

동축원통 전극내의 파티클에 의한 음향신호 분석

(Analysis of Sound Signal by Conducting Particle in Coaxial Cylindrical Electrodes)

조국희* · 권동진** · 곽희로***

(Kook-Hee Cho · Dong-Jin Kweon · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문에서는 동축원통 전극내의 파티클이 외함에 충돌하여 발생하는 음향신호를 초음파 센서와 진동센서를 이용하여 측정하고, 이들 신호의 분석과 주파수 스펙트럼 분석에 관하여 연구하였다. 동축원통 전극에서 파티클이 반동운동할 경우의 음향신호는 파티클이 없을 경우의 잡음신호보다 10[dB] 이상의 크기로 측정되어 초음파 및 진동센서를 GIS 외함에 부착하여 측정할 수 있었다. 또한 파티클이 외함에 충돌할 경우와 파티클에 의한 부분방전 및 절연파괴시의 초음파 및 진동신호를 측정하여 밀폐화된 GIS 내부의 파티클이 절연에 미치는 상태를 추정 가능하였다. 또한 파티클의 지름 및 길이의 증가에 따른 측정신호와의 상관관계를 진동신호의 최대진폭 및 평균평방제곱근으로 분석하여 파티클의 크기를 추정 가능함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the sound signals due to the collisions against the inside wall by conducting particles within coaxial cylindrical electrodes, and the corresponding frequency spectrum are analyzed and described. These sound signals were detected and measured using ultrasonic and vibration sensors attached to the exterior of the GIS enclosure. In the case where a particle is bouncing about between these coaxial electrodes, the sound signal was found to be more than 10[dB] greater than the background noise due to no particle. Also, in the case where a particle collides with the walls of the chamber, the measured ultrasonic and vibration signal resulting from partial discharges and insulation breakdown caused by the particle made it possible to determine the condition of the insulation inside the sealed GIS. Lastly, the relationship between the peak amplitude and RMS voltage of the measured signal, the diameter and length of the particle was analyzed. Using this analysis, it is possible to confirm the size of particle.

*정회원 : 전기연구소 선임연구원

**정회원 : 한전전력연구원 선임연구원

***정회원 : 숭실대학교 공과대학장

접수일자 : 1997. 7. 18

1. 서 론

가스절연 개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS)는 모선, 차단기, 단로기, 접지장치 등을 조합하여 설치한 설비로서; 높은 절연내력을 가지는 SF₆ 가스가 금속용기에 밀폐된 콤팩트하고 안전한 고신뢰성 기기이다. GIS는 1966년 프랑스 EDF의 변전소에 최초로 사용된 이래, 국내에서도 22[kV]급 부터 765[kV]급에 이르기 까지 기간계통 및 도시과밀 지역의 중추 변전소에 적용이 확대되고 있다. GIS는 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않도록 충분한 전계강도로 설계되어 있다. 그러나 GIS는 운반, 현장조립 및 점검 등에 의하여 도체에의 돌기, 스페이서의 크랙 및 파티클 등이 발생할 수 있으며, 이러한 결함에 의한 부분방전은 GIS의 높은 전계강도에 의하여 용이하게 절연파괴에 도달할 가능성을 갖고 있다[1~4]. GIS는 내부사고 발생 시 사고부분의 추정이나 복구작업이 어려우므로 GIS의 사고를 예방하고, 변전소 무인화를 뒷받침하기 위해서는 GIS에서 발생하는 이상의 징후를 초기단계에서 찾아 내는 예방진단 기술이 중요하다.

