

SMA 커넥터를 이용한 3축 펄스 탐지기

3 Dimensional Pulse Detector Using SMA Connector

이 상 수 · 박 용 배

Sangsue Lee · Yong Bae Park

요 약

본 논문에서는 SMA 커넥터를 이용한 3축 펄스 탐지기의 동작 특성을 분석한다. 상용 시뮬레이터를 이용하여 3축 펄스 탐지기를 모델링하고, 펄스가 인가됐을 때 동작 특성을 확인 및 분석하여 펄스 탐지기로써의 응용이 가능함을 확인한다.

Abstract

In this paper, the performance characteristic of 3 dimensional pulse detector using SMA connector is analyzed. Modeling of 3D pulse detectors is done in a commercial simulator. When a pulse is incident on the detector, we analyze the performance characteristics of the detector and verify the feasibility of the pulse detector.

Key words: Pulse Detector

I. 서 론

펄스는 짧은 시간 동안에 순간적으로 큰 진폭을 발생시키는 파동을 의미한다. 이러한 펄스는 전자기기에 예기치 못한 과전류를 발생시킬 수 있고, 이에 따라서 전자기기의 영구적인 파손을 일으킬 수 있다. 주로 핸드폰이나 컴퓨터와 같은 전자기기를 이용하여 통신을 하는 현대 시대에서 위와 같은 전자기기의 마비는 큰 사회적 혼란을 야기할 수 있기 때문에, 펄스를 미리 감지하여 전자기기의 피해를 최소화하는 것이 중요하다^[1].

펄스 탐지기는 펄스를 탐지하는 센서로 그 종류로는 전속밀도의 미분값을 측정하는 D-Dot, 자속밀도의 미분값을 측정하는 B-Dot, 빛이 크리스탈 내에서 편파 특성이 바뀌는 것을 이용하는 Electro-optic 프로브가 있다. 기존에

전기장을 측정하기 위해 SMA 커넥터를 이용하여 D-Dot 센서를 구현한 결과가 있었다^[2]. 마이크로스트립 라인을 이용하여 루프 형태로 설계하고, 3축으로 배치하여 전기장을 측정하는 B-Dot 센서도 상용제품으로 판매되고 있다^[3]. 그러나, SMA 커넥터를 3축으로 설계하여 전기장을 측정하는 프로브는 연구된 바가 없다.

본 논문에서는 SMA 커넥터를 이용하여 D-Dot 프로브를 3축으로 구성 및 설계하여 상용 시뮬레이터 Microwave Studio of CST로 모델링하고, 특성을 분석하였다.

II. D-Dot 프로브

2-1 D-Dot 프로브 동작 특성

D-Dot 프로브는 전기장이 입사할 때 프로브 도체 축에

「본 연구는 국가보안기술연구소의 지원을 받아 수행하였음.」

아주대학교 전자공학과(Department of Electrical Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received July, 3, 2017 ; Revised July, 27, 2017 ; Accepted September, 11, 2017. (ID No. 20170703-062)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

평행한 전기장 성분의 전속밀도 시간 변화율을 측정한다⁴⁾.

$$V(t) = \frac{d\vec{D}}{dt} \cdot \vec{A}_{eq}Z \quad (1)$$

식 (1)은 D-Dot 프로브의 출력 전압을 나타낸다. 식 (1)은 그림 1의 D-Dot 프로브 등가회로로부터 유도된다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, D-Dot 프로브의 등가회로에 펄스에 의해 전속밀도의 미분 값에 비례하는 전류가 야기되어 출력 전압으로 측정된다. D-Dot이라는 이름이 붙은 이유도 여기에 있다. \vec{D} 는 전속밀도, A_{eq} 는 프로브의 등가면적, Z 는 부하임피던스를 나타낸다. 프로브의 등가면적과 부하임피던스를 알고 있다면 출력 전압을 측정하여 적분함으로써 인가된 전기장의 세기를 알 수 있다.

그림 2는 D-Dot 프로브의 전달함수이다. 주파수가 작을 때와 클 때를 각각 근사화하여 표시한 것이다. 전속밀도의 미분값이 측정되는 구간은 차단주파수보다 작은 주파수이다. 다시 말해서, 차단주파수보다 큰 주파수에서는 전자기장의 측정이 불가능하고, 너무 작은 주파수에서는 출력의 크기가 작아서 측정이 힘들다. 주파수 응답은 펄스 탐지기가 입사하는 전자기장을 측정할 수 있는지를 판단하는 지표가 된다.

