

초음파 신호와 부분방전 신호의 패턴에 의한 GIS내 파티클 위치 추정

(Locating Particle by Ultrasonic Signal and Partial Discharge Signal Pattern in GIS)

곽희로* · 이동준**

(Hee-Ro Kwak, Dong-Zoon Lee)

요 약

본 연구에서는 GIS내 파티클의 각종 위치에서 발생하는 초음파 신호와 부분방전 신호의 패턴을 비교 분석하였다. 파티클 위치에 따른 초음파 신호와 부분방전 신호 패턴의 특징은 전극 부착시 양의 반주기에서 큰 초음파 신호와 큰 부분방전 신호가 주기적으로 나타났으며, 외함 부착시에는 음의 반주기에서 큰 초음파 신호와 큰 부분방전 신호가 주기적으로 나타났다. 그리고 스페이서 부착시에는 양, 음의 반주기에서 초음파 신호와 큰 부분방전 신호가 주기적으로 나타나고 있다 또한 자유운동시에는 충돌에 의한 초음파 신호와 큰 부분방전 신호가 비주기적으로 나타났다. 이상의 결과로부터 초음파 신호와 부분방전 신호 패턴을 비교, 분석하면 GIS 내부에 존재하는 파티클의 위치 추정이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract

This paper describes the analysis of ultrasonic signal and partial discharge (PD) signal patterns for each location of particle in GIS. The characteristics of the ultrasonic signal and PD signal patterns for each location were as follows; in case of particle on the electrode, large ultrasonic signals and large PD signals occurred in positive half-cycle periodically; in case of particle on the enclosure, large ultrasonic signals and large PD signals occurred in negative half-cycle periodically; in case of particle on the spacer, ultrasonic signals and large PD signals occurred in positive and negative half-cycle periodically; in case of the free moving particle, ultrasonic signals and large PD signals occurred by collision non-periodically. As a result, it was confirmed that particle in GIS could be located by the comparison and analysis of ultrasonic signal and PD signal patterns.

1. 서 론

산업의 발달과 도심의 확장에 따라 전기에너지의

* 정희원 : 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수
** 정희원 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정
접수일자 .

수요는 날로 증가하고 있는 추세이다 그러나 전력 수요가 많은 도시에 공급하는 전력설비는 지가상승에 따른 부지확보 어려움과 환경문제 때문에 소형화 및 육내화가 불가피하여 절연내력이 우수한 SF₆ 가스를 절연매체로 사용하는 GIS의 사용이 증가하고 있다. 또한 우리 나라의 경우 GIS 보급률에 비해

GIS의 사고는 외국에 비해 높은 편이고 GIS의 사고 발생시 대형사고로 발전할 뿐만 아니라 사고 부분을 추정하는 것이 어려워 복구하는데 장시간이 소요되는 단점을 가지고 있다[1-2]. 그러므로 운전 중에 GIS 내부에서 발생하는 이상 징후를 초기단계에 찾아내는 예방진단 기술이 중요하다. 따라서 현재의 GIS 진단방법은 열화의 초기단계에 나타나는 PD를 검출하여 분석하고자 하는 방법들이 많이 연구되고 있다. GIS내 PD를 일으키는 발생원 중 파티클에 의한 이유가 많은 부분을 차지하고 있어 파티클 검출에 관한 연구도 활발히 진행 중에 있다.

파티클 검출에 관한 진단 방법으로는 초음파 측정법, 진동가속도법 등이 있다. 이중 초음파 측정법을 이용한 방법은 주로 급속이물이 인가전계에 대응한 정전력을 받아 부상 후 왕복운동을 할 경우 외함에 충돌하여 발생하는 충돌신호와 음향신호를 진동가속도계와 초음파센서로 측정하여 파티클 존재유무 및 파티클 종류와 크기를 추정하는 연구와 GIS내 부분방전을 검출하는 연구로 어느 정도 성과를 이루고 있다. 그러나 GIS내 파티클의 경우 존재유무를 찾는 것뿐만 아니라 파티클의 위치를 찾아내 제거하는 것이 매우 중요하다.

