

고전압 나노초 펄스 측정을 위한 D-DOT 프로브의 동작특성

임수원\*, 조주현\*\*, 김종수\*\*, 김영배\*\*, 류홍제\*\*, 진윤식\*\*  
 과학기술연합대학원대학교\*, 한국전기연구원\*\*

Operating Characteristics of D-DOT Probe for Nanosecond High-Voltage Pulse Measurements

Soo-Won Lim\*, Chuhyun Cho\*\*, Jong-Soo Kim\*\*, Young-Bae Kim\*\*, Hong-Je Ryoo\*\*, Yun-Sik Jin\*\*  
 University of Science & Technology\*, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*

**Abstract** - 고전압 펄스 성형회로의 출력 펄스를 측정하기 위한 D-DOT 프로브를 설계 제작하고 그 동작 특성을 조사하였다. 이 프로브는 고전압 펄스 전송선의 외함에 전계방향과 병렬로 설치되었다. 프로브의 중심도체는 지름 46 mm의 구리선이고, 바깥도체는 안지름 15mm의 알루미늄이며, 이들 도체 사이에 동축의 테플론 절연체가 삽입되었다. 프로브에서 출력되는 신호는 고전압 펄스신호의 미분된 형태의 신호가 측정되므로 오실로스코프의 적분기능을 사용하였다. 실제 제작한 프로브의 교정비는  $7.7 \times 10^{12}$ 였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 교정비는  $7.38 \times 10^{12}$ 였다.

1. 서 론

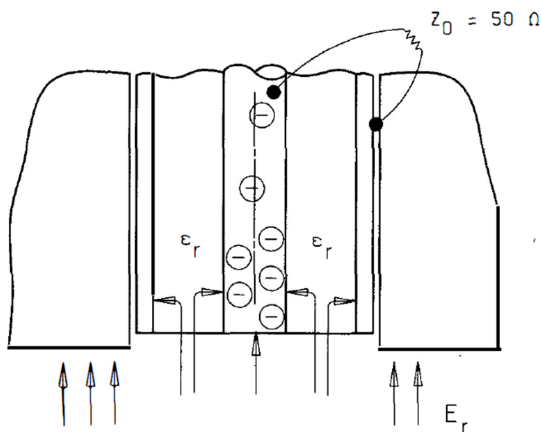
고전압 펄스 성형회로의 출력 펄스를 연구하는데 있어서, 출력 전압을 정확하게 측정하는 것은 매우 중요하다. 특히 펄스의 상승시간이 수 나노초 또는 그 이하일 경우 측정 센서를 설계 제작하는데 있어서 세심한 주의가 요구된다.[1]

이러한 펄스 전압을 측정함에 있어서, 저항성 분압기 또는 용량성 분압기(D-DOT 프로브)가 일반적으로 사용된다. 저항성 분압기는 부하에 병렬로 연결되므로 분압기의 저항값이 충분히 크지 않으면 펄스전원장치의 에너지전달효율에 영향을 미칠 수 있다. 용량성 분압기는 설치가 간편하고, 단순한 구조로 제작하는데 용이하며, 넓은 대역폭을 가진다. 이러한 센서는 일반적으로 수동소자로 구성된 적분기(저역 통과 필터)와 함께 사용된다. 이 경우 센서는 광대역 특성을 가질 수 있으나 감도에 한계가 있다.[2-4]

본 논문에서는 D-DOT의 출력 신호를 적분기를 사용하지 않고 직접 디지털 오실로스코프에 연결하여, 디지털 오실로스코프의 적분기능을 사용함으로써, 적분기를 구성하는 수동소자에서 발생할 수 있는 기생성분의 영향을 최소화하였다.

2. D-DOT 프로브의 동작특성

2.1 동작 원리와 컴퓨터 시뮬레이션



<그림 1> D-DOT 프로브 종단을 확대한 그림

그림 1은 D-DOT 프로브의 종단을 확대한 것이다. 수직인 전계가 동축 프로브의 중심도체에 표면전하밀도를 발생시킨다. 주파수가 0일 때, 중심도체는 50 Ω 저항을 통하여 영 전위를 유지한다. Er이 변하면 전하량은 선형적으로 변하고, 전류 경로는 저항 Z0를 통하여 형성되며, 이때 저항에서 전력이 소모된다.[5]

중심도체의 표면전하는 다음과 같이 주어진다.

$$Q(t) = K D_r(t) \tag{1}$$

여기에서 K는 중심도체의 유효면적이다. 전류는 다음과 같이 주어진다.

