Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 17, No.2, pp. 81~87 March 2003 논문 17-2-12

대기중 교류 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 특성

(The Characteristics of Frequency Spectrum of the radiated Electromagnetic Waves with AC Discharge Progress in Air)

박광서* · 최병주 · 김기채 · 김이국 · 이광식

(Kwang - Seo Park · Byoung - Ju Choi · Ki - Chai Kim · Lee - Kook Kim · Kwang - Sik Lee)

요 약

본 논문은 공기중 침대 평판 전극계를 이용하여 방전진전 과정과 부분방전을 모의하였다. 이 때 방전진전과정에 따른 방사전자파를 biconical 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 주파수 스펙트럼 분포를 분석 연구하였다. 본 연구의 결과로부터 공기중 교류방전 진전에 따른 방사전자파의 측정과 분석에 의한 절연진단을 위한 방법을 제시하였고 또한 방전진전과정과 방사전자파를 상호관계를 고려하면 부분방전의 검출과 방전진전과정의 평가가 가능함을 확인하였다.

Abstract

This paper simulated discharge progress and partial discharge using needle-plan electrode system in air, in this time with discharge progress, studied the distribution of frequency spectrum of the radiated electromagnetic waves using biconical antenna and spectrum analyzer.

From results of this study, a method was introduced for measurement and analyzation of the radiated electromagnetic waves in accordance with AC discharge progress in air, Besides, according to the consideration of the mutual relation between frequency spectrum of the radiated electromagnetic waves and discharge progress, it was confirmed that detecting partial discharge and estimating discharge progress were possible.

Key Words : partial discharge, radiated electromagnetic wave, frequency spectrum

1. 서 론

고압가스를 절연매체로 하는 가스절연 개폐장치나 변압기 등과 같은 고전압 전력 기기는 신뢰성 향상을 위해 기기의 운전 중에 이상 유무를 검출할 수 있는 상시감시 시스템의 확립이 대단히 중요하다. 이와 같은 전력 기기의 내부에서 절연파괴가 일어나기 전에 부분방전에 의한 방사전자파를 방사하게 되는데, 이때 발생하는 전자파를 기기의 외부의 적절한 위치에서 검출하여 기기의 이상 상태를 발견하고자 하는 연구가 보고되고 있다[1],[2]. 특히 UHF

* 주저자 : 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 053-815-7291, Fax : 053-813-8230
E-mail : aca28@yumail.ac.kr
접수일자 : 2003년 1월28일
1차심사 : 2003년 2월13일
심사완료 : 2003년 3월14일

법에 의한 전력 기기 진단 기술은 기존의 기술보다 여러 가지 장점이 있어 국내·외에서 활발한 연구가 진행되고 있다[3],[4].

따라서 이미 발표한 연구논문[6]에서 방사전자파 분석에 의한 전력 기기 진단의 가능성을 이론적으로 충분히 확인하였고 본 논문에서는 전력설비나 전기기기에 전기적 이상 발생시 수반되는 절연파괴의 전구현상인 부분 방전을 침대 평판전극으로 모의하고 인가전압 증가에 따른 방전진전 과정을 모의하였다. 이때 발생되는 방사 전자파를 비접촉센서인 바이코니컬 안테나와 spectrum analyzer를 이용하여 주파수 스펙트럼 분포특성을 연구하고 방전진전과정과 방사전자파의 상호관계를 고려함으로 대기중 부분방전의 검출과 방전진전 상태의 예측이 가능함을 확인하고자한다.

또한 대기중 방전은 각종 절연물 내에 부분방전의 기본이 되는 방전으로서 방전진전에 따른 현장의 대기중 코로나 방전시 발생되는 방사전자파의 특성 연구의 기초자료가 될 것이며 또한 실제 주변 공기중 코로나 방전에 의한 노이즈와 전력 기기 내부에서 발생하는 부분방전 신호의 구별에 중요한 기초자료 제공을 할 것이다. 또한 고감도 고신뢰 경제형 UHF 센서의 개발과 방사전자파 측정분석에 의한 전력 기기의 절연진단 시스템개발에 중요한 기초자료가 되리라 판단된다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 본 논문의 실험 장치의 개략도이다. 점선 부분은 전원부분으로 교류 고전압(Input : AC 200V 60Hz, Output: AC 60kV 60mA)을 사용하였다. 그림에서 L은 블로킹 코일이고 C는 결합 콘덴서이며 이들은 고주파 필터의 역할을 한다. 또한 출력되는 고전압을 측정하기 위해 고전압 분압기(R_2 :R_3=5000:1)를 사용하였다.

장치 개략도에서 R_1(50Ω)은 방전진전에 따른 부분방전의 전류파형을 측정하기 위한 무유도 저항이며 전류 파형의 측정은 Digital Oscilloscope(Lecroy 9350AL, 500[MHz])와 미소전류를 측정하기 위해 증폭기가 내장된 Active probe (bandwidth :DC~1[GHz], Leroy AP020)를 사용하였다. 그리고 방전진전에 따라 방사되는 전자파의 측정과 분석을 위하여 EMI, EMC 측정용 Biconical 안테나 (EMCO model 3110)와 스펙트럼 분석기 (Advantest R4131D)를 이용하였다.

