
펄스정전응력법(PEA)을 이용한 고분자 유전체 내의 공간전하분포 측정시스템

황보승*

The Measurement System of Space Charge Distribution in Polymer Dielectric Materials by
the PEA Method

Bo-Seung Hwang*

요 약

본 논문에서는 최근 DC 전력케이블에서 큰 이슈가 되고 있는 공간전하(space charge) 문제와 관련하여 공간전하의 비파괴 측정법 중 하나인 펄스정전응력법(PEA method)에 대한 이론적 고찰을 수행하였으며, 이를 바탕으로 직류전압 하에서 고분자 유전체 내에서 공간전하분포를 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한, 보정(deconvolution) 처리를 통해 왜곡된 공간전하 신호에 대한 개선을 실시함으로써 신호의 정확도를 개선하였다.

ABSTRACT

In this paper, we have evaluated theoretically the PEA method which is the most popular methods for the non-destructive measurement of space charge distribution in polymer dielectric materials and is recently one of big issues in DC high voltage cables. On the basis of theoretical evaluation, we have developed the space charge measurement system in polymer dielectrics under DC applied voltage and improved the accuracy of space charge distribution by applying the deconvolution process for distorted signals.

키워드

space charge distribution, PEA method, deconvolution, dielectric materials
공간전하분포, 펄스정전 응력법, 보정, 유전체

1. 서론

최근 전력케이블, 콘덴서, 전력용 기기 등에서 고분자 유전체의 고전계 사용이 증가함에 따라, 유전체 내에서의 공간전하 형성과 형성된 공간전하가 전기전도, 절연특성 및 장기적 수명에 미치는 영향이 한층 중요해졌으며, 이에 따라 고분자 유전체 내에서 공간전하

분포 측정방법에 대한 관심이 점차 증가하고 있다.[1] 이러한 유전체 내부의 공간전하량을 측정하기 위하여 종래에는 TSC(thermal stimulated current)을 사용하거나 전자빔과 화학적 용매를 이용하여 공간전하의 방출(detrappping)을 측정하거나 유전체를 박편으로 절단하여 각각의 전하량을 측정하는 방법 등을 사용하였다. 그러나 이러한 방법들은 유전체 내부의 개략

* 호남대학교 전자광공학과(hbs@honam.ac.kr)

접수일자 : 2012. 08. 10

심사(수정)일자 : 2012. 11. 12

게재확정일자 : 2012. 12. 10

적인 공간전하분포를 한번밖에 측정할 수 없는 파괴적인 방법으로서 재현성과 감도 및 분해능 등 여러 가지 면에서 단점을 지니고 있다. 따라서, 최근 국내·외적으로 유전체 내부의 공간전하분포를 비파괴적으로 측정하고자 하는 연구와 함께 공간전하가 유전체의 전기적 특성에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되어지고 있다.[2, 3]

본 논문에서는 최근 국내·외적으로 가장 활발하게 연구되고 있는 공간전하의 비파괴 측정법인 펄스전진 응력법(PEA: pulsed electro-acoustic 법)에 대한 이론적 고찰을 수행하였으며, 이를 바탕으로 고분자 유전체 내의 공간전하분포를 측정할 수 있는 시스템을 설계 및 제작하였다. 또한, 측정된 신호에 대한 보정(deconvolution) 처리를 통해 공간전하분포의 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

II. 본 론

2.1. PEA 법의 개요

PEA 법은 1985년 일본의 Takada와 미국의 Cooke에 의하여 처음 제안되었으며[4], 기존의 다른 음향적인 측정법인 압력파법이나 열펄스 방식에 비해 재현성이 뛰어나고 시스템의 구성이 비교적 간단하다는 장점을 가지고 있으며, 압력파를 외부에서 인가하는 대신 고전압 단펄스를 직접 유전체에 인가하여 유전체 내부에서 발생한 압력파(또는 탄성파)를 음향적으로 검출한다는 점에서 정확도가 높다. 즉, 수 ns의 전압펄스를 시료에 인가하여 유전체 내부의 공간전하가 받는 변형(Lorentz 힘)에 의해 발생 및 전파하는 압력파를 압전소자에 의해 음향적으로 검출하여 공간전하분포를 구하는 방법이다.

2.2. PEA 법에 의한 공간전하분포의 측정 원리

슈트상 유전체에서 공간전하분포를 측정하기 위해서는 시료의 공간전하분포를 1차원 모델로 제한할 필요가 있다. 즉, 공간전하분포의 변화는 한쪽 전극의 위치를 $x=0$, 두께방향으로 x 가 증가한다고 가정하면, $y-z$ 평면에서는 공간전하가 균일하게 분포한다고 가정하여, x 좌표 성분에 대해서만 공간전하밀도($\rho(x)$)를 구할 수 있다. 이러한 1차원적 가정은 압력파의 기

본파장이 측정전극의 지름에 비해 무시할 수 있을 정도로 충분히 작다는 점에서 성립이 가능하다. 또한, 공간전하분포의 이론적 분석을 간단히 하기 위해 다음과 같은 가정을 필요로 한다.