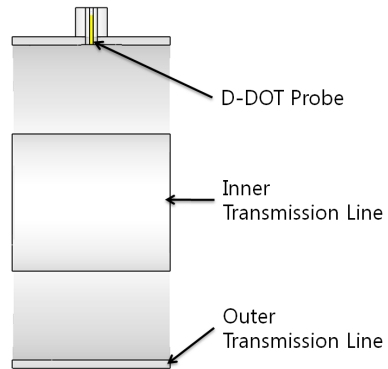
$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = K \frac{dD_r(t)}{dt} = K \epsilon_0 \frac{dE_r(t)}{dt} \tag{2}$$

저항에 인가되는 전압, 즉 프로브의 출력 전압  $V_z(t)$ 는  $Z_0 I(t)$ 이고, 식 (1)과 (2)를 정리하면 다음과 같이 된다.

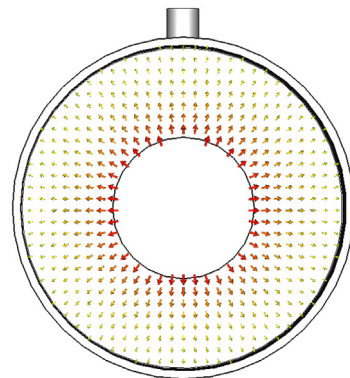
$$V_z(t) = Z_0 K \epsilon_0 \frac{dE_r(t)}{dt} \tag{3}$$

$$V_r(t) = K_r \int V_z dt \tag{4}$$

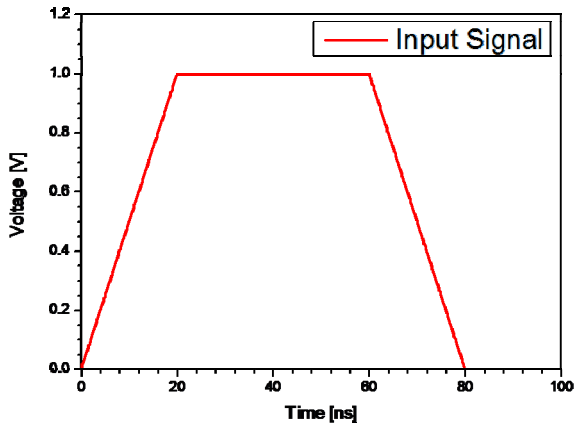
여기에서  $V_r$ 은 전송선의 인가전압이다.  $K_r$ 은 프로브의 교정비이고, 단위는  $[s^{-1}]$ 이다. 만약  $K_r$ 을 안다면, 중심도체 면에 수직인 전계는 저항  $Z_0$ 에 인가되는 전압  $V_z(t)$ 를 적분하고  $K_r$ 을 곱하여 전송선에 인가되는 펄스 전압을 측정할 수 있다.



