 근사를 적용한 D-dot 센서의 출력 값인 전압과 전기장 간의 관계식은 식 (1)과 같다^[15].

$$V(t) = RA_{eq}\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} E(t) \quad (1)$$

여기서 R 은 부하의 임피던스로 출력 케이블의 임피던스에 해당하고, A_{eq} 는 센서의 등가면적이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 센서의 출력값은 센서의 등가면적에 비례하고, 이는 센서의 민감도와 연관된다. B-dot 센서의 경우, 전기장 대신 자기장을 측정하는 것을 제외하고는 식 (1)과 유사한 관계식을 따른다.

2.2 BALUN(BALANCED to UNbalanced)

D/B-dot 센서는 Table 1에서 볼 수 있듯이, free field type과 ground plane type이 존재한다. Ground plane type은 센서가 접지판 위에 설치되고, 하나의 센서와 하나의 출력 단자로 구성되며, 출력형태가 unbalanced 형태를 가진다. Free-field type은 자유공간에 설치되고, 두 개의 센서와 두 개의 출력단자로 구성되며, 출력형태가 balanced 형태를 가진다. Free-field 센서의 출력은 balanced 형태이고, 오실로스코프의 입력은 unbalanced 형태이므로 이 둘 사이의 신호를 연결하기 위해서는 balanced 형태에서 unbalanced 형태로 변환해주는 장치가 필요한데 이 장치가 BALUN에 해당한다.

Table 1. Type of sensors

	D-Dot	B-Dot
Free field		
Ground plane		

2.3 동축케이블 및 감쇠기

센서 출력과 광전변환기 송신기 입력 사이 및 광전변환기 수신기 출력과 오실로스코프 입력 사이의 연결은 전기적 신호가 이용되는 구간이기 때문에 동축

케이블로 구성하는 것이 불가피하다. 그에 따라 이 구간에서는 최소한의 길이의 동축케이블로 구성하였다. 이 때, 광전변환기 송신기의 손상을 막기 위해 감쇠기를 통해 광전변환기 송신기로 입력되는 신호가 광전변환기 송신기가 받아들일 수 있는 최대 입력보다 낮게 변환하는 것이 필요하다.

2.4 광전변환기

동축케이블의 경우, 노출된 케이블의 길이가 길어질수록 신호의 감쇠 및 왜곡이 심각해지는 문제가 발생한다. 그런데, 체계 수준의 시험 시스템과 같이 규모가 큰 시스템의 경우 포설되는 케이블의 길이가 상당하다. 그에 따라 전자기적 영향을 거의 받지 않는 광케이블을 시험 영역 내에 포설하여 신호를 전달하는데, 이 때 광신호와 전기신호간의 신호 변환을 위해 광전변환기가 사용된다.

3. 주파수 영역 분석을 이용한 계측 기법

3.1 전달함수(Transfer function)

어떤 선형 시불변(Linear time invariant) 시스템 $h(t)$ 에 대한 입력 $x(t)$ 과 출력 $y(t)$ 간의 관계는 시간영역에서 컨볼루션 형태로 식 (2)과 같이 나타난다.

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

식 (2)를 식 (3)에 나타난 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하여 전개해보면, 식 (4)와 같이 시간영역에서의 컨볼루션 관계는 주파수 영역에서의 곱으로 나타남을 알 수 있다.

$$X(jw) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-jw t}dt \quad (3)$$

$$Y(jw) = H(jw)X(jw) \quad (4)$$

이 때, $H(jw)$ 는 주파수 영역에서의 입출력간의 비로 볼 수 있는데, 이를 해당 시스템의 전달함수라 부른다. 만약 여러 개의 독립 시스템이 직렬로 연결되어 있을 경우, 전체 시스템의 전달함수는 식 (5)와 같이 각 시스템의 전달함수의 곱으로 나타난다.

$$Y(jw) = H_1(jw)H_2(jw)H_3(jw)X(jw) \quad (5)$$

이 특성을 통해 각 시스템의 전달함수만 알고 있다면 전체 시스템의 입력 신호와 출력 신호 간의 관계를 수식적으로 명확히 정의할 수 있고, 이를 통해 주파수별 보상된 신호를 추출할 수 있다. 주파수 영역에서의 보상을 마친 후에는 최종적으로 식 (6)에 나타난 역 푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)을 수행하여 시간영역에서의 보상된 신호로 변환한다.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(jw)e^{jw t}dw \quad (6)$$

이러한 관계는 소프트웨어 상에서 구현되는 이산 시간 데이터에서도 동일하게 적용되는 특성이다. 본 논문에서는 이산시간 푸리에 변환의 일종인 빠른 연산시간을 장점으로 하는 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)과 역 고속 푸리에 변환(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)을 이용하여 시간 영역과 주파수 영역간의 이산시간 데이터 변환을 수행하였다.

