

# 모바일 충전회로에서 EFT/B 신호의 전달특성 예측에 대한 연구

## Prediction of EFT/B Signal Transfer Characteristics in Mobile Charging Circuit

송승제 · 김광호\* · 조정민\*\* · 이승배\*\* · 김소영\* · 나완수\*

SeungJae Song · Kwangho Kim\* · Jeongmin Jo\*\* · Seungbae Lee\*\* · So-young Kim\* · Wansoo Nah\*

### 요 약

본 논문에서는 모바일 충전회로를 대상으로 IEC 규격의 EFT/B(Electric Fast Transient and Burst) 내성 시험을 수행할 때 전달되는 신호를 예측할 수 있는 방법론 및 모델을 제안한다. EFT/B 신호는 모바일 충전회로가 충전 중인 상태에서 전달되기 때문에 교류전원 단에서 부터 부하 단까지의 신호전달특성을, 모바일 충전회로에 교류전원이 연결된 상태에서 알아야할 필요가 있다. 이를 위하여 간단한 CDN(Coupling-Decoupling Network)을 설계 제작하였으며, 이것을 이용하여 교류전원이 연결되어 있을 때와 연결되어 있지 않을 때의 두 가지 경우에 대해서 모바일 충전회로의 S-parameter를 VNA(Vector Network Analyzer)를 이용하여 측정하였다. 그 결과, 측정된 모바일 충전회로의 S-parameter 특성은 전원의 연결 유무와 거의 무관하였으며, 이것을 근거로 하여 모바일 충전회로만의 전달특성을, 전원이 연결되지 않은 상태에서, 적절한 인터페이스를 제작하여 측정하였다. 실제 EFT/B 신호 입출력의 전달함수를 구하여 S-parameter 측정의 정확성을 검증하였다. 이렇게 측정된 특성을 이용하여 모바일 충전회로의 EFT/B 신호가 전달되는 특성을 효과적으로 예측할 수 있었음을 보였다.

### Abstract

This paper presents a methodology and a model that can analyze the high frequency transfer characteristics from socket in the AC power port to the 5 V DC output port in the mobile charging circuit. This is to predict the output signals coming from the IEC(International Electrotechnical Commission) Standard(IEC 61000-4-4), EFT/B(Electric Fast Transient and Burst) immunity test for mobile charging circuit. Since the mobile charging circuit is energized from the AC power socket from the power line, it is necessary to know the high frequency transfer characteristics with activated AC power line. A simple CDN(Coupling-Decoupling Network) is designed and manufactured for measuring S-parameters of mobile charging circuit with and without AC power line activated. The result shows that the S-parameters of the specific mobile charging circuits are almost the same, independent of AC power line activation. Consequently, the S-parameters without AC line could be used to predict the output response to the EFT/B signals, and it was shown that the proposed methodology predicts the output responses quite accurately, which proves the validness of the methodology presented in this paper.

Key words: EFT/B Immunity Test, Mobile Charging Circuit, S-Parameter, AC Power Line

「이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A1A2009489).」

성균관대학교 이동통신 전력전자공학과(Department of Mobile Communication & Power Electronics Engineering, SungKyunKwan University)

\*성균관대학교 정보통신대학(School of Information and Communication Engineering, SungKyunKwan University)

\*\*삼성전자(Samsung Electronics)

· Manuscript received July 30, 2015 ; Revised August 17, 2015 ; Accepted October 12, 2015. (ID No. 20150730-052)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

I. 서 론

현재 각종 시스템의 집적화, 소형화 그리고 고속화 추세에 따라 전자 업계에서 작은 칩, 모듈에서부터 완성품 단계까지 EMC(ElectroMagnetic Compatibility) 문제의 중요성은 점차 증대되고 있다. 이와 같은 현상에 발맞추어 다양한 EMC 국제 평가 규격들이 존재한다. 이 중 하나인 EFT/B 내성 시험은 IEC에서 규정하는 국제규격(IEC 61-000-44)<sup>[1]</sup>으로서 EFT/B 신호를 평가하고자 하는 대상 EUT (Equivalent Under Test)에 인가하여 EFT/B 신호에 대한 EUT의 내성을 평가하는 방법을 기술하고 있다. EFT/B 신호는 EUT에 전기적으로 연결된 스위치가 물리적으로 분리될 때 전류가 순간적으로 차단되어 회로 내에서 높은 순간전류 변화량을 갖게 되는 것을 모사한 것으로, 이 높은 전류 변화량은 EUT의 유도 성분에 의하여 순간적인 높은 전압의 펄스 파형들이 발생하여 대상 회로를 타고 동작 중인 회로 내에서 오동작을 유발시키는 원인이 된다.

EFT/B 신호는 비교적 낮은 주파수를 이루며 반복되지만, 그것을 구성하는 성분들은 수 MHz에서 수 GHz 대역의 주파수를 갖는다. 따라서 높은 주파수의 EFT/B 신호에 의한 오동작에 대응한 설계를 위하여 EFT/B 신호는 시간 또는 주파수 특성과 EFT/B 내성 시험에서 신호가 전달되는 경로는 고주파 신호에 의한 특성 분석이 필요하며, 이를 통하여 회로의 원하는 지점에서의 EFT/B 신호의 전압 예측기술의 필요성은 점차 커지고 있다.

본 논문에서는 첫째, IEC 규격의 EFT/B 내성 시험에서 특정 중단 부하를 대상으로 시험 환경을 재연하여 EFT/B 신호의 입력/출력 전압을 측정하였다. 두 번째로 EFT/B 신호의 전달경로의 S-parameter를 모바일 충전회로에 AC 전력이 공급되는 상태에서 측정하는 법을 제안하였다. 또한, 소신호인 S-parameter를 이용하여 대신호인 EFT/B 신호를 예측하는 것이 타당함을 가정하고, 입출력의 전달함수와 제안하는 방식으로 측정된 S-parameter의 값을 비교하여 검증하였다. 마지막으로 측정된 S-parameter 값을 활용한 회로 시뮬레이션을 통해 앞서 직접 측정된 EFT/B 신호의 출력 전압 파형과 비교 분석하여 제안한 방법이 정당함을 보였다.

II. EFT/B 신호 분석

2-1 EFT/B 신호

규격에서 제안하는 EFT/B 신호의 순간적인 전압 변화는 시간 축에 대하여 그림 1에서와 같은 파형을 갖는다. 이는 5 kHz 또는 100 kHz의 주파수를 가지며, 15 ms간 반복되어 다발(Burst Duration,  $t_d$ )을 이루게 된다. 다발의 지속이 끝나면 약 285 ms의 지연 후 다발이 반복된다. 이것은 총 300 ms의 주기를 가지며, Burst Period( $t_p$ )라 한다. 규격에서는 EFT/B 신호의 전압 레벨을 4 kV에서 0.5 kV의 범위에서 시험을 진행한다. 이와 같은 EFT/B 신호는 EFT/B 신호 발생기를 활용하여 생성된다. 본 논문에서는 NoiseKen社의 FNS-AX3로 0.2, 5, 10, 2 kV의 전압을 5 kHz의 주파수로 설정하여 실험을 진행하였다.