기존의 GIS내 파티클 위치추정에 관한 연구는 UHF 센서를 이용하여 부분방전의 전자파 신호를 분석하는 연구가 진행되어 왔으나 이 방식은 운전중인 GIS 진단에 적용하려면 GIS에 노출 스페이서가 필요하며, 노출 스페이서가 없을 시에는 GIS 내부에 센서를 설치하여야 한다. 그러나 초음파 신호 측정법은 외부 탱크에 센서를 부착하여 부분방전에 의해 발생하는 초음파를 검출하는 방식이므로 기존의 기기에 대해서도 쉽게 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.[3~5]

따라서 본 연구는 GIS 사고 주원인 중 하나인 파티클에 의한 사고를 예방, 진단하기 위한 기초자료를 제공하기 위하여 초음파 신호와 부분방전 신호의 패턴을 측정 분석하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 챔버부, 전원부 및 계측부로 구성하였다. 챔버부는 모의 GIS 챔버, 진공펌프 및 SF₆ 가스로, 전원부는 고전압 발생장치

및 제어장치로 구성되어 있으며, 부분방전 위상 측정 및 초음파 측정을 위한 계측부는 부분방전 검출장치, 초음파 센서, 전치증폭기(pre-amp), 오실로스코프로 구성되어 있다. 그림 1은 GIS내 파티클의 위치에 따른 부분방전 신호 및 초음파 신호를 측정하기 위한 실험장치의 개략적인 구성을 나타낸 것이다.

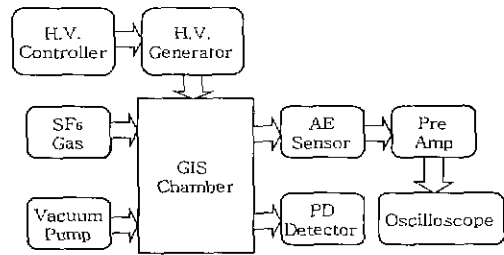


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. The schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용한 전원은 교류 60[Hz]로 최대 400[kV]까지 인가할 수 있는 고전압 발생장치를 이용하였으며, 고전압 발생장치에서 모의 GIS 챔버까지의 리드 선은 코로나 링을 이용하여 GIS 외부에서의 노이즈 발생을 최대한 억제하였다.

초음파 신호를 측정하기 위하여 사용한 초음파 센서는 NF사의 AE-901E로써 주파수 대역이 20[kHz]~20[MHz]까지 광대역 주파수 특성을 가지고 있으며, 60[dB]의 이득 특성을 가지는 전치 증폭기를 사용하여 신호를 증폭시켜 오실로스코프에서 관측하였다. 모의 챔버 내에서 파티클의 위치에 따라 발생하는 부분방전 신호를 측정하기 위하여 PD Detector TE-571을 이용하였다.

본 연구에서는 GIS 내부에서 부분방전을 유발시키는 파티클의 위치를 파티클이 전극에 부착한 경우, 파티클이 외함에 부착한 경우, 파티클이 스페이서에 부착한 경우, 파티클이 자유운동을 하는 경우로 모의하였다.[3][6]

GIS내 존재하는 파티클에 의한 초음파 신호 및 부분방전 신호를 분석하기 위하여 모의 전극, 모의 스페이서를 제작하였다. 모의 전극은 GIS내 내부도체와 외부도체 사이에 나타난 평등전계를 모의하기 위하여 평판 전극을 만들었으며 이때 전극 끝을 라운드 처리하여 전극 끝에서 부분방전이 일어나는 것을 방지하였다. 또한 모의 스페이서는 아크릴을 이용

초음파 신호와 부분방전 신호의 패턴에 의한 GIS내 파티클 위치 추정

하여 원통형으로 제작하였고 파티클은 지름 0.56[mm] 길이 5[mm]의 선형 구리 파티클을 이용하였다.

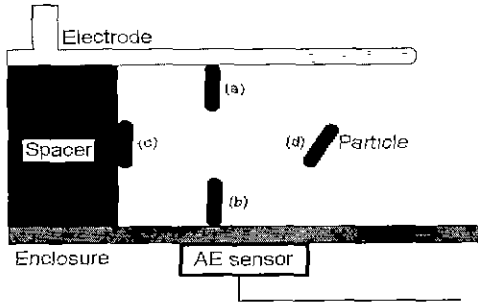


그림 2. 모의 파티클 위치
Fig. 2. Simulated particle position

그림 2는 본 논문에서 제작한 전극과 파티클의 위치를 나타낸 것이다. 특히 그림 2 (c)에서 보듯이 스페이서 부착시에는 파티클의 위치가 전극과 외함의

중간에 위치하도록 하였다. 그리고 GIS 탱크로 전달되는 초음파 신호를 측정하기 위하여 초음파 센서는 외함에 설치하였다.