GIS의 설치 및 정기점검시에 유입될 수 있는 파티클의 검출에는 파티클에 의하여 부분방전이 발생할 경우의 전자파를 측정하는 방법과[5~6] 파티클이 인가전계에 대응한 정전력을 받아 부상하여 반동운동(bouncing)을 할 경우 외함에 충돌하여 발생하는 음향신호를 초음파 및 진동센서로 측정하는 방법이 있다[7]. 그러나 전자파를 측정하는 방법은 반드시 부분방전이 발생하여야 하고, 높은 전계강도를 갖는 GIS에서는 부분방전이 바로 절연파괴로 도달할 가능성이 많으므로, 사고 전에 이에 대한 대책을 세우기에는 상당한 어려움이 예상된다. 따라서 GIS 내부의 파티클을 측정하기 위한 기법으로는 파티클에 의하여 부분방전이 발생되기 전단계인 파티클의 반동운동 단계에서 측정이 가능한 초음파 신호 및 진동신호의 측정기법이 효과적인 것으로 사료된다.

파티클이 외함에 충돌하여 발생하는 특정 주파수의 초음파나 진동을 측정하는 기법은 GIS 내부에서 파티클이 운전 중 열화에 의하여 발생할 가능성이

적으므로, 최근에 관심이 집중되고 있는 상시감시장치보다는 정기점검시에 이용할 수 있도록 하는 것이 바람직하며, 점검시의 짧은 시간동안에 최대한의 정보를 추출하기 위해서는 초음파 및 진동신호의 파형 및 주파수를 분석하는 것이 보다 중요할 것이다.

본 논문에서는 동축원통 전극을 이용하여 초음파 센서 및 진동 가속도계로 고유 잡음신호(background noise), 파티클의 반동운동, 부분방전 및 절연파괴시의 음향신호를 측정하고 주파수 스펙트럼을 분석하였다. 또한 파티클의 지름과 길이에 따른 음향신호의 최대진폭과 RMS 전압과의 상관관계를 측정하여 GIS내에 파티클의 존재여부 및 크기구별의 가능성을 확인하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 논문의 실험장치 구성은 그림 1과 같이 고전압 전원장치, 실험용 모의 GIS 챔버, 초음파 센서 및 진동 가속도계, 전치 증폭기, 기록장치인 오실로스코프로 구성하였다. 고전압 발생장치는 교류전압 50 [kV]까지 인가할 수 있으며, 고전압 발생장치에서 실험용 가스챔버의 부싱까지는 부분방전이 발생하지 않도록 동관을 사용하여 연결하였다.

그림 2는 모의 GIS 챔버의 개략도로서 동축 원통 구조의 GIS 내부에서 파티클이 전계에 의해 부상하여 반동운동할 수 있도록 제작하였다. 모의 GIS 챔버에서 내부원통은 고전압을 인가할 수 있도록 부싱을 통하여 연결하였으며 외부원통은 접지하였다. 내부원통과 외부원통의 간격은 15[mm]로 하였다. 이때 외부원통은 반경 200[mm], 길이 900[mm]이며, 내부원통은 반경 150[mm], 길이 300[mm]이다. 외부원통에는 파티클의 거동상태를 관찰할 수 있도록 관찰장(150×100[mm])을 설치하였다. 모의 GIS 챔버에서 파티클에 의해 절연이 파괴되지 않고 파티클이 반동운동을 할 수 있도록 질소가스를 2기압 충전하였다.

파티클이 외부원통에 충돌하는 경우와 부분방전 및 절연파괴시 음향신호의 주파수 대역을 파악하기 위하여 본 연구에서 사용한 초음파 센서는 광대역형으로 모델명은 AE-900F2, No:Q850이고 제조회사

