

코로나방전에 의한 공중(空中)초음파 신호특성

Characteristics of Ultrasonic Signals Caused by Corona Discharge in Air

이상우* · 김인식** · 이동인*** · 이광식*** · 이동희****

(Sang-Woo Lee · In-Sik Kim · Dong-In Lee · Kwang-Sik Lee · Dong-Rhie Lee)

요 약

본 연구는 고전압 전력기에서 코로나에 의한 절연열화를 진단하기 위해 초음파 측정법을 사용하여 코로나의 진전상태에 따른 초음파신호를 분석하였으며, 또한 방전전하량과 초음파 펄스수의 관계를 조사하였다.

실험결과, 교류전압 인가시 코로나가 성장하여 브러시 또는 스트리머 코로나 형태에서 초음파신호는 처음으로 관측되었으며, 이때 관측된 초음파신호는 정극성 최대치에서 검출할 수 있었다. 전압이 상승함에 따라 정극성이 부극성에 비해 초음파의 발생빈도는 높게 나타났으며, 초음파신호의 크기는 전류펄스의 크기에 비례하였다. 그리고 초음파 펄스수는 방전전하량에 비례하여 증가된 것으로 나타났다.

옥외 전력기기에 대한 초음파 측정시 기본데이터를 얻기 위해 초음파의 발진 및 수신장치를 이용하여 공중초음파의 감쇄, 시간지연 및 지향특성도 조사하였다.

Abstract

Measurements of ultrasonic signals caused by corona discharges were performed by using an ultrasonic measurement technique to analyze the development states of coronas in a high-voltage power apparatus. We also examined the relationship between discharge magnitude and ultrasonic pulse number to diagnose the deterioration of electrical insulation by corona discharges.

From these results, it was found that ultrasonic signals due to corona discharges can be firstly detected at the peak value of positive polarities prior to the breakdown voltages, and the magnitude of ultrasonic signals was closely related to the current pulses by the corona discharges when ac voltages were gradually raised, and it appeared that ultrasonic pulse number was proportional to discharge magnitude.

Attenuation, time-delaying and directivity characteristics of ultrasonic signals propagated to air by using ultrasonic oscillation and receiving systems are reported as a basic data of ultrasonic measurements in out-door HV apparatus.

Key Words : Ultrasonic signal, insulation diagnosis, corona discharge

1. 서 론

가공송전선로 또는 옥외용 전력기에서 아크방전이나 코로나가 일어나면, 그 방전에 의해 음향에너지

* 정회원 : 영남대 공대 전기전자공학부 박사과정 수료

*** 정회원 : 영남대 공대 전기전자공학부 교수

** 정회원 : 경일대학교 전기공학과 교수

**** 정회원 : 수원대학교 전기전자공학부 교수

접수일자 : 1999년 3월 3일

가 방출되고 있음은 잘 알려진 사실이다. 코로나방전은 도체의 구조, 인가전압의 크기 및 기상상태 등에 따라 규모의 차이는 있으나, 공기를 절연물로 사용하고 있는 옥외 전력설비에서는 불가피한 현상이다. 특히 도체 및 이를 지지하는 절연물의 오염이나 우천시 코로나의 개시전압은 낮게 되고, 방전음은 크게 나타남을 알 수 있다.

고전압 전력설비에서 코로나방전이 일어나면 여러 가지 장애를 일으킬 뿐만 아니라 주변 절연물을 급속히 열화시켜 결국 절연파괴에 이르게 되는 경우가 많다. 따라서 기기의 고장을 미연에 방지하기 위해서는 이러한 코로나방전의 진전상태를 운전중 연속적으로 감시할 필요가 있다.

초음파진단법은 대형구조물 또는 저장탱크 등에서 스트레스나 응력(strain)변형시 발생하는 음향신호를 분석하여 구조물의 안전 감시용으로 이용되어 왔으나, 최근 고전압기기에서 발생하는 부분방전을 검출하여 절연파괴사고의 예방진단에 적용하려는 연구가 많이 발표되고 있다[1~3].

절연진단시 초음파 측정법이 주목 받게된 이유는 측정장치가 비교적 간단하여 현장적용에 용이하고, 전기적인 측정법과 상호간섭을 일으키지 않는 특징이 있다.[4] 또한 고전압기기의 전기적 측정에서 문제가 되고 있는 정전용량 및 외부잡음에 대한 영향도 받지 않는 장점이 있다[5].