인가전압에 따라 부분방전이 다르게 발생하므로 본 논문에서는 인가전압을 방전개시전압부터 절연과 피전압까지의 전압을 10등분하여 1/10, 4/10, 7/10, 9/10인 전압에서 각각 측정하였다.[7]

또한 초음파 신호와 부분방전 신호의 패턴을 얻기 위하여 파티클의 위치에 따라 각각의 인가전압에서 3회 이상 실험하였다.

3. 파티클 위치에 따른 초음파 신호와 부분방전 신호의 위상 특성

3.1 전극에 파티클 부착시

전극에 파티클 부착시 1/10 전압, 4/10 전압, 7/10 전압, 9/10 전압에서 부분방전 신호와 초음파 신호를 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

그림 3에서 보는 것처럼 모든 인가전압에서 양의

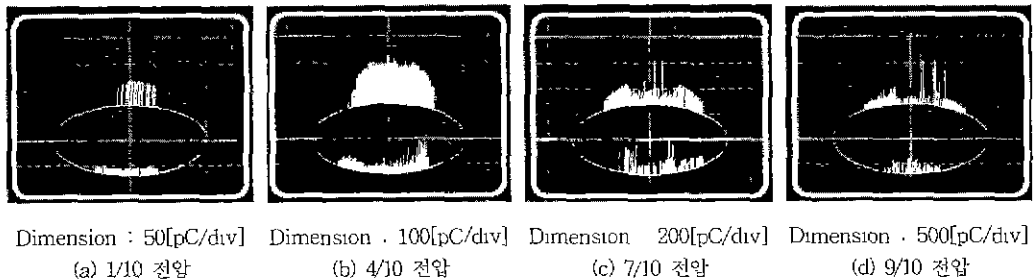


그림 3. 전극에 파티클 부착시 부분방전 신호
Fig. 3. The PD in case of the particle on electrode

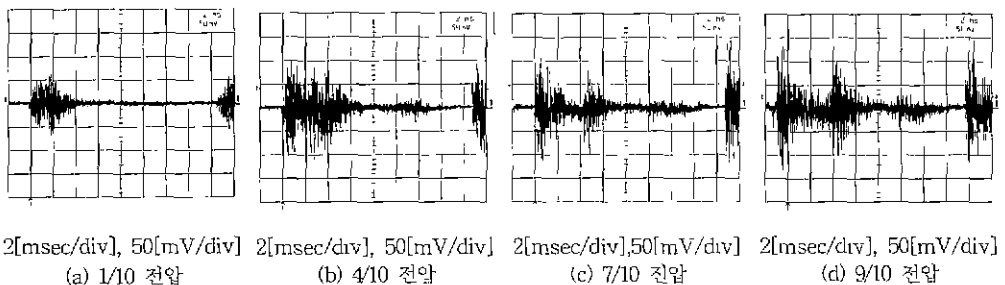


그림 4. 전극에 파티클 부착시 초음파 신호
Fig. 4. The ultrasonic signals in case of the particle on electrode

반주기의 부분방전이 음의 반주기의 부분방전보다 크게 발생하고 있다. 이와 같이 극성효과가 나타나고 있으며 이러한 현상은 다른 여러 실험에서도 나타나고 있다.

이런 극성효과의 현상을 물리적으로 고찰해 보면 전극에 파티클 부착시 형태는 대표적인 불평등 전극인 침 대 평판전극으로 생각할 수 있다. 이때 코로나 개시전압은 침쪽이 양극 전압일 경우보다 음극 전압일 경우가 더 낮다. 하지만, 침이 양극 전압일 경우 침 끝에서는 글로우 코로나와 또는 브러시 코로나를 거쳐 양극성 스트리머(positive polarity streamer)를 발생하게 만든다. 한편 침이 음극 전압일 경우 평판전극의 전계가 침보다는 훨씬 작으므로 양극성 스트리머는 형성되지 못하고 음극인 침에서 음극성 스트리머(negative polarity streamer)가 형성되는데 음극성 스트리머는 양극성 스트리머보다는 활발하지 못하므로 침이 양극일 때보다는 부분방전의 크기가 작게 된다.