- ① Δx 내의 전하에서 발생된 압력파의 파형은 입력 전압펄스의 파형과 같다.
- ② 전하의 양과 전하에 의해 발생된 압력파의 크기는 선형적으로 비례한다.
- ③ 압력파의 모든 주파수 성분은 유전체를 같은 속도로 전파하며, 전파도중에 일어나는 감쇄와 분산은 무시 가능하다. (이러한 가정은 얇은 시료에서만 성립한다.)
- ④ 압력파에 대한 선형중첩 정리가 적용 가능하다.
- ⑤ 압력파의 크기와 압전소자의 전압출력은 선형적으로 비례한다.

이러한 가정 하에서 그림 1에 나타낸 것과 같이 두께가 d 이고, 공간전하밀도가 $\rho(x)$ 인 슈트상 유전체를 전극 $A(x=0)$ 와 $B(x=d)$ 사이에 삽입하고, 전극 B 에 직류전압 $V(=E_{dc} \cdot d)$ 를 인가하고, 전극 A 는 접지한 경우에 대하여 이론적 고찰을 수행하였다.

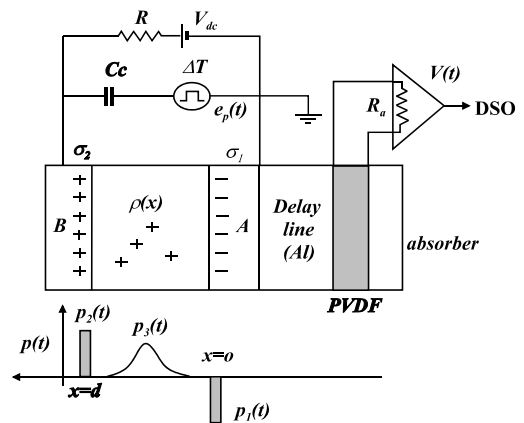


그림 1. PEA 법에 의한 공간전하분포의 측정원리
Fig. 1 Measurement principle of space charge distribution by the PEA method

그림 1에서 유전체 내부에 공간전하밀도 $\rho(x)$ 가 분포하고 있다고 가정하면, 이것에 의해 전극 A 와 B 의 표면에는 유기전하가 발생하며, 인가전압에 의한 영향과 중첩되어 나타난다. 이때 각각의 단위면적당의 전

하량을 σ_1 과 σ_2 라고 하면, 크기는 다음과 같다.

$$\sigma_1 = -\epsilon E_{dc} - \int_0^d \left(\frac{d-x}{d}\right) \rho(x) dx \quad [\text{C/m}^2] \quad (1a)$$

$$\sigma_2 = \epsilon E_{dc} - \int_0^d \left(\frac{x}{d}\right) \rho(x) dx \quad [\text{C/m}^2] \quad (1b)$$

유전체 내부를 Δx 의 아주 얇은 두께로 나누어 k 번째 구획의 위치를 x_k 라고 가정하면, 그 구획에 존재하는 전하량은 $\rho(x_k)\Delta x$ 가 된다. 유전체 내부와 전극 위에 존재하는 전하에 펄스폭이 ΔT 인 입력전압펄스 $e_p(t)$ 를 외부에서 인가하면, 공간전하는 Lorentz 힘을 받게 되고 순간적인 변위를 일으키게 된다. 이때, 전극 위의 표면전하 σ_1, σ_2 가 받는 힘을 각각 f_1, f_2 라 하고, x_k 위치에 있는 공간전하 $\rho(x_k)\Delta x$ 가 받는 힘을 Δf_3 라고 가정하면, 이것은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$f_1(t) = [\sigma_1 - \frac{\epsilon}{2} e_p(t)] e_p(t) \quad [\text{N/m}^2] \quad (2a)$$

$$f_2(t) = [\sigma_2 + \frac{\epsilon}{2} e_p(t)] e_p(t) \quad [\text{N/m}^2] \quad (2b)$$

$$\Delta f_3(\lambda_k, t) = \rho(\lambda_k) \Delta \lambda e_p(t) \quad [\text{N/m}^2] \quad (2c)$$

이러한 순간적인 변위에 의해 발생한 압력파는 각각 양쪽 방향으로 전파하고, 일부는 시료와 전극 A를 통해 검출용 압전소자(PVDF)에 도달하게 된다. 이때, σ_1 에 의해 발생한 압력파 $p_1(t)$ 은 다음과 같다.

$$p_1 = \frac{T_1 T_2}{2} \left[\sigma_1 - \frac{\epsilon}{2} e_p \left(t - \frac{m}{v_A} - \frac{n}{v_{AI}} \right) \right] e_p \left(t - \frac{m}{v_A} - \frac{n}{v_{AI}} \right) \\ = \frac{T_1 T_2}{2} \left[\sigma_1 - \frac{\epsilon}{2} e_p(t - \tau_A - \tau_{AI}) \right] e_p(t - \tau_A - \tau_{AI}) \quad (3)$$