EFT/B 발생기는 50 Ω 내부저항을 가지고 있으며, 이것은 중단에 50 Ω의 저항을 갖는 부하가 연결됨을 가정하

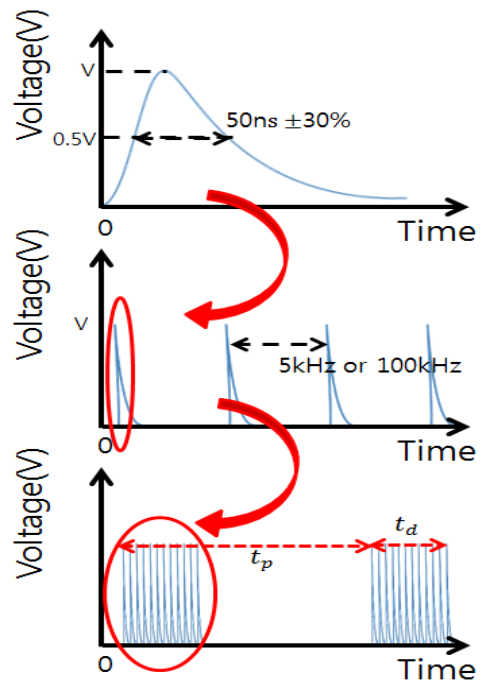


그림 1. EFT/B 신호의 전압 파형.  $t_d$ : 파형 다발, 15 ms  
 $t_p$ : 파형 주기, 300 ms  
 Fig. 1. EFT/B signal voltage waveform.  $t_d$ : Burst duration, 15 ms  $t_p$ : Burst period, 300 ms.

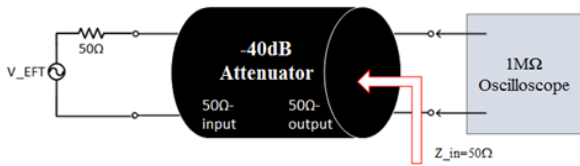


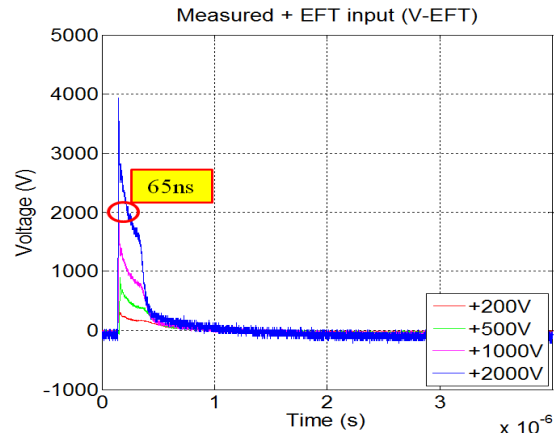
그림 2. EFT/B 발생기의 전압 측정  
Fig. 2. Measurement of EFT/B generator voltage.

고, 계측기의 디스플레이에 나타나는 전압의 2배가 되는 전압을 발생시킨다. 수 kV의 전압을 발생시키므로 이것을 측정하기 위한 회로는 계측기의 허용 범위 내에서 진행해야 하므로  $-40\text{ dB}$ 의 감쇠비를 갖는 전용 감쇠기를 사용하여 전압 수준을 100:1로 낮추어 측정하였다. 그림 2는 측정 회로를 등가로 나타내었다. 오실로스코프의 내부저항 값인  $1\text{ M}\Omega$ 을 부하로 활용하면 EFT/B 발생기의  $50\ \Omega$  내부저항은 무시할 수 있을 만큼 낮은 값이 되므로 대부분  $1\text{ M}\Omega$ 에서 전압 강하가 발생하게 된다. 따라서  $1\text{ M}\Omega$ 에서의 전압강하 값으로 EFT/B 신호의 기초 파형인  $V_{\text{EFT}}$ 를 오실로스코프에서 직접 측정할 수 있다<sup>[3][4]</sup>.

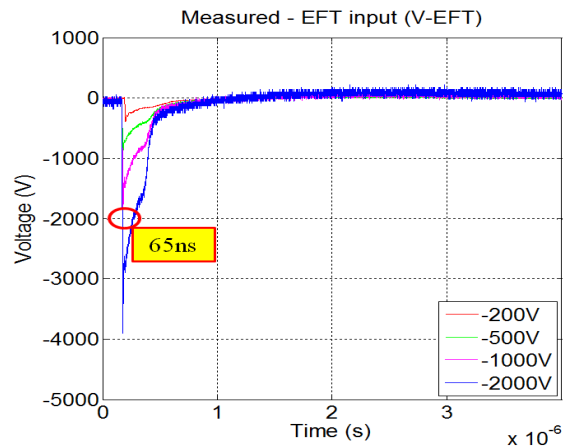
그림 3의 (a)는 발생기의 화면에서 전압을 크기별로 조정 후 기본  $V_{\text{EFT}}$ 를 측정하였다. (b)는 같은 크기의 전압을 음의 값으로 측정한 결과이다.  $2\text{ kV}$ 에서 최대 전압의 절반일 때 약  $65\text{ ns}$ ( $50\text{ ns}+30\%$ )의 지속시간을 보였다.

### 2-2 EFT/B 내성 시험 재언

모바일 디바이스는 충전회로를 통하여 충전 중인 상태에서 EFT/B 내성 시험을 진행한다. 그림 4와 같이 EFT/B 신호 발생기는 2개의 전원과 연결되고, 첫 번째 전원은 EFT/B 신호를 발생시키며, 이것이 두 번째 전원에 중첩되어 모바일 디바이스의 충전회로의 Line과 Neutral에 입력된다. 교류 전원의 PE(Protective Earth) 부분은 모바일 충전회로에서 연결되지 않으므로 본 연구에서는 사용하지 않는다. 교류신호와 EFT/B 신호가 더해지는 과정은 EFT/B 신호 발생기 내부의 커플링/디커플링 회로에 의하여 이루어지며, 이것에 대한 등가회로는 그림 4의 EFT/B 발생기 내부와 같다. 커플링 회로는 약  $33\text{ nF}$ 의 커패시터로 이것은 낮은 주파수에서 높은 임피던스를 가져  $60$



(a) 양의 전압을 갖는 EFT/B 신호  
(a) Positive voltage EFT/B signal



(b) 음의 전압을 갖는 EFT/B 신호  
(b) Negative voltage EFT/B signal

그림 3. 오실로스코프에서 측정된 EFT/B 신호  
Fig. 3. Measured EFT/B signal by oscilloscope.