3.2 전달함수를 이용한 보상

2절에서 설명한 계측 시스템 상의 각 구성요소들은 각각의 주파수 응답 특성을 가진다. 그런데 기존의 시간영역에서의 보상을 통해 전/자기장을 산출할 시, 이들 특성을 고려하지 않음으로 인해 정확한 보상을 수행하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 계측 경로상의 각 구성요소들의 전달함수를 이용하여 보상하는 기법을 제시하였다. 본 논문에서 D-dot 센서를 통해 계측된 미분 신호를 원하는 전기장으로 보상하는 절차는 Fig. 5와 같다. 주파수 응답 특성을 고려한 보상을 위해 우선 계측된 신호에 대해 FFT를 수행하여 주파수 영역에서의 신호로 변환한다. 변환된 주파수 영역 신호의 각 주파수별 데이터에 대해 각 주파수에 해당하는 계측 경로상의 구성요소들의 전달함수 값으로 식 (5)에 따라 나뉘춤으로써 보상을 수행한다. 이 과정이 Fig. 5의 주파수 보상 절차에 해당한다.

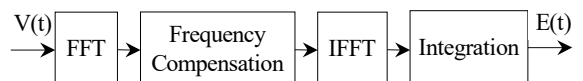


Fig. 5. Compensation process

이 때, 각 전달함수는 네트워크 분석기를 이용하여 크기 및 위상 응답 측정을 통해 추출하였다. 전압 측정 시, 주파수 응답 특성을 고려해서 보상을 해야 하는 인자는 Fig. 4에 따라 BALUN, 동축케이블, 광전변환기에 해당한다. 감쇠기의 경우, 주파수 응답 특성이 HEMP 파형의 대역폭 구간에서 비교적 평평하기 때문에 주파수에 상관없이 감쇠된 값만큼 보상을 수행하는 것으로 충분하다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 각각 BALUN, 동축케이블, 광전변환기의 주파수 영역에서의 크기(Magnitude) 응답에 해당한다.