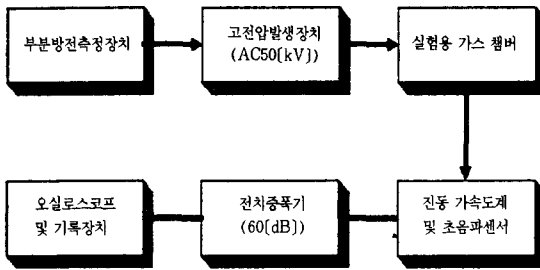


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

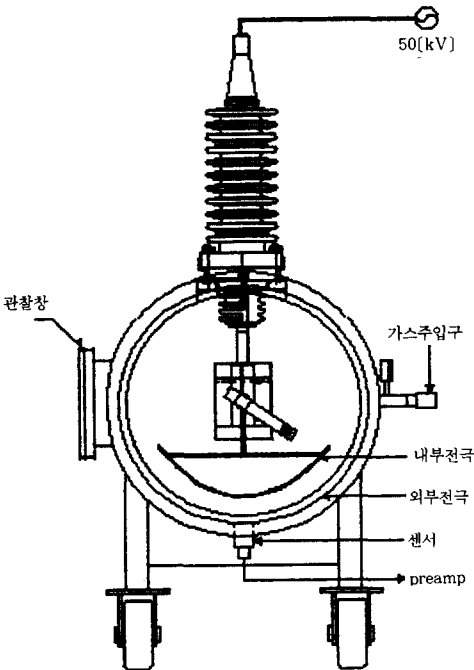


그림 2. 모의 GIS Chamber의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of the model GIS chamber

는 NF사로서, 주파수대역이 30[kHz]에서 2[MHz]까지 넓은 범위의 주파수 특성을 보유하고 있다. 일반적으로 초음파 센서는 특정한 좁은 주파수 범위에서만 민감하게 반응하는 공진형의 센서가 특정한 목적으로 사용되나[8~9], 초음파 신호의 주파수 스펙트럼 특성을 분석하기 위해서 광대역의 센서를 사용하였다. 또한 진동신호를 탐지하여 전기적인 신호로 변환시키는 진동센서는 모델 725T, S/N : 3955로 Wilcoxon Research 진동 가속도계로 주파수대역이

50[kHz]미만이고 고유 주파수가 32[kHz]인 가속도계를 사용하였다. 초음파 센서 및 진동 가속도계는 파티클이 중량에 의해 원통의 하부에 모이게 되므로 외부원통의 하부에 부착하였다.

GIS 외함에서 측정되는 음향신호의 레벨은 수십 [μV]정도로 상당히 낮은 상태이다. 따라서 측정된 음향신호를 오실로스코프로 전송하여 분석하기 위하여 60[dB]의 이득을 갖는 전치 증폭기를 사용하여 신호의 왜곡을 방지하기 위한 20[Hz]~2[MHz]대역의 주파수 특성을 갖는 것을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파티클에 의한 초음파 및 진동신호 분석

그림 3은 모의 GIS 챔버에서 측정된 초음파의 잡음신호로 그림에서 1은 초음파의 신호파형이고, A는 초음파 신호를 주파수 스펙트럼한 파형이다. 모의 GIS 챔버에서 초음파의 잡음신호의 크기는 10 [mV]이며, 약 33[kHz] 대역에서 잡음신호가 발생함을 볼 수 있다. 이것은 실험장치의 설치환경과 초음파 센서의 부착상태, 전치 증폭기와 신호분석장치 및 전원에 포함된 잡음에 의한 것으로 판단된다.

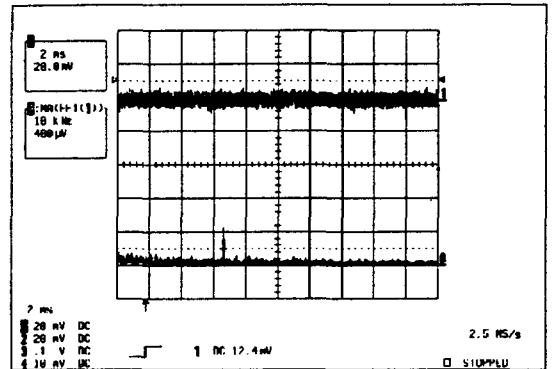


그림 3. 모의 GIS 챔버에서 초음파의 잡음신호와 주파수 분석
Fig. 3 Background noise and FFT analysis of ultrasonic signal in model GIS chamber

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 진동 가속도계를 이용하여 잡음신호를 측정된 것이다. 그림에서 2는 진동신호의 파형이고, B는 진동신호를 주파수 스펙트럼한 파형이다. 진동신호의 크기는 초음파 신호와 같이 약 10[mV]가 발생하였으며, 진동신호의

