

## STFT 및 통계적 처리에 의한 공기 중 부분방전원 식별

### Recognition of PD Sources in Air by STFT and Stochastic Parameters

이강원<sup>1</sup>, 박성희<sup>2,a</sup>, 강성화<sup>3</sup>, 임기조<sup>2</sup>

(Kang-Won Lee<sup>1</sup>, Sung-Hee Park<sup>2,a</sup>, Seong-Hwa Kang<sup>3</sup>, and Kee-Joe Lim<sup>2</sup>)

#### Abstract

The phenomenon of PD(Partial Discharge) is accompanied by electromagnetic wave which can be detected by UHF(Ultra High Frequency) antenna. The signals obtaining from UHF antenna are very high rapid pulse and have wide band frequency responses. The distribution of PRPD(Phase Resolved Partial Discharge) which consisted of those pulse train can show distinct characteristics of PD sources. But it is not sufficient to discriminate among PD sources. This paper suggests that the stochastic parameters formed by preprocessing of STFT(Short Time Fourier Transform) are good tools for differentiate from PD sources. The stochastic parameters are CC(Cross Correlation) mean value, CC standard deviation, CC skewness, CC kurtosis.

**Key Words** : PRPD, UHF, STFT, CC

#### 1. 서론

절연시스템의 전기적 열화는 물적, 인적인 면에서 큰 사고로 이어질 수 있으므로, 사전에 측정하여 예방하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 이러한 전기적 열화는 다양한 방법에 의하여 측정될 수 있으나 그중 열화 시 발생하는 부분방전은 전기적 열화에 대한 중요한 정보를 제공하므로, 이러한 부분방전을 측정하는 기술이 중요하다. 이러한 부분방전에 대한 검출방법으로서 방전원의 접지측에 저저항을 직접 연결하여 측정하는 방법, 접지측 또는 고압측으로 흐르는 방전전류를 측정하는 CT법, 측정기기의 안 또는 밖에서 방전원로부터의 초음파를 측정하는 AE센서법 그리고 방전원으로부터

발생한 전자기파에 의한 UHF 신호를 측정하는 방법 등이 있다[1-5]. 그러나 CT법과 AE센서법 등은 대상기에 직접설치를 해야 하는 번거로움을 가지고 있으며, 또한 AE센서법은 외부의 차단기동작 및 산업기기의 동작과 같은 기계적인 노이즈(수십Hz ~ 수백kHz) 및 초음파의 전달시 매질간의 음향임피던스의 차이에 따른 영향을 많이 받는 단점을 가지고 있다. 또한 부분방전의 발생양상은 시간영역에서 비 주기적인 펄스형태를 보여주므로 부분방전에 대한 정확한 예측을 어렵게 하고 있는데, 이러한 비 주기적 신호에 대한 처리기술로서 여러 가지가 사용되고 있으며, 그중 많이 연구되고 있는 것이 STFT와 wavelet을 이용한 기술이고, 이 기술들은 시간영역과 주파수영역을 동시에 관찰할 수 있게 한다[6,7].

본 논문에서는 방전원으로서 침대 평판 및 침대 침 전극구조를 사용하여 두 개의 방전원을 모의하였고, 비접촉식으로서 방전원으로부터 발생한 전자기파를 검출하는 광대역 UHF antenna를 이용하여 각 방전원으로부터 방사된 펄스신호를 측정하고 한 주기 동안 측정된 신호에 대하여 기존 PRPD법

1 : 철도기술연구원

(경기도 의왕시 월암동 385,

Fax: 031-460-5509

a : Corresponding Author : partenza@hanmail.net)

2 : 충북대학교 전기공학과

3 : 충청대학교 산업안전공학과

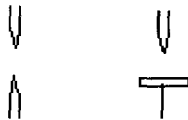
2003년 5월 16일 접수, 2003년 6월 5일 1차 심사완료,

2003년 6월 24일 최종 심사완료

에 의한  $\phi-q-n$  분포를 검토하며, 각 분포에 대한 통계적 특성 파라미터 값을 추출하였다. 그리고 또한 각 주기 당 펄스신호에 대한 STFT를 행한 후 각 window의 앞과 뒤의 상관관계를 검토하고, 그 결과를 100주기 동안 축적한 후 통계 처리를 하여 각각의 방전원으로부터 계산된 통계적 결과(평균, 표준편차, 왜도, 첨예도)를 상호 비교하여 방전원식별에 적용하였다.