따라서 코로나전압이 낮다는 것과 더욱 전압을 올렸을 때 코로나가 성장하기 쉽다는 것과는 별개의 문제로 일반적으로 침이 양극인 경우 양극성 스트리머가 성장하기 쉬어지기 때문에 부분방전이 많이 발생하게 된다.[8-9]

또한, 그림 4에서 보는 것처럼 초음파 신호는 규칙적으로 특정한 부위에서 주기적으로 측정되었는데 이것은 부분방전의 발생이 인가전압의 위상에 따라 주기적으로 발생하기 때문으로 생각된다

그림 4 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 1/10 전압에서의 초음파 신호는 약 60[mV]로 작게 나타났고 그림 4 (c)에서 보듯이 7/10 전압 이후로 나타나는 초음파 신호는 상대적으로 큰 신호와 작은 신호가 주기적으로 발생하였으며 신호의 크기뿐만 아니라 길이도 증가하였다.

부분방전 신호의 주기와 관련지어 생각하여 보면 초음파 신호의 인가전압 주파수의 양의 반주기에 나타나는 큰 파형은 부분방전 신호 주기의 양의 반주기에 나타난 큰 방전에 기인한 것으로 생각되어지고, 초음파 신호의 인가전압 주파수의 음의 반주기에 나타난 작은 파형은 부분방전 신호 주기의 음의 반주기에 나타난 작은 방전에 기인하는 것으로 생각된다

3.2 외함에 파티클 부착시

파티클이 외함에 부착시 1/10 전압, 4/10 전압, 7/10 전압, 9/10 전압 일 때 측정된 부분방전 신호와 초음파 신호를 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5에서 보는 것처럼 음의 반주기에서의 부분방전이 양의 반주기에서의 부분방전보다 크게 발생하는 것으로 나타나고 있다.

그림 6 (a)에서 보는 것처럼 1/10 전압에서는 초음파 신호가 양의 반주기에 대응되는 앞부분에서 나타났으며 음의 반주기에 대응되는 뒷부분에서는 초음파 신호 크기가 작아 노이즈 때문에 나타나지 않았다. 그리고 7/10 전압 이후로 나타나는 초음파 신호는 상대적으로 큰 신호와 작은 신호의 두 개의 파형이 한 주기에서 발생하였다. 인가전압의 주파수를 고려하여 생각해보면 부분방전 신호의 패턴이 음의 반주기 보다 양의 반주기에서 큰 신호가 나타나고 있으므로 초음파 신호의 앞부분에 나타나는 큰 파형은 음의 반주기에 나타난 큰 부분방전 신호에 기인한 것으로 생각되어지고, 초음파 신호의 뒷부분에 나타난 작은 파형은 양의 반주기에 나타난 작은 부분방전 신호에 기인하는 것으로 생각된다.

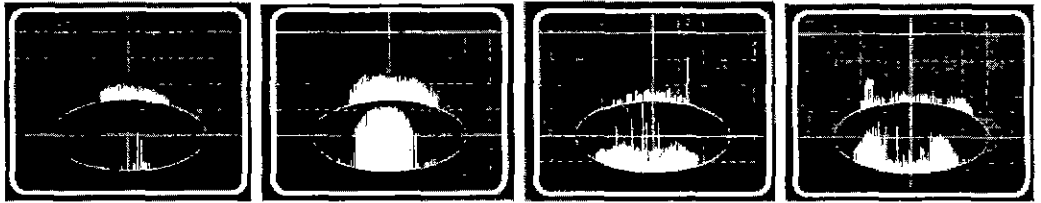
3.3 스페이서에 파티클 부착시

스페이서에 파티클 부착시 1/10 전압, 4/10 전압, 7/10 전압, 9/10 전압 일 때 측정된 부분방전 신호와 초음파 신호를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

그림 7에서 보는 것처럼 4/10, 7/10, 9/10 전압에서 부분방전이 양의 반주기와 음의 반주기에서 비슷하게 나타나고 있다. 이와 같은 이유는 파티클이 스페이서에 부착시는 전극이나 외함에 파티클 부착시의 극성효과가 나타나지 않기 때문이라고 생각된다.