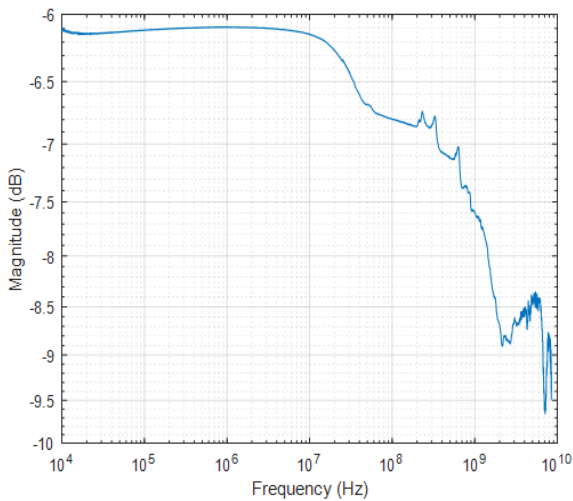


Fig. 6. Transfer function of BALUN

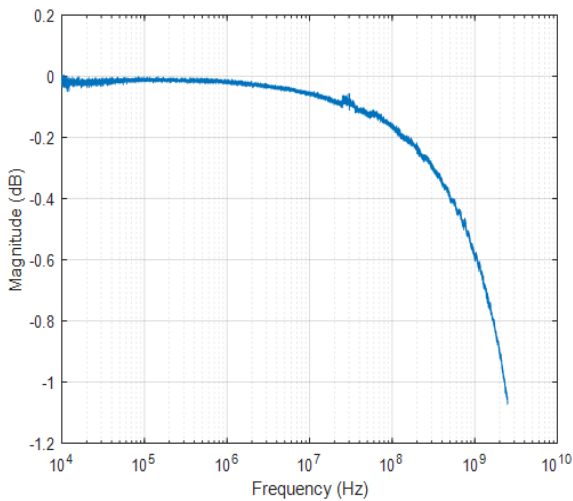


Fig. 7. Transfer function of coaxial cable

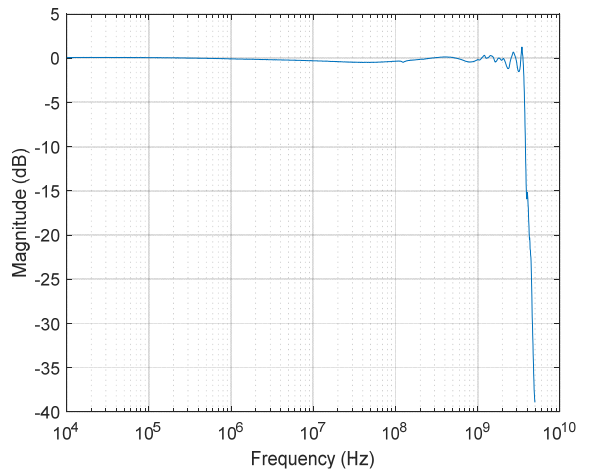


Fig. 8. Transfer function of fiber-optic data link

상기 그래프들을 보면 알 수 있듯이 주파수 응답 특성이 저주파에서는 비교적 일정하지만 고주파로 갈수록 급격히 변화함을 알 수 있다. 그에 따라 이들을 적용하여 보상 시, 고주파 대역으로 갈수록 차이가 확연히 드러날 것임을 예상할 수 있다.

Fig. 9는 free-field D-dot 센서를 통해 계측된 신호가 Fig. 4의 계측경로를 거쳐 오실로스코프 상에 도시된 시간영역에서의 원 신호에 해당한다. 이 원 신호에 대해 FFT를 수행하여 주파수 영역으로 변환한 주파수 영역에서의 원 신호와 이 신호에 대해 Fig. 5의 주파수 보상 절차를 수행한 후의 결과를 비교해보면 Fig. 10과 같다.

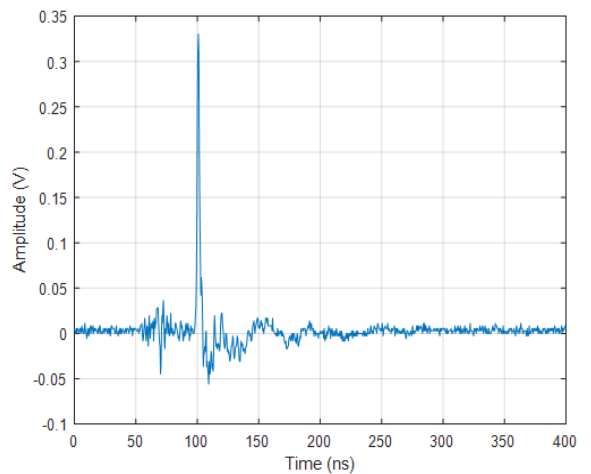


Fig. 9. Raw data in the time domain

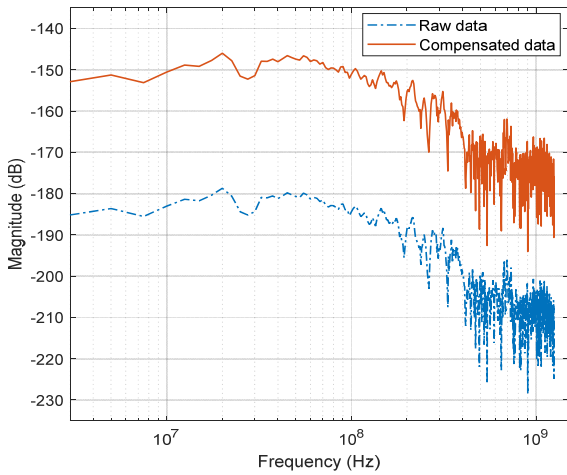


Fig. 10. Comparison of frequency response between the raw data and the compensated data

기존의 시간 영역에서의 보상과 본 논문에서 제시한 주파수 영역에서의 보상을 각각 수행한 후의 주파수 응답을 비교한 결과가 Fig. 11에 나타나 있다. 이때, 시간 영역에서의 보상 시 BALUN은 제조사에서 제공하는 삽입손실 값을 이용하였으며 동축케이블 및 광전변환기에 대한 보상은 이루어지지 않았다. 앞서 언급한 바와 같이 고주파 대역에서 특히 기존 보상 방식과의 차이가 두드러지며, 최대 2.3 dB 정도의 차이가 나타난다.

