

## GIS 절연진단센서 설계와 연면방전에 따른 방사전자파 특성

(A Design of Insulated Diagnosis Sensor and the Characteristics of Frequency Spectrum from the Radiated Electromagnetic Waves according to Surface Discharge)

박승규\* · 최은혁 · 이광식\*\*

(Sung-Gyu Park · Eun-Hyeok Choi · Kwang-Sik Lee)

### Abstract

If obstacle in GIS(Gas Insulated Switchgear), its affects are great are on the community and it is consequently demanded lots of difficulties to recover and repair. Accordingly, diagnosis techniques, that are able to prevent from accidents before they happen by providing more stable and highly reliable power effectively and finding sign of the accidents is very important. A novel UHF(Ultra High Frequency)-microstrip antenna is presented. The measured impedance bandwidth of the proposed antenna is from 0.5GHz to 15GHz with the stop band from 0.5GHz to 10.7GHz for VSWR<2. Form results of this study, The antenna is will play an important role for the sensor for insulation diagnosis system by UHF method of real site GIS and power equipment using SF<sub>6</sub> gas

Key Words : UHF, GIS, Microstrip Antenna, Insulation Diagnosis

### 1. 서 론

고압가스를 절연매체로 하는 가스절연개폐장치나 변압기 등과 같은 고전압 전력기기는 신뢰성 향상을 위해 기기의 운전 중에 이상 유무를 검출할 수 있는

\* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 박사과정

\*\* 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수

\* Main author : Doctor's course, Department of Electrical Engineering at Yeungnam University

\*\* Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering at Yeungnam University

Tel : 053-810-3953, Fax : 053-810-4767

E-mail : kslee@yu.ac.kr

접수일자 : 2011년 11월 11일

1차심사 : 2011년 11월 16일

심사완료 : 2012년 9월 14일

상시감시 시스템체제 구축이 대단히 중요하다.

대표적인 전력기기인 GIS(Gas Insulated Switch-gear)는 설계 및 운전 중에 결함이 존재할 경우 운전 시간이 경과함에 따라 이 결함에 의해 절연열화가 진전되는 것이 일반적인 현상이며, 다른 전력기기들과 같이 GIS 내부에서도 절연과파가 일어나기 전에 부분방전에 의한 방사전자파 검출을 통해 운전자가 결함의 존재 유무를 인지하는 UHF(Ultra High Frequency) 기술 등과 같은 절연진단기술에 관한 연구가 보고 되고 있다.

UHF 기술은 전자파 검출법의 한 방법으로서 UHF 대역의 안테나 센서를 GIS에 내장 혹은 외장시켜 내부의 부분방전 현상을 검출하는 방식이다. GIS 내에서 부분방전에 의해 초고주파에 이르기까지 광대역에

결쳐서 발생하는 전자파는 GIS 내부에서 다양한 종류의 공진현상을 일으켜 3 $\mu$ s 동안 전자파가 지속되는 현상을 보이게 되며, 이러한 전자파를 적절한 센서를 이용하여 부분방전 검출이 가능하게 된다. 일반적으로 UHF 기술에서는 측정대상 주파수 대역 선정에 있어 노이즈 처리 면에서 상당히 유리하다고 알려져 있는 500MHz부터 주파수가 높을수록 전자파에 따른 손실이 크고 측정장비 개발이 상대적으로 어려워지며 여러 가지 전파환경(방송파, 통신주파수 대역 등)을 고려하여 1.5GHz로 한다[1].

본 연구에서는 UHF대역에서 사용될 수 있는 다양한 형태의 안테나 중에서 마이크로스트립을 이용한 UHF 안테나 모델의 측정 주파수 대역을 500MHz~2.0GHz로 조정하여 설계하고자 한다. 마이크로스트립 안테나를 이용한 UHF 센서 모델은 평면상의 기판에 복사계와 급전계를 동시에 구성할 수 있으며 얇고, 가볍고, 소형화가 가능할 뿐 아니라 인쇄 회로의 기법을 이용하여 손쉽게 제작할 수 있어 제작비용이 저렴하다. 특히 광범위한 주파수를 측정할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 논문은 GIS 내부에 장착 가능한 UHF센서 모델을 맥스웰방정식을 시간, 공간에서 차분화, 해석 공간의 전자계를 전계와 자계를 상호간 계산을 이용해서 시간적으로 갱신하여 출력점의 시간응답을 얻는 방법인 FDTD(Finite Difference Time Domain)법을 이용하여 설계하였다. 또한 현재 SF<sub>6</sub> Gas 대체 절연재로 사용되고 있는 건조공기의 절연내력은 기존의 SF<sub>6</sub>에 비해 1/3정도로 알려져 건조공기를 사용하는 전력설비의 절연성 보안을 위하여 다양한 고체절연물이 사용되고 있다. 이러한 고체절연물을 사용하고 있는 전력설비의 절연파괴시 대부분이 고체절연물의 연면의 절연성에 의하여 결정되어진다. 따라서 본 논문에서는 친환경절연체인 건조공기를 사용하는 전력설비의 설계시 기초자료로 활용가능한 이종 고체절연물에 따른 연면절연파괴시 방사전자파를 분석하여 실제 적용가능성을 판단해보고자 한다.