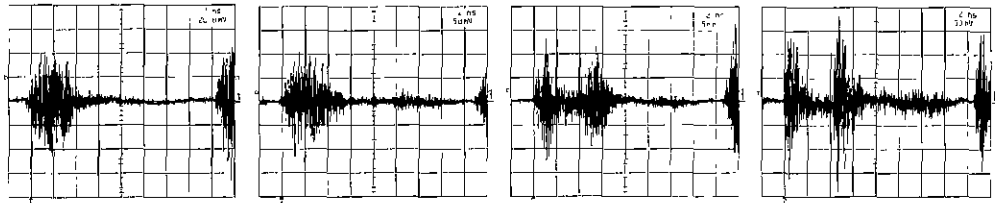
그림 8에서 보듯이 인가전압이 증가함에 따라 초음파 신호의 크기는 증가하고 있으나 각각의 인가전압에서의 초음파 파형은 인가전압 주파수의 양의 반주기와 인가전압 주파수의 음의 반주기에서의 크기가 서로 비슷하게 나타나고 있다. 부분방전 신호 주기와 비교해 보면 양의 반주기와 음의 반주기에서 비슷한 크기로 나타난 부분방전에 의해 반주기마다 초음파 신호가 나타나는 것으로 생각된다.

초음파 신호와 부분방전 신호의 패턴에 의한 GIS내 파티클 위치 추정



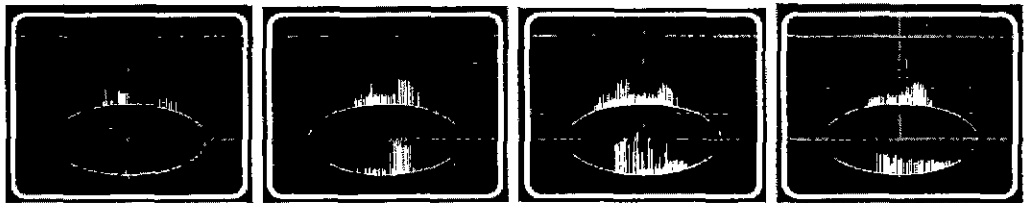
Dimension : 50[pC/div] Dimension : 100[pC/div] Dimension : 200[pC/div] Dimension : 200[pC/div]
 (a) 1/10 전압 (b) 4/10 전압 (c) 7/10 전압 (d) 9/10 전압

그림 5. 외함에 파티클 부착시 부분방전 신호
 Fig. 5. The PD in case of the particle on enclosure



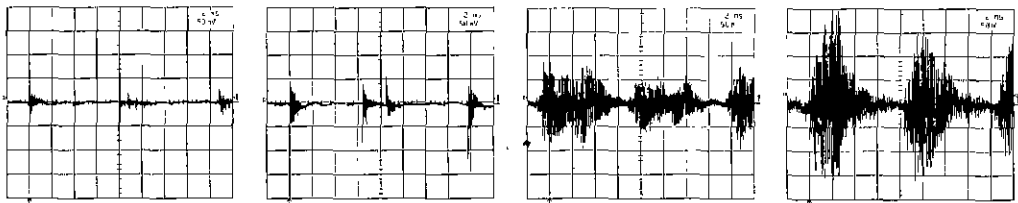
2[msec/div], 20[mV/div] 2[msec/div], 50[mV/div] 2[msec/div], 50[mV/div] 2[msec/div], 50[mV/div]
 (a) 1/10 전압 (b) 4/10 전압 (c) 7/10 전압 (d) 9/10 전압

그림 6. 외함에 파티클 부착시 초음파 신호
 Fig. 6. The ultrasonic signals in case of the particle on enclosure



Dimension : 50[pC/div] Dimension : 100[pC/div] Dimension : 200[pC/div] Dimension : 500[pC/div]
 (a) 1/10 전압 (b) 4/10 전압 (c) 7/10 전압 (d) 9/10 전압

그림 7. 스페이서에 파티클 부착시 부분방전 신호
 Fig. 7. The PD in case of the particle on spacer



2[msec/div], 50[mV/div] 2[msec/div], 50[mV/div] 2[msec/div], 50[mV/div] 2[msec/div], 50[mV/div]
 (a) 1/10 전압 (b) 4/10 전압 (c) 7/10 전압 (d) 9/10 전압

그림 8. 스페이서에 파티클 부착시 초음파 신호
 Fig. 8. The ultrasonic signals in case of the particle on spacer

3.4 파티클 자유운동시

본 실험에서 파티클은 약 16.0[kV]에서 부상하였는데 이는 선형 파티클 존재시 부상전압 계산식 [10-11]에 의한 계산 값 16.7[kV]와 유사하게 나타나고 있다. 또한 일단 부상한 파티클은 전극과 외함사이에서 전극과 외함에 충돌하며 불규칙적으로 운동 [12]하게 되는데 이 운동을 파티클의 자유운동이라 한다.

