ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 7, pp. 860~864, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.7.860

펄스정전응력법(PEA)을 이용하여 측정한 고분자 절연재료 내에서의 공간전하분포 신호에 대한 보정 처리 연구

A Study on the Correction Processing for the Signal of the Space Charge Distribution in Polymer Insulating Materials Measured by PEA Method

민 우 민* · 강 종 민* · 김 형 규** · 박 준 도*** · 황 보 승†
(Woomin Min · Jongmin Kang · HyungGyu Kim · JunDo Park · Seung Hwangbo)

Abstract – The signal of space charge distribution measured in polymer insulating materials by the PEA has some noises due to the system circuits and the ringing phenomena in the sensor of PVDF and so on forth. It's magnitude mainly depends on the thickness of the insulation material, and it is also affected by the attenuation and dispersion when traveling in a dielectric material. In order to make it reliable, the correcting process for the signal is essential. In this study, we proposed the new deconvolution process on the measured signal of space charge distribution in the flat XLPE insulator, and developed a new signal processing algorithm. Using this, we could improve the reliability of the measured signal much and analyze the effects of space charge clearly in materials.

Key Words : PEA (Pulsed Electro-Acoustic Method), Space Charge, Deconvolution, XLPE

1. 서 론

오늘날 동력 전달 기술이 발전하여 고전압 DC 전송이 가능해졌다. 그러나 해저 케이블에 사용되는 HVDC 송전 선로의 경우 케이블 내부 절연 재료에 직류 고전압이 지속적으로 걸리기 때문에 공간전하로 인한 절연 파괴의 발생 가능성이 아주 높다. 공간전하는 절연 재료 내부의 주입, 생성 또는 이동하면서 절연체 내부의 전기적 특성에 영향을 미쳐 절연파괴를 가져올 수 있다[1]. 따라서 공간전하 분포 측정은 HVDC 송전급 해저 케이블의 성능과 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 이러한 절연체 내의 공간전하분포를 측정하기 위하여 비파괴적이고 노이즈에 강한 펄스정전응력법(PEA)을 채택하였으며, 측정 시료로써는 고분자 절연재료인 XLPE 평판을 사용하였다. 펄스정전응력법을 사용하여 공간전하분포를 측정하면 경계면에서의 반사와 반사에 의한 공진(ringing), 잡음 등이 같이 포함되고 또한, 케이블의 절연 두께가 두꺼워 질수록 감쇠 및 분산의 영향이 커져서 신호 왜곡이 발생하게 된다[3]. 이러한 왜곡된 신호로는 절연재료의 수명과 성능을 정확하게 평가하는 것이 힘들다. 따라서, 이러한 왜곡된 신호를 보정하는 작업이 필요하며, 여기서는 신호 보정을 위해 디컨볼루션(deconvolution)이라는 방식의 수학적 계산방법을 사용하였다. 이 방법은 측정 신호와 시스템 응답을 이용하여 원래 신호를 복원하는 방법으로 신호의 신뢰성을 얻기 위해 많은 영역에서 사용되고 있다. 본 연구에서는 자체적으로 디컨볼루션 알고리즘과 프로그램을 개발하여 측정신호를 성공적으로 보정하였으며, 이를 통해 절연체 내의 공간전하 거동을 보다 신뢰성을 가지고 분석할 수 있게 되었다.

† Corresponding Author : Dept. of Automotive Engineering, Honam Univerity, Korea.
E-mail: hbs@honam.ac.kr
* Dept. of Electrical and electronic Engineering, Honam Univ., Korea
** Dept. of Automotive Engineering, Honam Univ., Korea
***Dept. of Electrical and electronic Engineering, Honam Univ., Korea
Received : February 14, 2018; Accepted : May 25, 2018

2. 본 론

2.1 펄스정전응력법(PEA Method)

펄스정전응력법은 절연체 내부의 공간전하를 직접적으로 측정하기 위한 방법으로 개발되었으며, 최근 PEA법을 사용하여 많은 연구가 국내 · 외적으로 활발히 이루어지고 있다. 이 방법은 공간전하를 비파괴적으로 동일한 시료 상에서 반복적인 측정이 가능하며, 재연성이 뛰어나고, 시스템 구성이 비교적 간단하다는 장점을 가지고 있어 우리나라를 비롯한 많은 곳에서 현재 널리 사용되고 있다. 이 방법은 고전압 단(short) 펄스를 직접 유전체에 인가하여 유전체 내부에서 발생한 압력파(또는 탄성파)를 음향적으로 검출하는 방식이다. 즉 절연체 내부에 형성된 공간전하가 고전압 단(short) 펄스와의 정전응력에 의해 변위를 일으키고, 이것이 절연체 내부에 압력파를 발생시켜 주위로 전파하는 것을 검출

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부에 설치된 압전소자에 의해 음향적으로 검출함으로써 공간전하의 분포를 측정하는 방식이다[1].