초음파를 이용한 절연진단 연구로서는 1978년 E. Howells 등에 의해 전력변압기 내부에서 발생한 부분방전을 간단한 외부측정장치로써 검출할 수 있음을 발표하였으며[2][6], 1979년 R. T. Harrold는 이러한 부분방전 검출시 수신감도를 향상 시킬 수 있는 방법을 제시하였다[7]. 그리고 T. Sakoda 등은 부분방전에 의해 발생한 초음파신호의 특성을 조사하기 위해 푸리에 변환법을 사용하여 분석한 결과를 보고하였다.[8]

지금까지 국내외에서 보고된 초음파 진단법은 거의 대부분 전달매체로서 절연유, 즉 액체유전체를 사용한 전력용변압기 또는 커패시터를 적용 대상으로 하였다. 그러나 앞으로는 고체 절연물에 대한 열화진단 뿐만 아니라, 공기중 또는 압축가스절연계통(compressed-gas insulated substation)에도 확대 적용될 것으로 생각된다. 공기중에서 코로나방전에 의해 발생하는 음향에너지의 약 99[%]는 초음파 영역에서 방출되므로

[4] 공중 초음파를 이용한 고전압기기의 예방진단에 대한 연구는 크게 기대되고 있으나, 아직까지 기초적인 측정 데이터가 충분히 제시되지 않는 실정이므로 연구의 필요성을 느낀다.

따라서 본 연구에서는 공진주파수가 상이한 초음파 센서를 선정하여 초음파 송신 및 수신장치를 제작하고, 주파수대에 따른 공중초음파의 기본특성, 즉 감쇄, 전파 및 지향특성 등을 조사하였다. 그리고 침대평판 전극배치에서 직류 및 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때 코로나의 발생전압 및 극성에 따른 초음파 신호를 분석하였으며, 또한 펄스계수회로를 이용하여 코로나방전의 크기와 초음파 신호의 상관관계 등을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

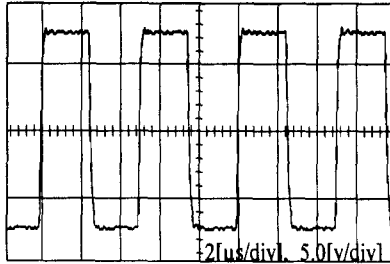
공중초음파의 기본특성을 조사하기 위해, 우선 초음파신호의 발진 및 수신회로를 구성하였다. 초음파센서는 공진주파수가 23, 40 및 200[kHz]인 압전변환소자를 사용하였다. 발진회로는 Timer IC 와 듀티비(duty ratio)가 50[%]인 JK Flip-flop IC를 사용하여 설계하였으며, 공진주파수에 해당하는 구형파를 발생하였다.

초음파신호의 수신회로는 전치증폭기, 고역통과필터 및 주증폭기로서 구성하였다. 여기서 전치증폭기(pre-amplifier)는 40[dB]의 이득(gain)을 갖도록 설계하였다.

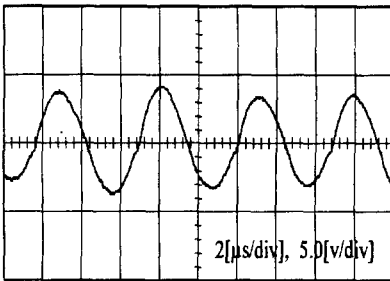
고역통과필터(high-pass filter)는 측정장치 및 신호처리장치 주변에서 발생될 수 있는 저주파의 잡음성분을 제거하기 위한 것으로 차단주파수(cut-off frequency)는 각 센서의 공진주파수보다 낮은 값에서 적절히 선정하였다. 그리고 주증폭기(main-amplifier)는 60[dB]의 이득을 갖도록 설계하였으나, 가변저항을 사용하여 이득을 적절히 조절할 수 있도록 하였다.

그림1은 대표적인 송수신 특성으로서 초음파 측정장치를 확인하기 위해 공진주파수 200[kHz]에 대한 초음파 발진 및 수신회로의 출력전압 파형을 나타낸 것이다.

그림1(a)은 발진회로의 구형파 출력파형으로서 송신용 센서에 인가된 peak-peak전압(V_{pp})은 약 15[V]이며, 발진주파수는 200[kHz]이다.



(a) 발진회로의 출력 파형



(b) 수신회로의 출력 파형

그림 1. 송수신 회로의 출력전압 파형
Fig. 1. Output voltage waveform of oscillation and receiving circuit

그림1(b)은 발진주파수 200[kHz]에 의해 발생된 초음파를 오실로스코프로에 의해 관측된 수신회로의 출력전압 파형이다.

그림2는 코로나방전에 의한 초음파 측정시스템의 블록선도를 나타낸 것이다. 이때 초음파 수신회로는 전자(電磁)적인 차폐를 위해 알루미늄으로 만든 케이스 내부에 설치하였다. 상부의 침전극은 스테인레스강(stainless steel)으로 만든 직경 4.0[mm]인 환봉을 사용하여 곡률반경 약 20[μm]이 되도록 연마하였다. 하부 전극은 황동으로 만든 반경50[mm]인 근사로그우스키(Rogowski)형 평판전극을 사용하였다.

고전압의 발생과 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 조절할 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 고전압프로브(high voltage probe. type:EP-50K, 일본 Pulse

Electronic Engineering Co.)를 사용하였다.

코로나 개시전압까지는 약 0.5[kV/sec]의 속도로 인가전압을 상승시켰다. 코로나의 발생전압에서 방전전하량 및 초음파신호를 관찰하고, 다시 단계적으로 천천히 전압을 증가시켰을 때 이들 값을 조사하였다.

