

모의 GIS 내부에 도전성 이물질 존재시 부분방전 진전에 따른 전자파 측정에 의한 절연진단연구

(A Study on the Insulation Diagnosis to measure Radiated Electromagnetic Waves with Partial Discharge Propagation at being of Conductive Particle in model GIS)

박광서*

(Kwang-Seo Park)

요 약

본 논문에서는 모의 GIS 내부에 도전성 파티클을 놓아둠으로써 전하의 축적과 전계의 집중이 용이하도록 하여 부분방전을 모의하였다. 이때 부분방전 발생과 진전에 따른 방사전자파를 스펙트럼 분석기와 EMI·EMC 측정용 안테나(30~2000[MHz])를 사용하여 측정·분석하였다. 모의 GIS 내부에 도전성 파티클 존재에 따른 부분방전의 검출과 방진전전 과정의 판단을 위한 절연진단의 방법으로써 본 논문에서 제안한 측정 주파수의 대역의 분리와 데이터 측정과 분석법을 이용하면 부분방전의 검출과 방전과정의 판단이 가능함을 확인하였다.

Abstract

Partial discharge were simulated by conductive particle which could be easy accumulated charge and concentrated electric field in the model GIS. Radiated electromagnetic waves were measured and analyzed by using spectrum analyzer and antenna (30~2,000[MHz]) for measurement of EMI·EMC in accordance with occurrence and propagation of partial discharge. This paper suggested the other method of detecting and estimating of partial discharge for insulation diagnosis of GIS being conductive particle by measurement and analysis of radiated electromagnetic waves. From results of this study, it was confirmed that if the suggested method should be used for the diagnosis of insulation in the model GIS being conductive particle, detecting partial discharge and estimating discharge propagation will be possible.

Key Words : Radiated Electromagnetic Waves, Conductive Particle, Partial Discharge, Insulation Diagnosis

1. 서 론

가스절연개폐장치(GIS)는 40년 전부터 상업화가 시작되어 현재 22[kV]급에서 765[kV]급까지 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 GIS를 포함한 전력설비의 안정성 확보를 위한 절연진단 기술 등이 최근 많

* 주저자 : 경일대학교 제어전기공학부 전임강사
Tel : 053-850-7157, Fax : 053-850-7602
E-mail : kspark@kiu.ac.kr
접수일자 : 2007년 12월 10일
1차심사 : 2007년 12월 11일
심사완료 : 2007년 12월 18일

이 연구되어지고 있다. 전기적 사고의 전구현상인 부분방전 검출을 위한 하나의 방법으로서 방사전자파를 측정·분석하는 방법이 있다[1-2]. 이것은 고전계가 집중된 곳에서 발생하는 부분방전펄스에 의한 전자파를 안테나 센서와 스펙트럼 분석기를 이용하여 방사잡음을 측정·분석함으로써 전기적 이상 유무를 판정하는 방법이다. 이와 같은 방법은 현재까지 전력설비의 실제 현장에 적용한 사례가 있으며 꾸준히 연구되고 있다[3-4].

현재 국내에는 외국의 UHF 안테나 센서를 도입하여 부분방전 신호 처리에 관한 연구가 주로 진행되고 있지만 UHF 절연진단의 핵심부품인 신뢰성 있는 UHF 센서의 개발에는 취약점이 있다고 판단된다.

특히 외부 노이즈 처리의 문제 등으로 UHF 센서의 측정 대역을 500[MHz] 이상으로 주로 설정하고 있다[3]. 그러나 비교적 외부노이즈 영향이 적은 내장형 센서의 경우 500[MHz] 이하의 대역에서도 관심을 가질 필요가 있고 노이즈 필터링 기술이 좀더 보완된다면 전기적 사고의 전구 현상인 부분방전 초기단계에선 500[MHz] 이하의 대역에서 신호가 더 잘 발생된다.