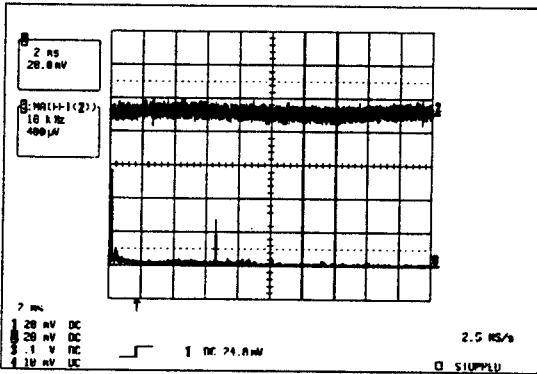


그림 4. 모의 GIS 챔버에서 진동의 잡음신호와 주파수 분석
Fig. 4. Background noise and FFT analysis of vibrational signal in model GIS chamber

주파수 스펙트럼 분석도 초음파와 같이 약 33(kHz) 대역에서 잡음이 발생하였다. 특히 진동 가속도계를 사용하였을 경우, 초음파 센서와는 다르게 약 1(kHz) 대역에서도 잡음이 측정되었다. 이는 초음파 센서는 저주파 대역에서는 감도가 떨어지지만 진동 가속도계는 저주파에서 감도가 예민하기 때문에 분석된다.

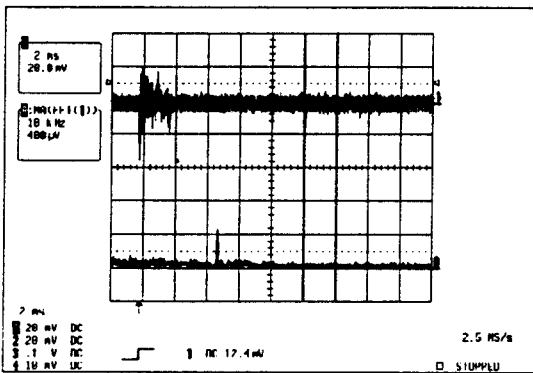


그림 5. 파티클의 충돌에 의한 초음파 신호와 주파수 분석
Fig. 5. Ultrasonic signal and FFT analysis from conducting particle bound

그림 5는 모의 GIS 챔버에서 파티클이 부상하여 외부원통에 충돌할 경우에 측정된 초음파 신호와 이 신호를 주파수 스펙트럼 분석한 파형이다. 이때 파티클은 직경 0.15(mm), 길이 1, 3, 5(mm)의 선상의 구리(copper wire)를 사용하였으며, 내부원통과 외부원통 사이에 3~4개를 자유롭게 놓아 두었다. 파티클이 없을 때는 내부원통에 인가한 전압 25(kV)

에서도 절연파괴가 발생하지 않았으나, 파티클이 존재할 때 인가전압을 증가시키면 약 7(kV)에서 부터 파티클이 기립하여 운동을 하며, 약 17(kV)에서 절연이 파괴되었다.

파티클이 외부원통에 충돌하여 발생하는 초음파와 진동신호의 크기는 약 60(mV)로서 잡음신호에 비하여 약 10(dB)정도 크게 나타났고 잔향도 2(ms) 동안 지속되어 잡음신호와의 구별이 용이하였다. 이때의 주파수 스펙트럼은 그림 3에서와 같은 약 33(kHz) 대역에서 잡음신호가 발생하였으며, 약 50(kHz) 대역까지 스펙트럼이 크게 나타났다. 그러나 그림 3과 비교하여 초음파 신호는 구별이 확실하나 주파수 스펙트럼은 구별하기가 쉽지 않았다. 주파수 스펙트럼은 측정되는 신호의 크기가 작고 초음파 센서의 고유 주파수가 2(MHz)인 광대역으로 저주파 대역에서는 감도가 예민하지 못하기 때문에 판단 된다.