코로나방전의 개시 및 진전상태를 확인하기 위해 침전극 선단에서 수평으로 약 15[cm] 떨어진 위치에 배울 50인 디지털 카메라(CCD Camera)를 설치하였다.

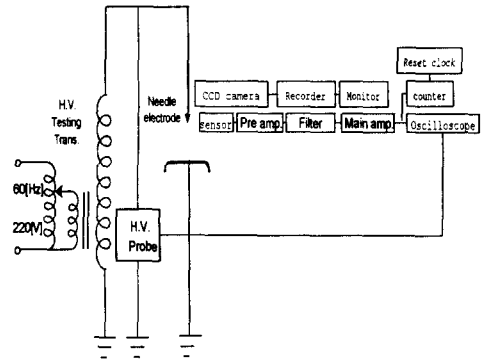


그림 2. 초음파 측정시스템의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of ultrasonic measuring system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공중 초음파의 감쇄특성

초음파의 기본특성은 전파매질에 따라 분류할 수 있다. 일반적으로 특성이 상이한 매질이 공존하는 경우에는 초음파의 반사 및 굴절특성이 요구되고 있다. 그러나 본 실험에서는 공기를 단일매질로서 사용하므로 감쇄특성, 지향특성 및 시간지연 특성에 대해 조사하였다. 초음파의 제반 특성은 주변 소음으로부터 완전히 차단된 무향챔버내에서 구하는 것이 요망되고 있으나, 본 실험에서는 주변잡음을 최대한 억제시킨 실내에서 측정하였다.

그림3은 온도20[°C]인 공기중에서 전달되는 초음파의 감쇄특성을 나타낸 것이다. 송신출력전압은 $V_{pp}=15[V]$ 로서 일정하게 유지하고, 송수신 초음파센서의 이격거리(d)를 변화시켰을 때, 초음파 수신회로의 출력전압을 기준값에 대한 비로서 나타낸 것이다. 음원으로부터 거리가 증가함에 따라 음파의 세기, 즉 음압은 그림3과 같이 감소되는 것으로 나타났으며, 초

음파의 주파수가 높을수록 그 감쇄특성은 현저한 것으로 나타났다. 그림과 같이 초음파 발생원으로부터 이격거리 60[cm]인 음압레벨은 10[cm] 떨어진 음압레벨에 비해 23 및 40[kHz] 초음파에서는 각각 5.0[dB] 및 6.0[dB] 감소되었으나, 200[kHz] 초음파는 24.4[dB] 감소된 것으로 나타났다.

그림3에서 측정된 초음파의 전달특성은 초음파센서 사이의 이격거리(d)가 센서의 직경($\phi=18$ [mm])에 비해 충분히 크기 때문에 원거리음장(音場)이라 할 수 있다. 이러한 음장에서 감쇄현상은 일반적으로 고체보다 액체, 액체보다 기체중에서 현저한 것으로 보고되어 있다[4]. 이는 초음파가 물체중을 진행할 때 매질에 따라 에너지의 흡수 및 확산에 의한 손실이 서로 다르기 때문이라고 해석된다.

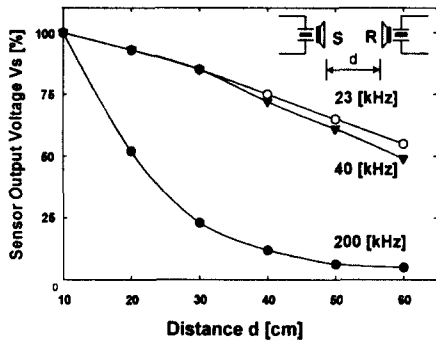


그림 3. 초음파신호의 음압감쇄 특성
Fig. 3. Attenuation characteristics of ultrasonic signal

한편 공기중에서 코로나에 의해 발생된 초음파는 일반적으로 그 신호 자체도 미약할 뿐만 아니라 구상 압력파(spherical pressure wave)로서 전파되므로 급격히 확산되어 전파거리가 증가함에 따라 초음파신호는 더욱 약하게 되어 측정상 많은 어려움에 직면하게 된다. 따라서 초음파의 수신감도를 높이기 위해 초음파 도파관(waveguide)을 사용할 필요가 있다.

본 실험에서 사용된 초음파 도파관은 센서의 직경이 약 18[mm]이므로 내경20[mm]인 plexiglas 파이프를 사용하였다.

그림 3에서 나타난 바와같이 거리가 증가함에 따라 특히 고주파 영역의 음압레벨(sound pressure level)이 현저히 감소된 것으로 나타났다. 그러나 부분방전에 대한 초음파신호 측정시 전력용기기에서는 외부잡

음이 존재하므로 보통 100~300[kHz]의 고주파영역이 보다 효과적인 것으로 보고되고 있다[6].