전기장의 방향을 예측하여 유동적으로 프로브를 배치하는 것은 사실적으로 불가능하다. 펄스의 방향과 관계없이 임의의 방향으로 입사하는 펄스를 측정하기 위해 3축으로 설계하였다. 각 축에서 측정되는 전압을 적분하여 모든 전기장 성분을 추출하고, 펄스의 크기를 식 (2)를 통하여 측정할 수 있다.

$$|E_{tot}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (2)$$

SMA 커넥터도 그림 1과 같은 등가회로를 가지며, SMA

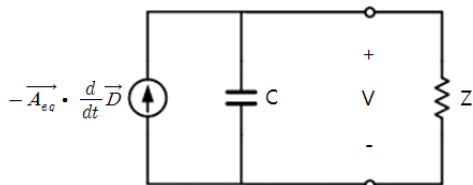


그림 1. D-Dot 프로브의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of D-Dot probe.

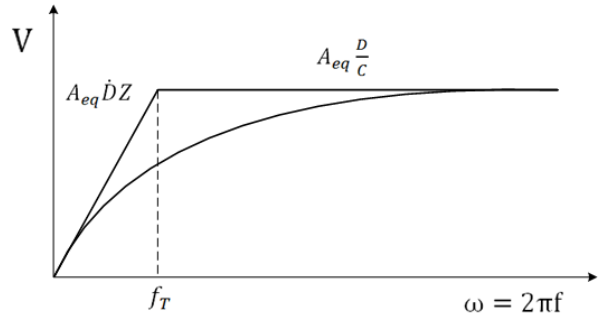


그림 2. D-Dot 프로브의 전달함수
Fig. 2. Transfer function of D-Dot probe.

커넥터의 도체 축과 수평인 성분이 입사할 때 식 (1)과 같이 출력을 얻을 수 있다.

III. 설계 및 시뮬레이션

3-1 SMA 커넥터를 이용한 탐지기

그림 3은 Microwave Studio of CST를 이용하여 SMA 커넥터를 이용한 프로브를 모델링한 것이다. 1 GHz부터 10 GHz까지의 광대역 측정용 프로브를 설계하는 것이 본 논문의 목표이다. 접지면의 크기는 한 변의 길이가 23.5 mm 인 정사각형이며, SMA 커넥터의 도체와 유전체가 접지면의 무게중심에 위치하고 있다. 도체의 길이는 4.5 mm, 유전체의 길이는 3 mm이다. 내부 도체의 직경은 1.26 mm, 유전체의 직경은 4.18 mm이다. 상용 SMA 커넥터와 동일한 크기를 가지도록 설계하였다.

SMA 커넥터를 이용한 D-Dot 프로브의 경우, SMA 커넥터의 정확한 모델링을 하지 않아도 특성에 큰 영향을

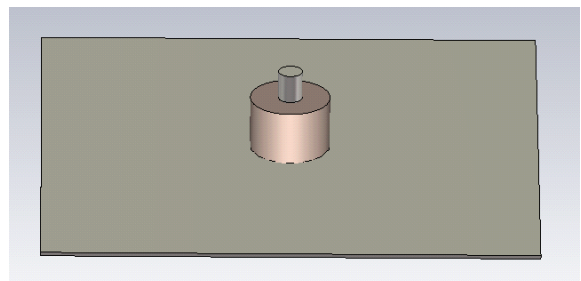


그림 3. SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기 모델
Fig. 3. Pulse detector model using SMA connector.

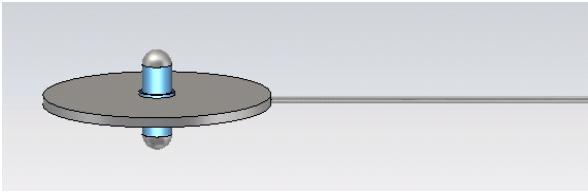
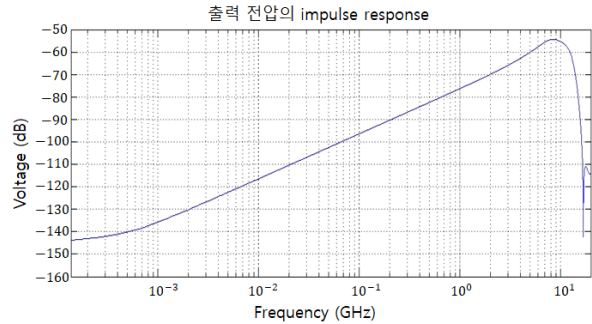