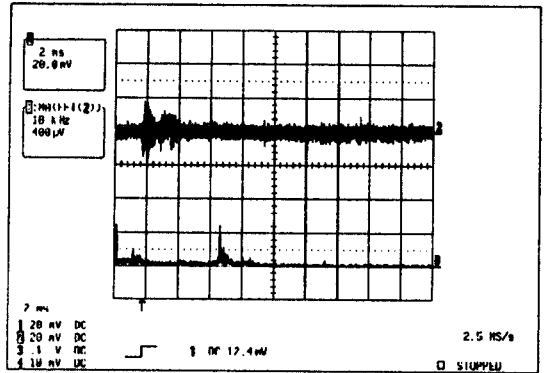


그림 6. 파티클의 충돌시 진동신호와 주파수 분석
Fig. 6. Vibrational signal and FFT analysis from conducting particle bound

그림 6은 그림 5와 같은 조건에서 진동 가속도계를 이용하여 측정된 진동신호와 이 신호를 주파수 스펙트럼 분석한 파형이다. 파티클이 외부원통에 충돌하여 발생한 진동신호의 크기는 약 40(mV)가 측정되었으며, 초음파 신호와 같이 약 2(ms)동안 잔향이 발생하였다. 이때의 주파수 스펙트럼은 그림 4와 같이 약 1(kHz) 대역과 33(kHz) 대역에서 잡음이 발생하였으며, 10(kHz)이하 주파수 대역과 30~40(kHz) 주파수 대역에서 큰 신호가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 GIS내의 파티클을 측정하기 위해서

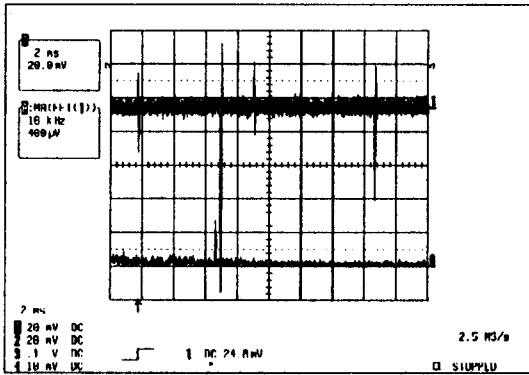


그림 7. 파티클에 의한 부분방전시 초음파 신호와 주파수 분석
Fig. 7. Ultrasonic signal and FFT analysis from partial discharge by particle

는 낮은 주파수 대역에서 감도가 예민한 진동 가속도계를 이용하는 것이 보다 측정이 용이함을 알 수 있다.

파티클이 부상하면 내부원통과 외부원통 사이에서 인가전압에 따라 반동운동을 하는데, 이 상태에서 계속하여 인가전압을 상승시키면 파티클에서 부분방전이 발생한다. 그림 7은 파티클이 외부원통에 충돌할 경우의 신호와 부분방전시 발생하는 신호와 구별하기 위하여, 파티클에서 부분방전이 발생할 경우에 초음파 센서로 측정된 신호이다.

파티클에서 부분방전이 발생하는 경우는 외부원통에서 기립하여 파티클 끝에서 전계집중에 의해 내부원통으로 부분방전이 발생하는 경우, 파티클이 원통 사이를 반동운동하는 중에 파티클이 외부원통으로 부분방전이 발생하는 경우 및 내부원통에 부착하여 외부원통을 부분방전이 발생하는 경우로 구분할 수 있으며, 이때 전압을 더욱 증가시키면 절연파괴가 발생하게 되고, 경우에 따라서는 일정 전압에서도 부분방전이 절연파괴로 이어지는 경우도 발생하였다. 부분방전의 발생은 부분방전 측정장치의 방전전하량과 방전파형으로 확인하였으며, 그림 7의 부분방전시는 약 40(pC)의 부분방전 전하량이 나타났다. 부분방전시 신호는 파티클이 외부원통에 충돌할 때의 신호와 같은 잔향이 발생하지 않으므로 구별이 가능하였다. 이와 같이 부분방전이 발생할 경우의 방전펄스 경로는 고전압 전극과 외부원통이 되므로

외부원통 하부에 부착한 초음파 센서 및 진동 가속계에서 충격성 부분방전 펄스를 측정 가능하였다.