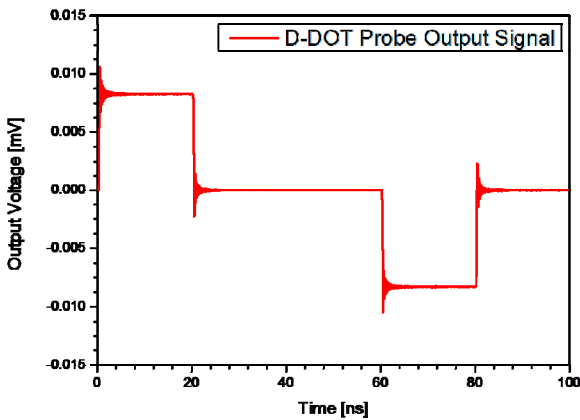
(a) 시뮬레이션 모델



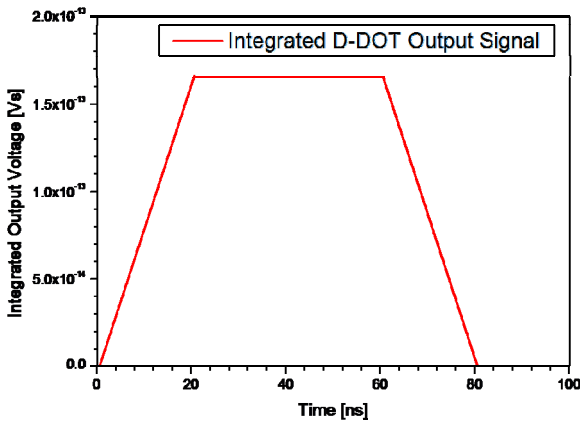
(b) 전송선에 입력단에서의 모드



(c) 전송선의 입력 전압 파형,  $V_r(t)$



(d) D-Dot 프로브 출력 전압 파형,  $V_z(t)$



(e) D-Dot 프로브 출력 전압의 적분 파형

〈그림 2〉 CST MICROWAVE STUDIO를 이용한 D-DOT 프로브 시뮬레이션

$K_r$ 를 계산하기 위하여 CST MICROWAVE STUDIO 2006을 사용하였다. 그림 2-(a)와 같은 구조로 시뮬레이션 하였으며, 원통형 전송선에서 형성된 모드와 인가한 펄스 파형은 각각 그림 2-(b), (c)에 나타내었다. 사용한 각각의 파라미터들은 표 1과 같다. 센서의 끝부분은 50 Ω의 저항이 연결되어있고 반사가 없다고 가정하였다. 센서의 출력파형  $V_z(t)$ 는 그림 2-(d)와 같다. 앞에서 살펴보았듯이 센서의 출력 파형은 전송선 입력 파형의 미분된 결과 같다. 그림 2-(d)의 파형을 시간에 대하여 적분하여보면, 그림 2-(e)와 같다. 이제 그림 2-(e) 파형의 플랫폼의 값과 인가한 파형의 플랫폼의 값을 비교하여보면 아래 식(5)와 같이 교정비  $K_r$ 를 구할 수 있다.

$$K_r = \frac{V_r(t)}{\int V_z dt} \quad (5)$$

입력파형의 피크값은 그림 2-(c)에서 1 [V] 이고, 프로브 출력 적분파형의 피크값은 그림 2-(e)에서  $1.657 \times 10^{-13}$  [Vs]로 교정비는  $K_r = 6.035 \times 10^{12}$  [ $s^{-1}$ ] 이었다. 이 값은 케이블(RG400, 5m)의 감쇄비를 고려하지 않은 값이다. 따라서 케이블의 감쇄비를 보상하면 전체 측정시스템의 감쇄비는  $7.124 \times 10^{12}$  [ $s^{-1}$ ]로 얻을 수 있다.

〈표 1〉 D-DOT 센서 파라미터

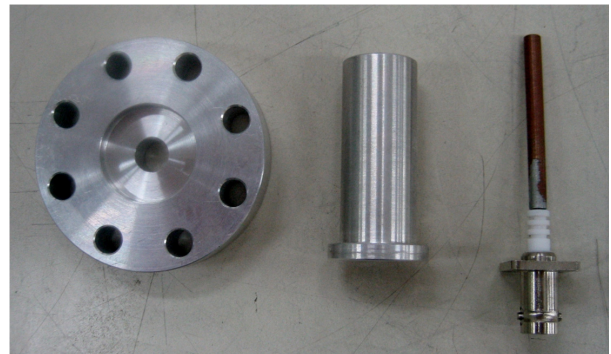
D-DOT 프로브

|          |           |
|----------|-----------|
| 전체 길이    | 47 mm     |
| 중심도체 지름  | 4.6 mm    |
| 바깥도체 안지름 | 15 mm     |
| 중심도체     | Copper    |
| 바깥도체     | Aluminium |
| 중간 유전체   | Teflon    |

전송선

|          |           |
|----------|-----------|
| 중심도체 지름  | 174 mm    |
| 바깥도체 안지름 | 400 mm    |
| 중심도체     | Aluminium |
| 바깥도체     | Aluminium |
| 중간 유전체   | Air       |

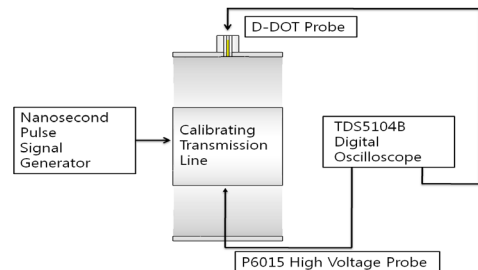
2.2 D-DOT 프로브의 제작 및 실험 결과



〈그림 3〉 설계/제작한 D-DOT 프로브

고전압 펄스 성형회로의 출력 펄스를 측정하기 위하여 설계 제작한 D-DOT 프로브는 그림 3과 같다. D-DOT 프로브의 교정비는 중심도체의 유효면적에 비례하기 때문에 설계 시 용도에 따라 세심한 주의가 요구된다. 측정하고자하는 펄스 전압의 최대값은 일정하면서 상승시간이 짧아진다면, 출력 신호  $V_z$ 의 최대값은 상승시간 감소량에 반비례하여 증가하게 된다. 그리고 면적이 너무 작으면 출력신호가 상대적으로 작아지기 때문에 노이즈의 영향이 커지게 된다.

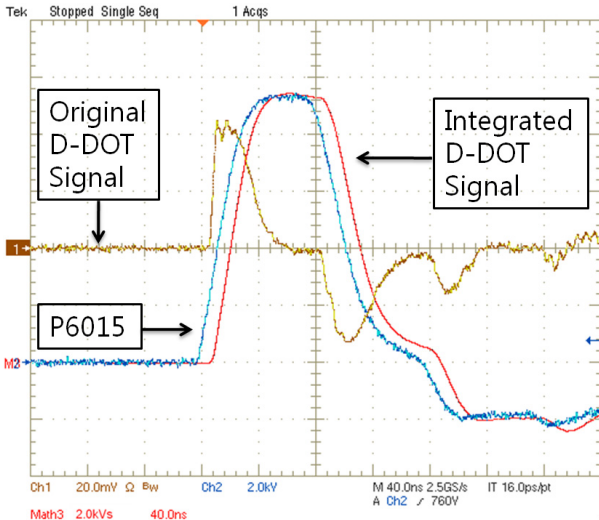
D-DOT 프로브 조립체와 측정용 케이블 사이의 연결부분에서 도체들 사이에 직경이 다를 수가 있다. 이것은 전체의 불연속을 발생시켜서 파형을 왜곡시킬 수 있으므로, 주의가 필요하다.



