

음향신호의 유중 전파특성 분석

윤민영, 박경수, 왕국명, 김선재, 길경석^a

한국해양대학교 전기전자공학과

Analysis of Propagation Characteristics of Acoustic Signal in Insulation Oil

Min-Young Yun, Kyoung-Soo Park, Guoming Wang, Sun-Jae Kim, and Gyung-Suk Kil^a

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received January 19, 2016; Revised January 20, 2016; Accepted January 23, 2016)

Abstract: This paper dealt with the propagation characteristics of acoustic signal in insulation oil for the purpose of improving the reliability of AE (acoustic emission) method used for condition monitoring of oil-immersed transformers. A discharge source was placed in insulation oil and AE sensors (f_c : 140 kHz) were attached on the oil tank to study the changes of velocity and propagation path with the depth and distance. The average velocity was 1,436 m/s and the velocity decreased with the increase of depth from the oil surface to 430 mm. The propagation paths were classified into three sections by the shortest reflection path of the detected signal. The minimum distinguishable distance in each section was 70 mm. It was also verified that PD (partial discharge) with a magnitude over than 500 pC can be detected by the AE sensors.

Keywords: Acoustic, Propagation, Velocity, Partial discharge, Oil

1. 서론

산업 발전에 따라 전력수요가 증가되고 그에 따른 전력설비의 신뢰성이 요구되어 절연진단기술에 대한 중요성이 부각되고 있다. 현재 절연진단분야는 우리나라를 포함한 각 선진국을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다. 기기의 절연열화 및 이상 유무를 상시 감시하여 발생 가능한 사고를 조기에 발견하고 유지 보수함으로써, 신뢰성 및 경제성을 확보할 수 있다 [1,2].

전력설비 중 유압변압기는 장시간 사용하면 절연유 및 프레스 보드의 절연 내력이 열화되어 고장이 발생한다. 이러한 절연체 내·외부에 기포와 crack 등의 현

상으로 전계가 집중되어 부분방전 (PD)이 발생되며, 안정적인 전력공급을 위해 상시진단이 필요하다.

오프라인 진단법은 대표적으로 IEC 60270에 의한 전기적 측정으로 정밀한 진단이 가능하나 전원을 차단 시켜야 된다는 단점이 있다. 반면, 온라인 진단법은 실시간 모니터링이 가능하여 유지 보수에 효율적이다 [3,4]. 온라인 진단법에는 음향 검출법, 유중가스 검출법 및 광학적 검출법이 있으며, 그 중 음향 검출법은 센서의 설치가 간편하고 전기적으로 절연되어 있어 주변 전자계의 노이즈에 강한 장점이 있다.

또한 다수의 센서를 설치하여 음향신호의 도달 시간차를 측정하면 부분방전의 위치를 추정할 수 있다. 그러나 기존 연구는 음파의 유중 전파특성과 관계없이 입사 신호만으로 부분방전의 발생 유무와 위치를 분석하였다 [5-7]. 음향신호의 정확한 검출을 위해서는 방전에 의해 발생하는 음향신호의 전파특성을 분석할 필요가 있다.

a. Corresponding author; kilgs@kmou.ac.kr

본 논문에서는 AE 센서를 사용하여 유종의 깊이 및 거리에 따라 평균속도와 전파경로를 분석함으로써, 음향 신호의 전파특성을 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 음향신호 검출

유종에서 발생하는 부분방전에 의한 음향 검출 및 주파수를 분석하기 위하여 AE 센서를 사용하였다. 공진 주파수 140 kHz에서 15 dB 이상인 것을 그림 1에 나타내었다.

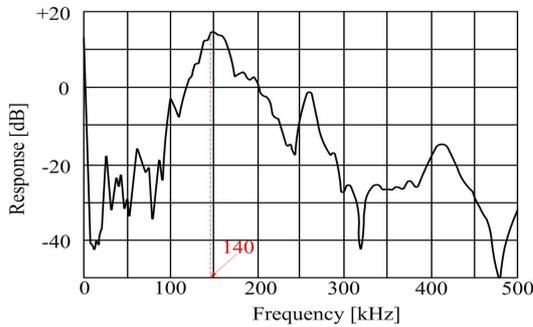


Fig. 1. Frequency response of AE sensor.