이러한 점에 착안하여 본 연구는 신뢰성 있는 EMI*EMC 측정용 UHF대역 안테나를 이용하여 방전진전과정의 방사전자파를 30~300[MHz], 300~1000[MHz]대역으로 나누어 측정하여 데이터 처리를 통한 절연진단의 방법을 제시하고 그 가능성을 확인하려 하였다.

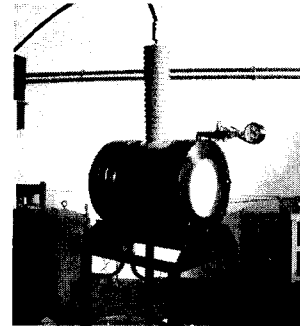
따라서 본 논문에서는 현재 SF₆ 가스를 이용한 고압 가스 절연개폐장치(GIS)에서 발생할 수 있는 전기적 결합인 도전성 파티클이 존재할 경우 부분방전의 발생과 진전에 따른 방사전자파를 신뢰성 있는 EMI·EMC 측정용 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정·분석함으로써 부분방전이 발생하는 주파수 대역을 설정하고 또한 부분방전의 발생과 방전진전 과정을 판단하려 하였다.

2. 실험장치 및 방법

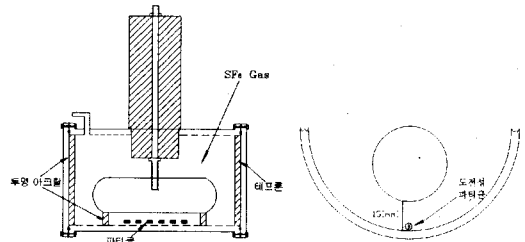
그림 1은 본 실험을 위해 설계 제작한 실험용 모의

GIS의 개략도와 사진이다. 모의 GIS의 최대 인가전압은 200[kV]이고 최대 압력은 10기압까지 압력 상승 및 압력유지가 가능하도록 제작하였다. 실제 실험에서는 모의 GIS의 내부 압력은 4기압을 유지하였다. 또한 그림 1에서 보는 바와 같이 실제 GIS의 버스 바 모양을 모의하기 위해 원통형 바닥 위에 원통형 전극을 사용하였으며, 원통형전극의 끝부분은 전계집중을 없애기 위해 반원형으로 처리하였다. 원통형 전극과 바닥과의 거리는 3[mm]~50[mm]까지의 조정이 가능하다.

모의 GIS의 한쪽부분은 내부 방전의 현상 관측을 용이하게 하기 위해 투명 아크릴을 이용하여 제작하였고 다른 한쪽 부분은 방사전자파의 투과가 다른 절연물체에 비하여 감쇄가 적은 테프론을 이용하여 제작하였다.



(a) 실험용 챔버 사진



(b) 실험용 챔버 개략도 (c) 부분방전 모의

그림 1. 모의 GIS 실험용 챔버 사진과 개략도

Fig. 1. Picture of experimental chamber of model GIS and schematic Diagram

SF₆ 가스를 주입하기 전에는 가스 챔버의 내부를 청소하고 로타리 펌프(Rotary Pump)를 사용하여 약 10⁻⁴[Torr]까지 진공을 시킨 후 모의 GIS 내부에

불순물이 없도록 조치 후 SF₆ 가스를 주입하였다. 원통형 바닥면과 모의 버스바 사이에 원통형 유전체 파티클(직경: 1[mm], 길이: 1[mm]) 20개를 놓아 두었다.

그림 2는 실험 장치의 개략도이다. 점선 부분은 전원부분으로 교류 고전압을 사용하였다. 또한 입력 고전압을 측정하기 위해 분압기를 사용하였다. R_i(50[Ω])은 방전진전에 따른 부분방전의 전류파형을 측정하기 위한 무유도 저항이며, 전류 파형의 측정은 Digital Oscilloscope(Lecroy 9350AL)와 미소 전류를 측정하기 위해 증폭기가 내장된 Active probe를 사용하였다.