그림 4는 초음파 도파관을 사용한 경우 200[kHz] 초음파에 대한 음압감쇄 특성을 나타낸 것이다. 여기서 송신출력전압(V_{pp})은 15[V]로 일정하게 유지하고, 센서의 이격거리를 변화시켰을 때 수신회로의 센서출력 전압 V_s [V]을 표시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 도파관을 사용하지 않은 경우에 비해 도파관을 사용했을 때의 센서출력전압, 즉 수신감도는 약 3배 증가된 것으로 나타났다. 어느 일정한 거리에서 음향 신호를 검출할 경우 초음파 도파관을 이용하면 신호원 근처의 음향을 미리 포집(trap)하여, 이를 효과적으로 전송시킴으로써 음압레벨을 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

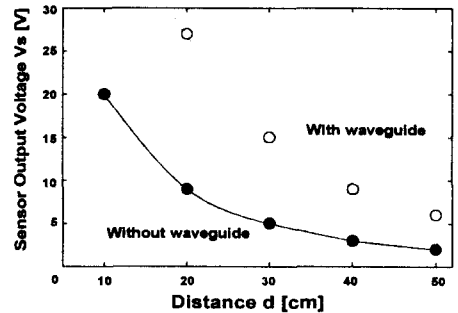


그림 4. 도파관에 의한 음압감쇄 특성
Fig. 4. Attenuation characteristic with waveguide

3.2 공중 초음파의 지향 특성

그림 5는 공기중 초음파의 지향특성을 나타낸 것이다. 그림과 같이 초음파의 송신소자를 고정시키고 측방향에 30[cm] 떨어진 위치에 초음파 수신소자를 놓고 각 θ 를 변화한 경우 초음파센서의 음압을 수신회로의 출력전압으로 측정하였다. 이때 각 θ 에 따라 측정된 값은 각 0도 일 때의 기준값에 대한 비로서 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 공기중 초음파는 측방향에서 가장 감도가 좋으며, 각 θ 가 증가하면 음압은 감소된 것으로 나타났다. 보통 지향성의 예리도를 간결하게 표현하기 위해 음압레벨이 각 0도일 때에 비해 -3[dB] 또는 -6[dB] 감쇄할 때의 각을 나타낸다. 특히 -6[dB], 즉 음압이 약 1/2로 저하되는 각(2θ)을 반감각(半減角)이라 부른다.

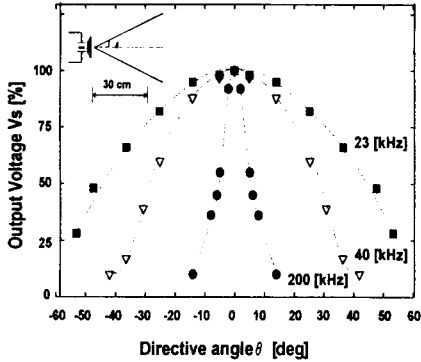


그림 5. 초음파의 지향특성
Fig. 5. Directivity characteristics of ultrasonic signal

본 실험에서 사용된 초음파 센서의 반감각(2θ)은 23[kHz]인 경우 약 88도, 40[kHz]인 경우 약 56도, 200[kHz]인 경우 약 7도인 것으로 나타났다. 주파수가 높을수록 초음파의 지향각은 예리해 짐을 알 수 있다.

3.3 공중 초음파의 시간 지연 특성

공기중에서 초음파는 매질의 전파방향으로 공기밀도의 소밀이 반복되는 종파(longitudinal wave)로서 전파되므로 기체분자의 평균속도와 밀접한 관계가 있다.

대부분의 물질에 대해 초음파의 전파속도는 잘 알려져 있다[5]. 보통 상온 및 상기압에서 공기의 전파속도는 약 343.5[m/s]이다. 절연유와 같은 액체의 전파속도는 약 1,480[m/s]으로 증가되고, 고체에서는 일반적으로 더욱 높은 속도가 된다.

매질에 따라 일정한 전파속도를 갖고 있기 때문에 방전이 발생한 순시에 초음파신호를 수신하는 것은 불가능하고, 방전점으로부터 센서 설치장소까지 매질을 통해 전달되기 위해서는 일정한 시간지연이 요구되고 있다. 그림 6은 공중초음파의 시간지연특성을 오실로스코프에 의해 나타낸 것이다. 여기에서 상부파형은 초음파 발신장치에 인가된 주기 16[ms], 폭 50[μs]인 구형파펄스를 나타낸 것이고, 하부파형은 공진주파수 200[kHz]인 초음파센서를 사용하여 이격거리 10[cm]에서 측정된 초음파신호 파형이다.

초음파신호는 그림과 같이 고주파밴드의 형태로서 오실로스코프 화면상에 나타나고 있으며, 구형파펄스

보다 일정시간 t에 의해 지연되어 있다.

여기에서 측정시간 t는 285[μs]이고, 발생점까지의 계산거리는 9.8[cm]이므로 공기중에서 계산 오차는 매우 적은 것을 알 수 있다. 따라서 매질의 전파속도를 알고, 초음파 신호의 시간지연을 측정하므로써 음원까지의 거리를 용이하게 계산할 수 있다.