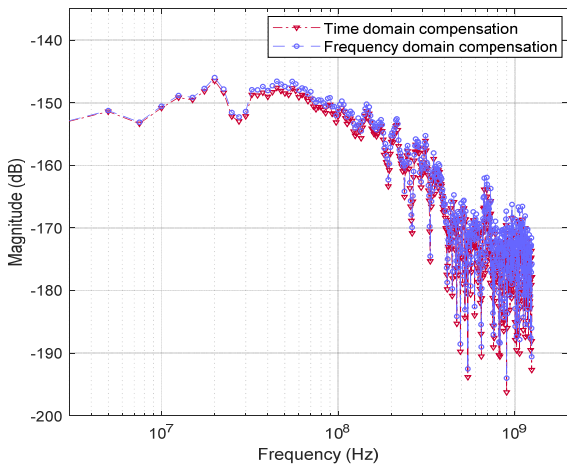


Fig. 11. Comparison of frequency response between the time domain compensation and the frequency domain compensation

전/자기장 측정 외에도 체계 내 케이블에 유기된 전류를 측정할 경우, D/B-dot 센서 대신 전류프로브를 이용하여 측정이 이루어지는데 전류프로브의 주파수 응답 특성 또한 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 HEMP 파형의 대역폭 구간 내에서 일정하지 않다. 결론적으로 체계 수준 HEMP 내성 시험 시 유기되는 전압 및 전류 계측을 위해서는 주파수 영역에서의 전달함수를 이용한 보상이 필요하다는 것을 알 수 있다.

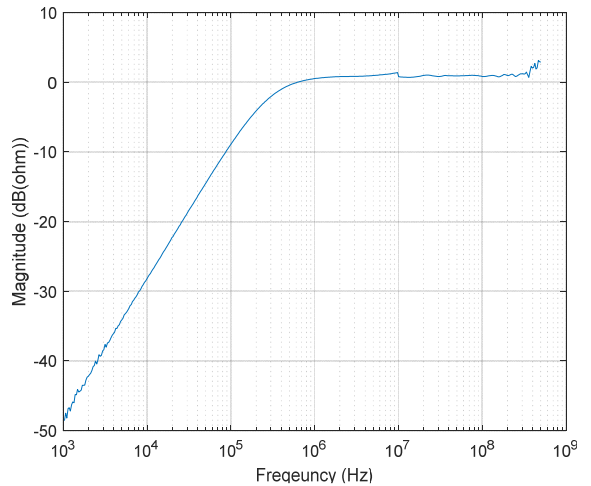


Fig. 12. Transfer function of current probe

3.3 주파수 영역에서의 오프셋 보상

주파수 영역에서의 보상을 마친 후, 시간 영역에서의 파형을 얻기 위해 IFFT를 수행하고 식 (1)에 따라 $E(t)$ 를 산출한다. 그런데 오실로스코프를 통해 계측된 데이터는 오실로스코프 자체의 오프셋을 포함하고 있기 때문에 실제로 식 (1)에 따라 적분 연산을 수행 시 Fig. 13과 같이 파형이 어느 한쪽 방향으로 치우친 형태가 나타난다.

이를 해결하기 위해 기존 연구에서는 적분하기 전 오실로스코프 상에서 육안으로 커서를 이용하여 오프셋을 보상하는 방식을 취했다^[11]. 이는 사람의 육안을 이용함으로써 인하여 생기는 부정확함과, 매번 커서 조정에 따른 불편함이 존재한다. 사람의 육안에 의한 부정확함을 개선하기 위해 적분과정에서 오프셋을 보상하는 curve fitting이라는 기법이 최근에 제시되었다^[12]. Curve fitting 기법은 적분된 파형에서 펄스의 시작 지점이라고 판단되는 지점 이전의 데이터에 대해 1차 함수 형태로 추정된 성분을 전 영역에 걸쳐 제거해주면

오프셋이 제거되는 방식이다. 하지만 펄스의 시작 지점을 지정하는데 있어서 모호함이 존재하고, 시작 지점 이전의 데이터에 포함된 잡음 성분에 따라 1차 함수 성분을 적절히 추정하지 못하는 경우가 발생한다. 그에 따라 Fig. 14와 같이 오프셋 보상이 적절히 이루어지지 못하여 파형이 여전히 어느 한 쪽 방향으로 치우치는 형태가 나타난다. 이를 보정하기 위해 매번 펄스 파형의 시작 지점을 선정하고, 그 지점 이전의 데이터 중 잡음이 비교적 적은 부분, 즉 Fig. 13에서 50 ns 이전의 영역과 같이 직선에 가까운 영역을 선택하여 1차 함수 성분을 추정해야 하는 과정이 필요하다.