여기서, v_{AI} 와 v_A 는 각각 지연라인(Delay-line)인 AI과 전극 A에서 음파의 전파속도를, m 과 n 은 Delay-line과 전극 A의 두께를, $\tau_A (= g/v_A)$ 와 $\tau_{AI} (= d/v_{AI})$ 은 압력파가 전극 A와 Delay-line을 통과하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 그리고, $1/2$ 은 압전소자로서의 방향 성분을 나타내는 계수이다. Delay-line은 전압펄스

인가시 발생하는 노이즈에 의한 영향을 제거하기 위한 것으로 대개 1~2cm 두께의 AI을 사용한다. T_1 과 T_2 는 각각 Delay-line에서 PVDF, 전극 A에서 Delay-line으로의 투과계수이다. 일반적으로, 물질 A에서 A₂로의 투과 및 반사계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\text{투과계수} : T = \frac{2Z_{A_2}}{Z_{A_1} + Z_{A_2}} \quad (4a)$$

$$\text{반사계수} : R = \frac{Z_{A_2} - Z_{A_1}}{Z_{A_1} + Z_{A_2}} = T - 1 \quad (4b)$$

여기서, Z 는 물질 고유의 음향 임피던스로서, $Z = \rho v = \sqrt{\rho Y}$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$]로 부터 구할 수 있다. ρ 는 매질의 밀도, v 는 매질에서 음파의 전파속도, Y 는 Young's Modulus를 나타낸다. $p_1(t)$ 를 Fourier 변환하면 다음과 같다.

$$P_1(f) = \frac{T_1 T_2}{2} \left[S_1(f) - \frac{\epsilon}{2} E_p(f) \right] * E_p(f) \exp[-j\omega(\tau_A + \tau_{AI})] \quad (5)$$

여기서 $S_1(f)$, $E_p(f)$ 는 각각 σ_2 , $e_p(t)$ 의 Fourier 함수이고 *는 convolution을 나타낸다. 마찬가지로, σ_2 에 의한 압력파 $P_2(t)$ 및 $P_2(f)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$p_2(t) = \frac{T_1 T_2 T_3 T_4}{2} \left[\sigma_2 + \frac{\epsilon}{2} e_p(t - \tau_s - v_A - \tau_{AI}) \right] e_p(t - \tau_s - v_A - \tau_{AI}) \quad (6)$$

$$P_2(f) = \frac{T_1 T_2 T_3 T_4}{2} \left[S_2(f) + \frac{\epsilon}{2} E_p(f) \right] * E_p(f) \exp[-j\omega(\tau_s + \tau_A + \tau_{AI})] \quad (7)$$

여기서, $\tau_s = d/v_s$ 로서 압력파가 시료를 통과하는데 걸리는 시간이고, $S_2(f)$ 는 σ_2 의 Fourier 함수이며, T_3 과 T_4 는 각각 시료에서 전극 A, 전극 B에서 시료로의 투과계수이다. 표 1은 주요 물질에 대한 음향적 특성을 정리한 것이다. 또한, $\rho(x_k)\Delta x$ 에 의해 발생한 압력파 $\Delta p_3(x_k, t)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta p_3(x_k, t) = \frac{1}{2} T_1 T_2 T_3 \rho(x_k) \Delta x e_p(t - \tau_x - \tau_s - \tau_{Al}) \quad (8)$$

여기서 $\tau_x = x_k/v_s$ 로서, 공간전하 위치로부터 전극 A에 도달하는데 걸리는 시간을 나타낸다.

유전체 내부의 전체 공간전하에 의해 발생한 압력과 $p_3(t)$ 는 $\Delta p_3(x_k, t)$ 들의 합으로 생각할 수 있으며, $\Delta x \rightarrow 0$ 이라고 가정하면 다음과 같다.

$$p_3(t) = \frac{1}{2} T_1 T_2 T_3 \int_0^t \gamma(\tau) e_p(t - \tau - \tau_A - \tau_{Al}) d\tau \quad (9)$$

$$P_3(f) = \frac{1}{2} T_1 T_2 T_3 v_s R(f) * E_p(f) \exp(-j\omega(\tau_\lambda + \tau_A + \tau_{Al})) \quad (10)$$

여기서, $\gamma(\tau) = \rho(x) = \rho(v_s \tau)$ 이고, $R(f)$ 는 $\gamma(\tau)$ 에 대한 Fourier 변환 값이다.