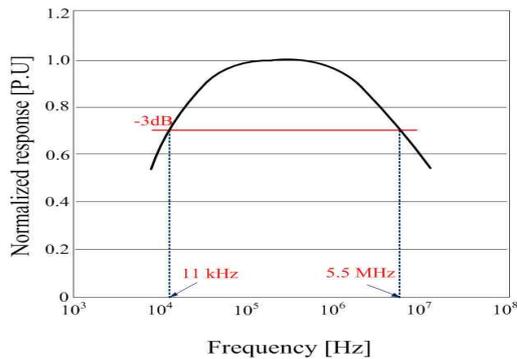


Fig. 2. Frequency response of the prototype.

AE 센서는 마그네트 홀더와 세트로 구성되어 변압기 외함에 탈부착이 용이하지만 전원선과 신호선을 공통으로 사용하므로 전원과 음향신호를 분리하기 위한 역결합회로(decoupler)가 필요하다 [8]. 또한 AE 센서의 음향신호는 매우 미소하므로 측정감도를 개선하기

위한 증폭기가 요구된다. 10 kHz 이상의 음향신호는 200 dB 이상 감쇄시키는 역결합회로와 이득이 40 dB인 음향증폭기를 사용하였다 [9].

음향신호 검출기의 주파수 응답은 함수발생기로 1 kHz에서 10 MHz까지 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로써 분석하였다. 그림 2와 같이 -3 dB의 주파수대역은 11 kHz~5.5 MHz로 AE 센서의 주파수대역을 충분히 포함하였다.

2.2 실험계 구성

유종에서 음향신호 전파특성을 분석하기 위하여 유종 탱크 외함(1,000 mm × 740 mm × 740 mm)에 AE 센서를 부착한 후, surge generator를 사용하여 1 kV의 임펄스(1.2/50 μs)를 방전관에 인가하였다. 깊이는 30 mm, 230 mm 및 430 mm, 거리는 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm에서 동일한 크기의 방전을 발생시켜 방전펄스와 음향신호를 측정하였다.

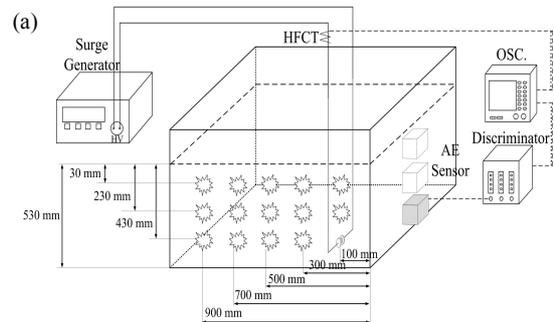


Fig. 3. Experimental setup. (a) Configuration, (b) photograph.

일정한 크기의 임펄스를 인가하였을 때, 유종 전파 특성을 파악할 수 있도록 구성하였고, 실험계를 그림 3에 나타내었다.

3. 측정 및 분석

3.1 유중 전파특성

깊이 30 mm에서 거리에 따른 유중 음향신호의 도달시간과 속도는 거리 100 mm에서 각각 68.8 μ s와 1,453 m/s, 300 mm에서 204.8 μ s와 1,464 m/s, 500 mm에서 343.1 μ s 와 1,457 m/s, 700 mm에서 487.1 μ s와 1,437 m/s 및 900 mm에서 618.1 μ s와 1,456 m/s이며, 평균속도는 약 1,456 m/s 이다.

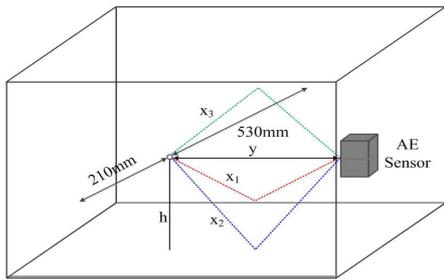


Fig. 4. Propagation paths of acoustic signal in insulation oil.

또한 그림 4와 같이 음향신호가 반사되는 방향과 속도를 분석한 후, 반사되어 검출되는 신호의 구간을 구별할 수 있다. AE 센서로부터 100 mm 거리에서 가장 먼저 검출되는 신호(제 1 구간의 시작지점)는 유중으로부터 직접 전달되는 신호로 도달시간은 68.8 μ s이다.