## 2. GIS 절연진단용 센서의 필요성

최근 변전소에 일반적으로 적용하고 있는 GIS는 20

년 이상의 내구성을 보장하는 무보수로 설계가 이루어지지만, 현재 국내에는 20년 이상된 GIS가 상당수 있으며 또한 내구성과 상관없이 제작, 또는 설치, 유지보수상의 결함으로 인한 GIS 고장이 발생되고 있다. 이러한 GIS 내부고장은 복구시간이 장시간 소요되며 산업, 경제적 측면에서 볼 때 정전으로 인한 경제적 비용이 매우 크게 발생한다. 그러나 SF<sub>6</sub> 가스가 절연매체인 GIS는 모선, 차단기, 단로기, 접지장치 변성기 등이 밀폐된 금속 공간 내에 구비되어 있으며 신설 및 기존 변전소의 무인화로 기기 운전자가 GIS 내부에서 일어나는 미세한 결함들을 알아내기는 쉽지 않다. 이를 반영하듯 1998년부터 2003년 동안 우리나라에서 발생한 전력설비별 고장발생 현황을 보면 GIS의 고장이 전체 744건 중 90건에 달하며, 이 수치는 전체 전력설비 고장의 12.1%를 차지하고 있다.

이러한 상황에서 최근의 GIS 보수점검방식이 일정 주기에 따른 예방보전(Time Based Maintenance)에서 기기상태에 의한 점검방식(Condition Based Maintenance)이 도입되면서, 변전소 전체의 수명연장과 운전비용 절감에 많은 연구가 이루어지지만, 절연 파괴 고장을 미연에 방지하기는 매우 어렵다. 또한 국내 GIS에 사용되고 있는 센서는 대부분 국외제품을 사용하고 있는 실정이며, 국내 GIS 및 전력기기에 사용되는 안테나형 센서의 성능에 대한 시험방법이나 기준이 확립되어 있지 않다. 또한 국내에서 개발된 센서는 신뢰성이 문제로 대두되고 있는 실정이다.

이에 전력설비의 대용량화 고전압화에도 불구하고 부지확보 차원에서 소형화 및 옥내화가 불가피하여 GIS를 비롯한 전력설비들의 고 신뢰성과 안정성을 확보하기 위해서 상시감시 시스템 체제 구축을 위한 센서의 개발이 필요하다고 사려된다.

## 3. GIS내 결함별 방사전자파

### 3.1 실험 장치 및 방법

SF<sub>6</sub> 결함별 모의실험은 내부 압력은 4기압을 유지하였다. 또한 GIS의 버스 바 모양을 모의하기 위해 원통형 바닥 위에 원통형 전극을 사용하였으며 원통형

전극의 끝부분은 전계집중을 없애기 위해 반원형으로 처리하였다. 원통형 전극과 바닥과의 거리는 3mm~50mm까지의 조정이 가능하다. 모의 GIS의 한쪽부분은 내부 방전의 현상 관측을 용이하게 하기 위해 투명 아크릴을 이용하여 제작하였고 다른 한쪽 부분은 방사전자파의 투과가 다른 절연물에 비하여 감쇄가 적은 테프론을 이용하여 제작하였다.