표 1. 주요 물질에 대한 음향적 특성[5, 6]
Table 1. Acoustic characteristics in main materials

물 질	밀 도 [kg/m ³]	음파속도 [m/s]	음향임피던스 [10 ⁶ kg/s · m ²]	감쇄계수 α [neper/cm]
Al	2700	6400	17.0~17.3	0.021(10MHz)
LDPE	940	2000	1.88	0.54(1.5MHz)
Glass (Pyrex)	2300	5600	12.9	-
PMMA	1180	2680	3.2	0.57(2.5MHz)
PVDF	1780	2200	3.92	0.54(1.5MHz)
Copolymer	1820	2400	4.39	-
Quartz (X-cut)	2650	5750	15.2-15.3	-
Air(20°C)	1.21	343	0.000415	-

이상과 같은 전체 압력과 $p(t) (= p_1(t) + p_2(t) + p_3(t))$ 가 압전소자를 통과할 때, 압전효과에 의해 압전소자 표면에는 전하 $q(t)$ 가 유기되고, 이때의 표면전하는 다음과 같다.

$$q(t) = v_p \int_0^{\tau_p} h(\tau) p(t - \tau) d\tau \quad (11)$$

여기서, $\tau_p (= a/v_p)$ 는 음파가 압전소자를 통과하는데 걸리는 시간이며, a 는 압전소자의 두께이다. 압전소자의 전달함수인 $H(f)$ 의 주파수대역이 입력펄스 $E_p(f)$ 의 주파수대역보다 작다고 가정하면, 공간전하분포를 나타내는 $p(t)$ 를 구하기 위하여 Deconvolution 과정이 필요하지만, 압전소자의 주파수대역이 충분히 크다고 가정하면(실제, PVDF 주파수 대역이 훨씬 큼), 출력 전압으로부터 바로 $p(t)$ 를 구할 수 있게 된다. 즉, $h(t)$ 는 다음과 같이 근사가 가능하다.

$$h(t) \approx g_{33} C_p | u(t) - u(t - \tau_p) | \quad (12)$$

이 수식을 식(11)에 대입하여 정리하면, 다음과 같이 압전소자에 유기되는 표면전하는 $p(t)$ 와 선형적인 비례관계를 가지는 것을 알 수 있다.

$$q(t) \approx g_{33} a C_p p(t) = d_{33} S p(t) \quad (13)$$

여기서, C_p 와 S 는 각각 압전소자의 정전용량(= $\epsilon S/a$)과 면적을, ϵ 는 압전소자의 유전율을 나타내며, $g_{33} (= d_{33}/\epsilon)$ 은 piezoelectric stress constant이다.

그리고, $q(t)$ 에 의한 개방 출력전압 $v_{op}(t)$ 는 식(14)와 같이 정리될 수 있다. 즉, 압력파에 의해 압전소자에 유기되는 전압의 크기는 압전소자의 면적에는 무관하고, 주로 압전소자의 두께에 비례한다는 것을 알 수 있다.

$$v_{op}(t) = \frac{q(t)}{C_p} = g_{33} a p(t) \quad (14)$$

2.3. 공간전하신호의 측정

압전소자에 의한 전압출력신호를 광대역 증폭기로 증폭할 경우의 등가회로를 그림 2에 나타내었다.

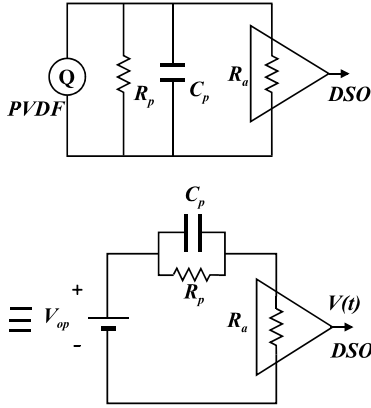


그림 2. 압전소자의 출력 증폭에 대한 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of amplifier output for piezoelectric material

그림에서 R_a 는 증폭기의 입력 임피던스를 나타내며, 압전소자의 저항은 R_a 에 비해 매우 크므로 무시 가능하다. 회로에서 $q(t)$ 는 시정수 $\tau_c(=R_a C_p)$ 로 감소한다. 따라서, 입력 임피던스가 큰 증폭기를 사용하면, 즉 R_a 를 $1\text{M}\Omega$, C_p 를 $1\text{nf}(a=28\mu\text{m}, S=2.6\text{cm}^2)$ 라고 하면 τ_c 는 약 1ms 로서, 공간전하의 측정시간대($10\sim 30\text{ns}$)에서는 거의 변화가 없지만, 입력 임피던스가 50Ω 인 경우에는 방전에 의한 신호의 왜곡이 발생할 수 있다.