그리고 방전진전에 따라 방사되는 전자파의 측정과 분석을 위하여 EMI·EMC 측정용인 BiConiLog 안테나(EMCO3142) 및 스펙트럼 분석기(Advantest R3131A)를 이용하였다.

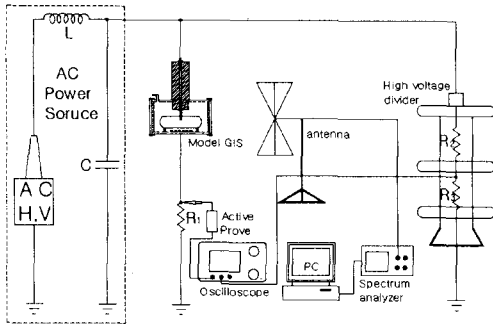


그림 2. 실험장치의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

본 연구의 실험방법은 먼저 전압 인가속도를 약 1[kV/sec]의 속도로 일정하게 상승시켜 전극간의 절연파괴전압은 5회 측정하여 평균한 전압 값을 구하였다. 모의 GIS 내부에 유전체들의 존재에 따른 부분방전을 모의하면서 부분방전의 발생에서 절연 파괴 되는 단계별로 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 관찰하기 위해 절연파괴전압 보다 낮은 전압을 3[kV]씩 상승인가 후, 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용한 다양한 기초실험을 통해 모의 GIS 내부에 부분방전 발생 및 진전에 따른 방사전자파의 측정에 유리한 안테나의 최적 측정주파수, 방사전자파

측정방법, 데이터 취득방법 등을 설정 후 실험을 하였다.

방사전자파의 주파수 스펙트럼을 측정된 데이터를 스펙트럼 분석기에서 GPIB로 데이터를 컴퓨터에 전송하여 분석하였다.

이 때 전극 중심부와 안테나 사이의 거리는 방사전자파의 감쇄특성 및 실험상 안전거리등을 고려하여 1[m]로 고정하여 두고 실험을 하였다. 안테나의 각도는 전계강도를 측정하기에 유리하도록 전류의 흐름 방향과 동일하게 대지에 대하여 수직으로 배치하였다.

본 실험에서 30~2000[MHz] 대역의 안테나를 이용하여 다양한 방법으로 관측한 결과 30~300[MHz] 대역과 300~1000[MHz] 대역을 나누어 데이터를 취득함이 부분방전의 발생과 진전을 구분함이 유리하다고 판단되어 2가지 대역으로 나누어 방사전자파를 측정 분석하였다.

또한 실제 전력설비의 절연진단에 응용하기 위해서 노이즈가 존재하는 일상의 공간에서 부분방전시 방사전자파를 측정 분석하여 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포를 연구함이 필요할 것이다. 그러므로 방사전자파 측정시 주변환경의 기저 외부 잡음을 측정하여 방사전자파의 분석에 적용하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 안테나 인자를 고려한 측정주파수 대역에서 주변 노이즈의 전계강도를 측정한 그림이다.

그림 3에서 표시한 부분에 라디오와 TV 방송주파수 대역의 신호가 잘 나타나고 있다. 본 실험에서는 이러한 대역에서 부분방전 신호와 노이즈 신호 구별의 오류를 피하기 위해 80~110[MHz], 180~190[MHz], 860~900[MHz]의 대역에서 방전진전에 따른 방사전자파의 신호를 무시하도록 하였다.

1회 측정된 데이터는 500개이고 데이터 취득 방법은 신호의 정의 값을 sweep time 5초 동안 10회 측정된 평균값을 취득하였다. 데이터 취득시간 50초간 실험실 주변의 기기에서 Switching 동작(on, off)이 발생하지 않도록 하였다.