제 1 구간은 210 mm의 측면으로부터 반사되었을 때의 최단거리는 식 (1)로 산출할 수 있으며, 한 면의 거리를 구할 수 있다.

$$x_n = \sqrt{h^2 + \left(\frac{y}{2}\right)^2} \quad (1)$$

계산을 통해 $x_1 = 215.8$ mm로 총 이동거리 및 도달시간은 각각 431.7 mm, 297.1 μ s로 산출되었고, 음향신호가 검출되기 전 구간을 제외하면 228.3 μ s가 제 1 구간임을 알 수 있다. 따라서 반사되어 들어가기 전에 음향신호는 유중에서 직접 들어가는 신호라는 것을 알 수 있다.

두 번째로 반사되어 전달되는 최단거리는 방전발생원에서 500 mm의 거리로부터 외함의 바닥면을 통해 반사되는 신호로서 이동거리와 도달시간은 각각 1004.9 mm, 691.6 μ s로 산출되었다. 제 1 구간을 포함하는 영역인 297.1 μ s에서 제 1 구간을 제외하면 144.9 μ s가

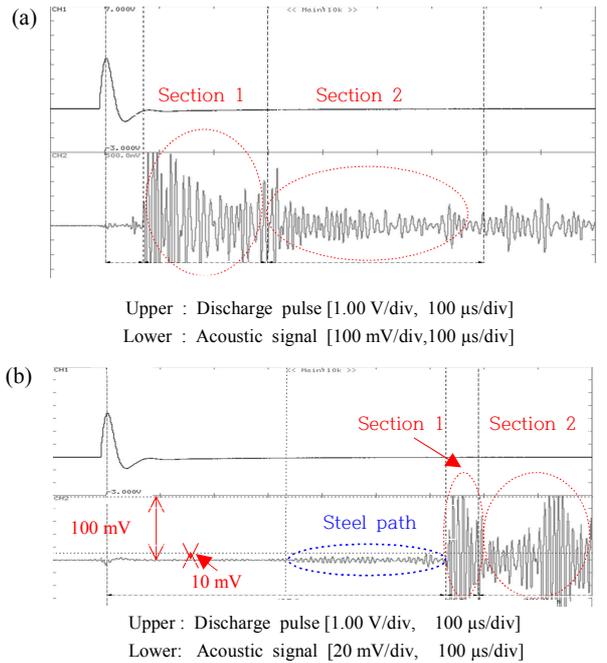


Fig. 5. Typical discharge pulse and acoustic signal by propagation paths (depth=30 mm). (a) 100 mm, (b) 900 mm.

Table 1. Distance and TOA by propagation paths (depth=30 mm).

Division	Section 1		Section 2		Section 3	
	Distance [mm]	Time [μ s]	Distance [mm]	Time [μ s]	Distance [mm]	Time [μ s]
100	431.7	228.3	1,004.9	394.5	1,064.7	X
300	516.1	220.2	1,044.0	107.7	1,101.1	X
500	652.9	107.4	1,118.0	323.8	1,172.0	X
700	816.3	82.0	1,220.6	73.6	1,270.2	X
900	993.1	73.3	1,345.3	245.2	1,390.5	X

제 2 구간이 된다. 제 3 구간은 방전 발생원으로부터 530 mm 거리에서 전파되었을 때, $x_3 = 532.3$ mm로 AE 센서 까지 이동거리는 1064.6 mm이다. 도달시간을 계산한 결과, 741.2 μ s가 산출되었고, 제 1 구간과 제 2 구간을 제외한 영역은 49.6 μ s로 그림 5와 같이 제 3 구간은 구별이 불가하였다.

AE 센서와 방전원까지의 거리가 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm에서 제 2 구간과 제 3 구간의 거리의 차가 45~60 mm로 거리가 짧아 제 3 구간은 구별할 수 없었다. 표 1~3은 동일한 방법으로 방전원의 깊이 30 mm, 230 mm 및 430 mm에서 AE 센서로부터 거리별로 각각 100 mm, 300 mm, 500 mm, 700 mm 및 900 mm까지의 1~3 구간을 선정하였다.

Table 2. Distance and TOA by propagation paths (depth=230 mm).