펄스정전응력법을 이용한 공간전하분포 측정 원리는 그림 1에 나타낸 것과 같이 공간전하밀도가 $\rho(x)$인 샘플을 접지전극(x=0)과 상부 전극(x=d) 사이에 위치시키고, 양 전극에 고전압 V_{dc}를 인가하면 반도전층인 두 전극 표면상에 전하들이 축적된다. 이때, 고전압 단(short) 펄스 $e_p(t)$을 커플링 캐패시터 C_C을 통해 상부 전극에 인가하면 순간적으로 전하들이 정전응력에 의한 Lorentz 힘에 의해 국소적인 변위를 일으키게 된다. 이러한 전극 표면과 샘플 내부에 존재하는 공간전하들에 의해 발생되는 압력파가 압전소자(PVDF)로 진행하고 순차적으로 전압신호로 변환됨으로써 공간전하분포를 측정할 수 있게 된다. 공간전하에 의한 센서신호는 전하량에 선형적으로 비례하지만 시스템적인 회로 및 재료에 의한 감쇠, 분산 때문에 왜곡이 생기게 된다.

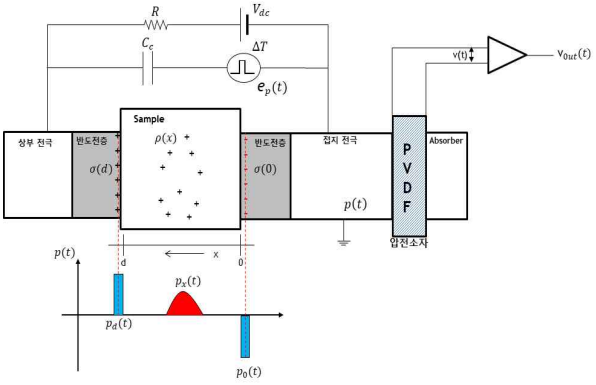

그림 1 PEA법에 의한 공간전하분포의 측정원리
Fig. 1 Principle of the PEA Method

측정시료 내부에 공간전하밀도 $\rho(x)$가 분포하고 있다고 가정하면, 이것에 의해 반도전과 전극 사이에 유기전하가 발생하며 인가전압에 의한 영향과 중첩되어 나타나게 된다. 시료에 DC 고전압을 인가했을 때 상부전극과 접지전극에서의 단위면적당 전하량을 각각 σ_1, σ_2라고 하면, 그 크기는 식 (1), (2)와 같이 유도된다.

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

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

그림 2는 본 연구에서 XLPE 평판 시료에 대해 공간전하분포를 측정하기 위해 사용한 측정 셀에 대한 개략도이다. 펄스발생기에서 출력된 고전압 단(short) 펄스의 진폭은 0~5kV이고, 진폭은 20ns이며, 입력신호의 임피던스 매칭을 위해 50Ω Feed-through를 사용하였으며 이를 통해서 반사에 의한 신호왜곡을 줄이고자 하였다. 압력파 신호를 전기적인 신호로 검출하기 위한 압전소자로써는 주파수 특성이 우수한 PVDF를 사용하였으며, 검출한 미소신호를 증폭하기 위해 전압이득이 49dB이고, 대역폭이 0.001~500MHz인 증폭기를 사용하였다.