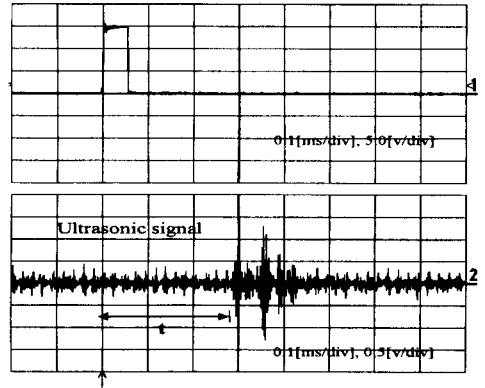


그림 6. 펄스신호에 대한 초음파신호 지연 특성
Fig. 6. Delay characteristics of ultrasonic signal for pulse signal

3.4 코로나방전의 초음파 특성

3.4.1 교류전압 인가시의 특성

공기중 상용주파수 교류전압에 대한 코로나방전의 물리적 현상을 조사하는데 일반적으로 침대평판 전극 배치를 사용하고 있다. 그림 7은 상온 상기압의 공기중에서 침대평판전극의 갭길이 7.0[mm]일 때 코로나방전의 발생 및 그 진전상태에 따른 초음파신호 특성을 나타낸 것이다. 초음파신호는 공진주파수 200[kHz]인 초음파센서를 사용하여 측정된 것이다. 여기서 채널1은 인가전압[V]이며, 채널 2는 코로나방전전류, 채널3은 이때의 초음파신호 파형이다.

인가전압을 서서히 상승시키면 코로나 개시전압에 도달하여 미약한 코로나방전이 개시된다. 전압(Vrms)을 2.6[kV]으로 증가하게 되면 그림 7(a) 채널 2와 같이 부극성 반주기의 최대값에서 처음으로 코로나 전류펄스가 나타난다. 이러한 펄스는 그림에서 나타난 바와 같이 펄스의 크기, 형태 및 주기적인 간격은 거의 일정한 형태를 갖고 있다. 이러한 펄스를 보통 트리첵 펄스(Trichel pulse)라고 부른다[9]. 그 펄스의 길이는 수10[μs]정도이고, 주파수는 수100[kHz]까지 나

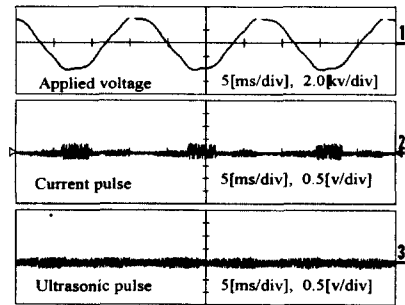
타나는 경우도 있다. 이때의 코로나방전은 펄스형(pulse type)으로 나타나며 그림 7(a)와 같이 인가전압의 최대치 영역에서 발생된다. 이때 발생된 펄스형 방전은 그 에너지가 미약하여 초음파센서에 응력을 가하지 못하므로 그림 7(a) 채널3과 같이 초음파신호는 검출되지 않았다.

인가전압을 더욱 상승시켜 3.5[kV]가 되면 그림 7(b) 채널 2와 같이 정극성 반주기의 최대값에서도 코로나 펄스가 나타난다. 그러나 이 펄스들은 그림에서 나타난 바와 같이 트리첵 펄스보다 그 크기는 훨씬 크고, 보통 불규칙적인 형태를 갖고 있다. 이 상태에서도 그림 7(b) 채널 3과 같이 초음파신호는 검출되지 않았다. 이때 코로나방전은 사진1(a)와 같이 글로우(glow)형을 나타내고 있으므로 이를 글로우 코로나라 부른다.

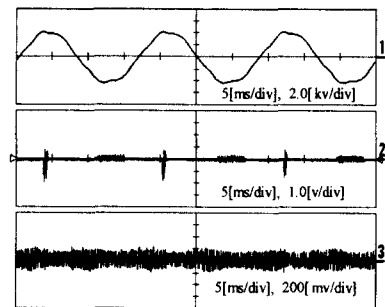
전압을 더욱 증가시켜 5.3[kV]가 되면 그림 7(c) 채널 2와 같이 전류펄스는 양(兩)극성에서 이전 단계보다 매우 크게 나타났다. 코로나방전은 전보다 매우 활발한 상태이며, 이때 방전의 형태는 사진1(b)와 같이 브러시(brush) 또는 스트리머(streamer) 코로나로 진전된 형태로 나타났다. 그림 7(c) 채널 2에서 정극성 최대값 부근에서 매우 큰 두개의 전류펄스가 관측되었으나, 오히려 최대값에서는 펄스가 없는 소위 무펄스 코로나방전이 두개의 전류펄스 사이에서 일어나고 있다. 이를 보통 연속코로나(continuous corona)라 부른다. 고전압 계통에서 코로나 손실은 매우 크게 관측됨에도 불구하고 전자파 장애(radio interference)는 비교적 낮게 나타나는 현상이 보고되고 있는데[10] 이는 연속 코로나에 의한 것으로 해석되고 있다. 이 단계에서 처음으로 초음파신호가 채널3과 같이 정극성 반주기의 최대치 부근에서 관측되었다. 초음파신호의 형태는 방전전류펄스와 매우 유사하게 관측되고 있으며, 센서와의 거리가 크지 않으면 방전전류와 초음파신호는 거의 일치되고 있다. 또한 이 단계의 정극성 전압에서 발생된 두개의 전류펄스 중에서 두번째 전류펄스는 처음에 비해 큰 값을 갖고 있으며, 초음파신호는 두번째 큰 전류펄스에서 먼저 발생되고 있음을 알 수 있다.