파티클 자유운동시 1/10 전압, 4/10 전압, 7/10 전압, 9/10 전압 일 때 측정된 부분방전 신호와 초음파 신호를 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

그림 9에서 보듯이 1/10 전압, 4/10 전압, 7/10 전압, 9/10 전압에서 부분방전이 양의 반주기와 음의 반주기에서 비슷하게 발생하고 있다.

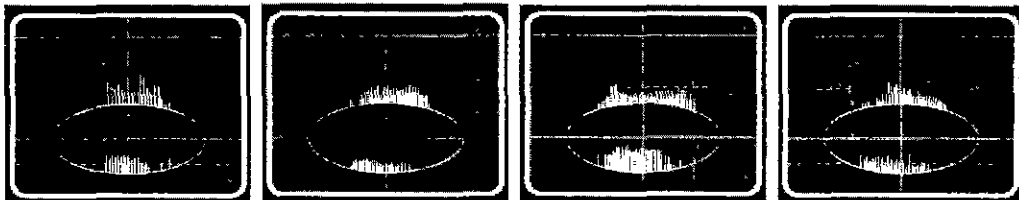
각 인가전압에서 측정된 초음파 신호는 그림 10에서 보듯이 다른 3가지의 파티클 위치(9/10전압에서 V_{p-p} : 약 270~400[mV]) 보다 상당히 큰 신호(9/10 전압에서 V_{p-p} : 약 7600[mV])가 인가전압의 주기와는 상관없이 불규칙적으로 발생하였다. 이것은 파티클이 인가전계에 의해 부상하여 자유운동시 발생하는 초음파 신호는 부분방전에 의한 초음파 신호라

기보다는 파티클 자유운동시 외함과외의 충돌에 의해 발생하는 초음파 신호에 기인하는 것으로 생각된다.

표 1. 파티클 위치에 따른 방전패턴과 초음파 신호 특성
Table 1. PD pattern and ultrasonic signal for the location of particle

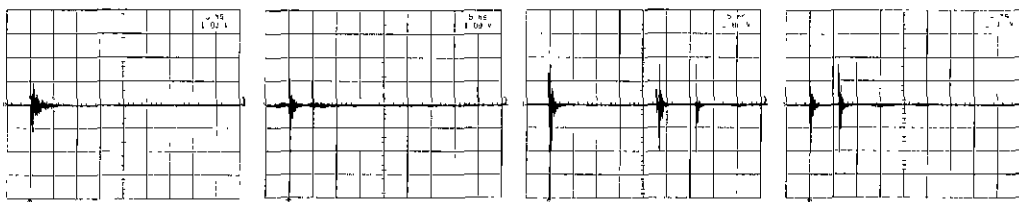
파티클 위치	부분방전 신호	초음파 신호
전극부착	방전크기 : (+)주기 > (-)주기	주기적(큰파형, 작은파형) V_{p-p} : Max. 270[mV]
외함부착	방전크기 : (+)주기 < (-)주기	주기적(큰파형, 작은파형) V_{p-p} : Max. 370[mV]
스페이서부착	방전크기 : (+)주기 ≈ (-)주기	주기적(비슷한 크기) V_{p-p} Max. 400[mV]
자유운동	방전크기 : (+)주기 ≈ (-)주기	비주기적 V_{p-p} : Max. 7600[mV]

표 1은 GIS내 파티클 위치에 따른 방전패턴과 초음파 신호의 특성을 요약한 것으로 양의 반주기와 음의 반주기에서 방전 크기 비교와 초음파 신호의 주기성 여부 그리고 초음파 신호들 중 9/10전압에서



Dimension : 200[pC/div] Dimension : 500[pC/div] Dimension : 500[pC/div] Dimension: 1000[pC/div]
(a) 1/10 전압 (b) 4/10 전압 (c) 7/10 전압 (d) 9/10 전압

그림 9. 파티클 자유운동시 부분방전 신호
Fig. 9. The PD in case of the free moving particle



5[msec/div], 1000[mV/div] 5[msec/div], 1000[mV/div] 5[msec/div], 2000[mV/div] 5[msec/div], 2000[mV/div]
(a) 1/10 전압 (b) 4/10 전압 (c) 7/10 전압 (d) 9/10 전압

그림 10. 파티클 자유운동시 초음파 신호
Fig. 10. The ultrasonic signals in case of the free moving particle

최대 크기의 전압을 나타내었다.