## 2. 실험 방법

본 논문에서 사용된 전극 구조는 침-침 전극구조와 침-평판전극이며, 침-침 전극구조는 케이블 또는 GIS(Gas Insulated Switchgear)에서 전압이 인가되는 도체부분과 그라운드부분의 양쪽에 돌기가 형성된 형태를 나타내며, 침-평판구조의 경우는 도체부분 또는 그라운드 부분중 어느 한쪽에 돌기가 형성되어 있는 형태로 그림 1과 같다. 사용된 침의 곡률반경은 약  $3\mu\text{m}$ , 평판전극은 원통형으로서 지름 7mm이고, 전극간 거리는 양 전극 모두 10mm를 유지하였으며, 각 전극에는 6.2kV(60Hz)의 교류전압이 인가되었다.



(a) Needle-Needle (b) Needle-Plane

그림 1. 전극 구조.

Fig. 1. Construction of electrode.

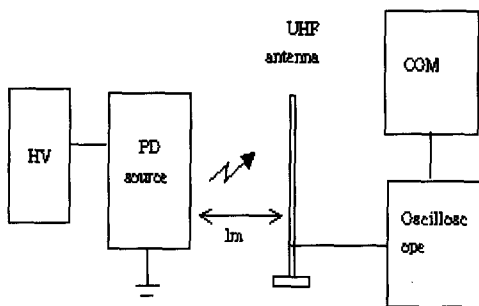


그림 2. 실험 장치에 대한 블록나이어그램.

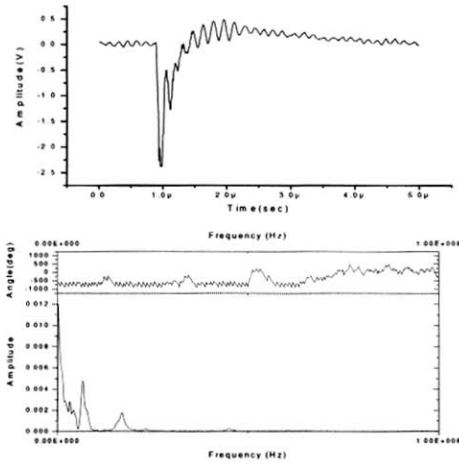
Fig. 2. Block-diagram of experimental setup.

방전원에서 방사된 전자기파를 측정하기 위하여 광대역 특성을 가진 UHF 안테나(30 kHz~2 GHz)를 사용하였으며, 방전원과 안테나의 이격거리는 1m를 유지하였다. 실험에 사용된 장치들에 대한 블록나이어그램은 그림 2이다. 안테나에서 측정된 신호는 안테나에 내장된 Preamp를 거쳐 50Ω의 입력임피던스로 조정된 디지털오실로스코프(Tektronix, 5GHz)를 통하여 관측되었으며, 측정된 데이터는 GPIB 케이블을 거쳐 컴퓨터로 보내진 후 저장 및 데이터 처리과정이 수행되었다.

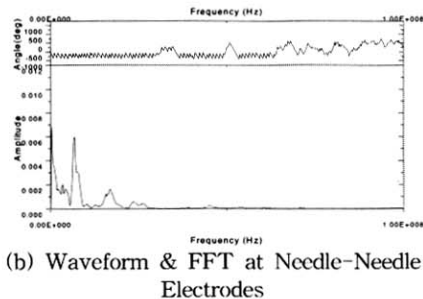
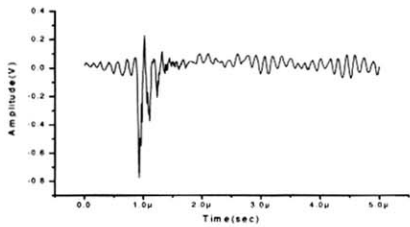
## 3. 결과 및 고찰