그림 8은 파티클에서 부분방전이 발생할 경우에 진동 가속도계로 측정된 신호와 주파수 스펙트럼 분석한 파형으로서 센서에서 측정된 신호는 부분방전에 의하여 방전펄스가 한 주기당 약 4번 측정되었으며, 그림 6에 비하여 잔향이 나타나지 않는 펄스성의 신호가 측정되었다. 따라서 파티클이 외부원통에 충돌할 경우의 음향 신호와 부분방전에 의한 방전펄스는 측정된 신호의 잔향으로 쉽게 구별이 가능하다. 이때 초음파 및 진동신호의 주파수 스펙트럼은 100(kHz)까지 잡음신호와 구별되지 않았다.

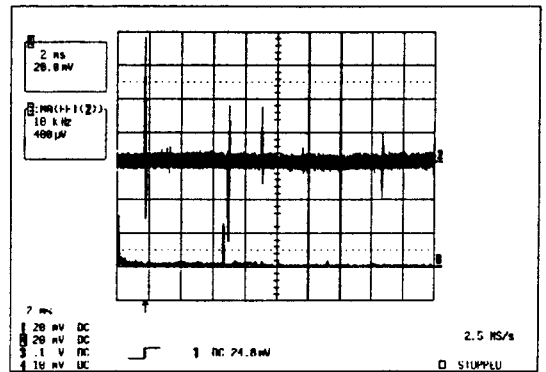


그림 8. 파티클에 의한 부분방전시 진동신호와 주파수 분석
Fig. 8. Vibrational signal and FFT analysis from partial discharge by particle

그림 9와 그림 10은 파티클이 외함에 충돌할 경우의 음향신호와 절연파괴시 측정되는. 음향신호를 구별하기 위해 초음파 센서와 진동 가속도계로 측정된 신호로서, 절연파괴시방전량은 수백(pC)으로 나타났으며, 초음파 신호의 크기는 7~8(V)이고, 진동신호의 크기는 약 40(V)로 측정되었다. 파티클에 의하여 절연이 파괴될 경우의 음향신호는 파티클이 외함에 충돌할 경우의 음향신호와 비교할 때 상당히 큰 신호가 발생하여, 구별이 용이하였다. 절연이 파괴된 경우에 초음파 센서와 진동 가속도계에서 측정된 신호의 주파수 스펙트럼을 분석한 결과, 그림 9의 초음파 신호는 파티클의 충돌에 의한 음향신호와 다르게 잔향이 발생하지 않고 방전펄스가 약 2(ms)동안 계속하여 발생하다가 약 5(ms)후에 다시

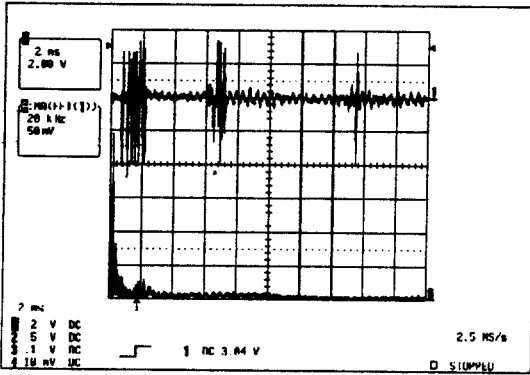


그림 9. 파티클에 의한 절연파괴시 초음파신호와 주파수 분석
Fig. 9. Ultrasonic signal and FFT analysis from insulation breakdown by particle