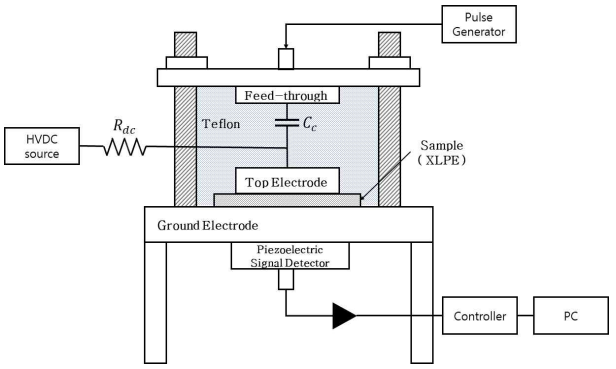

그림 2 공간전하 측정을 위한 PEA셀 도식 표현
Fig. 2 Schematic of the PEA cell for the measurement of space charge

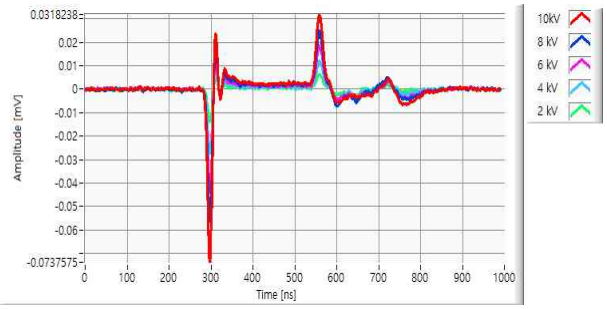

그림 3 DC 2~10kV에서 측정한 공간전하분포신호
Fig. 3 The space charge distribution signals measured at DC 2~10kV

2.2 신호 보정(Signal Processing)

2.2.1 Deconvolution

그림 3은 본 연구에서 제작한 PEA 시스템을 통해 절연두께 ~ 500㎛ XLPE에서 측정된 공간전하분포 신호이다. 인가전압은 DC 2, 4, 6, 8, 10kV이며, 실험결과를 통해 인가전압과 공간전하분포 신호의 선형적 관계를 확인하였으며, 시스템을 통한 잡음과 반사, 신호의 감쇠 및 분산 등이 신호에 포함된 것을 확인할 수 있었다. 일반 잡음의 경우 필터링을 통해서 보정이 가능하지만, 전달함수에 따른 신호파형의 왜곡 현상을 보정하기 위해서는 특정 방정식을 통한 신호 보정이 필요하며, 그 방법으로 Deconvolution을 사용하였다. Deconvolution은 컨볼루션(convolution, 결합)된 신호들을 분리하기 위해 사용하는 알고리즘 기반 프로세싱 과정이며, 이러한 프로세싱은 신호 처리 및 이미지 처리에 많이 활용되고 있다. 한편, 공간전하분포 신호를 측정하기 위해서는 광대역 증폭기를 통해서 신호를 획득하게 되는데, 이때 증폭기 자체가

고역 통과(high pass) 필터로써 공간전하분포 신호의 왜곡을 발생시키기 때문에 정확한 공간전하분포를 측정할 수 없다[3].

컨볼루션 정리에 따르면 시스템의 임펄스(impuse) 응답을 구하면 해당 시스템 회로의 입력과 출력 관계를 계산할 수 있다. 즉, 증폭기 주파수 대역이 충분하고, $x(t)$를 이상적인 공간전하신호라고 가정하면 측정된 신호는 시스템의 전달함수 $h(t)$와 Convolution 되어 출력된다. 따라서 측정한 신호와 함께 $h(t)$을 알고 있다면 Deconvolution 과정을 통해서 원래의 이상적인 신호를 구할 수 있다.

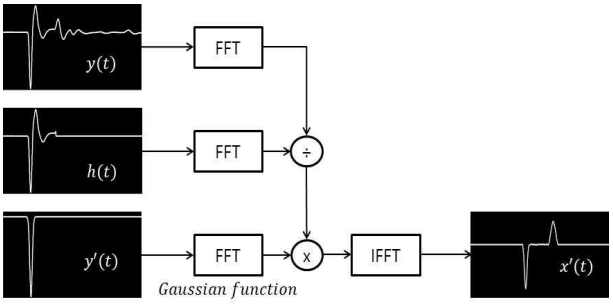

그림 4 신호보정을 위한 Deconvolution 처리과정
Fig. 4 Deconvolution processes for signal correction