그림3 (a)와 (b)는 각각 침대평판 및 침대 침전극구조에서 발생된 PD에 의한 전자기파를 UHF안테나를 이용하여 측정된 신호파형과 이에 대한 주파수분석 결과이다. 두 경우 모두 유사한 부극성의 신호파형과 주파수 분석결과(100MHz이하)를 보여주고 있으나, 파형의 하강시 oscillation의 크기가 그림 (a)보다 그림 (b)의 경우가 더 큰 것을 보여주고 있으며, 주파수 분석결과에서도 그림 (b)의 경우가 그림 (a)의 경우보다 고주파영역에서의 주파수성분이 더 많다는 것을 보여주고 있다. 이러한 결과는 두 전극의 불평등전계 하에서의 PD 펄스의 상승시간의 차이에 기인한 것으로 보이며, 침대침에서 발생된 PD펄스가 침대 평판의 경우보다 더 빠른 상승시간을 가진다는 것을 알 수 있다.

그림 4의 분포는 교류전압(6.2kV, 60Hz)하에서 UHF 안테나로부터 100주기동안 발생된 펄스를 위상별에 따라 중첩한 것이다. 그림 4(a)의 결과는 양의 주기부분에서만 펄스가 보여지며, 또한 그 형태에서 펄스열의 중간부분이 가라앉은 형태인데 반하여 그림 4(b)에서는 양의 주기와 부의 주기에서 모두 펄스가 나타나며, 또한 펄스열의 형태가 그림 4(a)의 경우와는 달리 중간부분이 돌출된 형태를 가지고 있다. 이런 두가지 비교를 통하여 그림 4(a)와 (b)는 서로 다른 방전원이라고 추측할 수 있게 한다. 그러나 이러한 비교는 단지 정성적인 결과를 보여주므로 정량적인 데이터를 얻기 힘들다. 그러므로 이러한 정성적인 비교를 정량적으로 보여줄 수 있는 방법으로서  $\phi-q-n$  분포를 이용한 통계적 처리 방법을 사용하였다.

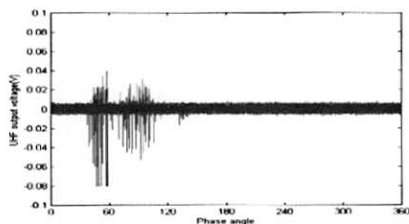


(a) Waveform & FFT at Needle-Plane Electrodes

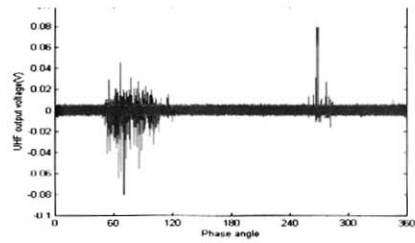


(b) Waveform & FFT at Needle-Needle Electrodes

그림 3. UHF 안테나의 출력신호 및 주파수 응답.  
Fig. 3. Output signals and frequency response of UHF antenna.

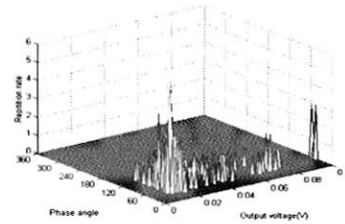


(a) PD pulses during 100 period (Needle-Plane)

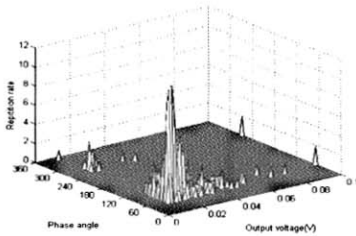


(b) PD pulses during 100 period (Needle-Needle)

그림 4. UHF antenna를 이용하여 100주기동안 측정된 각 방전원별 펄스파형.  
Fig. 4. Pulse shape of each discharge source using UHF antenna during 100 periods.



(a) Needle-Plane Electrodes



(b) Needle-Needle Electrodes

그림 5. UHF 안테나로 측정된 100주기간의  $\phi-q-n$  분포.

Fig. 5.  $\phi-q-n$  distribution from UHF antenna during 100 periods.