인가전압을 더욱 상승시켜 6.1[kV]가 되었을 때 코로나방전의 전류펄스 및 초음파신호는 그림 7(d)와 같이 나타났다. 이것은 본 전극배치에서 절연과피는 약 6.6[kV]에서 일어났으므로 절연과피 발생전 최종단계를 나타낸 것이다. 채널 2의 방전전류과형에서 나타난 바

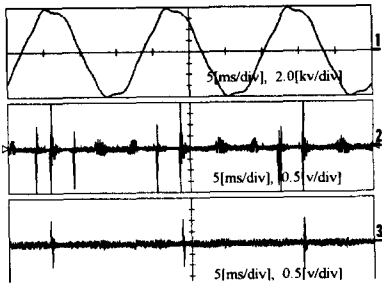
와 같이 정극성 피크값 부근에서 이전보다 강한 스트리머방전이 나타나고 있다. 여기서도 정극성 최대값 부근에서 2개의 매우 큰 방전전류펄스가 나타나고 있으며, 그 전류펄스 사이에는 펄스의 발생이 없는 연속 코로나가 관측되고 있다. 이때 초음파신호는 채널3과 같이 정극성 방전전류펄스와 일치하여 뚜렷하게 나타나고 있다. 이 단계에서는 그림과 같이 두개의 전류펄스마다 초음파신호가 관측되는 경우도 있다. 또한 두번째 전류펄스에서 보다 큰 초음파신호가 발생되고 있음을 알 수 있다. 지금까지 초음파신호는 정극성 영역에서만 기술되었으나 그림 7(d) 단계에서 부극성 영역에서도 초음파신호는 간헐적으로 관측할 수 있었다. 그러나 역시 정극성 영역이 부극성에 비해 초음파의 크기와 발생빈도가 활발함을 확인할 수 있었다. 부극성에서 발생하는 초음파는 전극간에 형성된 공간전하에 의한 것으로 생각된다. 이때 방전형상은 사진 1(c)와 같이 침전극 선단에서 스트리머 코로나가 상당히 발달한 매우 불안정한 형태를 이루고 있다.



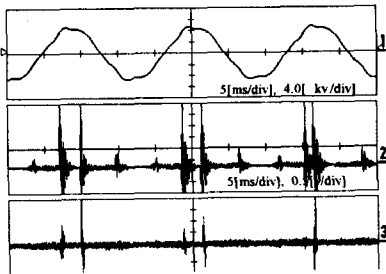
(a) 2.6 [kV]



(b) 3.5 [kV]



(c) 5.3 [kV]



(d) 6.1 [kV]

그림 7. 인가전압에 따른 초음파신호 특성
Fig. 7. Ultrasonic signal characteristics with applied voltages



(a) 3.5 [kV] (b) 5.3 [kV] (c) 6.1 [kV]

사진 1. 코로나방전의 진전
Photo. 1. Development of corona discharge

3.4.2 방전전하량 및 초음파펄스수의 특성

그림 8은 갭길이 7[mm]인 침대평판전극을 사용하여 인가전압을 변화시킨 경우 방전전하량과 초음파펄스수의 특성을 나타낸 것이다. 여기서 코로나 개시전압인 약 2.5[kV]까지는 방전전하량 Q는 매우 낮은 값에서 유지되고 있으나, 코로나 개시전압에서 전압의 상승과 더불어 방전전하량도 크게 증가된 것으로 나타났다. 그후 전압이 상승함에 따라 코로나는 발달되고 방전전하량은 전압에 비례하여 증가하였으며, 인가

전압이 약 5.5[kV]가 되어 브러시 또는 스트리머 코로나가 일어나면 전압의 상승에 따라 방전전하량은 매우 크게 증가된 것으로 나타났다.

약 4.5[kV] 이하의 전압에서는 초음파신호가 거의 나타나지 않았으므로 초음파 펄스수는 계수되지 않았으나, 그후 전압이 증가함에 따라 초음파 펄스수는 전압에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 또한 인가전압이 약 5.5[kV]가 되어 스트리머 코로나가 일어나면 파괴전압에 도달될 때 까지 펄스수는 급격히 증가된 것으로 나타났다. 초음파펄스수는 각 전압에 대한 초음파신호 파형에서 문턱레벨(threshold level) 이상의 펄스수를 1[sec]동안 계수하여 3회 평균한 값을 나타내었다. 문턱레벨은 가변저항으로 조정할 수 있으며 본 실험에서는 1.0[V]를 채택하였다.