Hz AC 전원 신호가 발생기로 전송되는 것을 차단하고, 고주파 신호인 EFT/B 신호를 EUT 쪽으로 전송한다. 전송된 신호는 다시 전원단으로 흘러들어가지 않도록  $100\ \mu\text{ H}$  이상의 인덕터와 페라이트로 구성되는 디커플링 회로에 의하여 차단된다. 모바일 충전회로로 전달되는 EFT/B 신호는 충전회로의 본체를 지나 특정 길이의 선로를 통과하여 Micro USB Port를 통하여 모바일 디바이스로 전달된다. 일반적인 시험에서는 충전회로의 중단에 모바일 디바이스를 연결하여 EUT의 동작/오동작 상태를 확인하

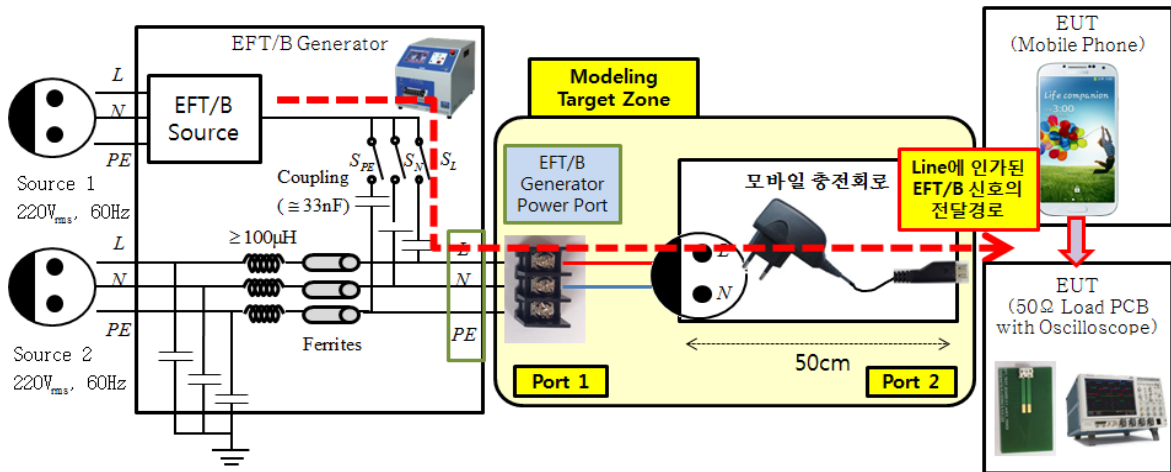


그림 4. 모바일 디바이스 충전회로에서 EFT/B 신호의 전달 경로, L(line), N(neutral), PE(protective earth)  
 Fig. 4. Transfer path of EFT/B signal in mobile device charging circuit, L(line), N(neutral), PE(protective earth).

지만, 여기에서는 직접적인 전압 출력을 위하여 EUT단에 모바일 디바이스 대신 Micro USB Port를 가지는 간단한 PCB를 제작하여 충전회로 종단에는 50 Ω 저항을 연결하여 여기에 걸리는 전압 값을 오실로스코프로의 프로브로 직접 측정하였다<sup>6)</sup>. 모든 측정에서 충전회로는 두 가지를 사용하였으며, 편의상 ‘A’와 ‘C’로 약어를 사용하였고, EFT/ B 입/출력신호 측정에는 ‘A’가 사용되었다.

EFT/B 신호를 1 kV로 세팅 후 50 Ω 저항에서 오실로스코프로 측정한 전압 파형의 DC 성분을 제거한 후의 전압은 그림 5와 같다<sup>5)</sup>. 같은 방법으로 각각 입력 전압이 양의 EFT/B 신호의 0.2 k, 0.5 k, 1 k, 2 kV일 때와 같은 크기로 음의 전압일 때 출력과 입력 전압의 최대, 최소의 차를 입력과 출력의 비로 dB 단위로 비교하였을 때 약 -24.5~26.9 dB의 감쇠를 확인할 수 있었다. 음의 EFT 신호를 인가하여 측정한 전압의 비교값은 -26~27.8 dB로 나타났다. 출력 리플 파형은 0.1 μs부터 약 0.4 μs까지 이어졌으며, 전체적으로 리플의 형태와 전압그래프 개형은 모든 출력 기록에서 비슷하게 나타났다. 이에 따라 EFT/B 신호는 충전회로를 통과한 후 짧은 시간 동안 종단에 전압변화를 일으키고, 5 kHz의 기본 주파수를 가지는 입력 파형은 200 μs 이후에 전달되기 때문에, 리플 지속시간인 0.4 μs보다 충분히 길다. 따라서 다음 신호가 입력되기 전에 이전 파형에 의한 전압 리플의 효과가 소멸되는

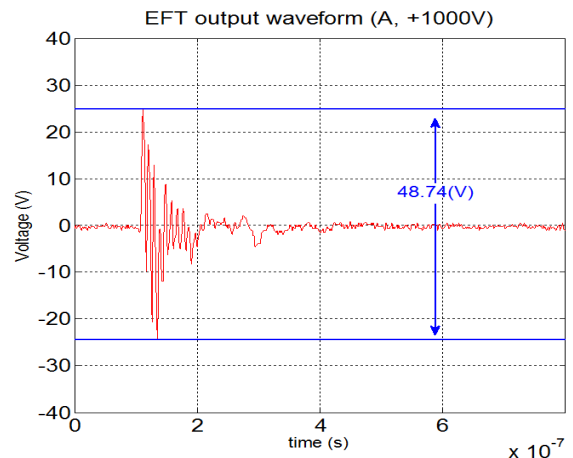


그림 5. 입력이 1 kV일 때 종단 저항에서의 출력파형  
 Fig. 5. Voltage output on 1 kV input on 50 Ω resistor.

것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 하나의 EFT/ B 신호 파형으로도 모바일 충전회로에서의 고주파 전달의 특성 및 현상을 분석하는 데에 충분함을 알 수 있다.