그림 2의 등가회로에서 증폭기의 출력전압 $v(t)$ 의 Fourier 함수 $V(f)$ 는

$$V(f) = \frac{1}{C_p} A(f) W(f) Q(f) \quad (15)$$

로 주어진다. 여기서, $A(f)$ 는 증폭기의 전달함수, $W(f)$ 는 C_p 와 R_a 에 의한 전달함수를 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$W(f) = \frac{R_a}{R_a + \frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{j\omega C_p R_a}{1 + j\omega C_p R_a} \quad (16)$$

식(15)에 식(5), (7), (10)을 대입하여 다시 정리하면,

$$\begin{aligned} V(f) &= \frac{v_p}{C_p} A(f) W(f) H(f) [P_1(f) + P_2(f) + P_2(f)] \\ &= G_o [(S_1(f) - \frac{\epsilon}{2} E_p(f)) * E_p(f) \exp(-j\omega(\tau_A + \tau_{Al})) \\ &+ T_3 T_4 (S_2(f) + \frac{\epsilon}{2} E_p(f)) * E_p(f) \exp(-j\omega(\tau_s + \tau_A + \tau_{Al})) \\ &+ T_3 v_s R(f) * E_p(f) \exp(-j\omega(\tau + \tau_A + \tau_{Al}))] \quad (17) \end{aligned}$$

여기서, $G_o = \frac{v_p T_1 T_2}{2 C_p} A(f) W(f) H(f)$ (18)

식(17)에서 알 수 있듯이 출력전압에는 전극 위의 표면전하 $S_1(f)$, $S_2(f)$ 와 유전체 내의 공간전하에 의한 신호 $R(f)$ 뿐만이 아니라 입력전압펄스 자체에 의한 정전응력(Maxwell stress) 성분도 포함되어 있기 때문에, 실제 공간전하에 의한 신호성분만을 구하기 위해서는 다음과 같이 출력전압신호 $V(f)$ 에서 입력펄스에 의한 신호 성분 $V_o(f)$ 을 빼주어야만 한다.

$$V_\rho(f) = V(f) - V_o(f) \quad (19)$$

여기서, $V_o(f)$ 는 식(17)로부터,

$$\begin{aligned} V_o(f) &= G_o [-\frac{\epsilon}{2} E_p(f) * E_p(f) \exp(-j\omega(\tau_A + \tau_{Al})) \\ &+ \frac{T_3 T_4 \epsilon}{2} E_p(f) * E_p(f) \exp(-j\omega(\tau_s + \tau_A + \tau_{Al}))] \quad (20) \end{aligned}$$

로 주어지고, 따라서 유전체 내의 공간전하에 의한 출력전압신호 $V_\rho(f)$ 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_\rho(f) &= G_o [S_1(f) + T_3 T_4 S_2(f) \exp(-j\omega\tau_s) + \\ &T_3 v_s R(f) \exp(-j\omega\tau) * E(f) \exp(-j\omega(\tau_A + \tau_{Al}))] \quad (21) \end{aligned}$$

이것을 Inverse Fourier 변환한 것이 식(22)이다.

$$\begin{aligned} v_\rho(t) &= G_o [\sigma_1 e_p(t) + T_3 T_4 \sigma_2 e_p(t - \tau_s) \\ &+ T_3 v_s \int_0^t \gamma(\tau) e_p(t - \tau) d\tau] \times e_p(-\tau_A - \tau_{Al}) \quad (22) \end{aligned}$$

식(22)에서 알 수 있듯이, 전극 위의 표면전하를 포함한 공간전하분포는 위치에 따라 압전소자에 도달하는데 시간차이가 발생하기 때문에 유전체 내의 공간전하의 분포를 구할 수 있게 되는 것이다.

2.4. 기타 측정시 고려 사항들

각각 σ_1 , σ_2 , $\rho(x)$ 에 해당하는 $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ 신호는 압력파의 전파경로의 차이, 즉 전파도중 이중계면에서의 부분 반사에 의해 크기가 바뀌기 때문에 서로 직접적인 비교를 할 수 없으며, 비교를 위해서는 각 신호에 대한 보정이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 전극 A와 B를 시료와 같은 PE 계열의 반도체 전극을 사용하였다. 이 경우에 있어서는 근사적으로 $K_3 \approx K_4 \approx 1$ 이 성립함으로써, 전체적으로 $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ 가 같은 경로를 통과하는 것으로 볼 수 있기 때문에 상호 직접적인 비교가 가능하게 되고, 측정 신호로부터 바로 공간전하분포를 구할 수 있게 된다.

또한, 식(18)에서 G_0 는 측정감도에 해당하는 것으로서, $A(f)$, $W(f)$ 및 $H(f)$ 가 공간전하분포 $R(f)$ 및 입력펄스 $E_p(f)$ 의 주파수대역에 비해 월등히 넓고 평탄한 특성을 나타낸다고 가정하면, G_0 를 상수로 취급하는 것이 가능하고 실험적으로 결정될 수 있다. 그리고, $E_p(f)$ 가 $R(f)$ 에 비해 그 주파수대역이 충분히 넓다고 가정하면, $V_d(f)$ 는 주파수 영역에서 공간전하분포에 대해 직선적으로 비례한다고 생각할 수 있다. 마찬가지로 시간영역에서 $v_d(t)$ 는 공간전하분포 $\rho(x)$ 에 대해 직선적으로 비례하기 때문에 출력전압 $v_d(t)$ 에서 바로 공간전하분포를 구할 수 있게 된다.