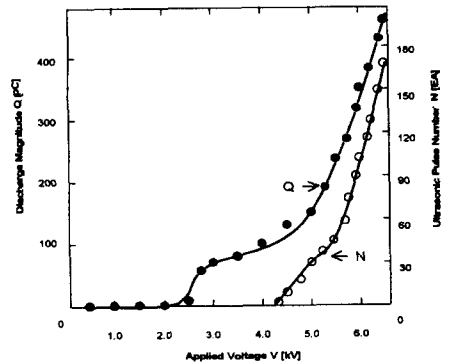


그림 8. 인가전압에 따른 방전전하량 및 초음파펄스수의 특성
Fig. 8. Discharge magnitude and ultrasonic pulse number with applied voltage

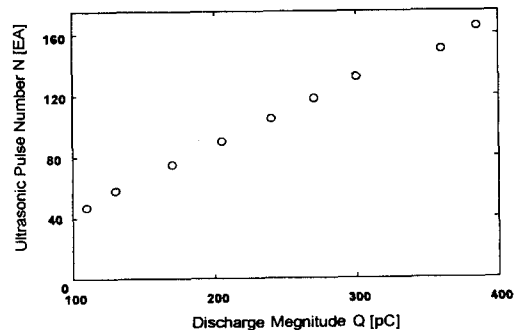
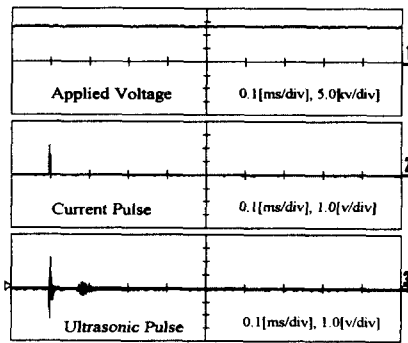


그림 9. 방전전하량과 초음파 펄스수의 관계
Fig. 9. Relationship between discharge magnitude and pulse number

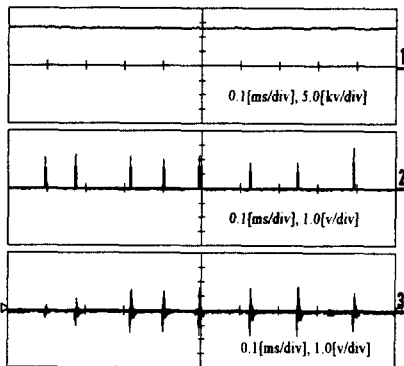
그림 9는 방전전하량과 초음파펄스수의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 초음파펄스수는 방전전하량에 비례하여 일반적으로 증가된 것으로 나타났다. 이것은 방전전하량과 방전에너지는 밀접한 관계가 있으므로 초음파신호의 강도는 방전에너지의 크기에 비례하고 있음을 알 수 있다.

3.4.3 직류인 경우의 특성

그림 10은 갭길이 10[mm]인 침대평판전극에서 침전극을 정극성으로 하였을 때 초음파신호 파형을 나타낸 것이다. 여기서 채널 1은 직류인가전압[V], 채널 2는 방전전류펄스, 채널3은 초음파신호 파형이다.



(a) 13.0 (kV)



(b) 13.1 (kV)

그림 10. 직류 코로나방전의 초음파신호
Fig. 10. Ultrasonic signal of dc corona discharges applied by dc voltage

그림 10(a)는 인가전압을 서서히 상승시켜 13.0[kV]인 경우이고, 이때 방전전류펄스와 초음파신호가 처음

으로 관측되었다. 방전전류의 측정은 측정용저항으로서 50[Ω]인 무유도저항을 사용하였다. 이때에도 교류전압 인가시와 같이 방전전류펄스와 초음파신호는 거의 동시에 나타나고 있다. 그러나 교류코로나에 비해 매우 높은 전압레벨에서 초음파신호가 관측되고 있다.

그림 10(b)는 인가전압을 13.1[kV]로 상승시켰을 때 초음파신호 파형을 나타낸 것이다. 미소한 전압상승에 의해 방전전류펄스 및 초음파신호의 발생빈도는 크게 증가된 것으로 나타났다. 그러나 여기에서 곧 절연파괴에 도달된 경우가 많이 관측되었으므로 직류코로나는 교류코로나에 비해 초음파에 의한 신호검출범위가 매우 작은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 공진주파수 23, 40 및 200[kHz]인 초음파센서를 사용하여 초음파 송신 및 수신장치를 제작하고 주파수에 따른 공중초음파의 기본 특성, 즉 감쇄, 전파 및 지향특성 등을 조사하였다. 또한 침대평판전극배치에서 직류 및 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때 코로나방전에 의한 초음파신호 특성, 방전전하량 및 초음파펄스수의 특성 등을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 공중초음파는 음원으로부터 전파거리가 증가함에 따라 음파의 세기는 감소되었으며, 주파수가 높을수록 그 감쇄특성은 현저하였다. 본 실험에서 전파거리 60[cm]인 음압레벨은 기준레벨(10[cm])에 비해 23 및 40[kHz] 초음파는 각각 5.0[dB] 및 6.0[dB] 감소되었으나, 200[kHz] 초음파는 24.4[dB] 감소된 것으로 나타났다. 수신감도를 향상시키기 위해 초음파 도파관으로서 내경20[mm] plexiglas pipe를 사용한 결과, 초음파신호의 레벨은 도파관을 사용하지 않는 경우에 비해 약3배 증가된 것으로 나타났다.