그림 4는 여기서 사용된 Deconvolution 처리 알고리즘을 나타낸다. 여기서 $y(t)$는 오실로스코프를 통해 측정된 신호이며, $x'(t)$는 이상적인 출력신호를 나타내고 $h(t)$는 시스템 전달함수를 나타낸다. Deconvolution 처리를 수행하기 위해서는 시스템 전달함수인 $h(t)$를 알고 있는 경우에만 가능하다. 본 논문에서는 시스템 전달함수 $h(t)$를 측정 신호 $y(t)$의 접지전극 상의 공간전하분포 신호로 간주한다. 즉, 이상적인 델타(△) 전압이 인가되어 접지 전극 상의 공간전하와 상호작용을 통해 델타 압력파가 발생되고 이것이 전파를 통해 왜곡된 것으로 간주한다. 하지만 이때 감쇠 및 분산은 없다고 가정한다. 여기서 $y'(t)$는 입력파형을 모의한 신호로써 Gaussian 함수를 이용해서 만든 신호이다. 이러한 Gaussian 함수는 일종의 필터 역할도 함께 수행한다.

Deconvolution 처리는 그림 4에서와 같이 측정신호 $y(t)$와 시스템 전달함수 $h(t)$를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 주파수 영역으로 변환 후, Gaussian 함수를 공해준 후에 식 5와 같이 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 변환을 통해 시간영역으로 변환하면 원래의 이상적인 신호 $x'(t)$를 구할 수 있다.

$$y(t) = h(t) * x(t) \tag{3}$$

$$Y(f) = H(f)X(f) \tag{4}$$

$$x(t) = F^{-1}\left(\frac{Y(f)}{H(f)}\,Y'(f)\right) \tag{5}$$

그림 5는 그림 3의 신호들을 Deconvolution 처리한 후의 보정된 상부 및 하부 전극 상의 공간전하분포를 나타낸 것으로, 측정신호에서 왜곡과 반사파가 보정된 것을 확인할 수 있다.

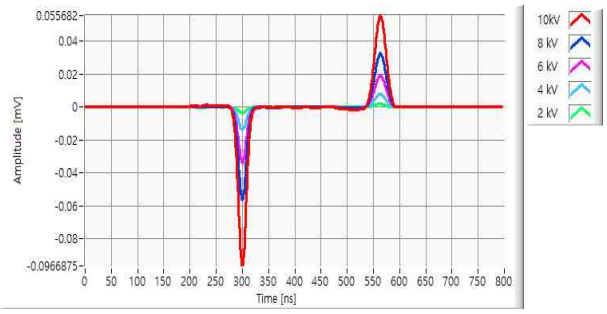

그림 5 DC 2~10kV에서 측정한 공간전하분포신호
Fig. 5 The space charge distribution signal measured at 2 to 10kV DC

2.2.3 Calibration

Deconvolution 처리를 실시한 후, 시간과 전압의 단위인 측정신호를 절연두께와 체적전하밀도로 변환하기 위한 또 다른 보정(Calibration) 작업이 필요하다. 본 연구에서는 측정신호를 Deconvolution 실시한 후의 보정된 신호에 대해서 하부전극 상에 형성된 공간전하를 이용해 다음 수식(식 6 및 7)을 활용해서 단위 보정 작업을 실시하였다.

$$\sigma_e = \epsilon_0 \epsilon_r E_e \tag{6}$$

$$E_e = \frac{V}{d} \tag{7}$$

여기서 ϵ_0는 유전율, ϵ_r은 비유전율을 나타내며,Z_{cal}은 전하밀도로 변경하기 위한 보정계수이다. $p(x)$는 보정신호의 하부전극 상의 신호이며, 식 (8)을 통해 보정계수를 구할 수 있다.

$$Z_{cal} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} p(x)\,dx}{\sigma_e} \tag{8}$$

이렇게 얻어진 보정계수를 통해 공간전하분포의 단위를 mV에서 C/m^3으로 변환할 수 있으며, 이때 체적전하밀도는 식 9를 통해서 계산할 수 있다.

$$\rho(x) = \frac{p(x)}{Z_{cal}} \tag{9}$$

마지막으로 쉬트상 시료에 인가된 전계와 전압은 식 10과 11를 통해서 구할 수 있다.