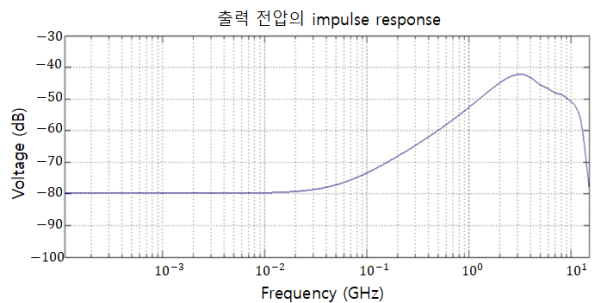
그림 4. Prodyn AD-70(R) 모델
Fig. 4. AD-70(R) model made by Prodyn Co..

주지 않기 때문에, 동축 케이블로만 모델링하였다. SMA 커넥터의 도체를 전극으로 활용하여 D-Dot 프로브로 활용할 수 있는지를 확인하기 위하여 상용 D-Dot 프로브를 모델링하였다. 그림 4는 Prodyn 사의 AD-70(R)을 Microwave Studio of CST을 이용하여 모델링한 것이다⁶⁾. 약 3.5 GHz 까지 동작하는 D-Dot 프로브이다. 모델링한 D-Dot 프로브의 임펄스 응답을 시뮬레이션하였고, 그림 5에 모델링한 D-Dot 프로브의 임펄스 응답이 나타나 있다. 그림 5(a)는 SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기의 임펄스 응답이며, 그림 5(b)는 AD-70(R)의 임펄스 응답이다. 그림 2와 앞서 설명한 것과 같이 기울기가 20 dB/dec로 증가하는 주파수 대역에서 출력 전압을 적분하여 전기장의 세기를 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 5(a)와 그림 5(b) 모두 일정한 주파수 대역에서 기울기가 20 dB/dec로 증가하며, SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기의 경우 상당히 넓은 주파수 대역에서 기울기가 일정하고, AD-70(R)의 경우, 약 3 GHz까지 기울기가 일정하다. AD-70(R)의 경우 3.5 GHz 까지 동작하는 모델이지만, 모델링 오차 때문에 결과에서 오차가 발생했을 가능성이 있다. 그림 5를 통해 SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기가 D-Dot 프로브로 동작할 수 있음을 알 수 있다.

추가적으로 그림 3과 그림 4의 D-Dot 프로브 모델에 60 kv 크기를 가지는 감쇠 사인파를 평면파로 인가한 경우를 시뮬레이션하였다. 그림 6은 인가한 감쇠 사인파와 각 D-Dot 프로브를 이용하여 복원한 전기장을 나타낸다. 그림 6(a)는 SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기의 경우이며, 적분계수는 시뮬레이션을 통하여 계산하였다. 그림 6(b)는 AD-70(R)의 경우이며, 적분계수는 수식을 통하여 계산하였다⁴⁾. AD-70(R)의 경우에 시뮬레이션하여 계산한 적분계수와 수식을 통하여 계산한 적분계수가 거의 일치



(a) SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기의 임펄스 응답
(a) Impulse response of pulse detector using SMA connector



(b) AD-70(R)의 임펄스 응답
(b) Impulse response of AD-70(R)

그림 5. SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기와 AD-70(R)의 임펄스 응답

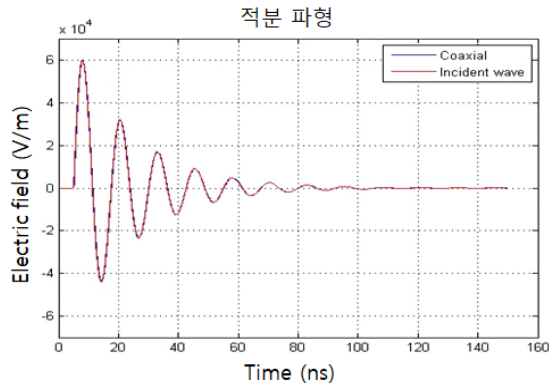
Fig. 5. Impulse response of pulse detector using SMA connector and AD-70(R).