III. 측정시스템 제작 및 실험

3.1. 측정시스템의 구성

본 연구에서는 앞에서 언급한 이론을 바탕으로 고체 고분자 유전체 내에서의 공간전하분포를 측정하기 위하여 직접 공간전하분포 측정시스템을 제작하였다. 그림 3은 본 연구에서 최종적으로 설계하고 제작한 공간전하분포 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

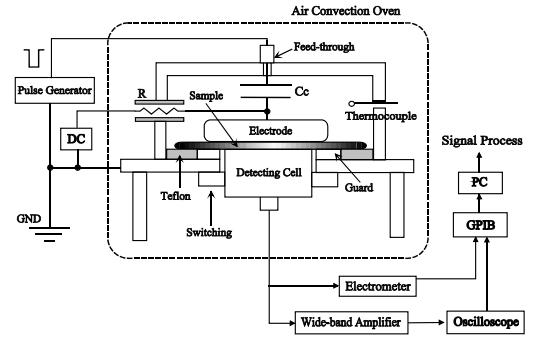


그림 3. 직류전압 하에서의 측정시스템의 개략도
Fig. 3 Schematic diagram of measuring system under DC voltage

일본의 Takada 등에 의해 제작된 기존의 PEA 법에 의한 측정시스템이 유전체 내부의 공간전하분포 측정만을 목적으로 한 반면에, 본 연구에서는 공간전하뿐만 아니라 충·방전시에 흐르는 전도전류를 함께 측정할 수 있도록 측정시스템을 개선하였다. 즉, 하부 전극에 가드(guard) 전극과 대면적 접촉식 스위치를 설치하여 공간전하분포와 전도전류를 교대로 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 유전체 내의 공간전하에 변위를 주기 위한 고전압 단(short) 펄스 발생기를 수은 스위치와 전력용 반도체 소자를 이용해서 직접 제작하였으며, 펄스전압(진폭은 0~4kV, 펄스폭 5~20ns)을 최대 1kHz의 속도로 인가할 수 있도록 하였다. 압전소자로서는 두께가 약 9 μ m인 PVDF를 사용하였으며, 떨림(Ringing) 현상을 방지하기 위하여 흡수체(absorber)로써는 PE 계열의 고분자를 사용하였으며 접촉압력을 가변시켜 음향정합 실시하였다.

한편, 입력전압펄스의 주파수대역(DC~200MHz)이 넓기 때문에, 회로의 주파수 특성이 중요하며 포유정전용량을 고려하여야만 한다. 또한, 신호전파에 따른 신호의 왜곡을 줄이기 위하여 주파수 특성이 우수한 coupling 콘덴서(C_c : 250~2000pF), 저항 및 차폐케이블이 필요하며, 노출된 접촉부의 길이를 가능한 짧게(파장의 약 1/4 이하)할 필요가 있다. 또한, 입력전압펄스의 반사를 줄이기 위해서는 측정셀과 펄스발생기의 임피던스 정합이 매우 중요하다. 그러나, 실제 고전압 콘덴서의 주파수 특성에 한계가 있고, 시료의 두께도 가변적이기 때문에 완전한 정합은 매우 어렵다.

본 연구에서는 임피던스의 정합을 위하여 측정셀의 인입구에 50Ω Feed-through를 설치하는 방법과 임피던스 정합 회로를 사용하는 방법을 모두 사용하고 있다. 다음 그림 4는 본 연구에서 사용한 임피던스 정합 회로의 예이다. [7]

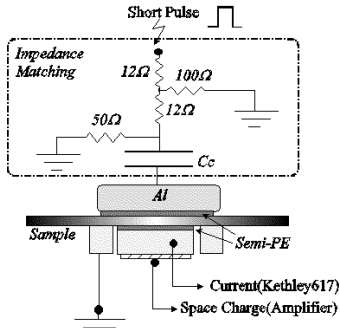
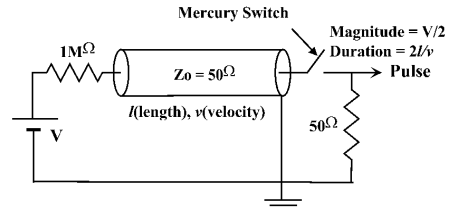


그림 4. 전극구성 및 임피던스 정합 회로도
Fig. 4 Electrode configuration and circuit diagram for impedance matching