### III. EFT/B 내성 시험 회로의 S-Parameter 측정

#### 3-1 전원회로와 연결/분리 상태의 측정 회로 구성

EFT/B 내성 시험은 모바일 디바이스가 충전회로에 의해 충전 중일 때 시험을 진행한다. 충전회로가 전원에 연

결 중일 때 높은 주파수의 EFT/B 신호를 60 Hz의 AC 전원에 더하여 인가해 주므로 네트워크 분석기(VNA)를 이용하여 동작 중인 모바일 충전회로를 측정하는 것이 정확할 것이라 예상된다. 따라서 이와 가장 유사한 S-parameter 측정 회로를 구현하기 위하여 IEC 평가 규격<sup>[1]</sup>에서 제안한 내성 시험 회로를 기초로 새로운 회로를 제안하였다. 그림 5의 EFT/B 신호의 전달 경로에 따라 제안하는 측정 방법에서는 충전회로 앞부분과 제안하는 회로와 연결되는 포트 1, 충전회로 종단의 Micro USB 포트를 포트 2로 하는 회로를 구성하였다. 계측 장비를 높은 전압과 DC전압 등에 보호하며, 앞서 제시한 실제 측정 과정과 유사한 측정 환경을 만들어주기 위하여 그림 6과 같은 측정 회로(CDN, Coupling/Decoupling Network)를 구현하였다. 또한, 종단 포트의 인터페이스는 SMA 타입을 사용하며, 50 Ω 특성 임피던스를 갖는  $\mu$ -Stripline 형태로 제작되었다<sup>[2]</sup>. 포트 1에서 인가되는 VNA의 고주파 신호는 33 nF의 커패시터를 통과하여 커플링된다. 커플링된 VNA 신호는 전원부의 100  $\mu$ H 인덕터 2개에 의하여 고주파상태에서 높은 임피던스를 형성하여 전원부로의 흐름이 차단되고, 이 신호는 측정하고자 하는 회로로 진행하게 된다. 결과적으로 이 신호가 포트 2로 전송되어 원하는 S-parameter 값을 계산한다. 이때 VNA의 포트 1은 220 V, 60 Hz의 높은 전원에 전기적으로 직접 연결되어 있으므로 과부하의 위험에 노출되어 있다. 이를 보호하기 위하여 VNA의 포트 1 앞단에서 -30 dB, 250 W 정격의 감쇠기를 사용하여 직접적인 전력을 감쇠시켜 주었다. 마찬가지로

로 충전회로 종단의 포트 2에서는 정상적인 동작을 하는 충전회로의 출력으로 5 V DC 전압이 출력되므로 AC 커플링으로 동작하는 VNA에 치명적 영향을 미칠 수 있다. 이것을 막기 위하여 DC 차단 소자를 포트 2에 직접 연결하여 보호하였다. 이때 실험된 모바일 충전회로는 ‘C’를 사용하였다.

### 3-2 측정 및 결과

앞 절에서 구성한 회로로 측정을 진행하였으며, 100 kHz에서 1 GHz까지 주파수를 1,601개의 포인트를 로그 주파수로 분석하였다. 전원단의 스위치를 On/Off하며 전원과 연결/분리 상태의 모바일 충전회로의 S-parameter의 측정을 진행하였다. 대조군으로 감쇠기를 제거한 후, 전원과 분리 상태에서 측정을 진행하였다. 그림 7의 (a)는  $S_{21}$ 을 측정 조건별로 주파수에 따라 나타내었다. 또한, 감쇠기의 전달 S-parameter를 측정하여 측정값을 이용하여 그림 7의 (b)에서 그 손실을 보정해 주었다. 보정 후  $S_{21}$ 의 값은 VNA의 에러항으로 예상되는 값(-120 dB의 잡음성 측정값)을 제외하고, 감쇠기가 없는 분리 상태의 대조 값과 감쇠기가 있는 값들은 모두 첫 번째 피크가 13.6 MHz에서 발생하였으며, 이후 1 GHz까지 대부분의 대역에서 일치한다는 것을 알 수 있었다.

그러나 수십 MHz 대역에서는 전원 연결 상태의 값이 분리 상태의 값에 대비하여 일정량의 노이즈성 변화량이 존재하였다. 이것은 모바일 충전회로의 동작 시 자체적으로 생성되는 능동 소자의 스위칭 신호가 VNA에 흘러들어 계산되어져 버린 값으로 예상된다. 정확한 S-parameter 값은 순수한 VNA의 신호만으로 이루어져야 하므로, 이것은 노이즈로 취급되어 무시할 수 있다. 따라서 분리 상태의 S-parameter를 측정하는 것이 외부 스위칭 신호가 포함되지 않으므로 더 정확한 모바일 충전회로에서의 고주파 특성이라 할 수 있다.

### 3-3 외부 수동 소자가 없는 전원단 분리 상태의 측정

AC 전원단에 연결된 상태의 모바일 충전회로의 S-parameter를 측정하기 위하여 구현한 그림 6의 회로에는 커

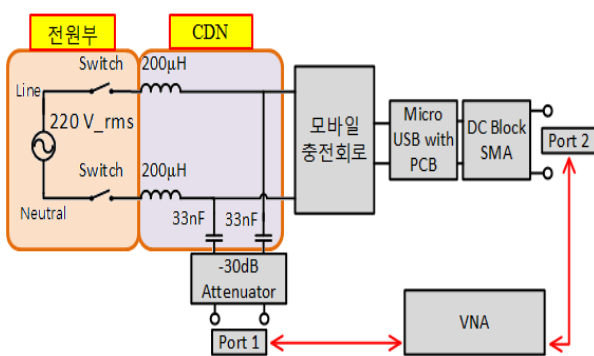
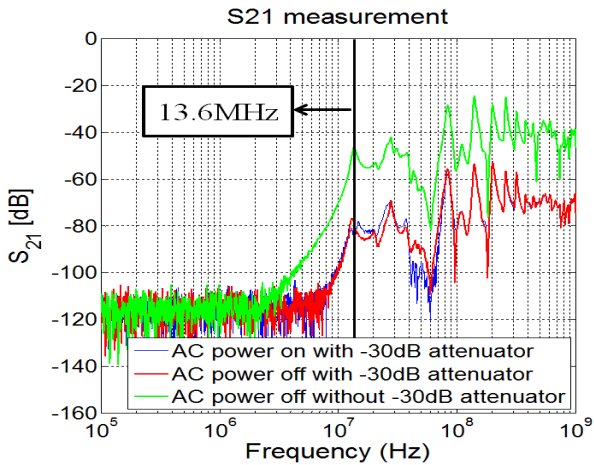
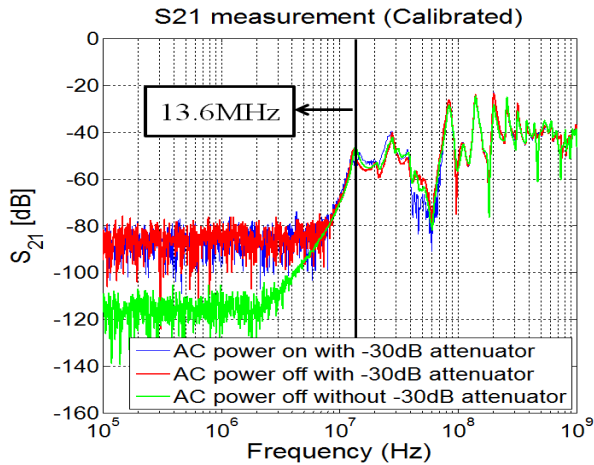


그림 6. 제안하는 S-parameter 측정회로  
Fig. 6. Proposed S-parameter measurement circuit.



(a) 감쇠기가 연결되어 교류전원이 인가된 상태와 감쇠기가 없는 상태의 S-parameter 측정  
 (a) AC power on/off and attenuator & without attenuator



(b) 감쇠기의 감쇠효과를 제거한 상태의 S-parameter  
 (b) Attenuator effects deleted S-parameter

그림 7. 제안된 회로를 이용하여 측정된 S-parameter.  
 Fig. 7. Measured S-parameter by proposed circuit.

플링/디커플링을 진행하기 위하여 모바일 충전회로 이외의 추가적인 회로가 존재한다. 수동소자 등을 포함하는 이 회로는 VNA의 신호를 주파수에 따라 분산시켜 정확한 특성의 측정에 방해한다. 따라서 그림 6의 회로는 모바일 충전회로만의 고주파 특성 측정을 위한 회로로 적합하지 않다. 정확한 S-parameter를 측정하기 위해 간단한 인터페이스를 제작하여 그림 8으로 진행하였다.

포트 1은 SMA 커넥터를 이용하여 50 Ω 특성 임피던스



그림 8. 수동소자가 제거된 인터페이스 회로  
 Fig. 8. Measurement circuit without passive component.

를 갖는 전송선로를 구현하여 모바일 충전회로의 전원부에 연결할 수 있게 콘센트를 이용하였다. 또한, 포트 2는 모바일 충전회로의 Micro USB Port를 제작하여 마찬가지로 50 Ω 전송선로와 SMA 커넥터를 이용하여 VNA에 연결해 주었다. 각 측정에서 인터페이스에 의한 효과는 무시하였으며, 그 결과를 그림 9에서 기존의 수동소자가 포함된 기존 회로의 측정값(그림 7의 녹색 파형)과 비교해 보았다. 수십 MHz 대역에서 전체적으로 S-parameter의 값이 수동소자의 영향이 제거됨에 따라 상승하였고, 더 높은 고주파 대역은 이전의 값과 비슷한 수준의 크기를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 단순히 모바일 충전회로의 2개의 포트만을 VNA에 연결하여 S-parameter를 측정하는 것이 수동소자의 영향 없이 보다 정확한 모바일 충전회로의 고주파 특성의 추출이라 할 수 있다.

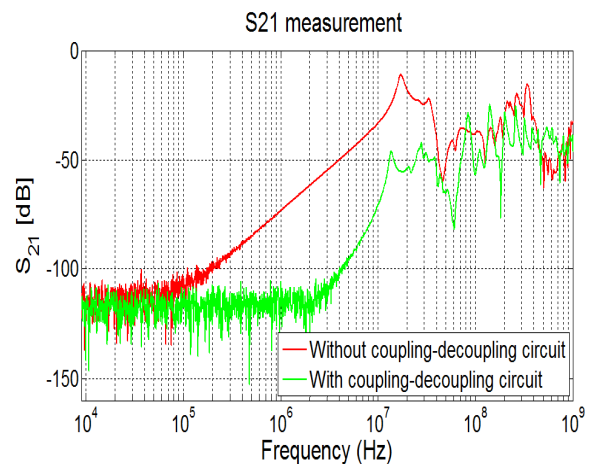


그림 9. 커플링/디커플링 회로 유/무에 따른 S-parameter  
 Fig. 9. S-parameter with/without additional CDN circuit.

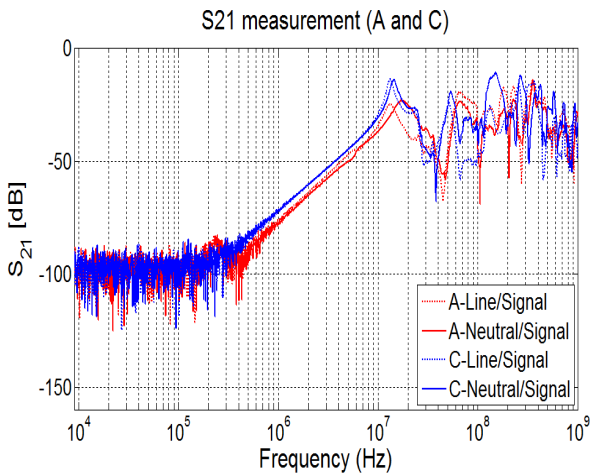


그림 10. 충전회로 A와 C의 연결 형태에 따른  $S_{21}$   
Fig. 10.  $S_{21}$  with different charging circuit condition.

EFT/B 신호는 EFT/B 신호 발생기에 의하여 충전회로의 Line과 Neutral로 각각 따로 입사시킬 수 있다. 따라서 각각의 전달함수를 측정하여야 하는데, 충전회로의 Line이 VNA의 Signal로 연결된 경우와 충전회로의 Neutral이 VNA의 Signal로 연결된 두 가지  $S_{21}$ 를 측정하였다. 모바일 충전회로는 앞선 절에서 이용되었던 ‘A’와 ‘C’를 모두 사용하였고, 각각 4개의 결과 값을 그림 10에 나타내었다.

### 3.4 소신호/대신호 관점에서의 EFT/B 신호의 전달 특성

일반적인 능동 회로는 능동 소자의 입/출력 특성에 따라 소신호/대신호 등가회로 모델이 존재한다. 따라서 능동회로의 소신호 특성, 대신호 특성은 각각 분석되어야 하며, 소신호 분석은 일반적으로 대신호 특성을 포함하지 못한다고 할 수 있다. EFT/B 신호는 모바일 충전회로에 인가되었을 때 상당히 큰 전압을 가지는 신호이므로 전달 특성을 분석할 때 대신호 모델로 분석해야 한다. 그러나 대신호 분석을 위한 등가회로는 능동회로의 비선형적 특성에 의하여 구현이 어려우므로 본 논문에서는 S-parameter를 이용한 소신호 분석 모델을 진행하였다.

본 연구에서 사용한 모바일 충전회로는 60 Hz를 정류하여 DC 5 V를 공급하는 회로이고, 이것을 위한 능동소자의 동작 주파수는 수 kHz이다. EFT/B 신호의 입력신호

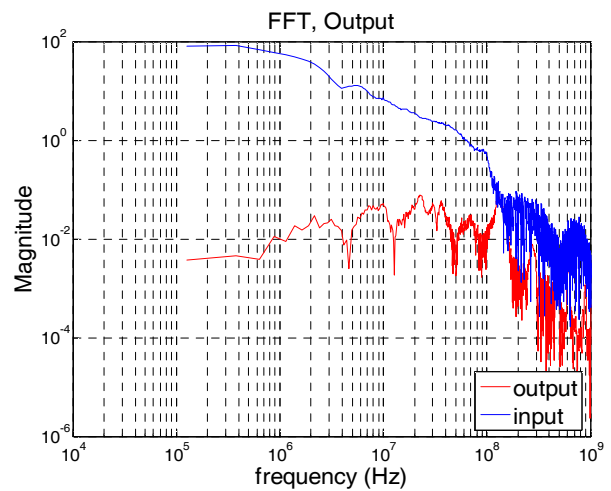


그림 11. 1 kV EFT/B 신호의 입/출력 주파수 스펙트럼  
Fig. 11. Frequency spectrum of 1 kV EFT/B signal in/output.

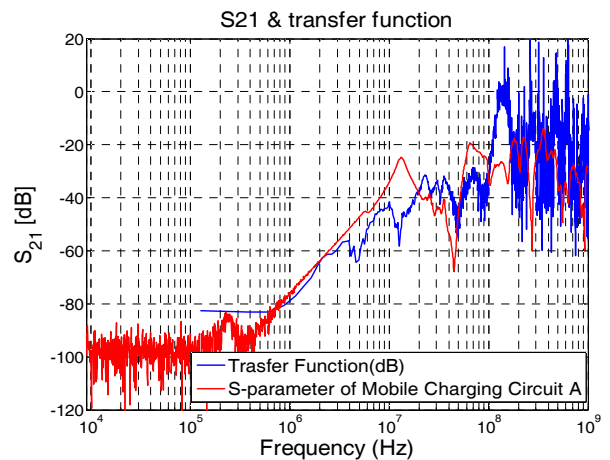


그림 12. 주파수 분석을 통한 전달함수와 측정한 S-parameter  
Fig. 12. Transfer function on frequency & measured S-parameter.

는 최대전압의 절반 지점의 65 ns의 폭을 가지고 있고, 이것은 대략 15 MHz의 주파수와 고조파로 인하여 능동소자의 동작 대역보다 더 높은 주파수 대역을 형성하게 된다. 또한, 시간 축의 입출력 파형을 FFT를 이용하여 주파수 대역으로 변환하여 자세한 주파수 대역을 확인하였다. 따라서 EFT/B 신호는 MHz 이상의 고주파 대역의 성분을 가지는 신호라 할 수 있으며, 이것은 주로 회로의 기생성

분을 통하여 전달이 되는 것으로 사료되며, 회로의 정상적인 동작과는 크게 관련이 없다는 것을 본 논문에서 가정하였다. 따라서 본 논문에서는 EFT/B 신호의 전달 대역과 유사한 주파수 대역의 S-parameter의 특성을 분석하였다.

그림 11에서는 1 kV 크기의 EFT/B 신호의 입력과 그것에 대한 출력을 위상을 고려하지 않고 FFT를 이용하여 주파수 성분으로 변환하였다. 그림 12에서는 이것을 입력과 출력의 비인 전달함수로 나타내어 S-parameter와 비교하기 위하여 dB 단위로 변환하여 서로 중첩시켜 비교하였다. 이를 통하여 소신호 분석으로서의 S-parameter 측정 결과는 실제 EFT/B 신호의 입/출력을 이용한 전달 특성과 유사함을 보였다. 따라서 제안하는 S-parameter를 이용한 특성 측정 방식이 EFT/B 신호의 전달 특성 분석에 유효함을 확인하였다.

#### IV. S-parameter를 이용한 EFT/B 출력 전압 예측

##### 4-1 전원단의 Line에 인가된 EFT/B 신호의 출력

앞선 장에서 그림 4의 회로를 그림 11에서 간단한 등가회로 시뮬레이션으로 구성하였다. AC 전원단의 Line이 VNA의 Signal로 연결되어 측정된 2 포트 S-parameter는 S2P 박스 형태로 삽입되고, 포트 1에는 미리 측정된 EFT/B 신호 발생기의 V\_EFT 전압 파형과 내부 임피던스인 50 옴을 연결해 주었고, 포트 2에는 실제 측정에 사용된 50 옴 종단 저항의 등가회로 모델을 구성하였다. 이때 종단 저항의 등가회로에서의 전압을 출력하여 2-3절에서 측정된 실제 출력 값과 비교하였다. 이 시뮬레이션에는 Keysight사의 ADS(Advanced Design System)을 활용하였다. 시뮬레이션에 의한 전압은 그림 15의(a)으로 나타났다. 최소 점과 최대 점의 차이는 45.6 V로, 그림 15의(b)의 실제 측정값의 전압 차인 48.74 V와 3.14 V의 차를 보였다. 두 값 모두 약 0.3 μS의 리플 시간을 가졌고, 시간축에 따라 순간적인 전압변화가 심한 실제 측정이었음을 감안하였을 때 전체적인 그래프 형태와 주기, 전압의 최대/최소값의 차가 유사함을 확인할 수 있었다. 같은 방법으로 -1 kV의 EFT/B 파형을 인가한 경우는 그림 16에서와 같이 마찬가지로 유사한 결과를 나타내었다.

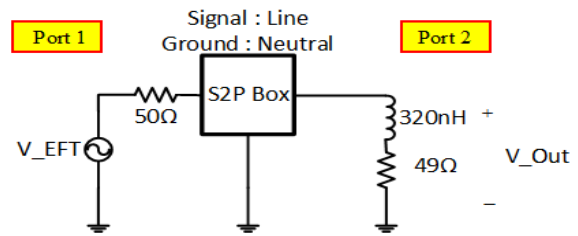


그림 13. EFT/B 내성 실험 등가회로  
Fig. 13. EFT/B immunity test equivalent circuit.

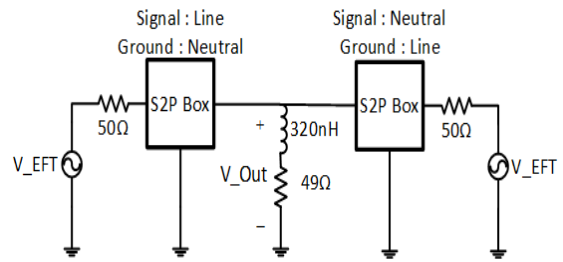


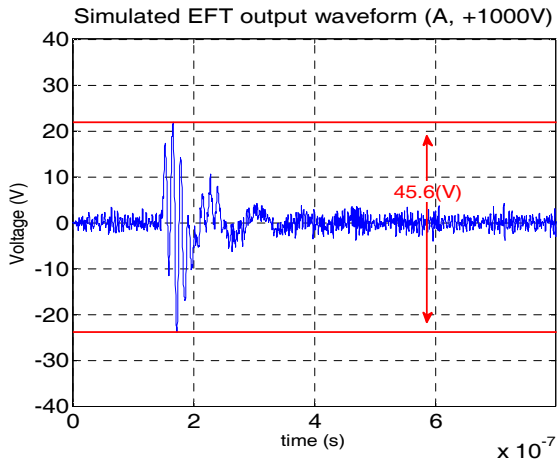
그림 14. EFT/B 신호의 Line/Neutral 동시 전달 등가회로  
Fig. 14. Proposed circuit for line, neutral.