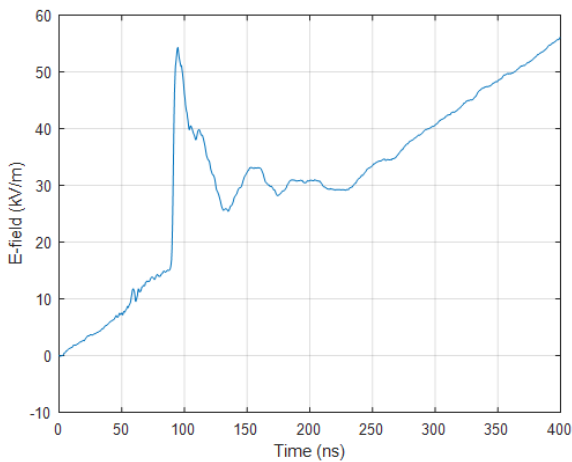


Fig. 13. Integrated waveform with offset

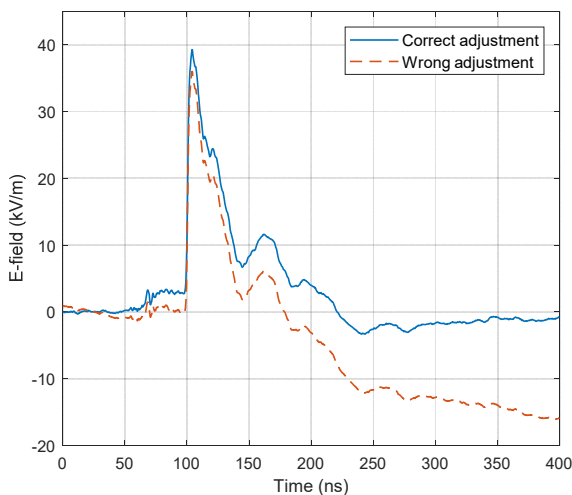


Fig. 14. Comparison of adjustment of the offset

이를 개선하기 위해 본 논문에서는 주파수 영역에서의 전달함수를 이용한 보상과 더불어 주파수 영역에서 오프셋을 보상하는 기법을 제안하였다. 기존의 오프셋 제거 방식들을 살펴보면 결국 오실로스코프 상에 도시된 신호의 DC 성분을 시간 영역에서 제거하려는 형태임을 알 수 있다. 이처럼 DC 성분이 제거되어야 한다는 점은 D-dot 센서의 관계식인 식 (1)에 대한 주파수 해석을 통해 더욱 자명해진다. 식 (1)을 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 식으로 변환하면 식 (7)과 같고, DC 성분이 '0'으로 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, D-dot 센서를 통해 계측된 신호는 DC 성분이 존재하지 않는다는 의미이다.

$$V(j\omega) = j\omega R A_{eq} \epsilon_0 E(j\omega) \quad (7)$$

그에 따라 본 논문에서는 주파수 영역에서 전달함수를 이용한 보상을 수행한 후, DC 성분(0 Hz)을 제거함으로써 효율적으로 오프셋을 보상하였다. Fig. 9에 나타난 원 신호에 대해 본 논문에서 제시한 기법을 통해 산출한 전기장과 기존의 시간 영역에서의 보상^[12]을 통해 산출한 전기장을 비교한 결과가 Fig. 15에 나타나있다. 파형의 첨두치를 비교해보면 본 논문에서 제시한 기법 대비 기존 방식의 경우 약 7% 정도 낮게 나타난다. HEMP 파형에 있어서 첨두치는 방호대책을 수립할 때 가장 중요한 요소인 만큼 이러한 차이는 무시할만한 수준이 아니라고 판단된다.