하여 시뮬레이션 방법이 정확함을 확인하였다. 그림 6을 볼 때, 두 D-Dot 프로브가 입사한 감쇠 사인파를 원활하게 복원하는 것을 확인할 수 있으며, 그림 6(b)에서 발생한 시간 지연은 동축 케이블을 제시된 규격에 따라 길게 모델링하였기 때문이다.

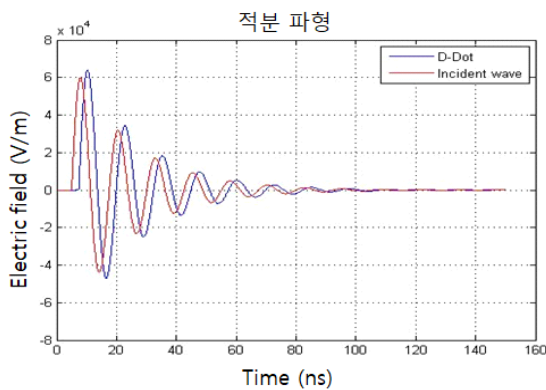
그림 5와 그림 6을 통하여 SMA 커넥터의 도체를 전극으로 사용하여 D-Dot 프로브로 동작시킴에 문제가 없을 것임을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

3-2 3축 펄스 탐지기 모델링

그림 7은 상용 시뮬레이터인 Microwave Studio of CST를 이용하여 3축 펄스 탐지기를 모델링한 것이다. SMA 커넥터를 이용한 단일축 프로브의 주파수 응답을 분석함으로써 D-Dot 프로브의 가능성을 확인하였다. 접지면은

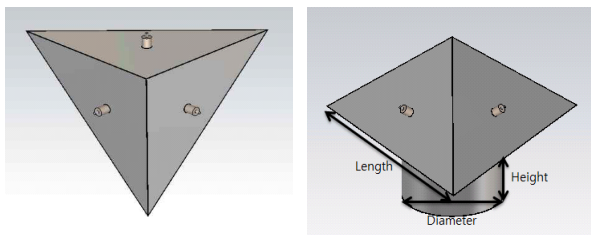


(a) SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기의 전기장 복원
 (a) Magnitude of electric field recovered by pulse detector using SMA connector



(b) AD-70(R)의 전기장 복원
 (b) Magnitude of electric field recovered by AD-70(R)

그림 6. SMA 커넥터를 이용한 펄스 탐지기와 AD-70(R)의 출력전압을 적분하여 복원한 전기장
 Fig. 6. Magnitude of electric field recovered by pulse detector using SMA connector and AD-70(R).



(a) D-Dot 프로브 윗부분 (b) D-Dot 프로브 정면
 (a) Upper side of D-Dot probe (b) Front side of D-Dot probe

그림 7. 3축 D-Dot 프로브 모델
 Fig. 7. 3 dimensional D-Dot probe model.

사면체로 구성하고, 각 접지면의 무게중심에 SMA 커넥터를 위치시켰다. SMA 커넥터가 없는 아래 삼각 접지면에는 차폐 관통구를 구성하여 모든 축 프로브의 출력 포트를 원 내부에 위치시켰다. 차폐 관통구는 SMA 커넥터에서 측정된 전압이 동축선을 따라 포트로 이동할 때 외부 전자기장에 의해 변질되는 것을 막기 위하여 사용되었다.

SMA 커넥터가 없는 아래 삼각형의 한 변의 길이는 120 mm, 차폐 관통구의 직경을 48 mm로 설계하였다. 각 SMA 커넥터의 도체는 7 mm, 유전체는 5 mm로 설계하여 돌출된 도체의 길이는 2 mm이다.

3-3 3축 펄스 탐지기의 시뮬레이션 결과

그림 8은 Microwave Studio of CST를 이용하여 그림 7의 센서 모델에 임펄스가 입사할 때 차폐 관통구 길이에 따른 주파수 응답을 시뮬레이션한 결과이다. 차폐 관통구 길이에 따라 임펄스 응답에 약간의 변화가 생긴다. 임펄스 응답이 가장 양호한 결과를 바탕으로 설계를 진행하여 차폐 관통구의 길이를 6 mm로 설계하였다. 임펄스 응답으로부터 수백 MHz부터 7 GHz까지 측정이 가능할 것임을 유추할 수 있다. 또한, 임펄스 응답으로부터 차단주파수는 약 7 GHz 내외인 것으로 확인된다. 그림 5(a)의 단일축 펄스 탐지기의 임펄스 응답과 유사하다.