$$E(x) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r}\int_0^d \rho(x)\,dx \tag{10}$$

$$V(x) = -\int_0^d E(x)\,dx \tag{11}$$

2.2.3 신호 보정 프로세싱 구축

본 논문에서의 연구 목적은 펄스정전응력법(PEA)을 이용해 고분자 절연재료에서 측정된 공간전하분포 신호의 정확도를 높이는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 우선 측정된 신호에서의 잡음과 왜곡을 줄이기 위해 검출부에서의 음향임피던스 매칭의 개선을 포함한 다양한 시도를 하였으나 여러 가지 원인에 의한 영향을 모두 제거하는 데는 분명한 한계가 있었다. 본 연구에서는 이러한 신호 왜곡을 줄이고자 LabVIEW S/W를 활용하여 신호보정 프로그램을 개발하였다. 그림 6은 신호보정을 위한 순서도를 나타내며, 사용자가 신호보정을 원하는 절연재료의 두께 및 타입(시편, 케이블)에 따라 파라미터를 설정할 수 있다. 또한 공간전하 데이터와 그래프를 엑셀을 통해 실시간으로 저장할 수 있게 하였으며, 날짜 및 시간별로 파일을 생성하여 데이터를 관리하기 쉽도록 구축하였다. 신호 보정 프로세싱을 통해 보정된 공간전하분포 신호는 그림 7과 그림 8 및 그림 9를 통해 나타냈다.

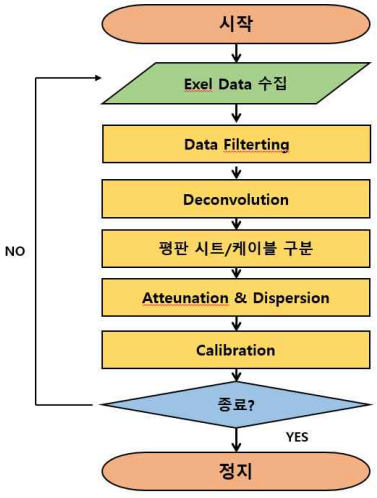

그림 6 신호 보정 플로우차트
Fig. 6 Signal processing flowchart

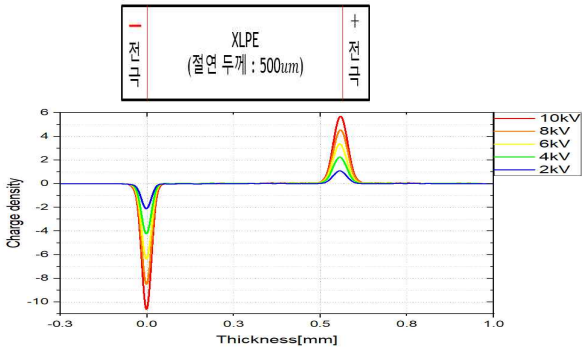

그림 7 절연 두께 500μm XLPE 시트 Charge density
Fig. 7 Insulation thickness 500μm XLPE sheet Charge density

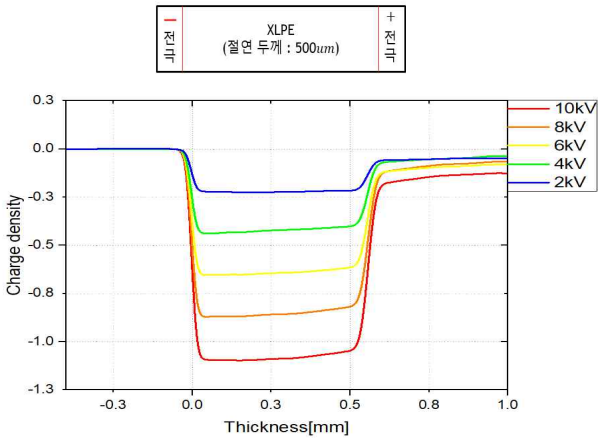

그림 8 절연 두께 500μm XLPE 시트 Electric field
Fig. 8 Insulation thickness 500μm XLPE sheet Electric field

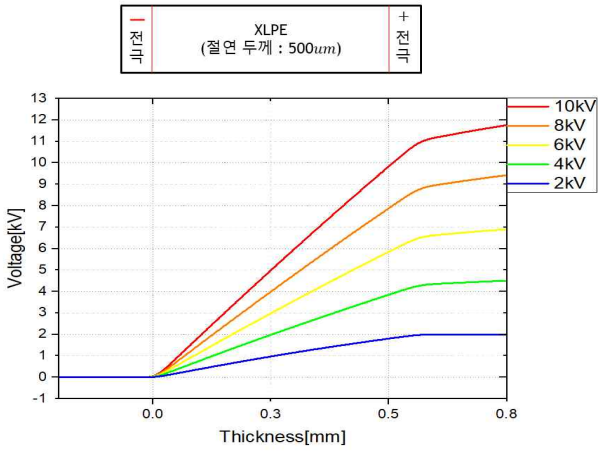

그림 9 절연 두께 500μm XLPE 시트 Voltage
Fig. 9 Insulation thickness 500μm XLPE sheet Voltage