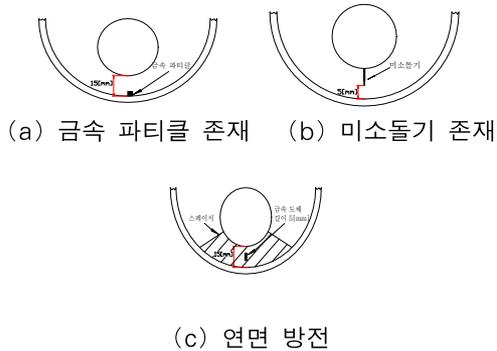


그림 1. 모의 GIS 내부 결함 모의  
Fig. 1. Imitated defects in imitated GIS

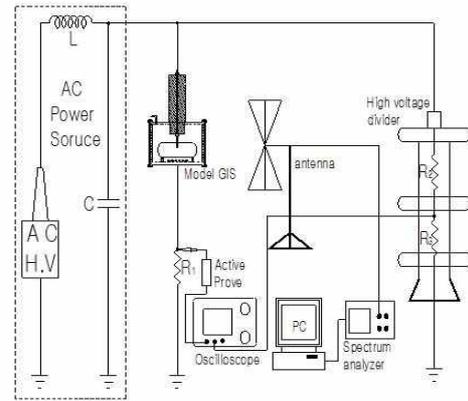
SF<sub>6</sub> 가스를 주입하기 전에는 가스 챔버의 내부를 청소하고 로타리 펌프(Rotary Pump)를 사용하여 약 10<sup>-4</sup>Torr까지 진공을 시킨 후 모의 GIS 내부에 불순물이 없도록 조치 후 SF<sub>6</sub> 가스를 주입하였다.

그림 1은 SF<sub>6</sub> 가스중 실제 GIS의 전기적 사고 발생의 원인 GIS 내부에 도전성 파티클 존재시, 미소돌기 존재시, 연면 방전, 절연성 파티클 존재시의 각각 부분 방전의 발생과 방전진전에 따른 방사전자파를 측정하기 위해 설계 제작한 실험용 모의 GIS의 내부 결함 모의개략도이다.

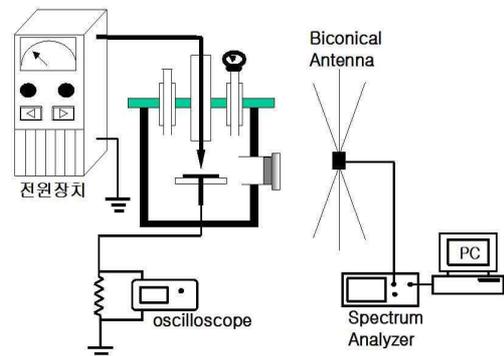
그림 2는 실험 장치의 개략도이다. (a)의 점선 부분은 전원부분으로 교류 고전압을 사용하였다. 또한 입력 고전압을 측정하기 위해 분압기를 사용하였다. R1(50Ω)은 방전진전에 따른 부분방전의 전류파형을 측정하기 위한 무유도 저항이며 전류 파형의 측정은 Digital Oscilloscope (Lecroy 9350AL)와 미소전류를 측정하기 위해 증폭기가 내장된 Active probe를 사용하였다.

그리고 방전진전에 따라 방사되는 전자파의 측정과

분석을 위하여 EMI·EMC 측정용인 BiConiLog 안테나(EMCO3142) 및 스펙트럼 분석기 (Advantest R3131A)를 이용하였다.



(a) SF<sub>6</sub> 결함별 모의실험 챔버



(b) 고체절연물의 SF<sub>6</sub>와 건조공기에 대한 연면방전시 방사전자파 실험장치

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

본 연구의 실험방법은 먼저 전압 인가속도를 약 1kV/sec의 속도로 일정하게 상승하여 전극간의 절연 파괴전압은 5회 측정하여 평균한 전압 값을 구하였다. 모의 GIS 내부에 결함에 따른 부분방전을 모의하면서 부분방전의 발생에서 절연과괴 되는 단계별로 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 관찰하기 위해 절연과괴전압 보다 낮은 전압을 3kV씩 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 실

험을 행하였다. 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 측정  
정한 데이터를 스펙트럼 분석기에서 GPIB로 데이터  
를 컴퓨터에 전송하여 분석하였다.

이때 전극 중심부와 안테나 사이의 거리는 방사전자  
파의 감쇄특성 및 실험상 안전거리등을 고려하여 1m  
로 고정하여 두고 실험을 하였다. 안테나의 각도는 전  
계강도를 측정하기에 유리하도록 전류의 흐름 방향과  
동일하게 대지에 대하여 수직으로 배치하였다.