Division	Section 1		Section 2		Section 3	
	Distance	Time	Distance	Time	Distance	Time
	[mm]	[μ s]	[mm]	[μ s]	[mm]	[μ s]
100	431.7	230.3	608.2	121.8	1,064.7	318.4
300	516.1	220.2	670.8	107.7	1,101.1	300.0
500	652.9	105.3	781.0	89.8	1,172.0	272.7
700	816.3	82.0	921.9	73.6	1,270.2	226.2
900	993.1	69.7	1,081.6	61.6	1,390.5	215.0

Table 3. Distance and TOA by propagation paths (depth=430 mm).

Division	Section 1		Section 2		Section 3	
	Distance	Time	Distance	Time	Distance	Time
	[mm]	[μ s]	[mm]	[μ s]	[mm]	[μ s]
100	223.6	87.7	431.7	145.7	1,064.7	436.6
300	367.4	X	516.1	108.4	1,101.1	407.3
500	538.3	X	652.9	102.3	1,172.0	361.5
700	728.0	X	816.3	78.3	1,270.2	316.1
900	921.9	X	993.1	64.5	1,390.5	276.8

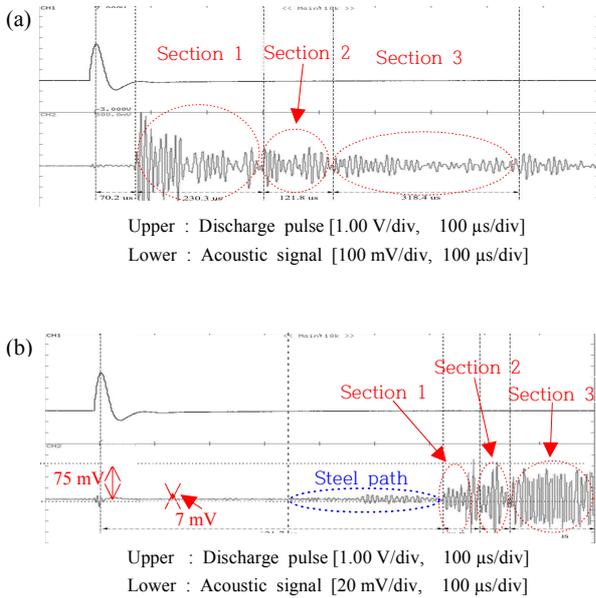


Fig. 6. Typical discharge pulse and acoustic signal by propagation paths (depth=230 mm). (a) 100 mm, (b) 900 mm.

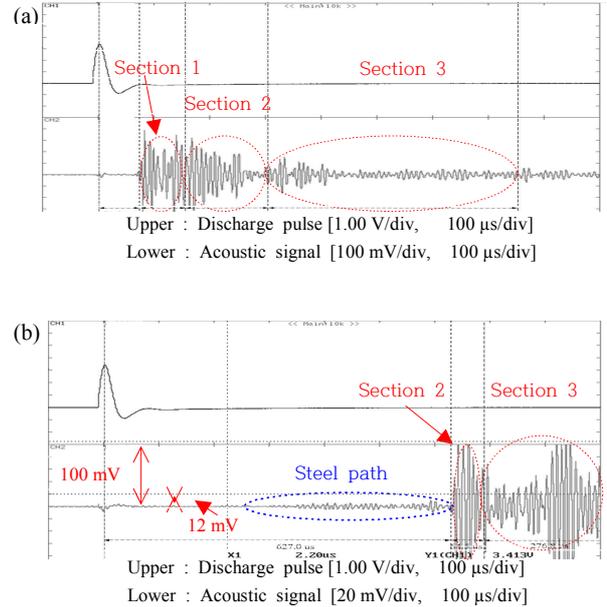


Fig. 7. Typical discharge pulse and acoustic signal by propagation paths (depth=430 mm). (a) 100 mm, (b) 900 mm.

철로 구성된 유증탱크 외함을 통해 전파되는 신호를 분석하였다 [10]. 철의 음향속도는 약 5,000~6,000 m/s이며, 방전원-AE 센서의 거리 900 mm에서 유증-외함까지 전달되는 최단거리는 210 mm로 도달시간은 144.2 μ s이다 [11]. 또한 외함-AE 센서까지의 거리는 1,110 mm로 도달시간은 185 μ s이다. 따라서 제 1구간의 시작지점 전까지 신호는 외함에서 검출되었으며, 도달시간은 329.2 μ s로 그림 5 (b)에 나타내었다. 또한 그림 5 (b)와 같이 외함에서 전달된 신호의 크기는 10 mV, 제 1 구간에서 검출된 신호의 크기는 100 mV로 검출되어 10%의 흡수율을 보였다. 따라서 외함을 통해 검출된 음향신호는 감쇠가 큰 것으로 판단된다.