모의 GIS 내부에 도전성 이물질 존재시 부분방전 진전에 따른 전자기 측정값에 의한 절연진단연구

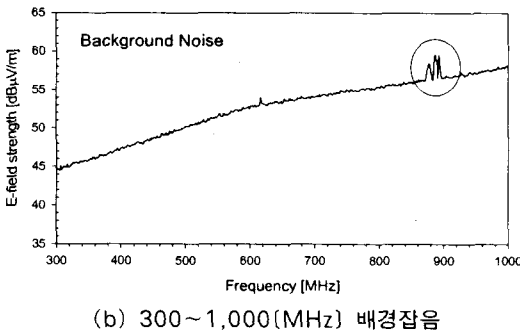
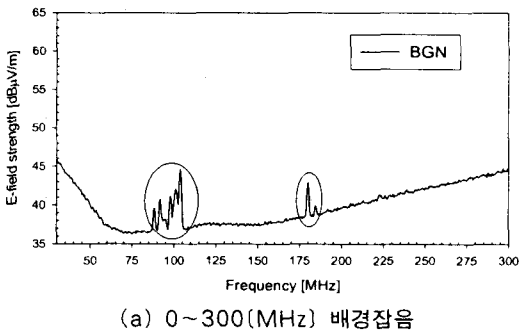


그림 3. 주변 배경 잡음
Fig. 3. Back ground noise

그 밖의 미약한 노이즈 신호는 본 실험의 데이터 취득방법으로 제거가 가능하였다. 만약 스위칭 동작에 의해 주변에 불요 노이즈가 침입하더라도 불요 노이즈는 특히 강도가 크며 분석기 화면상에 주기성을 갖지 않는 일회성의 신호임을 알 수 있어 부분방전 신호와 쉽게 구별되므로 다시 실험을 하여 데이터를 취득하였다.

그림 4는 모의 GIS 내부에 금속 파티클 존재시 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포이다. 각 인가전압 별로 측정된 방사전자파 데이터에서 그림 3의 주변 배경잡음을 뺀 데이터를 나타낸 것이다.

본 논문에서는 배경 잡음과 구별되는 부분방전 신호의 판단은 30~300[MHz] 대역의 경우 배경잡음보다 전계강도가 2[dBμV/m] 이상 증가한 데이터의 검출과 배경잡음보다 5, 10, 15, 20, 25[dBμV/m] 이상의 전계강도 증가, 30~300[MHz] 데이터의 인가전압 별로 평균전계강도의 증가량, 300~1000[MHz] 대역

에서는 방송 대역을 제외하고 1[dBμV/m] 보다 큰 데이터의 검출 등으로 판단하려 한다. 모의 GIS내부에 원통형 전극과 바닥 면과의 Gap은 15[mm]로서 1[kV/sec]의 속도로 전압을 인가시 완전절연과파괴가 발생하는 평균절연과파괴전압(이하 V_B)은 약 48.5 [kV] 정도이다.

그림 4에서 17[kV]인가부터 최초의 부분방전 신호라고 판단되는 65[MHz] 부근에서 5[dB] 이상 전계강도가 증가한 데이터가 검출된다. 300~1000 [MHz] 대역에서 TV 방송대역인 860~900[MHz] 대역을 제외하고 부분방전 신호의 검출되지 않았다.

즉 금속파티클 존재시 방전진전의 초기 1단계인 부분방전의 발생은 65[MHz] 부근에서 5[dB] 이상의 데이터 검출로써 판단할 수 있다. 이때 모의 GIS 내부를 관측한 결과 금속 파티클의 움직임의 거의 없었으나 미세한 방전 전류가 오실로스코프에 나타나기 시작하였다(그림 8의 (a)).

20[kV]인가에는 65[MHz] 부근에 10[dB]이상의 데이터가 검출되고 전계강도가 증가하였고 45[MHz], 152[MHz] 부근에 2[dB] 이상의 데이터 검출이 시작되었다. 그러나 300~1000[MHz] 부근에서는 본 분석법에 의해서는 부분방전 신호의 검출이 없었다.