본 실험에서 0~1.5GHz 대역의 안테나를 이용하여  
다양한 방법으로 관측한 방사전자파를 측정 분석하  
였다.

### 3.2 실험 결과 및 고찰

#### 3.2.1 SF<sub>6</sub> 결합별 방사전자파특성과 센서설계

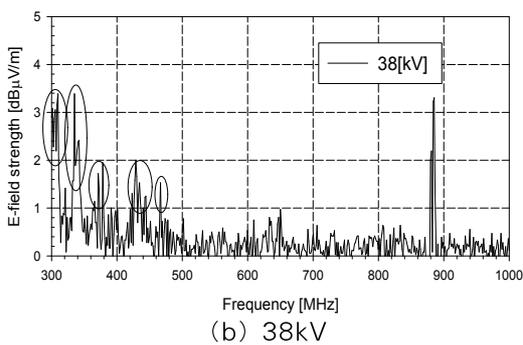
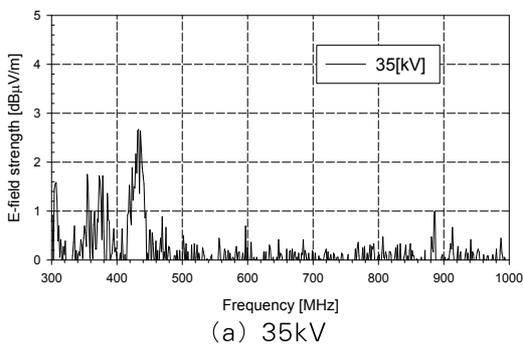


그림 3. 300~1,000MHz 대역 방사전자파 스펙트럼  
(도전성 파티클 존재)  
Fig. 3. Spectrum of radiated electromagnetic  
waves at 300~1,000MHz band (being of  
conducted particle)

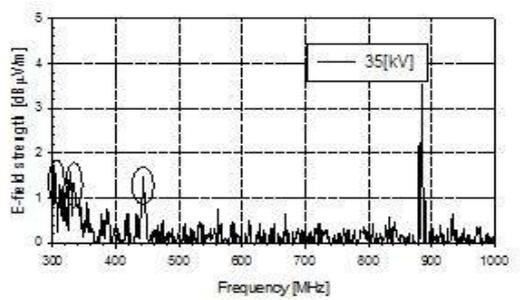
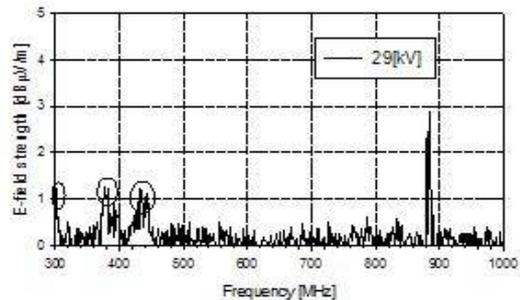
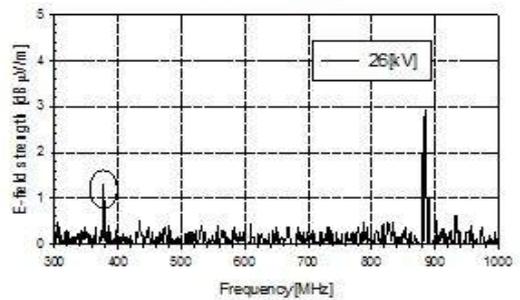
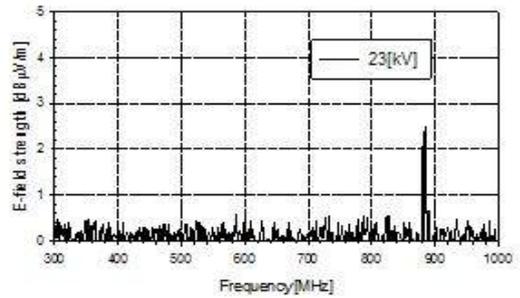


그림 4. 300~1,000MHz 대역 방사전자파 스펙트럼  
(미소돌기존재)  
Fig. 4. Spectrum of radiated electromagnetic  
waves at 300~1,000MHz band (being of a  
fine protrusion)

그림 3는 모의 GIS 내에 도전성 파티클 존재시 35, 38kV 인가시 배경잡음을 배제한 방사전자파의 스펙트럼 분포이다. 35kV인가까지 방전신호가 검출되지 않는다. 하지만 38kV인가시 300, 360, 380MHz 부근에 1~2dB, 430MHz 부근에 2~3dB 증가한 데이터가 검출로서 절연과피 직전의 단계라고 판단된다. 이때 모의 GIS 내부의 금속 파티클은 상하 진동이 심하여 서로 사다리 형태를 이루려고 하고 원통형 전극에 부착되기도 한다.