그림 6 (b)와 그림 7 (b)는 위와 동일한 방법으로 깊이 230 mm와 430 mm에서의 결과이다.

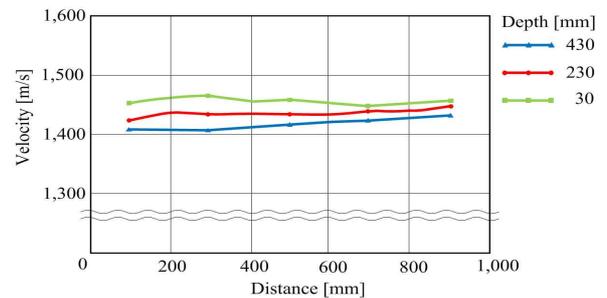


Fig. 8. Variation of propagation depending on depth.

그림 8은 깊이 30 mm, 230 mm 및 430 mm에서 거리에 따른 속도를 나타내었다. 깊이에 따라 각각의 평균속도는 1,456 m/s, 1,436 m/s 및 1,419 m/s로 분석되었다.

따라서 유중에서 깊이에 따른 속도는 2% 차이가 있었고, 평균속도는 1,436 m/s로 분석되었다. 깊이가 증가함에 따라 압력이 증가하여 속도의 감소가 발생한 것으로 판단된다 [12].

3.2 방전 전하량

표준펄스발생기 (CAL 1A)를 사용하여 방전원에서 발생하는 전하량을 산출하였다. 인가전하량에 따른 출력파형을 그림 9에 나타내었다.

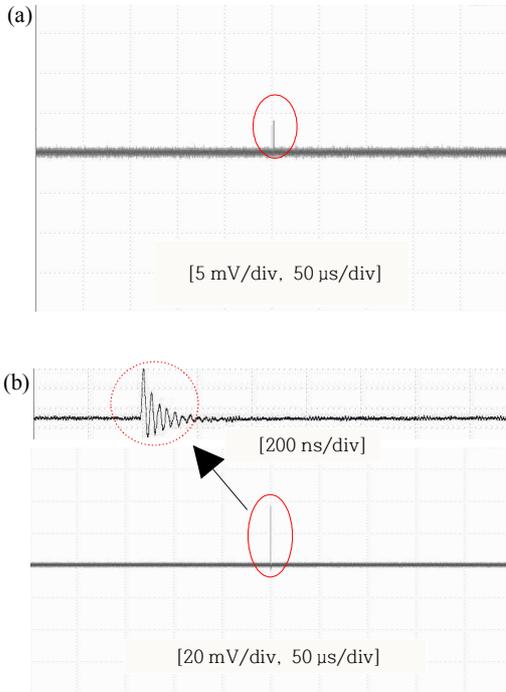


Fig. 9. Typical calibration pulse waveform. (a) 10 pC, (b) 100 pC.

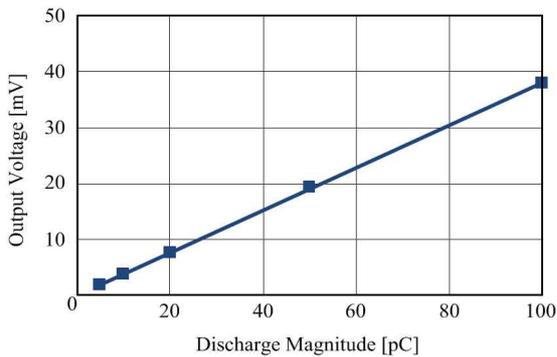


Fig. 10. Relation between injection charge and output voltage.