그림 5는 그림 4와는 달리 정상적인 통계적 데이터로 표현이 가능한  $\phi-q-n$  분포의 3차원 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 비교적 명확하게 침-평판과 침-침의 2종류 방전원에 대한 차이를 보여주고 있다. 또한 그림 4에서는 알 수 없는 각 위상별 방전의 발생 빈도를 알 수 있다. 표 1은 그림 5

의  $\phi-q-n$ 분포로부터 만들어진 2차원 분포들에 대한 양(+)주기와 부(-)주기에서의 왜도와 첨예도의 계산 값이다. 이러한 계산결과를 이용하여 두 전극간의 차를 정량적으로 비교하면, 각 분포에서의 통계적 파라미터 값이 큰 차이를 보여주므로 두 개의 방전원에서의 방전양상이 서로 다른 것의 의한 방전원 식별을 가능하게 한다.

표 1. 각 전극별 통계적 파라미터 비교.

Table 1. Comparison of statistical parameters for each electrode.

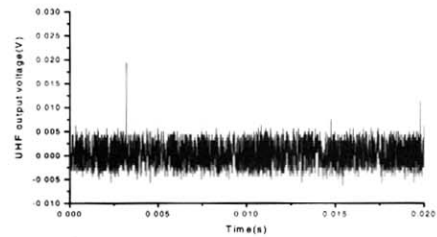
		Skewness		Kurtosis	
		침-평균	침-침	침-평균	침-침
$H_n(q)$		1.6	3.3	4.9	16.8
$H_{qn}(\phi)$	정	$7.6 \times 10^{-3}$	$-1.5 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-7}$
	부	-	$6.2 \times 10^{-4}$	-	$5.8 \times 10^{-5}$
$H_n(\phi)$	정	0.58	-0.87	2.46	1.6
	부		1.02		1.05
$H_q(\phi)$	정	$2.3 \times 10^{-4}$	$-5.6 \times 10^{-5}$	$7.03 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-6}$
	부		0.001		$1.06 \times 10^{-4}$

이러한 통계적인 방법을 이용하면 정량적인 분석이 가능하지만 통계적인 특성값의 부분방전원식별을 위한 적용에는 많은 데이터가 필요하고, 그 값의 최대-최소값의 오차범위가 상당히 넓기 때문에 그 적용에는 한계를 가지고 있다. 그러므로 이러한 단점을 보완하기 위하여 아래와 같이 한 주기당 발생한 펄스에 대한 STFT방법에 의한 특징 추출에 의한 방전원 식별이 새로이 제안되었다. 본 실험에서 사용된 STFT방법은 목적에 맞는 적절한 윈도우함수를 이용하여 시간에 따라 윈도우를 이동해가면서 푸리에 변환을 순차적으로 실행함에 의하여 이루어진다. 따라서 STFT을 이용하면 시간-주파수 측면에서 사건의 발생을 관찰할 수 있다. 이와 같은 STFT의 기본개념으로부터 STFT를 다음과 같이 정의할 수 있다.

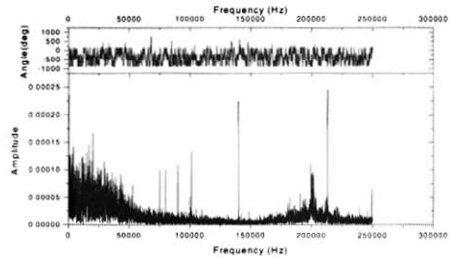
$$S(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)\exp(-j2\pi \cdot t)dt \quad (1)$$

이때,  $w(t)$ 는 Hanning 이나 Hamming과 같은 윈도우 함수(time window function)를 나타내며,  $\tau$ 는 윈도우함수의 중심을 나타낸다. 물론 실제

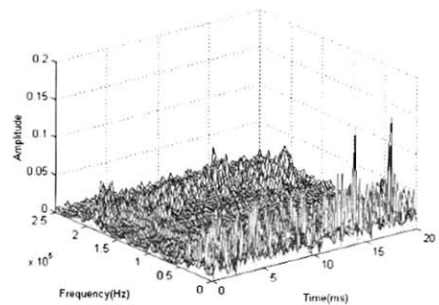
해석의 경우에는 이산화된 데이터를 이용하게 되며 윈도우의 길이가 제한되어있기 때문에 유한한 범위내의 데이터만 푸리에 해석하고 그 스펙트럼의 시간위치가 윈도우함수의 중심이 된다. 따라서 STFT을 이용하면 시간-주파수 축에 대한 스펙트럼을 표현할 수 있으며 이로부터 특정 사건이 발생하는 시간 및 주파수 위치를 파악 할 수 있다.