그림 9는 그림 6의 경우와 같이 감쇠 사인파가 입사할 때 시뮬레이션을 진행한 결과이다. 탐지기의 적분계수는 시뮬레이션을 통해 계산했다. 입사한 감쇠 사인파의 전기

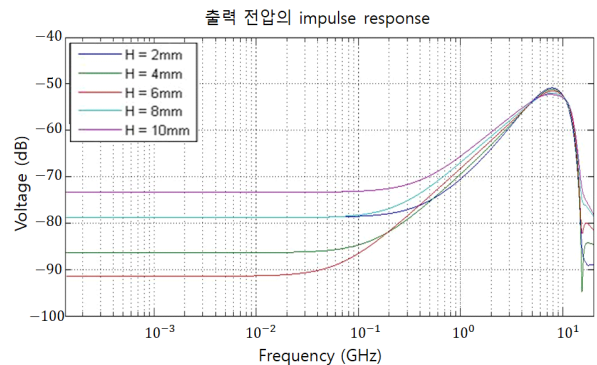
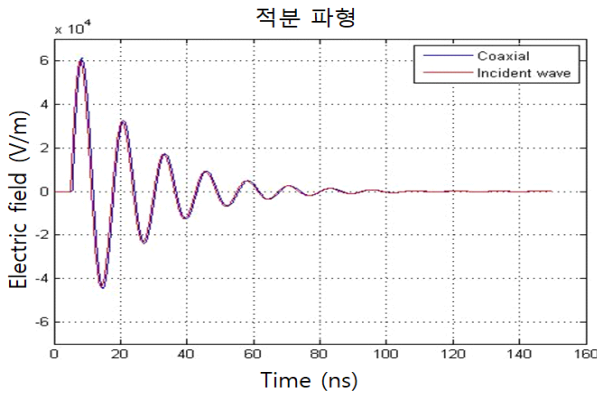


그림 8. 차폐 관통구 길이에 따른 임펄스 응답
 Fig. 8. Impulse response with respect to the length of shield tube.

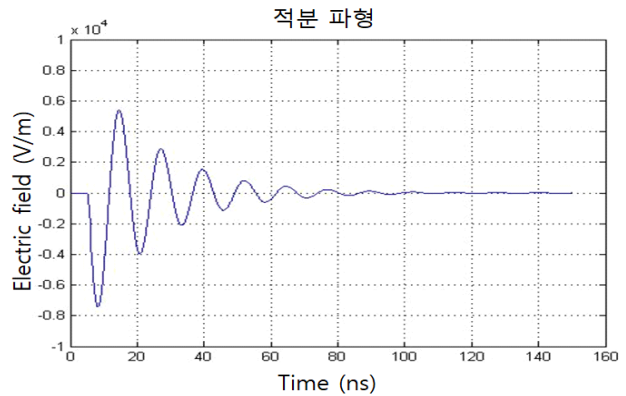
장 성분은 y성분만 가지는 평면파로 인가하였다. 그림 9(a)는 모든 축 프로브의 전기장 세기를 식 (2)를 이용하여 총 전기장의 세기로 계산한 것이고, 입사한 감쇠 사인파와 거의 유사하게 복원되는 것을 확인하였다. 그림 9(b)~그림 9(d)는 각 프로브의 출력 전압을 식 (1)을 이용하여 적분하여 전기장으로 환산한 것이다. y축 프로브만 출력을 가지고 x축, z축 프로브는 출력값을 가질 수 없으나, 그림 9(b)~그림 9(d)에서 볼 수 있듯이 x축과 z축 프로브의 출력 값이 존재하며, 감쇠 사인파의 형태도 갖추고 있다. x축과 z축 프로브의 출력이 존재하는 것은 그림 5의 모델링에서 모든 축의 프로브가 접지면을 공유하고 있기 때문으로 사료된다. 도체와 접지면 사이에 커플링이 발생하

고, 접지면을 공유하고 있어 다른 프로브에 영향을 줄 수 있기 때문으로 판단된다. 이러한 x축과 z축 프로브의 출력은 식 (2)를 이용하여 총 전기장의 세기와 방향을 예측할 때 오차로 작용한다.