##### 4-2 전원단의 Line과 Neutral에 동시에 인가된 경우

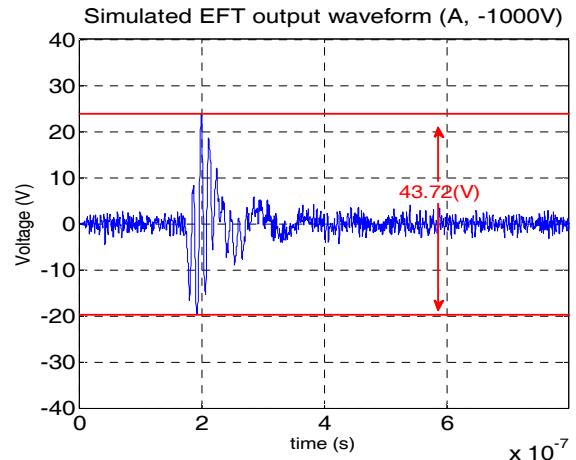
4-1절에서 제안한 회로에 추가적인 S2P 상자를 추가하여(그림 14) EFT/B 신호가 Line과 Neutral에 동시에 인가된 경우를 분석할 수 있다. 가운데 종단 부하를 기준으로 왼쪽의 S2P 상자는 4-1절에서와 마찬가지로 전원단의 Line이 VNA의 Signal과 연결되어 측정된 S-parameter를 이용하였으며, 출력부하 기준 오른쪽의 S2P 박스에 입력되는 S-parameter는 충전회로에서 전원단의 Neutral이 VNA의 Signal과 연결하여 얻은 값을 활용하였다. 따라서 포트 2의 종단의 부하는 총 2개의 입력 신호가 합쳐져 출력되는 형태를 가지게 된다. 4-1절에서와 마찬가지로 피크 전압값이 +1 kV인 V\_EFT를 EFT/B 신호 발생기의 파형으로 사용하였을 때의 측정 및 시뮬레이션 결과를 그림 14에 나타내었다. 각각 전압의 최대/최소값의 차가 57.2 V, 55.1 V로 일치한 결과를 얻었으며, EFT/B 신호를 Line에만 인가해 주었을 경우보다 큰 전압차가 나타났다.

같은 방법으로 앞 절과 같은 전압 크기의 EFT/B 신호를 Line에만 인가한 경우와 Line과 Neutral에 동시에 인가한 경우의 최대/최소전압 차를 수치상으로 표 1에서 정

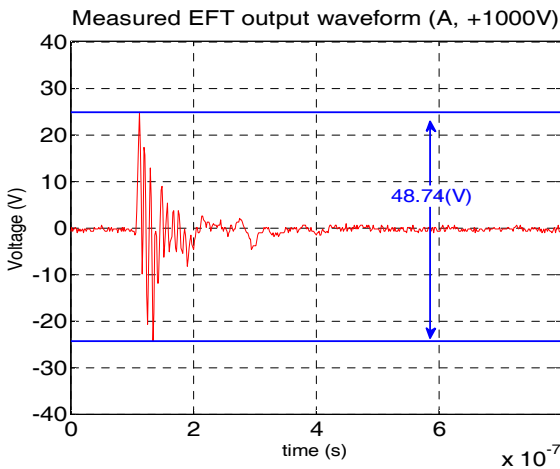




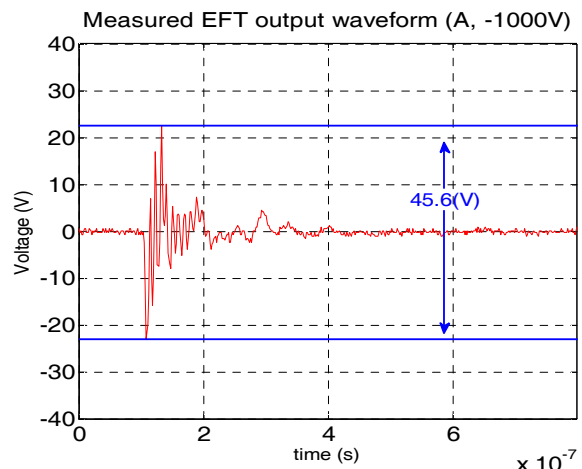
(a) 시뮬레이션을 통해 얻은 출력  
(a) Simulated voltage output



(a) 시뮬레이션을 통해 얻은 출력  
(a) Simulated voltage output



(b) 실제 측정을 통해 얻은 출력  
(b) Measured voltage output



(b) 실제 측정을 통해 얻은 출력  
(b) Measured voltage output

그림 15. 1 kV를 입력해 주었을 때 종단 50 Ω에서 시뮬레이션/측정값

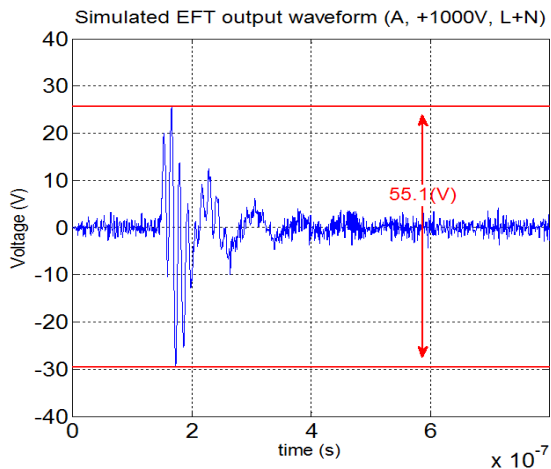
Fig. 15. Measured and simulated voltage when 1 kV EFT/B signal is inputted.

그림 16. -1 kV를 입력해 주었을 때 종단 50 Ω에서 시뮬레이션/측정값

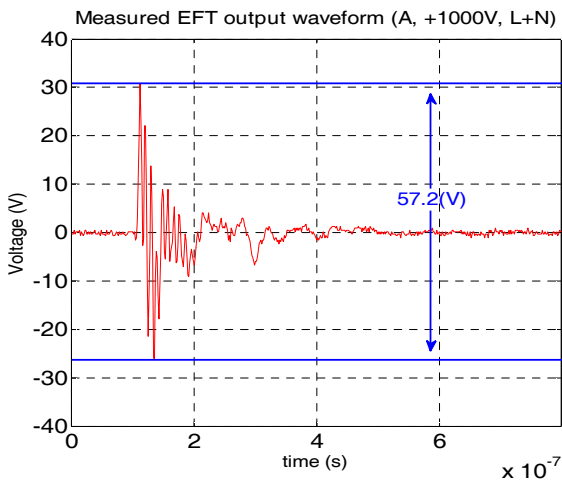
Fig. 16. Measured and simulated voltage when negative 1 kV EFT/B signal is inputted.