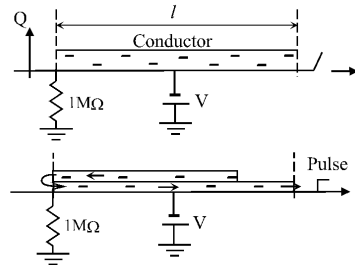
3.2. 고전압 단(short) 펄스 발생기

유전체 내부에 존재하는 공간전하분포를 측정하기 위해서는 외부에서 공간전하에 전기적 펄스를 인가하여 변위를 발생시켜야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 수은 스위치(UCL-C1105)와 전력용 반도체 스위칭 소자(HTS 80-12-μF)를 사용해서 고전압 단펄스 발생장치를 직접 제작하여 사용하였다. 수은 스위치의 경우에는 내압이 작아 0~1kV 5ns 이하의 펄스를 손쉽게 만들 수 있다는 장점을 가지는 반면에 스위칭 속도가 느리다는 단점을 가지고 있다. 반면에 반도체 스위칭 소자는 스위칭 속도가 빠르고 2~8kV 5ns 이하의 높은 전압펄스를 만들 수 있지만 가격이 비싸고 낮은 전압의 펄스를 만들 수 없다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 주로 수은 스위치를 사용한 펄스 전압을 주로 사용하였으며, 다음은 펄스전압을 발생하기 위한 회로도 와 원리도를 나타낸 것이다.

펄스발생기는 충전방식에 따라 외부 및 내부 충전 방식이 있으나, 외부 충전의 경우 초기에 주로 사용되었지만 접지측의 전위변동에 의해 잡음에 취약하고 스위칭이 불안정하다는 단점 때문에 최근에는 그림 5와 같은 내부충전 방식이 많이 사용되고 있다.



(a) 단펄스 발생기의 회로도



(b) 펄스 발생의 원리도

그림 5. 단펄스 발생기 회로도 와 원리도
Fig. 5 Circuit diagram and the principle of short pulse generator

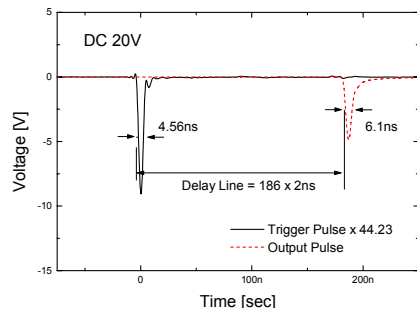


그림 6. 펄스 발생기에 의한 입력펄스 비교
Fig. 6 Comparison of input pulses by the pulse generator

이 방식은 케이블 한쪽 도체에 직류전압 V를 인가하고 다른 한쪽에는 스위치를 설치해서 스위치 단락 시 도체에 충전된 전하가 빠져나가는 현상을 이용한 것이다. 이때 입력펄스의 크기와 폭은 각각 V/2, 펄스 폭은 $2w(=2l/v)$ 로써, 외부충전 방식에 비해 노이즈에 상대적으로 강하고, 케이블의 길이를 짧게하는 것이 가능하기 때문에 5ns 이하의 펄스를 만들 수 있다. 여기서, v는 케이블에서 전자파의 속도이다.[8]

이와 같은 방법에 의해 실제 제작한 전압펄스의 파형을 그림 6에 나타내었다. 표시된 파형은 충전전압(V)이 20V이고 펄스폭이 5ns일 때의 값으로, 펄스발생기에서 바로 측정된 값과 BNC 케이블(약 50m)을 통과한 후의 파형을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 펄스는 케이블을 전파해 감에 따라 감쇄와 분산에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다.

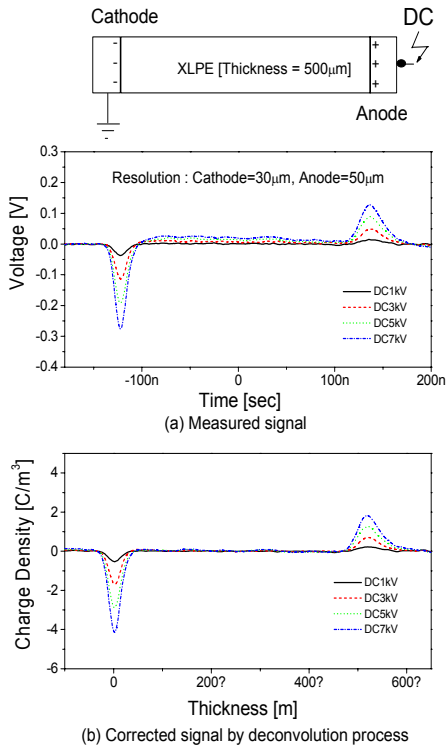


그림 7. XLPE 유전체에서 측정된 공간전하분포
Fig. 7 Space charge distribution measured in XLPE dielectric materials