즉 65[MHz] 부근에 10[dB]이상의 데이터 검출과 45, 152[MHz] 부근의 2[dB] 이상의 데이터 검출로써 본 실험의 분석법에 의해 방전 초기 2단계라고 판단하였다. 이때 모의 GIS 내부관측 결과, 금속파티클의 미세한 진동을 시작하였다.

23[kV]인가는 20[kV] 인가와 동일하나 65[MHz] 부근 그리고 45, 152[MHz] 부근에서 방전신호의 검출은 동일하나 그 데이터의 수와 전계강도가 증가하였다. 특히 32[MHz] 부근에 2[dB]이상의 데이터 신호 검출이 시작되었다.

즉 65[MHz] 부근에 10[dB]이상의 데이터 검출과 45, 152[MHz] 그리고 32[MHz] 부근의 2[dB] 이상의 데이터 검출로써 본 실험의 분석법에 의해 방전 초기 3단계라고 판단하였다. 이때 모의 GIS 내부관측 결과, 금속파티클의 진동은 초기 2단계의 경우보다 좀더 움직임이 활발하였다.

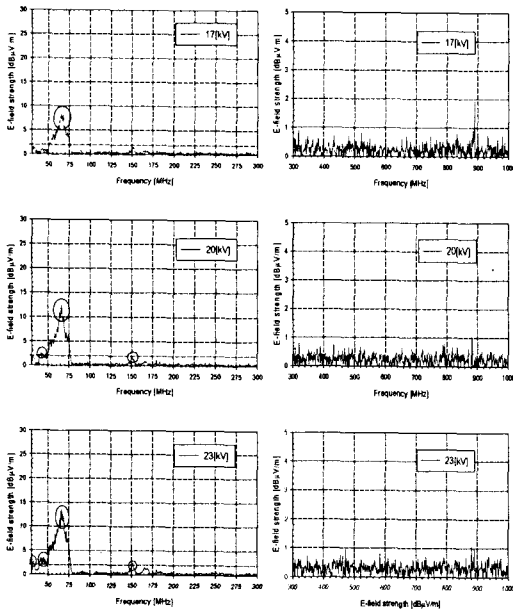


그림 4. 14~23(kV) 인가 시 주파수 스펙트럼
Fig. 4. Frequency spectrum with 14~23(kV)

그림 5는 26~29[kV] 인가시 방사전자파의 스펙트럼 분포이다. 26[kV] 인가시 65[MHz] 부근에 전계강도 10~15[dB] 증가와 32, 45, 152[MHz] 부근에서 전계강도 2[dB] 이상의 증가한 데이터의 검출은 23[kV]인가와 동일하나 그 데이터 수와 전계강도가 증가하였다. 특히 167[MHz] 부근에서 전계강도 2[dB] 이상 증가한 데이터가 검출되기 시작하였다. 300~1000[MHz] 대역에서는 방전진전 데이터 신호의 검출이 어려웠다.

즉 65[MHz] 부근의 10~15[dB] 이상의 데이터 검출, 34, 45, 152[MHz], 그리고 167[MHz] 부근의 2[dB] 이상의 데이터 검출로서 본 논문의 분석 방법에 의해 방전진전 주기 1단계라 판단하였다. 이 때 모의 GIS 내부의 금속파티클의 움직임이 활발하였다.

그림 5에서 29[kV] 인가시 65[MHz] 부근에 전계강도 10~15[dB] 증가와 32, 45, 152, 167[MHz] 부근에서 전계강도 2[dB] 이상 증가한 데이터의 검출은 23[kV] 인가와 동일하나 그 데이터 수와 전계강도가 증가하였다. 특히 252[MHz] 부근에서 전계강도 2[dB] 이상 증가한 데이터가 검출되기 시작하였다. 300~1000[MHz] 대역에서는 방전진전 데이터 신호

의 검출이 되지 않았다.