3. 결 론

본 논문에서는 자체 제작한 PEA 시스템을 통해 절연 두께 ~500μm XLPE에 DC 전압을 2, 4, 6, 8, 10kV로 순차적으로 증가시켜 공간전하분포를 측정하였으며, 측정된 신호에는 시스템 자체의 전달함수와 검출부의 음향 임피던스 불일치 및 인가전압의 임피던스 불일치 등에 의해 신호 왜곡이 발생하였다. 본 연구에서는 이러한 측정신호에 포함된 신호왜곡을 보정하기 위한 기존의 신호보정 알고리즘을 개선하였으며 이를 통해 개선된 공간전하분포 신호를 얻을 수 있었다. 또한, 보정된 공간전하분포 신호를 통해 고전 절연체 내의 전계와 인가전압을 성공적으로 계산할 수 있었다. 하지만 압력파의 감쇄와 분산에 대한 영향은 아직 고려하지 못하고 있으며 향후 이에 대한 고려를 통해 더욱 향상된 신호 보정이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20158530020770).

References

[1] S. Hwangbo, Y. H. Kwun, S. I Jeon and M. K. Han, "Direct Correlation between Space Charge and Conduction Characteristics of LDPE at Various Temperature", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 4419-4427, 1998.

[2] A.Vazquez, "Space Charge Measurement Using Pulsed Electroacoustic Technique and Signal Recovery", *Jounal of the European Ceramic 19*(1999) pp. 1219-1222.

[3] TSEKMES, I. A., et al. "Space charge accumulation in polymeric DC mini-cables. In: Solid Dielectrics (ICSD)", *2013 IEEE International Conference on. IEEE*, 2013. pp. 452-455.

[4] TSEKMES, Ioannis Alexandros, "Electrical characterization of polymeric DC mini-cables by means of space charge and conduction current measurements", 2012

[5] S. Hwangbo, D. H. Park, S. H. Nam, Y. H. Kwon, M. K. Han, "Numerical Analysis about the Time Characteristics of Space Charge Distribution and Measured Current in LDPE", *Trans. KIEE.* vol. 49C, no. 9, SEP. 2000

[6] S. Hwangbo, "Study on the Effects of space charge on the Conduction and Partial Discharge Characteristics in Polymer Insulators by Modifying the PEA(ESAW) Method", *Seoul National University*, 1998.

[7] G. T. Kim, S. Hwangbo, J. M. Kang, W. M. Min, J. H. Lee "A research on the Automatic measurement system of the space charge distribution in polymer insulating materials using PEA with high voltage short pulse generator", *Trans. KIEE*, pp. 40-41, 2016

[8] Antti Penttinen, "Design of pulsed electroacoustic measurement system for space charge characterisation", *Lappeenranta University of technology*, 2012

[9] J. M. Kang, S. Hwangbo, G. T. Kim, W. M. Min, J. D. Park "A study on the signal recovery method for measure the space charge distribution by using PEA method", *Trans KIEE*, pp. 1206-1207, 2016

저 자 소 개

민 우 민 (Woo-Min Min)

He received M.S degree in electricity and Electronic Engineering from Honam University. His research interests are automation system, signal processing.

강 종 민 (Jong-Min Kang)

He received ME in electrical and electronic engineering from Honam University in 2018. His research interests include measurement and automation systems and space charge of dielectric material

김 형 규 (Hyung-Gyu Kim)

He graduated from the Department Electronic Engineering of Honam University in 2018 and currently pursuing his master's courses in Automotive engineering. His research interests are automation system, signal processing.

박 준 도 (June-Do Park)

He received BE, ME in electrical and electronic engineering from Honam University in 2005, 2007, His research interests include optical and electrical electronics, high voltage cable space charge, and control and measurement automation systems.

황 보 승 (Seung Hwangbo)

He received BE, ME and PhD in electrical engineering from Seoul Nat'l University in 1987, 1989 and 1998, respectively. His research interests include the space charge of dielectric material and automatic measurement system.