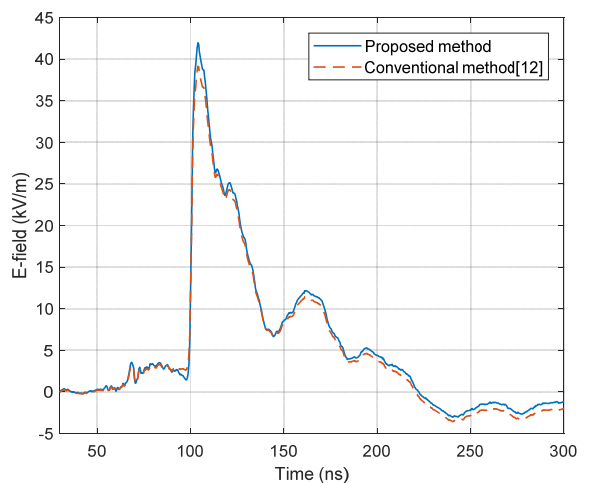


Fig. 15. Comparison of E-field between the conventional and the proposed method

4. 결 론

본 논문에서는 주파수 영역에서의 보상을 통해 체계 수준의 HEMP 내성 시험을 위한 시험파형을 계측하는 기법을 소개하였다. 주파수 영역에서 계측 경로상의 구성요소들의 전달함수를 이용한 보상 및 DC 성분 제거에 따른 오프셋 보상을 통해 기존 방식보다 효율적으로 정확한 파형을 추출할 수 있고, 이를 바탕으로 체계의 취약한 부분을 식별하여 적절한 방호대책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

HEMP에 대한 관심이 전 세계적으로 집중되는 만큼 이에 대한 영향을 연구하는 것은 필수적이다. 이를 연구하기 위해서는 기본적으로 HEMP 파형을 모사하고 그에 대한 계측이 불가피하다. 본 연구를 통해 보다 정확하고 효율적인 계측 기법을 소개함으로써 HEMP 영향에 대한 각종 연구를 수행함에 있어서 기여하는 바가 있을 것으로 기대된다.

References

[1] M. Seo, S. Chi, Y. Kim, W. Park, H. Kang and C. Huh, "Electromagnetic Wave Shielding Effectiveness Measurement Method of EMP Protection Facility," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 25, No. 5, pp. 548~558, 2014.

[2] IEC 61000-1-3, "IEC Standard, Electromagnetic Compatibility(EMC), Part 1-3 : General - The Effects of High-altitude EMP(HEMP) on Civil Equipment and Systems," 2002.

[3] IEC 61000-2-9, "IEC Standard, Electromagnetic Compatibility(EMC), Part 2-9 : Description of HEMP Environment - Radiated Disturbance," 1996.

[4] R. Hoad, W. A. Radasky, "Progress in High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Standardization," IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 55, No. 3, pp. 532-538, Jun. 2013.

[5] MIL-STD-464C, "Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems," Department of Defense, 2010.

[6] MIL-STD-188-125-1, "Department of Defense Interface Standard : High-altitude Electromagnetic

Pulse(HEMP) Protection for Ground-based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Fixed Facilities," Department of Defense, 1998.

[7] MIL-STD-188-125-2, "Department of Defense Interface Standard : High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Transportable Systems," Department of Defense, 1998.

[8] J. V. Klüss, P. Hyvönen, "Practical E-field Sensors for EMP Testing," in Proc. Int. Conf. High Voltage Eng. Appl.(ICHVE), Sep. 2014.

[9] Yaoyao Li, Donglin Su, Yan Liu, Zhao Yang, "The Experimental Study on the Effect of HEMP on the Typical Aircraft Antenna," 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM), Nov. 2015.

[10] Huang Zhengyu Shi Lihua Zhou Yinghui Ma Rupo, "EMD-Based Signal Denoising in EMP Measurement System," IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Aug. 2013.

[11] Bertrand Daout, TN27 - Adjustment of the Offset When using the Integration Function on a Scope, Montena Technology, Switzerland.

[12] Lijun Yao, Jianling Huang, Ning Kang, Tao Shen, Dong Liu, Feng Zhang and Hongliang Sun, "Compensation of the Offset in Numerical Integration of a D-dot Sensor Measurement," 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Harbin, China, July 2014.

[13] MIL-STD-461G, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment," Department of Defense, 2015

[14] S. Lee and Y. Park, 2017, "3 Dimensional Pulse Detector Using SMA Connector," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 28, No. 9, pp. 707~712, 2017.

[15] IEC 61000-4-33 Electromagnetic Compatibility(EMC) - Part 4-33 : Testing and Measurement Techniques - Measurement Methods for High-power Transient Parameters, Sep. 2005.