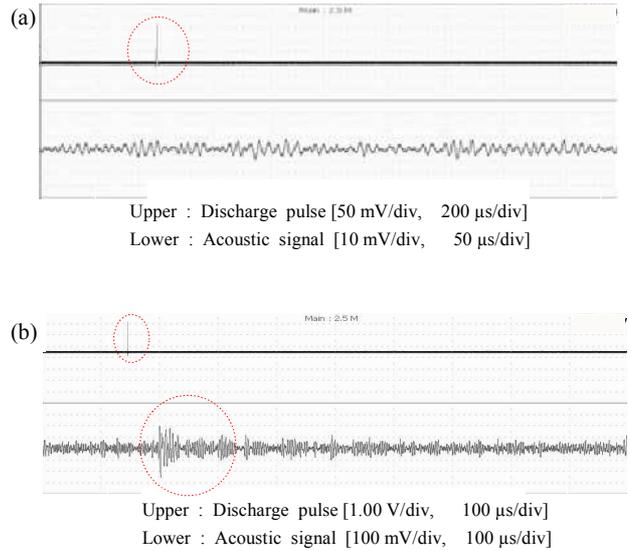


Fig. 11. Typical acoustic signal waveform. (a) 400 pC, (b) 500 pC.

그림 10과 같이 5 pC~100 pC의 전하량을 인가하여 교정을 진행한 결과 전하량과 출력전압은 각각 5 pC, 10 pC, 20 pC, 50 pC 및 100 pC에서 1.91 mV, 3.84 mV, 7.72 mV, 19.23 mV 및 38.0 mV로 분석되었다. 측정감도는 0.38 mV/pC으로 산출하였다.

그림 11과 같이 방전펄스 크기에 따른 최소 검출 가능한 음향신호는 500 pC 이상부터 음향신호 검출이 가능하였다.

4. 결론

본 논문에서는 유입변압기의 상태진단에 사용되는 음향 검출법의 신뢰성 향상을 목적으로 음향신호의 유중 전파특성을 분석하였다. 유중 깊이에 따라 속도는 약 2% 차이를 보였으며, 평균속도는 1,436 m/s이었다. 전파경로별 구간은 유중탱크에서 최단거리로 반사되어 검출되는 신호를 제 1 구간, 제 2 구간 및 제 3 구간으로 설정하였으며, 구간별 최소 판별 가능한 거리는 70 mm 이상이었다. 또한 외함을 통해 검출된 신호는 약 10%의 흡수율을 보였다. 본 시스템의 측정감도는 0.38 mV/pC이었으며, 최소 검출 가능한 전하량은 500 pC 이상이었다.

음향검출에 의한 유중 부분방전의 위치 표정에 있어, 본 논문에서는 기존 방식과는 달리 음향신호의 외함 반사와 투과를 고려하였고, 깊이에 따른 평균 전파속도를 미리 산출하여 적용함으로써 위치 표정 오차를 기존 4%에서 2%로 감소시킬 수 있었다.

REFERENCES

- [1] G. S. Kil, D. W. Park, I. K. Kim, S. Y. Choi, C. Y. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **20**, 907 (2007).
- [2] T. Leibfried and K. Feser, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 34 (1996).
- [3] E. Mohammadi, M. Niroomand, M. Rezaein, Z. AminiPD, *International Telecommunications Energy Conference*, 1 (2009).
- [4] Fuangsoongnern, Plueksawan, Tikakosol, *K. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 108 (2014).
- [5] H. Murayamal, T. Katayamal, K. Yamadal, M. Kozakol, M. Hikital, K. Kashine, I. Nakamura, H. Koide, *Conference Proceedings of ISEIM2011*, 273 (2011).
- [6] S. A. Ashraf, B. G. Stewart, C. Zhou, D. Hepburn, J. M. Jahabar, *High Voltage Engineering and Application(ICHVE)*, 577 (2008).
- [7] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, *Dielectrics and Electrical Insulation IEEE Transactions*, **15**, 1576 (2008).
- [8] H. E. Jo, C. H. Jin, D. W. Park, G. S. Kil and C. H. Ahn, *J. Korean Inst Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 147 (2012).
- [9] D. W. Park, H. E. Jo, S. J. Kim and G. S. Kil, *J. Elect. Eng. Technol.*, **8**, 743 (2013)
- [10] S. M. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, **15**, 1577 (2008).
- [11] S. W. Kim, *M. E. Thesis*, p. 17, 18, Korea Maritime and Ocean University, Busan (2010).
- [12] K. S. Kwon, *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, **61**, 112 (2013).