〈그림 4〉 D-DOT 프로브 교정 시스템

제작한 D-DOT 프로브를 교정하기 위한 시스템은 그림 4와 같다. 기지의 나노초 급의 펄스 전원장치로부터 출력된 펄스를 원통형 전송선에 인가하고 전송선에 부착된 D-DOT 프로브에서 출력된 신호와 P6015 고압프로브(Tektronics사, 75 MHz Bandwidth)에서 출력된 신호를 비교하여 D-DOT 프로브의 교정비를 결정하였다. 신호를 측정하기 위하여 디지털 오실로스코프 TDS5104B(Tektronix사, 1 GHz Bandwidth)를 사용하였다. D-DOT 프로브의 출력 신호를 직접 디지털 오실로스코프에 연결하고 디지털 오실로스코프의 적분기능(MATH)을 이용하였다. D-DOT 프로브가 정상적으로 동작을 하기 위해서는 반드시 저항을 연결하여야 하고, 본 논문에서는 디지털 오실로스코프의 입력저항을 50 Ω으로 설정하였다.

Accelerator with Water Pulse-Forming Line”, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 1, 58, 2009  
 [5] S.BURKHART, “Coaxial E-field Probe for High-Power Microwave Measurement”, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 33, 262, 1985



〈그림 5〉 D-DOT 프로브 교정 결과

위의 그림 5는 D-DOT 프로브의 교정결과 그래프이다. 시간 스케일은 40ns/div이며, 세로축 스케일은 각각 Ch1(컬러에서 황색)은 D-DOT 프로브의 출력 파형으로 20mV/div, Ch2(컬러에서 청색)는 P6015 고전압 프로브로 2.0kV/div, Math3(컬러에서 적색)은 2.0kVs/div이다. 적분한 신호 Math3은 교정비  $K_r = 7.7 \times 10^{12}$ 을 적용한 값으로 P6015 고전압 프로브의 신호와 크기와 형태가 매우 유사한 것을 알 수 있다.

### 3. 결 론

300 kV급 나노초 고전압 펄스 생성회로의 출력 펄스를 측정하기 위한 D-DOT 프로브를 설계 제작하고 그 동작 특성을 조사하였다. 이 프로브는 고전압 펄스 전송선의 외함에 전계방향과 병렬로 설치되었다. 프로브의 중심도체는 지름 4.6 mm의 구리선이고, 바깥도체는 안지름 15mm의 알루미늄이며, 이들 도체사이에 동축의 테플론 절연체가 삽입되었다. 프로브에서 출력되는 신호는 고전압 펄스신호의 미분된 형태의 신호가 측정되므로 오실로스코프의 적분기능을 사용하였다. 실제 제작한 프로브의 교정비는  $7.7 \times 10^{12}$ 였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 얻은 교정비는  $7.38 \times 10^{12}$ 였다. 제작한 D-DOT 프로브는 디지털 오실로스코프의 저항에서 열로 에너지를 소비하기 때문에 매우 높은 반복률의 펄스를 측정할 경우 문제가 발생할 수 있다. 앞으로 이에 대한 연구가 더 필요하다.

### [참 고 문 헌]

[1] L.Pecastaing, B.Cadilhon, T.Reess, A.De Ferron, P.Pignolet, S.Vauchamp, J.Andrieu, M.Lalande, J.P.Brasile, “A 250KV-300PS-350HZ MARX GENERATOR AS SOURCE FOR AN UWB RADIATION SYSTEM”, Pulsed Power Conference 2009 IEEE,, 51, 2009  
 [2] I.A.Metwally, “Coaxial D-Dot Probe:Design and Testing”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995 Annual Report, 298, 1995  
 [3] P. Choi, M.Favre, “A FAST CAPACITIVE VOLTAGE MONITOR FOR LOW IMPEDANCE PULSE LINES”, Pulsed Power Conference, 1995. Digest of Technical Papers, 2, 880, 1995  
 [4] Jin-Liang.Liu, Bing Ye, Tian-wen .Zhan, Jia-Huai Feng, Jian-De Zhang, and Xin-Xin Wang, “Coaxial Capacitive Dividers for High-Voltage Pulse Measurements in Intense Electron Beam