그림 4는 모의 GIS 내부에 미소돌기 존재시 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포이다.

모의 GIS내부에 원통형 전극에 미소돌기를 부착하였고 미소돌기와 바닥 면과의 Gap은 5mm로서 1kV/sec의 속도로 전압을 인가시 완전절연과피가 발생하는 평균절연과피전압(이하  $V_B$ )은 약 41kV 정도이다.

17kV인가시 모의 GIS 내부관측 결과 미소돌기 칩

선단에 막상 코로나가 발생하였으며, 20kV인가시 미소돌기 선단에 막상 코로나 방전이 활발히 이루어지고 있었다. 23kV인가시까지 방전신호가 검출되지 않았지만, GIS 내부를 관측결과 브러시 형태의 코로나가 칩 선단에 발생하였다. 26kV인가시 그림 3.3 (b)와 같이 380MHz 부근에 1~2dB 증가한 데이터가 검출되기 시작하였다. 전압을 증가할 때 300, 380, 430MHz 대역에서는 1~2dB 증가한 방전진전 데이터 신호가 검출되었다. 이때 모의 GIS 내부를 관측결과 부러시 형태에서 발전한 스트리머 형태의 코로나가 칩 선단에 발생하였다.

그림 5은 모의 GIS내부에 원통형 전극에 투명 아크릴을 이용하여 연면 스페이서를 만들고 길이 5m의 금속을 부착시켰다. 금속 도체와 원통형 전극사이는 5mm, 금속도체와 바닥면 사이는 5mm이다. 1kV/sec의 속도로 전압을 인가시 완전절연과피가 발생하는 평균절연과피전압(이하  $V_B$ )은 약 48kV 정도이다.

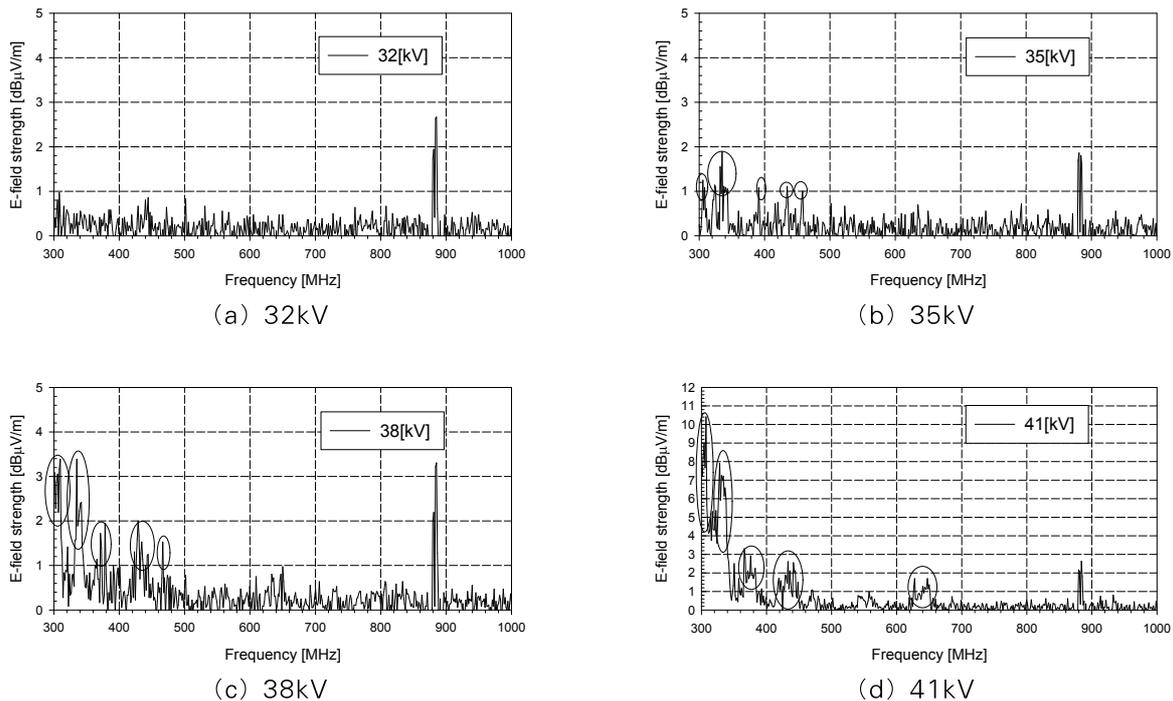


그림 5. 300~1,000MHz 대역 방사전자파 스펙트럼(연면 방전 존재)