(a) Pulse signal during 20ms



(b) Frequency analysis



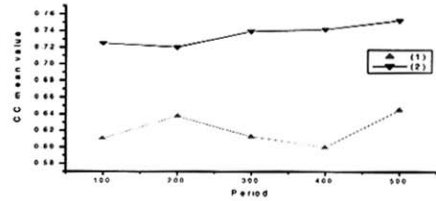
(c) STFT result

그림 6. UHF antenna를 이용하여 20ms동안 측정된 펄스파형 및 주파수 분석(FFT,STFT) 예.

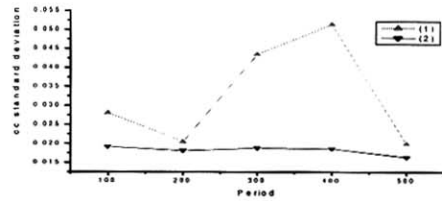
Fig. 6. Example of pulse wave and frequency analysis during 20ms.

그림 6(a)는 약 한주기 동안 측정된 UHF antenna 신호의 일 예이다. 방전이 발생되면 그림에서 보는 바와 같이 하나의 펄스형태로 되는 것을 알 수 있다. 이때 UHF antenna에는 펄스 이외에 노이즈가 함께 측정되며, 보다 정확한 펄스관찰을 위해서는 이러한 노이즈의 제거가 중요하다. 그림 6(b)는 이러한 시간영역에서의 신호에 대하여 주파수분석(Fast Fourier Transform)을 한 결과를 보여주며, antenna 펄스신호의 주파수 성분을 구분하는 것이 어렵다는 것을 보여준다. 그림 6(c)는 한주기 동안의 신호에 대하여 STFT한 3D 결과이며 이때 사용된 window는 Hanning함수를 사용하였으나, 그림 6(b)의 주파수분석결과와는 달리 펄스가 발생한 시간영역부분에서 주파수 성분이 전대역에 걸쳐 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 즉 STFT를 이용하면 펄스가 발생한 시간영역에서의 어떠한 주파수 변화를 정량적으로 나타낼 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 값은 각 window구간의 전과 후의 비교를 한다면 보다 더 분명한 결과를 얻을 수 있을 것이므로, 본 논문에서는 이러한 비교를 위하여 window구간의 전과 후 부분에 대한 상관계수(Cross Correlation)를 구하여, 통계적 데이터(평균, 표준편차, 왜도, 첨예도)를 도출하였으며, 이때 왜도(skewness)는 분포의 대칭성을 나타내는 양으로 값이 0인 경우 좌우 대칭이 되며, 대칭이 아닌 경우 (+)와 (-)의 값을 가지게 된다. 그리고 첨예도(kurtosis)는 분포의 집중도를 나타내는 양으로서 값이 클수록 분포의 첨예도가 커지게 된다. 그리고 각각에 대하여 구해진 결과는 그림 7과 같다.

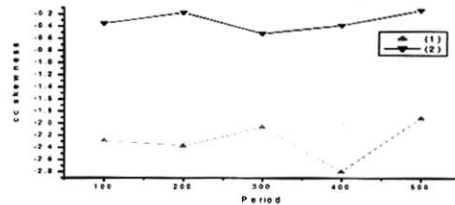
그림 7(a), (b), (c), (d)는 각각 계산된 상관계수들에 대한 100주기별 평균치, 표준편차, 왜도, 첨예도 등의 통계적 파라미터를 침-침(1), 침-평판(2)의 두 방전원에 대하여 나타내고 있다. 그림 7(a)에서 (1)의 경우에는 증가와 감소를 반복하고, (2)의 경우에는 완만하게 계속 증가하는 경향을 보여준다. 그림 7(b)에서 (1)의 경우는 표준편차 값이 각 주기별로 크게 변화하는 모습을 보여주지만, (2)는 약0.018의 표준편차를 거의 일정하게 유지하고 있다. 그림 7(c)에서는 두 개의 경우가 약간 비슷한 성향을 보여주며, 그림 7(d)에서는 (1)의 경우가 (2)의 경우보다 상당히 첨예도가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 두 개의 방전원에 대한 식별능력이 상당히 높다는 것을 알 수 있다.