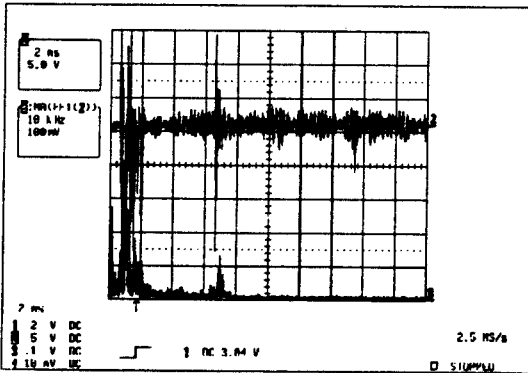


그림 10. 파티클에 의한 절연파괴시 진동신호와 주파수 분석
Fig. 10. Vibrational signal and FFT analysis from insulation breakdown by particle

방전 펄스가 약 1[ms]동안 발생하였으며, 약 10 [ms]후에 또다시 방전이 한 번 발생한 것으로 나타났다. 이때의 주파수 스펙트럼은 10[kHz]이하 대역에서 큰 신호가 발생하였다. 그림 10의 진동 가속도계로 주파수 스펙트럼을 분석한 결과는 10[kHz]이하 대역과 30~40[kHz] 대역에서 큰 신호가 발생하여 절연파괴시의 신호와 파티클 충돌시의 신호 및 부분방전시 신호는 구별이 용이하였다.

3.2 파티클의 크기에 따른 진동신호의 분석

파티클에 작용하는 정전력이 중력보다 클 때 파티클은 부상하며, 반동운동하는 파티클의 거동은 파티클에 작용하는 힘과 이물질의 형태, 크기 및 인가전압 파형에 따라 변화한다. 본 연구에서는 밀폐화된

GIS 내부에 파티클이 존재할 경우에 GIS 외부에서 초음파 및 진동센서로 GIS 내부의 파티클의 크기를 추정하기 위하여 선형구리 파티클을 지름(0.45, 0.26, 0.15, 0.1[mm]), 길이 2[mm] 단위로 2~20[mm]까지 변화시키면서, 높이는 10[mm]에서 떨어뜨릴(dropping)때 파티클의 크기와 측정신호와의 상관관계를 분석하였다. 파티클의 반동운동은 주파수 대역이 낮으므로 초음파 센서보다는 낮은 주파수 대역에서 감도가 높은 진동 가속도계로 측정하는 것이 바람직하므로, 본 연구에서는 진동 가속도계만을 사용하였다.

그림 11은 파티클을 직경별로 2[mm]씩 20[mm]까

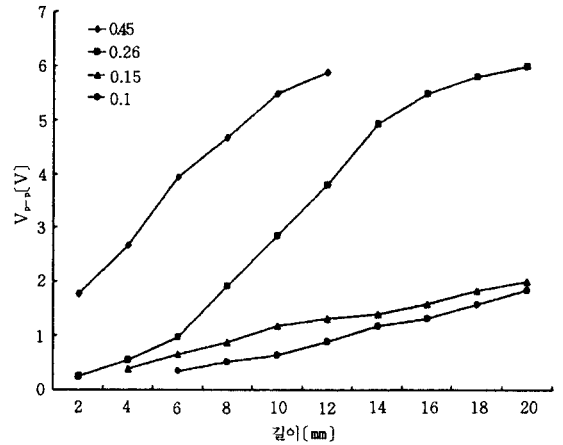


그림 11. 파티클의 길이와 진동신호의 최대진폭과의 관계
Fig. 11. Relationship between peak amplitude of vibrational signal and length of conducting particle

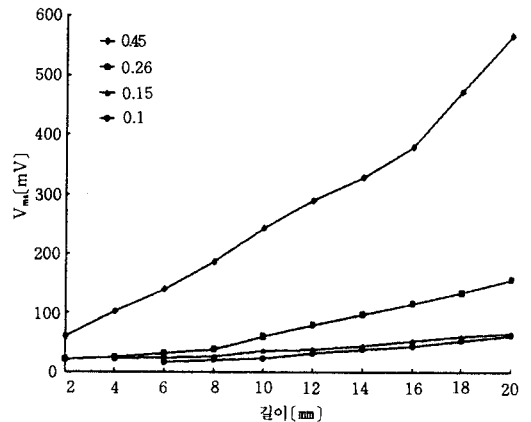


그림 12. 파티클의 길이와 진동신호의 RMS 전압과의 관계
Fig. 12. Relationship between RMS voltage of vibrational signal and length of conducting particle

지 길이를 변화시키면서 측정된 파티클의 길이에 대한 진동신호의 최대진폭을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 파티클의 길이가 길어짐에 따라 측정되는 진동신호의 최대진폭도 선형적으로 증가하였다.