4. 결 론

GIS내 파티클의 위치를 전극부착시, 외함부착시, 스페이서부착시 그리고 자유운동시로 모의하여 각각의 위치에 따른 초음파 신호 및 부분방전 신호 주기를 측정하고 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 파티클이 전극에 부착시 인가전압의 양의 반주기에 나타난 큰 방전에 의해 크기가 큰 초음파 신호가 발생하였고 음의 반주기에 나타난 작은 방전에 의해 크기가 작은 초음파 신호가 주기적으로 발생하였다.
2. 파티클이 외함에 부착시 인가전압의 음의 반주기에 나타난 큰 방전에 의해 크기가 큰 초음파 신호가 발생하였고 양의 반주기에 나타난 작은 방전에 의해 크기가 작은 초음파 신호가 주기적으로 나타났다.
3. 파티클이 스페이서에 부착시 인가전압의 양의 반주기와 음의 반주기에서 규칙적으로 나타난 비슷한 크기의 부분방전에 의해 반주기마다 초음파 신호가 주기적으로 나타났다.
4. 파티클 자유운동시에는 초음파 신호가 인가전압의 위상과 상관없이 불규칙적으로 발생하였으며 자유운동시에는 충돌에 의해 초음파 신호가 발생하므로 전극, 외함, 스페이서에 파티클이 부착시 발생하는 초음파 신호보다 매우 크게 나타났다.

이상의 결과로부터 부분방전 신호와 초음파 신호를 이용하여 GIS 내부 파티클 위치 추정이 가능함으로 GIS 진단의 기초자료로 활용 가능하리라고 생각된다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] Technical Committee on the Maintenance Standard of SF₆ Gas Insulated Equipments, "The maintenance

standard of SF₆ gas insulated equipments", Denki Kyodo Kenkyu, Vol. 33, No4, 1977.

[2] A. K. Chakrabarti, et. al., "Spacer involvement in conducting- particle-initiated breakdown in compressed gas insulated system", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. E-22, No. 4, pp. 431-438, 1987.

[3] M. Oyama, et al., "Development of detection and diagnostic techniques for partial discharges in GIS", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp.811- 818, 1994.

[4] L.E. Lundgard, et. al., "Acoustic diagnosis of gas insulated substations : a theoretical and experimental basis," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp. 1751-1759, 1990.

[5] Md. Enamul Haque, et al., "Diagnosis of GIS based on acoustic sensing technique", Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, APSCOM-97, pp. 556-558, 1997.

[6] 곽희로 외, "GIS내 파티클 상태에 따른 전기적 방전 신호 분석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.1084-1086, 1999

[7] 곽희로 외, "GIS내 파티클 상태에 따른 방전패턴 및 초음파 신호 특성 연구", 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집, pp. 299-301, 1999.

[8] W. Diesendorf, "Insulation Co-ordination in High-voltage Electric Power Systems", Butterworth & Co, pp.38-42, 1974

[9] 이덕출 외, "고전압공학", 문운당, pp.39-84, 1998.

[10] A. H. Cookson, et. al, "Movement of filamentary conducting particles under AC voltages in high pressure gases", International Symposium on High Voltage Technology, pp.416-418, 1975.

[11] Li Ming, et. al, "Behaviour and effect of conducting spiral particles under AC voltage in a gas insulated electrode system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp.159-164, 1988.

[12] 곽희로 외, "모의 GIS내 금속이물의 거동특성", 한국조명·전기설비 논문지, Vol.13, No. 4, pp 152-159, 1999

◇ 저자소개 ◇

곽 희 로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울공대 전기공학과 졸. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(박사). 1986년 MIT Visting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 부회장.

이 등 준 (李東俊)

1971년 12월 27일생, 1995년 숭실대 공대전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.