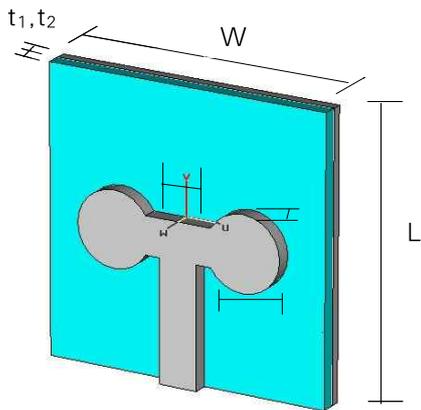
Fig. 5. Spectrum of radiated electromagnetic waves at 300~1,000MHz (surface discharge being)

그림 5 (b)와 같이 35kV 300, 340, 380, 430MHz 부근에 1~2dB 증가한 데이터가 검출되기 시작하였다.

그림 5 (c)는 38kV 인가시 전체적인 방전신호 데이터의 주파수 분포는 유사하였으며 일부 주파수 대역을 제외하고 전체 전계강도의 크기가 오히려 약간 감소하고 대신 300~1,000MHz 대역의 데이터 신호는 증가하였다. 300, 340MHz 부근에 3~4dB 증가한 데이터와 380, 430, 470MHz 부근에 1~2dB 증가한 데이터들이 검출되기 시작하였다.

그림 5 (d)는 41kV 인가 때 방사전자파의 스펙트럼 분포이다. 38kV 인가의 경우와 비교하면 전체적인 방전신호 데이터의 주파수 분포는 유사하였으며, 300, 340MHz 부근에 5dB 이상 증가한 데이터와 380MHz 부근에 3~4dB 증가한 데이터와 430MHz 부근에 2~3dB 증가한 데이터 그리고 620~640MHz 부근에 1~2dB 증가한 데이터가 검출되기 시작하였다.

본 논문에서는 안테나를 실험용 모의 GIS의 Teflon-resin에 설치하여 방전진전에 따른 방사전자파를 측정할 수 있는 UHF 센서를 설계하였다. 그림 6은 제안된 안테나 구조이다. Micro-strip 구조는 물리적인 직관성이 있어 해석이 용이한 전송선로모델로 하였으며, 해석과 제작의 용이성, 우수한 방사특성, 낮은 교차편파 방사와 보다 광대역을 측정하기 위하여



구분	W	L	W <sub>2</sub>	Φ	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
mm	30	30	4	4	1.588	1	1

그림 6. 제안된 센서 구조  
Fig. 6. Design of Sensor

원형 패치로 설계하였다. sub1은 유전율 2.2인 기판을 사용하였고, sub2와 sub3는 재질을 전기도체(PEC)로 설정하였다.

일반적으로 안테나에 있어 가장 중요한 S<sub>1,1</sub> 파라미터를 그림 7에서 보여주고 있다. 안테나의 S<sub>1,1</sub> 파라미터는 -20dB 이하의 값에서 안테나의 측정주파수 대역을 결정함으로써 신뢰성을 가진다. 하지만 일반적으로 -10dB이하의 값을 갖는 주파수 대역을 그 안테나의 측정주파수대로 사용한다. 따라서 그림 8에서 보는 것과 같이 -10dB이하의 값을 갖는 주파수 대역은 약 0.5~10.7GHz 사이에서 나타나고 있으며, 안테나 설계 시 고려한 UHF 기술에서의 측정대상 주파수 대역을 만족하고 있다. 또한 VSWR의 그래프에서 2이하의 주파수 대역에서 그 안테나의 측정범위 설정한다. 주파수대역 0.5~10.7GHz에서 2이하의 값을 가짐을 확인하였다.