즉 65[MHz] 부근의 10~15[dB] 이상의 데이터 검출, 34, 45, 152, 167[MHz] 그리고 252[MHz] 부근의 2[dB] 이상의 데이터 검출로서 본 논문의 분석 방법에 의해 방전진전 주기 2단계라 판단하였다. 이때 모의 GIS 내부의 금속파티클의 움직임이 더욱 활발하고 그 진동 높이의 폭이 증가하였다.

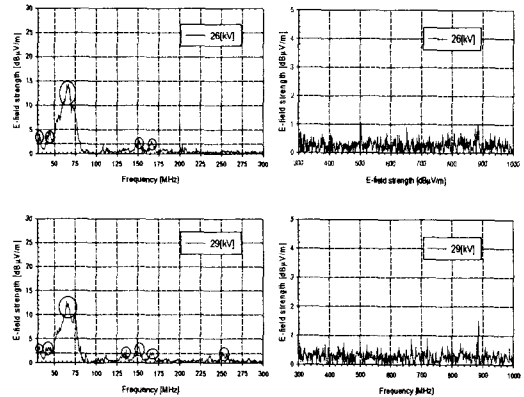


그림 5. 26~ 29(kV) 인가 시 주파수 스펙트럼
Fig. 5. Frequency spectrum with 26~29(kV)

그림 6은 32~35[kV] 인가시 방사전자파의 스펙트럼 분포이다. 32[kV] 인가시 30~300[MHz] 전 대역에서 전계강도가 2[dB] 이상 증가하였다. 65 [MHz] 부근에 전계강도 20[dB] 이상 증가한 데이터가 검출되고 32, 45[MHz] 부근에는 5[dB]~10[dB] 증가한 데이터가 검출되고, 135, 152, 167[MHz] 부근에서 전계강도 10[dB] 이상의 증가한 데이터의 검출 된다. 그 밖에 32[kV] 인가전까지 부분방전 신호가 나오지 않았던 대역인 220~260[MHz] 부근에서 전계강도 5[dB] 이상의 증가 데이터가 검출된다. 그러나 300~1000[MHz] 대역에서는 방전진전 데이터 신호의 검출이 어려웠다.

즉 30~300[MHz] 전 대역에서 2[dB] 이상 증가, 65[MHz] 부근에 20[dB] 이상 데이터 그리고 32, 45[MHz] 부근에는 5[dB]~10[dB] 이상 데이터의 검출로서 부분방전 말기 1단계의 판단이 가능하다. 이 때 모의 GIS 내의 금속 파티클은 활발히 상하진동을 한다.

그림 6에서 35[kV] 인가시 32[kV]와 비교하여 10

0~300[MHz] 부근에는 전계 강도가 약간 감소하나 300~1000[MHz] 대역에서 본 논문에서 판단하는 방전 신호의 검출이 시작되었다.

즉 30~300[MHz] 대역에서 2[dB] 이상, 45[MHz] 부근에 10~15[dB] 증가한 데이터와 특히 300, 360, 380[MHz] 부근에 1~2[dB], 430[MHz] 부근에 2~3[dB] 증가한 데이터가 검출로서 절연과피 말기의 마지막 단계인 절연과피 직전의 단계라고 판단된다. 이때 모의 GIS 내부의 금속 파티클은 상하 진동이 심하고 또한 서로 연결되어 사다리 형태를 이루려고 하고 원통형 전극에 부착되기도 한다.