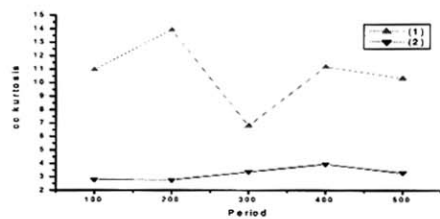
(a) Average cross correlation according to period



(b) Cross correlation standard deviation according to period



(c) Cross correlation skewness according to period



(d) Cross correlation kurtosis according to period.

그림 7. STFT를 이용한 상관계수분포의 각 방전원별 통계적 파라미터 비교.

Fig. 7. Comparison of statistical parameters for each PD source using STFT.

### 3. 결론

본 논문에서는 두 개의 서로 다른 전극 구조에

서 발생된 부분방전에 의하여 공기 중으로 방사되는 전자기파를 UHF안테나(30k-2GHz)를 이용하여 검출하였고, 각 위상별 펄스열에 대하여 PRPD에 의한  $\phi-q-n$  분포를 검토한 후,  $H_n(q)$ ,  $H_{qn}(\phi)$ ,  $H_n(\phi)$ ,  $H_q(\phi)$  등의 2차분포에서 통계적 특성과 라메타를 계산하여 두 방전원에 대하여 비교하였다.

STFT는 한 주기 동안의 시간영역을 각 window구간에 대하여 주파수 영역으로 분리할 수 있게 해주므로, 각 시간에 대한 정량적인 통계처리가 가능하다는 것을 보여준다. 이러한 통계처리로서 설정된 시간 전과 후를 비교하여 계산된 상관 계수 값들은 통계적 파라미터인 CC의 평균, 표준편차, 왜도, 첨예도이고, 이렇게 각 방전원별로 계산된 값들이 각 방전원별로 차를 보이므로 각각에 대한 구별이 가능하였다. 결과적으로 STFT를 이용한 통계적 처리방법의 이용은 방전원식별법으로서 적용가능하며, 그 식별능력이 높다는 것을 확인하였다. 그러므로 기존의 통계적 처리기법과 병행한다면 보다 더 정확한 방전원 식별이 가능할 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

[1] F. H. Kreuger, E. Gulski, and A. Krivda. "Classification of partial discharges", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 6, December 1993.

[2] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 27, p. 82, 1992.

[3] Turner, G. R. Hofsajer, and I. W. "Rogowski coils for short duration ( $>10$  / spl mu/S) pulsed current ( $<10$  kA) measurements", Africon, 1999 IEEE, Vol. 2, p. 759. 1999.

[4] L. E. Lundgaard, M. Runde, and B. Skyberg, "Acoustic diagnosis of Gas insulated substation; a theoretical and experimental basis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5. No. 4, 1990.

[5] Brian Hampton "UHF Diagnostics For Gas Insulated Substations", High Voltage Engineering Symposium, IEE, No. 467, p.

22, 1999.

[6] Van Brunt, R. J, von Glahn, P. Las, and T. "Nonstationary behavior of partial discharge during insulation aging," IEE Proceedings of Science Measurement Technology, Vol. 142, p. 37, 1995.

[7] Yu Ming, and Birlasekaran, S., "Characterization of partial discharge signals using wavelet and statistical techniques", Electrical Insulation, 2002. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on, p. 9, 2002.

[8] 권동진, 박재준, "변압기 부분방전 상시 감시기법에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권 12호, p. 1032, 2001.

[9] 임중관, 박용필, 이준용 "와이블 분포식을 이용한 Epoxy 복합체의 절연 신뢰도 해석", 전기전자재료학회논문지, 14권, 8호, p. 647, 2001.

[10] 박우현, 이기식, "에폭시/고무 거시계면에서 장시간 절연파괴전압에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권 11호, p. 1003, 2002.