앞장에서 설명한 바와 같이 바리스터의 미세구조는 결정립과 이것을 둘러싸고 있는 입계의 매트릭스로 되어 있다. 바리스터의 주 구성요소인 결정립은 도전율이 높으므로 소신호응답의 경우에는 인가전압의 대부분이 입계에 걸리게 된다. 바리스터 재료는 세라믹 S-파라미터계산은 보통 시뮬레이션 시간 간격에 대한 근사오차와 유한한 메쉬 해상도에 따른 부정확성에서 수치적 부정확성에 의하여 영향을 받게 된다.

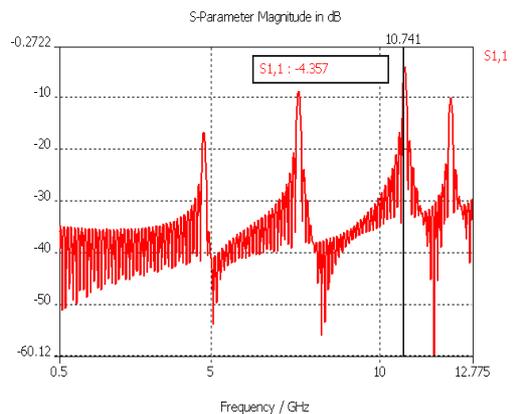


그림 7. S<sub>1,1</sub> 파라미터(S-parameters)  
Fig. 7. S<sub>1,1</sub> Parameter(S-parameters)

시간에 따른 포트 모드의 증폭신호는 푸리에 변환을 통하여 추출된 S-파라미터에서 계산되는데 시간신호에 대한 자체 정확도가 높아도 결국 시간 대비 신호가 영까지 감쇄된다는 가정에서 푸리에 변환을 하기 때문에 부정확성을 초래할 수 있다. 또한 S-파라미터에 리플이 야기되어 결과 정확도에 영향을 미칠 수 있다.

### 3.2.2 고체절연물의 방사전자파특성

그림 8은 이종 고체절연물에 종류에 따른 방사전자파 형태를 보여주고 있다.

고체연면절연물은 PE, PC, Acrylic을 사용하였으며, 절연가스로 SF<sub>6</sub>와 건조공기를 사용하였다. 시료의 크

기는 두께 3mm, 직경 100mm을 동일하게 사용하여 각각의 고체절연물에 대하여 연면절연과괴직전의 전압에서 방사전자파의 Max값을 측정 분석하였다.

그림 8 (a)는 SF<sub>6</sub> 1atm 일때의 방사전자파 특성을 나타내고 있다. 이 경우 고체절연물 PE일 때는 200, 1050 MHz, PC는 800, 1100 MHz, 아크릴은 300 MHz 대역에서 연면절연과괴 진전에 따른 방사전자파가 측정되었다. 그림 8 (b)는 건조공기를 절연매질로 사용하여 연면방사전자파를 측정하였다. 이 경우에도 그림과 같이 PE일 때는 350 MHz, PC는 150, 1050 MHz, 아크릴은 200 MHz 대역에서 연면절연과괴 진전에 따른 방사전자파가 측정되었다.