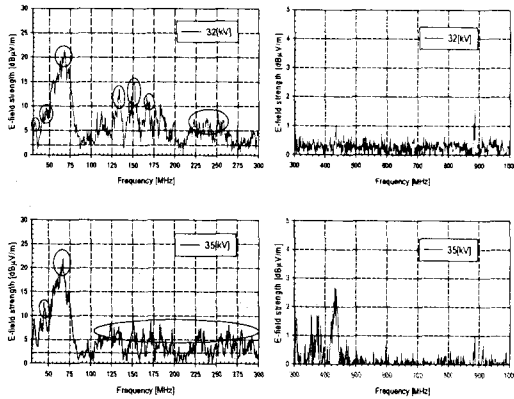


그림 6. 32~ 35(kV) 인가 시 주파수 스펙트럼
Fig. 6. Frequency spectrum with 32~35(kV)

그림 7은 모의 GIS 내부에 금속 파티클 존재시 방전진전에 따른 30~300[MHz] 대역에서 주변 배경잡음보다 증가한 평균전계강도(이하 E_{ave})를 나타낸 것이다. 인가전압 증가에 따른 방전진전에 의해 E_{ave} 는 전체적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 부분방전 발생과 방전초기 단계인 17~23[kV]인가의 경우 약 0.72~1.23[dB] 정도 증가하였다. 방전진전 중기단계인 26~20[kV]인 경우 1.62~1.63[dB] 정도 증가하였다. 방전진전 말기 단계인 32~35[kV]인가의 경우 5.1~6.38[dB] 정도 증가하였다.

즉 0.5~1.5[dB] 증가면 부분방전 초기단계, 1.5~2[dB] 증가하면 부분방전 중기단계, 2~7[dB] 증가하면 부분방전 말기단계로 판단이 가능하다.

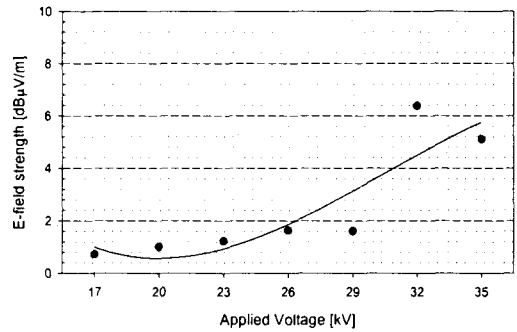


그림 7. 방전진전에 따른 평균전계강도
Fig. 7. Average electric field strength

그림 8은 모의 GIS 내부에 금속 파티클 존재시 방전진전과정에 따른 전압과 전류파형을 나타낸 것이다. 그림 8의 (a)에서 최초 부분방전의 발생의 시작은 인가전압이 17[kV]일 때부터 정극성 전압 부근에서 전류 펄스가 발생되고 인가전압이 20[kV]인 그림 8의 (b)에서 정극성 전압 부근 전류펄스의 크기가 증가되고 부극성 전압 부근에서 미세한 전류 펄스가 발생하기 시작하였다. 이러한 경향은 26[kV] 인가의 경우까지 증가하였다. 그림 8의 (e)부터 부극성 전압 부근에 급격한 전류펄스가 나타나기 시작하였으며 전압을 증가할수록 이러한 전류펄스의 크기는 증가한다. 방전진전 말기 단계인 그림 8의 (f), (g), (h) 단계인 32, 35, 38[kV] 인가의 경우 부극성 전압 부근에 급격한 정 전류펄스 외에 정극성 전압부근에 급격한 부 펄스전류가 검출되기 시작하였다. 즉 이러한 단계는 방전말기 단계인 절연과피 단계로 진전됨을 의미한다.

위의 실험결과를 살펴보면 현장 적용에는 접지선으로 3상 불평형 전류와 누설전류가 흘러 미약한 방전 전류와 구별이 어렵다. 그러나 실험실적 측정에는 미약한 방전전류의 측정에 신뢰성이 가장 높은 유선을 통한 오실로스코프와 Active Probe에 의해 관측되는 부분방전의 전압 전류 파형과 안테나와 Spectrum Analyzer에 의해 방사전자파를 측정 분석하는 본 실험의 방법을 비교하여 볼 때 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 모의 GIS 내부에 금속 파티클 존재시 방전진전에 따른 방전진전과정의 판단 및 방전상태의 예측을 위한 데이터를 검출하는 본