그림 12는 그림 11과 같은 조건에서 파티클의 길이에 따른 진동신호의 RMS 전압과의 관계를 나타낸 것이다. 파티클의 길이가 길어짐에 따라 측정되는 진동신호의 RMS 값도 선형적으로 증가하여, 길이 20[mm]일때의 RMS 전압은 566[mV]로 나타났다.

따라서 GIS 외함에서 측정되는 진동신호의 최대진폭이나 RMS 전압으로 GIS 내부에서 반동운동하는 파티클의 크기를 추정가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

GIS 내부에 파티클이 존재할 때 초음파 신호, 진동신호 및 주파수 스펙트럼을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파티클이 GIS 외함에 충돌할 때 발생하는 음향신호는 초음파 센서 및 진동가속도계로 검출이 가능하였으며, 10[kHz]미만과 30~40[kHz] 주파수 대역에서 큰 신호가 발생하였다.

(2) 측정된 파형분석으로 고유진동 잡음, 파티클의 충돌, 부분방전, 절연파괴를 구별 가능하다.

(3) 파티클이 반동운동 할 때 길이가 길수록 측정되는 진동신호의 최대진폭 및 RMS 전압이 크게 나타나, 밀폐화된 GIS 외부에서 GIS 내부 파티클의 크기 추정이 가능하였다.

참 고 문 헌

[1] Li Ming, et. al., "Behaviour and effect of conducting particles under AC voltage in a gas insulated electrode system," IEEE Trans. PD, Vol. 3, No. 1, pp. 159~164, 1988.

[2] A.H. Cookson, et. al., "Recent research in the United States on the effect of Particle contamination reducing the breakdown voltage on compressed gas-insulated systems," CIGRE paper, 15~09, 1976.

[3] 小林伸光, 柳父悟, "GISに混入した金屬異物の變動解析と絶縁破壊の理論的検討(交流電壓)," 全學論 B, 108卷, 4, 1988.

[4] B. Mazurek, J.D. Cross and R.G. van Heeswijk, "The effect of a metallic particle near a spacer on flashover phenomena in SF6," IEEE Trans. Electrical Insulation Vol. 28, No. 2, pp. 219~229, 1993.

[5] B.F. Hampton, T. Irwin and D. Lightle, "Diagnostic Measurements at Ultra High Frequency in GIS," CIGRE Paper, 15/33~01, 1990.

[6] J.S. Pearson, B.F. Hampton and Sellars, "A continuous UHF monitor for GIS," IEEE Trans. Electrical Insulation, vol. 26, No. 3, pp. 469~478, 1991.

[7] L.E. Lundgard, M. Runde and B. Skyberg, "Acoustic Diagnosis of Gas Insulated Substations : A Theoretical and Experimental Basis," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp. 1751~1759, 1990.

[8] 곽희로, 권동진 등, "초음파 센서를 이용한 변압기 예방진단 기술 연구," 한국조명 전기설비학회지, Vol. 8, No. 2, pp.46~53, 1994.

[9] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예방진단에 관한 연구," Ph.D. University of Soong Sil, 1995.

◆ 著 者 紹 介 ◆



조국희(趙國熙)

1960년 1월13일생. 1987년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 숭실대 대학원 전기공학과(석사). 1994년 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한국전기연구소 선임연구원.



권동진(權東震)

1963년 1월20일생. 1986년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 전력연구실 선임연구원.



곽희로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales대 대학원 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년 미국 MIT 방문교수, 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수, 공과대학 학장.