(2) 공중초음파의 지향특성을 조사한 결과, 주파수가 높을수록 지향각은 작은 것으로 나타났다. 본 실험에서 초음파의 주파수 23, 40 및 200[kHz]에 대한 반감각은 각각 88, 56 및 7도인 것으로 나타났다.

(3) 공중초음파는 매질조건 및 전파거리에 따라 일정한 시간지연이 생기므로 이를 정밀측정하므로써 음원까지의 거리를 산정할 수 있었다. 이격거리 10[cm]인 경우 구형파 펄스신호에 대한 시간지연은 285[μs]였으며, 이때 계산거리는 9.8[cm]로 나타났다.

(4) 침대평판전극에서 교류전압을 인가한 경우 글로우방전에서는 초음파신호가 나타나지 않았으나, 코로나가 진전하여 브러시 또는 스트리머방전 형태에서 절연파괴까지는 초음파신호를 관측할 수 있었다.

(5) 교류코로나에 의해 나타나는 초음파신호는 정극성 최대값 부근에서 먼저 관측되었으며, 이때 초음파신호의 크기 및 발생위치는 방전전류의 펄스신호와 매우 밀접한 관계가 있었다. 전류펄스의 크기가 증가하면 초음파신호의 크기도 비례하여 증가한 것으로 나타났다.

(6) 교류코로나방전에 의한 초음파신호는 정극성 영역에서 우선 관측되었으며, 전압이 상승함에 따라 초음파의 발생빈도 및 진폭은 정극성이 부극성보다 큰 것으로 나타났다.

(7) 교류코로나방전에 의한 방전전하량과 초음파펄스수를 측정된 결과, 초음파펄스수는 거의 방전전하량에 비례하여 증가된 것으로 나타났다.

(8) 정극성 및 부극성 전압을 인가한 직류코로나의 경우에는 코로나가 매우 발달된 파괴전압 직전상태에서 초음파신호는 관측되었으나, 교류코로나에 비해 초음파신호의 검출범위는 매우 작은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

[1] S. W. Lee, I. S. Kim, K. S. Lee and D. I. Lee, "Ultrasonic Signal Characteristics due to Treeing Deterioration in Epoxy Resin," The 9th Acean Conference on Electrical Discharge, pp. A2-3, 1998.
 [2] 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.
 [3] D. Train, A. Mercier and D. Thome, "The Detection of Partial Discharge in High Voltage Potential Transformers in Service," IEEE Winter Meeting, pp. 1909-1916, 1974.
 [4] R. T. Harold, "Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics," IEEE Trans. E, Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.
 [5] R. Dukes and E. A. Culpan, "Acoustic Emission : Its Techniques and Applications," IEE Proc., Vol. 131, No. 4, pp.241-251, 1984.
 [6] E. Howells and E. T. Norton. "Location of Partial Discharge Sites in On-Line Transformers," IEEE Trans. PAS, Vol. 100, No. 1, pp.158-162, 1981.
 [7] R. T. Harold, "Acoustic Waveguides 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.
 [8] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, K. Ando, "Basic Studies of

Acoustic Emissions Caused by the Partial Discharge in an Oil-Tank", K-J Joint Symp. on ED and HME, pp.16-19, Oct. 1998.
 [9] M. Hikita, T. Kato, H. Okubo, "Partial Discharge Measurements in SF6 and Air using Phase-resolved Pulse-height Analysis", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. 1. No. 2, April, pp. 276-283, 1994.
 [10] D. Kind, "An Introduction to High-Voltage Experimental Technique", Vieweg and Sohn, 1978. pp.126-132.

◇ 저자소개 ◇

이 상 우 (李相雨)
 1967년 4월 11일생. 1992년 경일대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학 산업대학원 졸업(석사). 1997~현재 영남대 공대 전기전자공학부 박사과정 수료. 영남이공대학, 구미1대학 강사.

김 인 식 (金寅湜)
 1953년 10월 3일생. 1974년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1991年 美國 University of Southern California대 초빙교수. 현재 경일대학교 전기공학과 교수.

이 동 인 (李東仁)
 1936년 10월 19일생. 1959년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1973~1977年 영국 Strathclyde대 대학원 졸업(박사). 1982~1983년 미국 South Carolina대 방문교수. 현재 당 학회 대구·경북지회 이사. 영남대 공대 전기전자공학부 교수.

이 광 식 (李廣植)
 1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology대 초빙교수. 현재 당 학회 부회장. 대한전기학회 방전·고전압 연구회 간사장. 영남대 공대 전기전자공학부 교수. 영남대 학생처장

이 동 희 (李東熙)
 1956년 1월 29일생. 1978년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 수원대 공대 전기전자공학부 부교수.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여
 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음