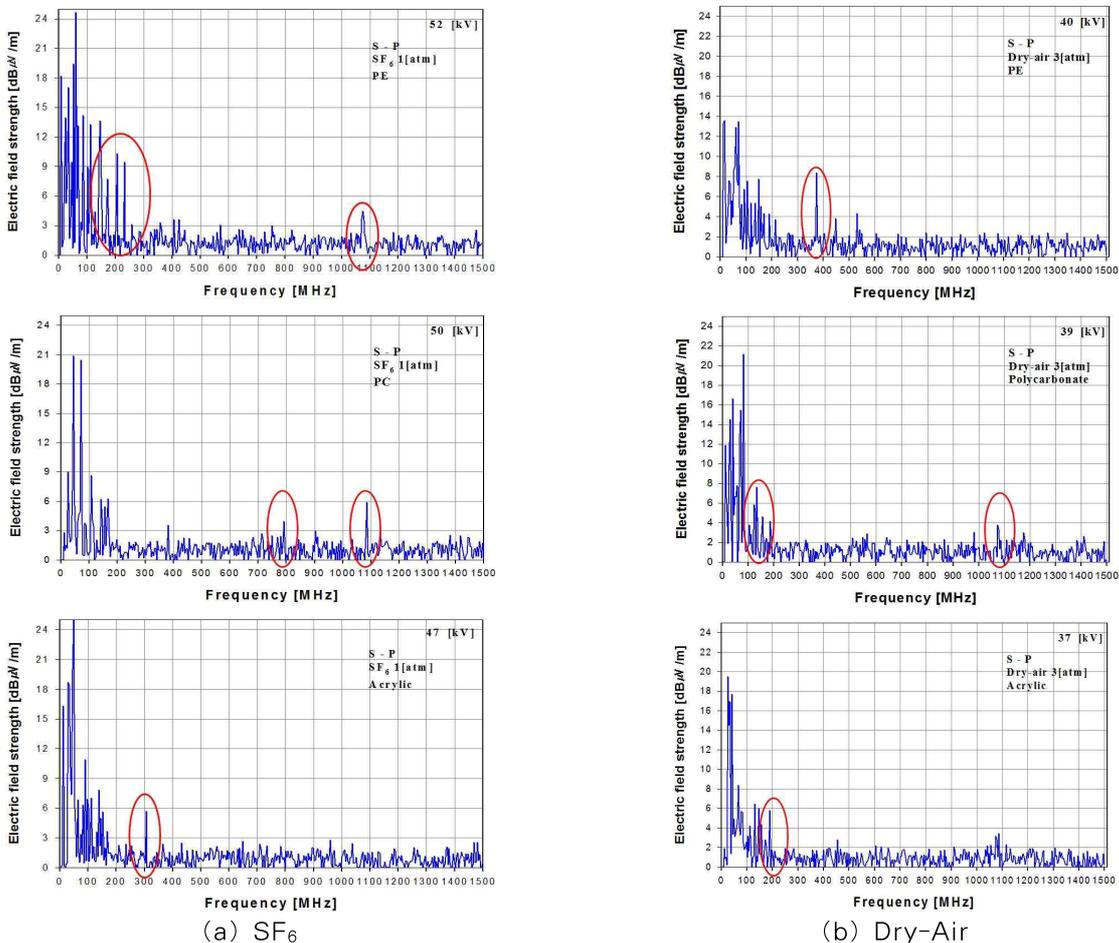


그림 8. 고체절연물의 종류에 따른 방사전자파특성

Fig. 8 Spectrum of radiated electromagnetic waves according to Surface Discharge

고체절연물의 종류와 절연가스의 종류에 따른 방사전자파의 대역이 상이하게 발생하는 것을 확인하였으며, 이러한 결과를 토대로 향후 전력설비에 사용되는 고체절연물에 의하여 발생하는 전력사고를 예측 가능한 예방보전 시스템을 개발할 수 있을 것이라 기대된다.

#### 4. 결 론

본 논문은 절연진단기술에 적용을 현재 널리 사용되고 있는 SF<sub>6</sub> 전력설비와 친환경절연재인 건조공기를 절연매질로 사용하는 전력설비에 대한 예방보전을 위하여 방사전자파를 측정분석하였다. 특히 SF<sub>6</sub>을 사용하는 전력기기에 있어서는 결함을 모의하여 결함별 방사전자파를 분석하여 결함의 검출이가능한 센서를 제시하였다. 제시된 마이크로스트립 안테나가 시뮬레이션을 통하여 측정주파수 대역이 0.5~10.7GHz임을 확인하여, UHF를 이용한 절연진단 기술에서 사용하는 주파수 대역에서 사용할 수 있음을 확인하였다.

앞으로 본 논문에서 설계된 마이크로스트립 안테나를 실제 제작하고, 각종 결함별 부분방전신호를 측정/분석하여 실제 전력기기의 이상 유무를 검출할 수 있는 상시 감시 시스템 구축에 사용이 기대된다.

#### References

- [1] Kwang-Sik Lee, "A basic study on insulation diagnosis system development by analysis of radiated electromagnetic waves", National Research Foundation of Korea, 2003.10.28.
- [2] Mun Soo Lee, "Antenna theory", MRC, 2001.08.31.
- [3] Young Joong Yun, "Antena theory and design", kyobobook, 2000.03.01.
- [4] Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics, WILEY, 1998.

#### ◇ 저자소개 ◇



**박승규 (朴崇圭)**

1964년 9월 7일생. 2002년 영남대 전기공학과 졸업. 2008년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정. (주)신덕엔지니어링 대표.



**최은익 (崔殷赫)**

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국폴리텍 VI대학 대구캠퍼스 스마트전기과 교수.



**이광식 (李廣植)**

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 현재 한국조명·전기설비학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 교수.