3.3. 공간전하분포의 측정 및 보정

그림 3에 표시된 측정시스템에 의해 검출된 전압신호는 매우 미약한 신호로써 증폭기(AU-1332, 0~500MHz)를 통해 증폭(약 48dB)되어 오실로스코프에 전달된다. 이렇게 얻어진 신호는 앞에서 언급한 바와 같이 불안정한 차폐에 의한 접지 노이즈뿐만 아니라 압전소자의 $H(f)$, 증폭단의 $A(f)$ 와 $W(f)$, 펄스입력단에서의 임피던스 부정합, 콘덴서의 주파수 특성, BNC 케이블에서의 감쇄 및 분산, 압전소자에서의 Ringing

현상 등에 의해 신호 왜곡이 발생한다. 따라서, 순수한 공간전하에 의한 신호만을 구하는 것은 매우 어렵고, 대부분 수학적인 보정처리가 필요하게 된다. 본 연구에서는 측정신호에서 S/N비를 향상시키기 위하여 약 512회의 평균화 처리와 필터링을 하였으며, 공간전하가 거의 형성되지 않을 것으로 판단되는 저전계에서 측정된 전압신호로부터 비례상수 G_0 를 구하여 시간에 따른 전압신호를 두께에 따른 전하밀도신호로 변환하였다. 보정(deconvolution)은 입력파형을 교정하는 방법을 사용하였으며, Inverse Fourier 변화 시 weighting을 주어 변환효율을 향상시켰다. 이러한 모든 과정은 자체 제작한 보정처리 S/W를 활용하였다.

그림 7(a)는 상온에서 고분자 유전체인 XLPE(두께 = 500µm)에 인가된 DC 전압을 변화시켜가며 측정된 공간전하분포를 나타낸 것으로 양극(anode)에는 (+) 전하가, 음극(cathode)에는 (-) 전하가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이때, 두 전극 상에서 측정된 공간전하모양에서 차이가 발생하는 것은 압력파가 유전체 내부를 전파해 나갈 때 감쇄와 분산에 기인한 것이다. 그림 7(b)는 그림 7(a)의 결과를 보정처리를 한 것으로 시료 내부에서의 데이터가 보정된 것을 알 수 있다. 이와 같이 보정 처리를 함으로써 공간전하의 검출 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 최근 DC 전력케이블의 장기수명특성과 관련하여 큰 이슈가 되고 있는 공간전하(Space charge) 문제와 관련하여 공간전하의 비파괴 측정법 중 하나인 펄스정전용력법(PEA method)에 대한 이론적 고찰과 함께 고전압 단펄스(short) 발생장치의 개발을 통하여 직류전압 하에서 고분자 유전체 내에서 공간전하분포를 측정할 수 있는 시스템을 성공적으로 개발하였다. 또한, 기존 시스템에 비하여 보정처리를 통해 측정된 공간전하 신호의 정확도를 향상시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 최수일, 이준호, 김규언, 김종민, 황보승, “공간전하에 따른 전도전류의 변화”, 전기학회논문지,

- 57권, 12호, pp. 2225-2229, 2010.
- [2] S. Hwangbo, Y. Kwon, S. Jeon, M. Han, "Direct Correlation between Space charge and Conduction Characteristics of Low-density Polyethylene at Various Temperature", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37, pp. 4419-4427, 1998.
- [3] J.H. Nam, Y.J. Kim, Y.H. Park, I. H. Ryu, S.T. Ha, W.S. Lee, T.H. Lee, J.T. Kim, "Technology of Nano XLPE Insulating Materials for the Extrude High Voltage Direct Current Cables", LS Cable & System technical Review, pp. 31-39, 2011.
- [4] T. Maeno, H. Kushibe, T. Takada, C. M. Cooke, "Pulsed Electro-acoustic Method for the Measurement of Volume Charges in E-Beam Irradiated PMMA", Ann. Report CEIDP, pp. 681-687, 1985.
- [5] H. Kitajima, Y. Mito, Y. Tanaka, T. Takada, "Measurement of Space Charge Distribution at High Temperature using the Pulsed Electro-Acoustic(PEA) Method", Japan DEI-95-91, 1995.
- [6] 田中 康寛, 高田 達雄, "Pulse靜電應力法による空間電荷측정과Data 信號處理", 日本電氣學會・絶縁材料研究會資料, DEI-92-74, 1992.
- [7] 황보승, 이준호, "부극성 직류전압에 의해 사전 형성된 공간전하가 XLPE의 부분방전 특성에 미치는 영향", 전기학회논문지, 52C권, 7호, pp. 310-313, 2003.
- [8] 김광택, 민성환, 윤중현, "폴리머 테이퍼링 도파로 영역이 있는 저손실 플라스틱 광섬유 커플러", 한국전자통신학회논문지, 7권, 4호, pp. 867-871, 2012.

저자 소개



황보승(Bo-Seung Hwang)

1987년 서울대학교 전기공학과업
(공학사)

1989년 서울대학교 대학원 전기공
학과(공학석사)

1998년 서울대학교 대학원 전기공학과(공학박사)

2012년 호남대학교 전자광공학과 교수

※ 관심분야 : 전기시스템 및 제어, 자동화 시스템