리하였다. 각각의 경우에서 어느 정도의 오차를 확인할 수 있었다. 이 오차는 첫째, 모바일 충전회로의 케이블이 차폐되어 있지 않으며, 그것들을 EFT/B 내성 실험의 규격에 따라 길이를 50 cm로 줄일 때 매번 일정하게 꼬아 줄 수가 없으므로 재현성이 낮아진다. 이로 인하여 의도치 않은 기생 성분이 각 실험별로 다르게 생성되어 VNA의 분석과 EFT/B 신호 전달에 영향을 미친 것이라 할 수 있

다. 둘째, 대부분의 오실로스코프는 비 측정 시에도 기기 자체의 잡음이 존재한다. 그러나 이것은 보통의 측정 때에는 무시 가능한 수준이나 EFT/B 신호의 측정에서는 순간적인 높은 전압을 직접 오실로스코프에 연결하는 것이 무리가 있어 1:100의 감쇄기를 이용하였다. 이를 시뮬레이션에 적용하기 위하여 감쇄되어 있는 신호에서 원 신호를 증폭하여 복원할 때 이 잡음 성분도 함께 증폭되어



(a) 시뮬레이션을 통해 얻은 출력  
(a) Simulated voltage output



(b) 실제 측정을 통해 얻은 출력  
(b) Measured voltage output

그림 17. 1 kV를 전원단의 line과 neutral에 동시입력 시 종단 50 Ω에서 시뮬레이션/측정값

Fig. 17. Measured and simulated voltage when 1 kV EFT/B signal is inputted in line and neutral.

나타나게 된다. 이 잡음은 EFT/B 신호의 입력파형에 얹혀 시뮬레이션 상에서 오차가 발생하는 원인이 된다. 그러나 전체적인 전압 개형은 앞의 그림에서 확인할 수 있듯이 전압의 첫 최고점의 양/음 부호와 지속 기간이 비슷하므로 두 결과가 어느 정도 일치하는 것이라 판단할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션과 실측 전압 차 비교

Table 1. Voltage difference, simulation and measurement.

입력전압(V)		출력전압 차		비교		
		측정 (V)	시뮬 (V)	측정-시뮬 (V)	오차 (%)	
200	Line	+	9.2	9.677	-0.477	5.18
		-	8.16	9.61	-1.45	17.7
	Line/Neutral	+	9.52	11.63	-2.11	22.16
		-	9.76	11.54	-1.78	18.2
500	Line	+	22.6	21.01	1.59	7.04
		-	20.4	21.37	-0.97	4.75
	Line/Neutral	+	26.6	26.12	0.48	1.8
		-	23.8	26.28	-2.48	10.4
1 k	Line	+	48.74	45.6	3.14	6.4
		-	45.6	43.72	1.88	4.12
	Line/Neutral	+	57.2	55.1	2.1	3.67
		-	57.2	52.6	4.6	8.04
2 k	Line	+	119.2	98.62	20.58	17.27
		-	100.8	92.47	8.33	8.26
	Line/Neutral	+	136	112.9	23.1	16.9
		-	125.6	111.4	14.2	11.3
				평균 오차(%)	10.21	

### V. 결 론

EFT/B 신호는 기본이 되는 삼각형태의 펄스파는 반복 주파수가 5 kHz와 100 kHz로 비교적 낮은 주파수를 가지지만, 주파수 성분을 FFT를 이용하여 분석하면 MHz에서 GHz의 성분들로 이루어져 있다. 이에 따라 적절한 대역의 주파수에 따른 전송경로에 대한 S-parameter를 이용하여 고주파 분석이 필요함을 확인하였으며, 분석에 적합한 S-parameter 값을 얻기 위하여 전원단에 연결/분리 상태에서 분석을 진행하였다. 이를 통하여 충전회로의 고주파 전달 특성은 측정에 필요한 적절한 인터페이스를 도입하여 전원을 연결하지 않고 측정된 S-parameter를 사용하여도 충분히 높은 신뢰도를 가지는 것을 실험적으로 확인하였다.

다양한 종류의 모바일 충전회로를 IEC 규격에 맞는 방법으로 S-parameter를 측정하여 EUT로서 활용하고자 하

는 임의의 부하를 갖는 등가회로로 구현한 후 시뮬레이션에 적용하면 EUT에서의 EFT/B 신호에 의한 출력 전압을 예측할 수 있다. 또한, 이것을 실제 출력 결과와 비교하였을 때 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 이와 같은 방법으로 직접 측정이 힘든 특수 지점에서의 EFT/B 신호의 전압 레벨은 제안한 시뮬레이션 방법을 이용하여 간단히 예측할 수 있을 것이라 사료된다. 이에 따라 전압 파형을 예측함으로써 이것은 EFT/B 내성 규격에 대응할 수 있는 적절한 EUT 설계의 기초가 될 것이라 사료된다.

### References

[1] Testing and Measurement Techniques-Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test, IEC 61000-4-4 Standard, 2nd ed., 2004.  
 [2] David M, Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & sons, 2009.  
 [3] Graziano, Cerri, Roberto De Leo, and Valter Mariani

Primiani, "Electrical fast-transient test: Conducted and radiated disturbance determination by a complete source modeling", *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on 43.1*: 37-44, 2001.

[4] Corneliu, Ursachi, Elena Helerea, "Immunity to electrical fast transient pulses of computer systems", *Applied and Theoretical Electricity(ICATE), 2014 International Conference on. IEEE*, 2014.  
 [5] Ji, Zhang, et al. "Modeling injection of electrical fast transients into power and IO pins of ICs", *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on 56.6*: 1576-1584, 2014.  
 [6] Ming-Dou, Ker, et al. "New transient detection circuit for electrical fast transient(EFT) protection design in display panels", *IC Design and Technology(ICICDT), 2010 IEEE International Conference on. IEEE*, 2010.

### 송 승 제



2014년 2월: 성균관대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 2014년 3월~현재: 성균관대학교 이동통신 전력전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] EMI/EMC, Power Integrity

### 조 정 민



2011년 2월: 성균관대학교 반도체시스템공학과 (공학사)  
 2013년 2월: 성균관대학교 반도체 디스플레이공학과 (공학석사)  
 2012년~현재: 삼성전자 S.LSI 사업부 IC level 전자파 적합성 담당  
 [주 관심분야] Power Integrity, IC Level

EMI/ EMS

### 김 광 호



2013년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)  
 2015년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 2015년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정  
 [주 관심분야] Signal Integrity, Power Integrity, S-Parameter

### 이 승 배



1996년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)  
 2010년 2월: 성균관대학교 반도체 디스플레이공학과 (공학석사)  
 1999년~현재: 삼성전자 S.LSI 사업부 IC Level 전자파 적합성 담당  
 [주 관심분야] IC Level EMI/EMS, Power Integrity

Integrity

김 소 영



1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 6월: 스탠포드대학교 전기공학과 (공학석사)

2004년 7월: 스탠포드대학교 전기공학과 (공학박사)

2004년~2008년: Intel Corporation

2008년~2009년: Cadence Design Systems

2009년~현재: 성균관대학교 반도체시스템공학과 부교수

[주 관심분야] Device and Interconnect Modeling, Power Integrity, Signal Integrity, VLSI Computer-Aided Design, Electromagnetic Compatibility

나 완 수



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)

1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator

1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원

1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] SI, PI, EMI/EMC