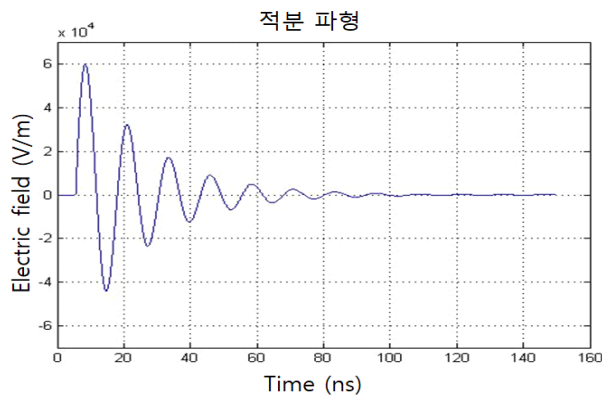
본 논문은 SMA 커넥터를 이용한 3축 펄스 탐지기의 구현 가능성에 관한 논문으로써, 실제 제작 및 측정에는 상당한 시간과 비용이 소요될 것으로 판단된다. 측정을 통한 검증은 실험 장비와 여건을 고려하여 추후에 진행할 예정이다. 본 논문에서는 측정 대신에 상용 D-Dot 프로브인 Prodyn 사의 AD-70(R)을 직접 시뮬레이션하여 시뮬레이션 방법을 검증하고, 동일한 시뮬레이션을 제안한 탐지기에 적용하였다.



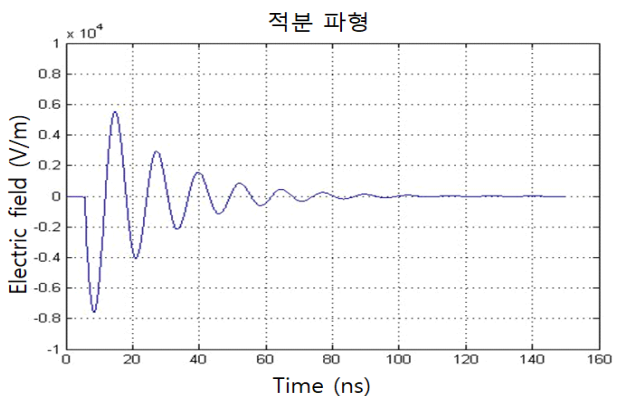
(a) 총 전기장의 세기
(a) Magnitude of total electric field



(b) x축 프로브의 전기장 세기
(b) Magnitude of electric field recovered by x-axis probe



(c) y축 프로브의 전기장 세기
(c) Magnitude of electric field recovered by y-axis probe



(d) z축 프로브의 전기장 세기
(d) Magnitude of electric field recovered by z-axis probe

그림 9. 감쇠 사인파가 입사할 때 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation result as damped sinusoidal signal is incident.

IV. 결 론

본 논문에서는 SMA 커넥터를 이용하여 3축 펄스 탐지기를 설계 및 시뮬레이션하고 분석하였다. SMA 커넥터가 D-Dot 프로브로써 충분히 동작할 수 있음을 확인하였고, 3축으로 구성된 펄스 탐지기가 입사한 평면파를 복원할 수 있음을 확인하였다. 접지면을 공유하고 있어 발생한 커플링을 제거한다면 더 정확한 측정이 가능할 것으로 보이며, 펄스 탐지기뿐만 아니라 EMI/EMC 프로브 등에도 응용할 수 있다.

References

[1] 장태헌, "고출력 전자기파 내성 평가 관련 표준화 동

향", *TTA Journal*, 150, pp. 43-51, 2013년 11월.

[2] J. V. Klüss, P. Hyvönen, "Practical E-field sensors for EMP testing", in *Proc. Int. Conf. High Voltage Eng. Appl. (ICHVE)*, pp. 1-4, Sep. 2014.

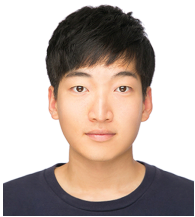
[3] Emprimus Website, www.emprimus.com

[4] Stewart L. Olsen, "Asymptotic conical dipole D-Dot sensor (ACD-S1(R)) development", *Air Force Weapons Laboratory, AFWL-TR-75-263, Final Report*, Apr. 1976.

[5] 임수원, 조주현, 김종수, 김영배, 류홍제, 진윤식, "고전압 나노초 펄스 측정을 위한 D-DOT 프로브의 동작 특성", 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1594-1596, 2011년 7월.

[6] Prodyn Technology, www.prodyntech.com

이 상 수



2017년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 전자장 해석

박 용 배



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2003년 2월~2006년 8월: KT 인프라연구소 선임연구원
 2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC