

# AE센서를 이용한 유증 코로나방전점 위치 및 주파수 영역 검출

(Location and Frequency Domain Detection of Corona Discharge Point in Oil Using AE Sensor)

이 상우\* · 김 성훈\* · 김 인식\*\* · 김 기채\* · 박 원주\* · 이 광식\* · 이 동인\*

(Sang-Woo Lee · Sung-Hun Kim · In-Sik Kim · Ki-Chai Kim · Won-Zoo Park · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee)

(Yeungnam University\* · Kyungil University\*\*)

## Abstract

In this paper, using a wide-band AE sensor with the frequency range from 100[kHz] to 1.5[MHz], the frequency spectra of AE signals generated from the corona discharges of the needle-plane electrode was analyzed to determine the proper ultrasonic sensor. We also examined the relationship between the magnitude of corona discharge and the magnitude of AE signals in peak-to-peak value under the application of 60[Hz] AC high-voltage in oil.

From these results, the main frequency spectra of AE signals emitted from the corona discharges of the needle-plane gap were found to be 130[kHz] by the fast fourier transform. The magnitude of AE signals was proportional to the magnitude of corona discharge and discharge current pulse with increasing the applied voltages. Also the detection of corona discharge point location by AE signals was found to be possible by using two sensors.

## 1. 서 론

전력용 변압기 및 캐패시터의 절연매체로서 절연유가 널리 사용되고 있으며 절연특성, 소호특성 및 냉각특성 등의 우수한 절연성능을 갖고 있다.

절연유의 절연내력은 시간이 경과함에 따라 유증에 잔류되어 있는 섬유, 수분 및 용해가스 등의 불순물에 의해 열화되어 매우 현저하게 저하되는 특성을 갖고 있다.

고전압기기에서 절연과피 사고는 주로 절연물의 열화에 의해 발생되므로 이러한 절연물의 열화상태를 조기에 검출하여 신속히 이상부위를 제거할 필요가 있다. 고전압전력기기의 사고 범위를 최대한 억제시켜 운전신뢰도를 향상시키기 위해 오늘날 여러 가지 예방진단기술이 이용되고 있다.

대용량 유입변압기의 부분방전 검출법으로서 탱크 외벽에 초음파센서를 부착하여 음향신호를 검출하는 초음파 측정법, 중성점 접지선에 부착된 로고우스키코일(Rogowski coil)로부터 방전전류를 검출하는 전류 펄스법 및 유증코로나방전에 의해 발생하는 가스성분의 분석에 의한 유증가스 분석법 등이 이용되고 있다. 최근 전력용 유입변압기에서 발생하는 부분방전의 측정을 초음파 또는 AE(Acoustic Emission)센서를 사용함으로써 열화상태를 상시감시(on-line monitoring)하기 위한 연구가 많이 발표되고 있다.[1][2][3]

유입변압기에 대한 절연열화 진단시 초음파 측정법을 사용하려고 하는 이유는 측정장치가 비교적 간단하여 현장 적용에 용이하고, 전기적인 측정법과 상호간섭을 일으키지 않는 장점이 있기 때문이다.[4][5]

그러나 실제 고전압기기의 내부 부분방전으로부터 발생하는 음향신호는 매우 미약하므로 효과적인 측정이 이루어지기 위해서는 측정회로의 수신감도를 높이거나, 방전형태에 따른 초음파신호의 주파수 범위를 조사하여 적절한 주파수 대역의 센서를 선택할 필요가 있다. 유증에서 코로나의 형태에 따른 음향신호를 분석하므로써 최적의 측정주파수 대역을 선정할

수 있고, 또한 음향신호의 주파수 스펙트럼의 분석을 통해 코로나방전의 형태를 역으로 추정할 수 있을 것으로 기대되고 있으나, 광대역 AE센서에 의한 이러한 음향신호의 주파수 분석에 관한 연구는 발표되고 있지 않아 연구의 필요성을 느낀다. 따라서 본 연구에서는 주파수 범위가 0.1~1.5[MHz]인 광대역 AE센서를 사용하여 침대 평판전극에서 발생하는 AE신호를 측정하여 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

또한, 유증 코로나의 초음파신호 특성을 조사하기 위해 침대 평판전극을 사용하여 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때, 방전전하량과 AE신호의 상호관계 및 2개의 초음파센서를 이용하여 유증 초음파신호의 지연시간을 측정하여 2차원적인 방전점의 위치검출을 기본적으로 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 전극은 스테인레스강(stainless steel)으로 제작된 침대 평판전극으로 구성하였다. 사용된 침전극의 선단각은 약30도이며, 선단 곡률반경은 약20[μm]이다.

평판전극의 지름은 약40[mm]이고, 전극의 두께는 약 10[mm]이며 전극 가장자리는 둥근 형상으로 제작하였다. 그림1은 코로나방전에 의한 초음파 측정시스템의 블록선도를 나타낸 것이다. 이때 초음파 수신회로는 전자(電磁)적인 차폐를 위해 알루미늄으로 만든 케이스 내부에 설치하였다. 그리고 실험에 사용된 절연유는 유입변압기에 사용되고 있는 천연 광유인 1종 2호의 절연유를 사용하였다. 음향신호를 검출하기 위한 AE센서는 진공그리스(vacuum grease)를 사용하여 유조의 외벽에 부착하였다. 사용된 유조는 두께 4[mm]인 아크릴 판(acrylic plate)으로 제작하였으며, 유조의 크기는 35\*20\*20[cm]이다. 음향신호를 검출하기 위해 광대역 AE센서(wide-band AE sensor)를 사용하였으며, 이 센서의 주파수 범위는 약100[kHz]~1.5[MHz]이며, 주파수 특성은 1.5[MHz]까지는 거의 평탄한 이득곡선을 나타내고 있다.

AE신호의 수신회로는 전치증폭기, 고역통과필터 및 주 증폭기로서 구성하였다. 여기서 증폭기회로의 이득은 40[dB]을 갖도록 설계하였다. 기계적 진동 등에 의한 외부 노이즈를 제거하기 위해 차단주파수 100[kHz]인 고역통과필터(high-pass filter)를 사용하였다. 본 증폭장치의 주파수응답은 약100~450 [kHz] 영역에서 측정감도가 비교적 양호한 증폭장치를 설계하여 설치하였다. 코로나방전에 의한 AE센서의 신호를 관찰하기 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하였다.

고전압의 발생 및 방전전하량[pC]으로 나타낸 코로나방전의 크기는 코로나 측정시스템(corona detecting apparatus system set, 일본 Pultec Electronics Co.)을 사용하여 측정하였다. 이 장치는 슬라이더에 의해 전압값을 조정할 수 있으며, 교류입력전압은 60[Hz], 220[V]이고, 시험용 변압기의 2차 최대전압은 30[kV]이다. 코로나 발생전압에서 오실로스코프를 사용하여 전압파형을 관측하기 위해 분압비 2000 : 1인 고전압 프로브(high voltage probe, type : EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하였다. 코로나 개시전압까지는 약1.0[kV/sec]의 속도로 인가전압을 상승시켰다. 그리고 코로나의 발생전압에서 방전전하량 및 음향신호를 관찰하고, 다시 단계적으로 천천히 전압을 증가시켰을 때 이들 값을 조사하였다. 코로나방전의 개시 및 진전상태를 확인하기 위해 침전극 선단에서 뒷면으로 약 20[cm] 떨어진 위치에 배울 50인 디지털 카메라(CCD Camera)를 설치하였다

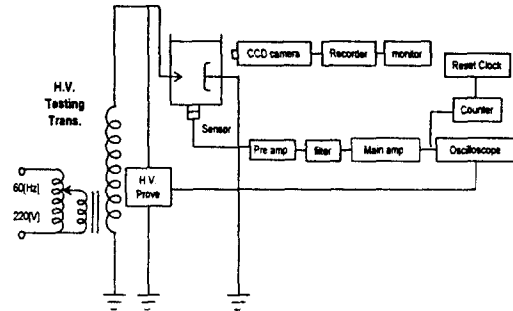


그림 1. 실험장치의 블록선도  
Fig. 1. Block diagram of experimental apparatus.

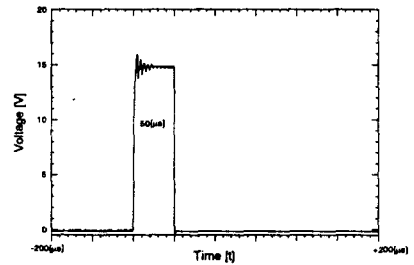
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 초음파신호의 감쇄 특성

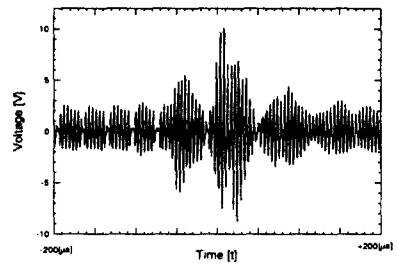
초음파의 기본특성은 전파매질에 따라 분류할 수 있다. 일반적으로 특성이 상이한 매질이 공존하는 경우에는 초음파의 반사 및 굴절 특성이 요구되고 있다.

그림2는 유중 초음파 송신 및 수신소자를 10.0[cm]으로 거리를 이격 하였을 때, 초음파신호의 감쇄 특성과 이격거리 10.0[cm]에서 철판의 크기 15x15[cm], 두께 2.0[mm]을 초음파 수신 소자 부분에 투입한 경우 초음파신호의 감쇄 특성을 각각 나타내었다. 여기서 초음파 발전기의 송신 최대출력전압(Vp-p) 15[V]로서 일정하게 유지하였으며, 200[kHz]인 초음파 센서를 사용하여 검출하였다. 그림2(a)와 같이 초음파 발전기의 송신출력전압(Vp-p)은 15[V]이며, 주기 16[ms], 폭 50[μs]인

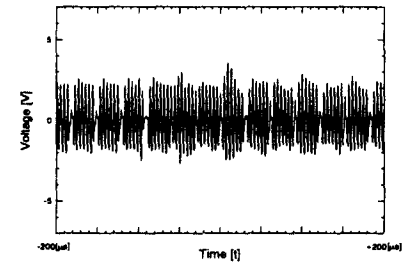
구형파펄스를 일정하게 유지하여 발신하였다. 그리고 송신 및 수신 초음파센서의 이격거리를 10.0[cm]으로 변화시켰을 때, 그림2(b)는 유중 절연유에서의 초음파수신회로 파형을 그림 2(c)는 철판두께 2.0[mm]을 초음파 송신 소자부분에 투입한 경우의 초음파 수신회로의 파형을 각각 나타내었다. 여기서 그림2(b)의 경우 초음파 수신출력전압(Vp-p)은 19[V]이었으나, 그림2(c)에서는 2.0[mm]인 철판을 사용한 경우 초음파 수신출력전압(Vp-p)은 7[V]로 감쇄되는 것으로 나타났다. 따라서 유중 초음파 송신 및 수신소자를 10.0[cm]으로 거리를 이격 하였을 때 철판두께 2.0[mm]를 사용한 경우 약8.7[dB]로 감소되는 것으로 나타났다. 그리고 실제 운전되고 있는 유입변압기의 외벽에 철판이나, 내부의 철심으로 인하여 발생하는 초음파 감쇄 현상이 존재하므로 이러한 감쇄 특성을 철판의 크기 및 두께의 변화에 따라 조사할 필요가 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 초음파신호의 감쇄 특성  
Fig. 2. Attenuation characteristics of ultrasonic signals in oil

#### 3.2 초음파신호의 시간지연 특성

유중 코로나방전점으로부터 방전에 의한 열로 인하여 국부적으로 절연유가 급격히 기화하여 주위의 절연유를 압축하므로 탄성파인 음향신호가 발생하는 것으로 일반적으로 알려져

고 있으며, 이들 음향신호를 효과적으로 검출하기 위해 AE센서를 사용하여 지연시간 특성을 조사하였다.

초음파신호는 매질에 따라 일정한 전파속도를 갖고 있기 때문에 방전이 발생한 순시에 그 신호를 수신하는 것은 불가능하고, 방전점으로부터 센서 설치장소까지 매질을 통해 전달되기 위해서는 일정한 지연시간이 발생되고 있다. 대부분의 물질에 대한 초음파의 전파속도는 잘 알려져 있으며, 상온 및 대기압에서 공기의 전파속도는 약343.5[m/s], 액체인 절연유의 전파속도는 약1,480[m/s], 고체인 에폭시수지는 약2,700[m/s]인 것으로 보고되고 있다.[6]

그림3은 유증 코로나방전에 의한 AE신호의 지연시간 특성을 오실로스코프에 의해 측정된 것이다. 여기에서 상부파형은 코로나 전류펄스로 주파수 대역이 170~250[kHz]인 코로나전류펄스 측정시스템을 사용하여 검출한 것이고, 하부파형은 AE센서를 사용하여 유증에서 15[cm]인 거리로 이격하였을 때 측정된 AE신호 파형이다.

AE신호는 고주파밴드의 형태로서 오실로스코프 화면상에 나타나고 있으며, 코로나 전류펄스보다 일정시간 t에 의해 지연시간이 되어 발생되고 있다. 여기에서 지연시간 t는 약14[μs]로 측정되었으며, 발생 점까지의 계산거리는 16.8[cm]이었다. 따라서 매질의 전파속도를 알고, AE신호의 지연시간을 측정함으로써 음원까지의 거리는 용이하게 계산될 수 있었다.

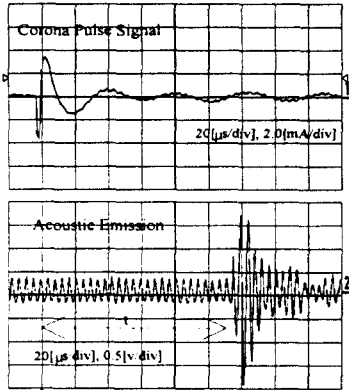


그림 3. AE신호의 지연시간 특성  
Fig. 3. Time delay characteristics of AE signals.

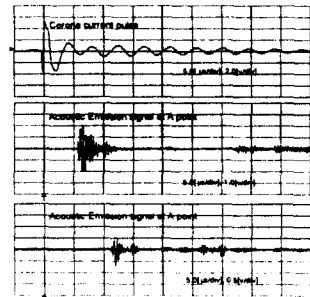
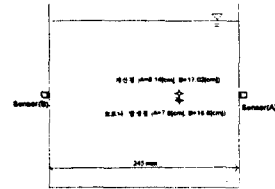
### 3.3 코로나 발생점의 위치 검출

그림4(a) 및 그림4(b)는 유증 코로나방전의 발생에 의한 기본적으로 2차원에서의 위치를 검출하고자 2개의 초음파센서를 그림4에서와 같이 일직선 및 대각선상에서 각각 초음파의 지연시간을 오실로스코프에 의해 측정된 것이다.

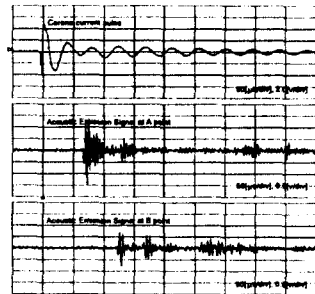
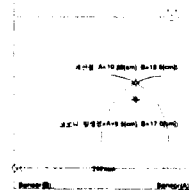
여기에서 그림4(a) 및 그림4(b)의 상부파형은 코로나방전 전류펄스로 주파수 대역이 170~250[kHz]인 측정시스템을 사용하여 검출한 것이고, 하부파형 센서A 및 센서B는 AE센서를 사용하여 측정된 초음파신호 지연시간 파형이다.

그림에서와 같이 센서A 및 센서B는 코로나방전 전류펄스보다 지연시간(t)에 의해 초음파신호가 나타나고 있다. 그리고 지연시간(t)에 의해 그림4(a) 및 그림4(b)에서 각각의 계산거

리에 따른 제적으로 임의의 코로나방전점의 위치를 측정할 수 있었다. 그림4(a)에서는 센서의 일직선상에 대한 임의의 코로나방전점 센서 A=7.9[cm], 센서 B=16.6[cm]에 대하여 코로나방전을 발생시켜 AE센서의 지연시간을 측정된 계산값은 센서 A=8.14[cm], 센서 B=17.02[cm]이었으며, 그림4(b)에서는 센서의 대각선상에 대한 임의의 코로나방전점 센서 A=9.5[cm], 센서 B=17.0[cm]에 대하여 코로나를 발생시켜 AE센서의 지연시간을 측정된 계산값은 센서 A=10.3[cm], 센서 B=18.5[cm]이었다. 따라서 매질의 전파속도를 알고, 초음파신호의 지연시간을 측정하므로써 코로나방전점의 위치를 용이하게 측정할 수 있다.



(a) 센서 A, B가 일직선상



(b) 센서 A, B가 대각선상

그림 4. 코로나방전점의 위치 검출  
Fig. 4. Location detection of corona discharge point by AE signals

### 3.4 유중 코로나방전에 의한 AE신호 주파수 스펙트럼

그림5는 침대 평판전극에서 갭길이 4[mm]인 경우 상용주파수 교류전압을 인가하여 유중 코로나방전의 진전에 따른 AE신호를 검출하였으며, 그리고 상용주파수 인가전압의 1주기에 해당하는 16[ms]동안에 발생한 AE신호 파형을 나타낸 것이다. 코로나 개시전압 부근 8[kV]에서는 초음파신호가 검출되지 아니 하였으며, 인가전압을 상승시켜 11[kV]이 되었을 때 공기중 코로나방전에 의한 초음파신호와 같이 유중에서도 정극성 최대치 부근에서 AE신호가 검출 되었다. 그리고 인가전압을 더욱 상승시켜 13[kV]일 경우에는 인가전압 상승에 따른 AE신호의 크기는 증가되었으며, 정극성 부근에서 발생 영역이 활발하게 증가되어 나타났다. 또한 인가전압을 더욱더 상승시켜 18[kV]인 경우 절연과피의 전단계 영역에서 AE신호는 정극성 전영역에서 발생되었으며, 부극성 최대치 영역에서는 검출되지 아니 하고 그 크기는 증폭장치가 허용하는 최대치로 증가되었다. 이는 절연과피 부근에서 기포의 수축 및 확산이 활발히 진행되므로 인하여 탄성파의 많은 에너지 밀도가 초음파센서에 전파되는 것으로 생각된다.

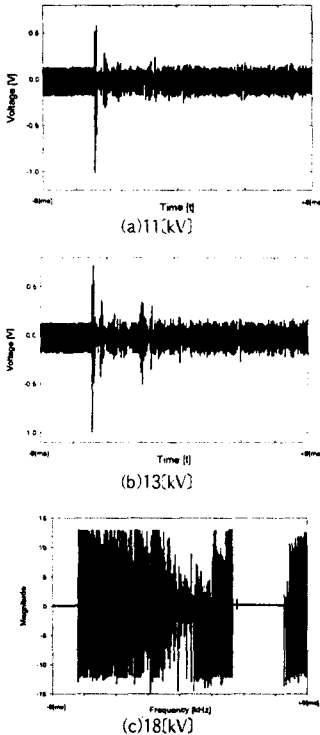


그림 5. 인가전압에 대한 AE신호  
Fig. 5. AE signals of applied voltages

그림6은 그림5의 인가전압에 따른 AE신호를 FFT(fast fourier transform)로 분석한 것이다.

그림6(a)과 같이 인가전압이 11[kV]인 경우 AE신호의 주파

수 대역은 90~230[kHz]로 나타났다. 그리고 그림6(b)과 같이 인가전압이 상승하여 13[kV]인 경우의 주파수 대역은 그림 6(a)과 같이 90~230[kHz]이었으나 그림6(a)에서보다 130[kHz] 영역 이외에는 주파수 대역은 감소되는 것으로 나타났으며, 주된 주파수 대역은 130[kHz]인 것으로 나타났다.

또한 그림6(c)에서는 인가전압이 더욱 상승하여 절연과피 전단계 영역에서는 주된 주파수 대역이 130[kHz]인 것으로 나타났다.

따라서 초음파센서를 이용하여 전력기기의 절연진단시 적절한 주파수 대역을 선정하여 검출함으로써 측정 감도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 외부 잡음을 최대한 억제할 수 있다.

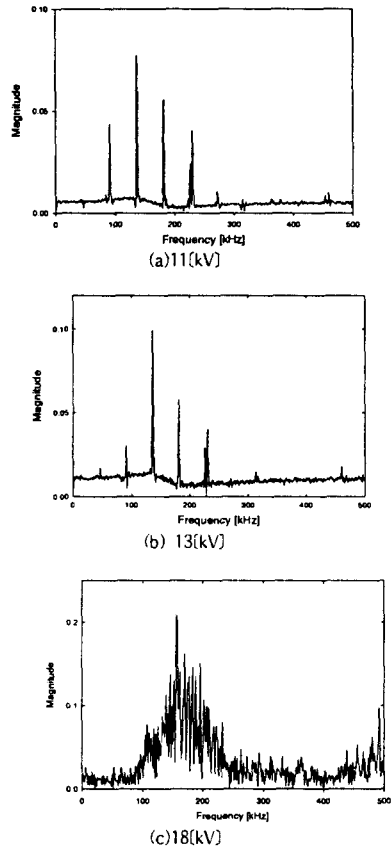


그림 6. AE신호에 대한 주파수 스펙트럼  
Fig. 6. Frequency spectrum of AE signals

### 3.5 방전전하량 및 AE신호 크기의 관계

그림7은 갭길이 4[mm]인 침대 평판전극을 사용하여 인가전압을 변화시킨 경우, 최대방전전하량(q)과 AE신호의 최대출력전압(Vp-p)의 특성을 나타낸 것이다.

여기서 코로나 개시전압인 약 9.0[kV]까지는 방전전하량(q)은 매우 낮은 값에서 유지되고 있으나, 코로나 개시전압에서 전압의 상승과 더불어 방전전하량도 크게 증가된 것으로 나타났다. 그후 전압이 상승함에 따라 코로나방전은 진전되어 코

로나방전전하량은 전압에 비례하여 증가하였으며, 인가전압이 약18[kV]가 되어 브러시 또는 스트리머 코로나가 일어나면 인가전압의 상승과 더불어 코로나방전전하량은 매우 크게 증가된 것으로 나타났다. 인가전압이 약11[kV]이하의 전압에서는 AE신호가 거의 나타나지 아니 하였으며, AE신호 주위의 노이즈 레벨을 유지하였으나 그후 인가전압이 증가함에 따라 AE신호의 최대출력전압(Vp-p)은 인가전압에 거의 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 또한 인가전압이 약18[kV]가 되어 브러시 및 스트리머 코로나가 일어나면 파괴전압에 도달할 때까지 AE신호의 최대출력전압(Vp-p)은 급격히 증가된 것으로 나타났다.

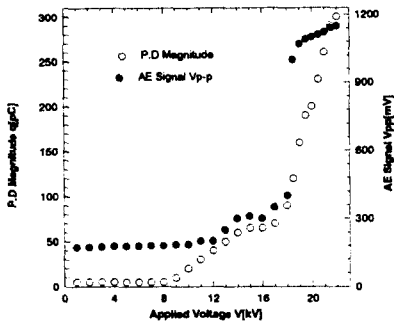


그림 7. 인가전압에 따른 코로나방전전하량(q) 및 초음파신호(Vp-p)의 특성  
Fig. 7. Corona discharge magnitude(q) and ultrasonic signal(Vp-p) with applied voltage

그림8은 침대 평판전극의 4[mm]인 경우 인가전압의 변화에 따른 최대방전전하량(q)과 AE신호의 최대출력전압(Vp-p)의 특성을 나타낸 것이다. 여기서 AE신호의 Vp-p는 peak to peak 전압을 나타낸 것이다.

그림8은 최대방전전하량(q)과 AE신호의 최대출력전압(Vp-p)의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 AE신호 최대출력전압(Vp-p)는 최대방전전하량(q)에 거의 비례하여 증가된 것으로 나타났다. 이것은 방전전하량과 방전 에너지는 밀접한 관계가 있으므로 AE신호의 강도는 방전에너지의 크기에 비례하고 있음을 알 수 있다.

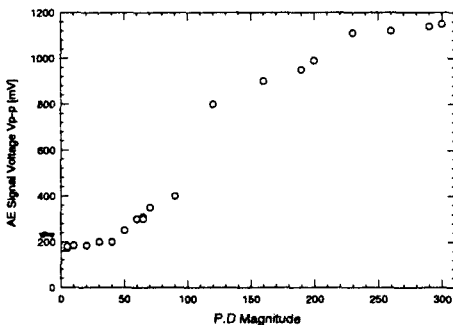


그림 8. 방전전하량(q)과 AE신호(Vp-p) 관계  
Fig. 8. Relationship between corona discharge magnitude(q) and AE signal(Vp-p)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 주파수 대역이 100[kHz]~1.5[MHz]인 광대역 AE센서를 사용하여 침대 평판전극에 대한 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때, 최대방전전하량(q) 및 AE신호 최대출력전압(Vp-p)의 특성 등을 조사하였다. 또한 유증 코로나방전에 대한 AE신호를 측정하여 주파수 스펙트럼을 분석하였으며, 코로나방전점에 대한 초음파신호의 지연시간을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 유증에 설치된 침대 평판에서 코로나방전에 의해 발생되는 AE신호에 대한 주파수 스펙트럼을 분석한 결과, 주된 주파수 대역은 약130[kHz]인 것으로 나타났다.
- 2) 코로나 개시전압 이후 전압이 상승함에 따라 AE신호는 브러시 또는 스트리머 코로나에서 관측되었으며, AE신호의 최대치(Vp-p)는 최대방전전하량(q)에 거의 비례하여 증가된 것으로 나타났다.
- 3) 코로나방전점에 대한 위치 검출은 초음파신호의 지연시간을 측정하고 매질의 전파속도를 곱하므로써 위치 검출을 할 수 있었다. 그리고 유증 총모파 송신 및 수신소자를 10.0[cm]으로 거리를 이격하여 침판두께 2.0[mm]를 투입하여 사용한 경우 초음파신호의 감쇄는 약8.7[dB]로 나타났다.

이상의 결과로부터 본 실험조건의 코로나 발생 패턴에서는 초음파센서의 공진주파수는 약100-150[kHz] 범위에서 선정되는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) E. Howells and E. T. Norton, "Detection of Partial Discharge in Transformers Using Acoustic Emission Techniques," IEEE Trans. PAS, Vol. 97, No. 5, pp. 1538-1549, 1978
- 2) 松浦 虎士, 岡部 成光, 金子 英男, "電力機器の絶縁寿命推定法の現状" 電學論A, 114卷 12号, pp.845-852 平成6年
- 3) R. T. Harrold, "Acoustic Wave-guides for Sensing and Locating Electrical Discharges in High Voltage Power Transformers and Other Apparatus", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.2, pp.449-457, 1979
- 4) Y. Kagawa, S. Yamazaki, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials" IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. EI-17, No. 4, pp. 314-8, 1982
- 5) R. Dukes and E. A. Culpin, "Acoustic Emission : Its Techniques and Applications," IEE Proc., Vol. 131, No. 4, pp.241-251, 1984.
- 6) L. E. Lundgaard, "Acoustic Partial Discharge Detection Fundamental Considerations," IEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp.25-31, 1992