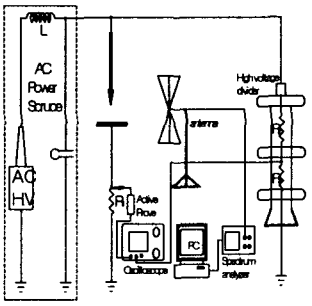


그림 1. 실험장치도
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

본 논문의 실험 방법은 침대 평판전극계를 이용한 공기중 전압 인가속도를 1[kV/sec]의 속도로 일정하게 상승하여 전극간의 절연파괴전압은 5회 측정하여 평균한 전압값을 구하였다. 한번 절연파괴 후 전원을 끄고 접지봉을 이용하여 잔류전압을 방전시키고 다시 교류고전압을 인가하여 실험을 행하였다. 각각 절연물에 따른 부분방전을 모의하면서 부분방전의 발생에서 절연파괴 되는 단계별로 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 관찰하기 위해 절연파괴전압 보다 낮은 전압을 0.3[kV/sec]의 속도로 상승인가 후, 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용한 다양한 기초실험을 통해 공기중 부분방전 발생 및 진전에 따른 방사전자파의 측정에 유리한 안테나의 최적 측정주파수, 방사전자파 측정방법, 데이터 취득방법 등을 설정 후 실험을 행하였다. 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 측정한 데이터를 스펙트럼 분석기에서 GPIB를 이용하여 데이터를 컴퓨터에 전송하여 분석하였다.

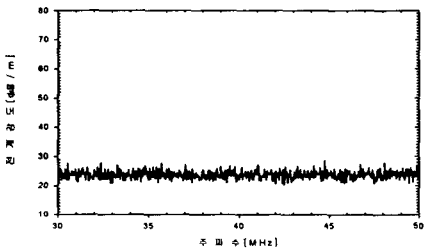
이 때 전극 중심부와 안테나 사이의 거리는 방사전자파의 감쇠 특성 및 실험상 안전거리등을 고려하여 1[m]로 고정하여 두고 실험을 하였다. 안테나의 각도는 전계강도를 측정하기에 유리하도록 전류의 흐름 방향과 동일하게 대지에 대하여 수직으로 배치하였다.

부분방전시 방사되는 전자파의 주파수 분포는 수

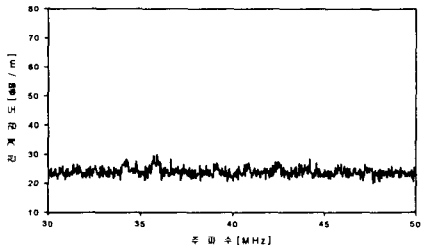
[MHz]에서 수십 [GHz]대역까지 광범위하다. 이러한 방사전자파를 관찰하기 위해서는 광대역 안테나가 필요하나 이러한 안테나는 제작이 어렵고 높은 비용이 요구된다. 따라서 공기중 방전의 진전과정에 따른 방사전자파를 측정하여 부분방전의 발생과 진전의 판단이 가능한 주파수 대역을 찾기 위해 본 연구에서는 30~300[MHz] 대역의 주파수 범위에서 여러 가지 기초실험을 실시한 결과 대기중의 경우는 30~50 [MHz] 대역이 적절하다고 판단하였다. 절연진단을 위한 방사전자파 측정분석의 안테나 측정 주파수 대역을 줄일 수 있다면 실제 전력설비에 적용 가능한 안테나의 형태로 변형이 가능하고 안테나의 크기 또한 줄일 수 있는 장점 등이 있다.

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 유용하게 적용하고자하였다.

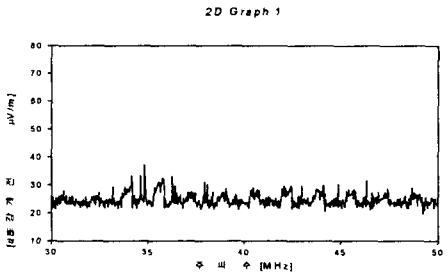
3. 실험결과 및 고찰



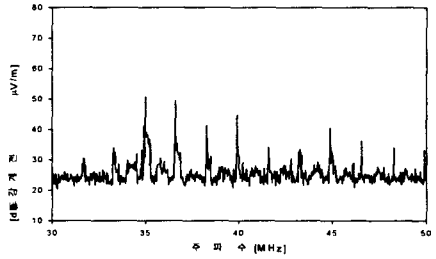
(a) background noise



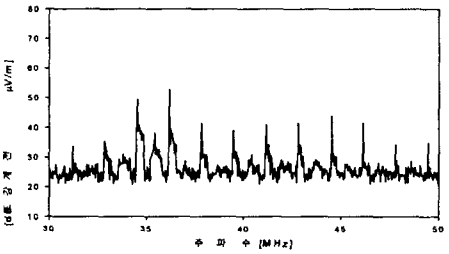
(b) 인가전압: 7.6[kV]



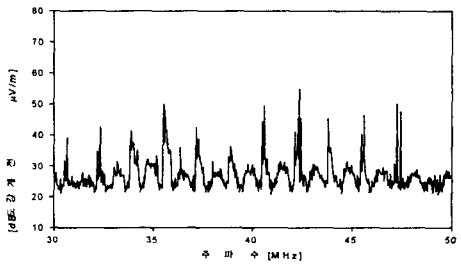
(c) 인가전압: 13.5[kV]



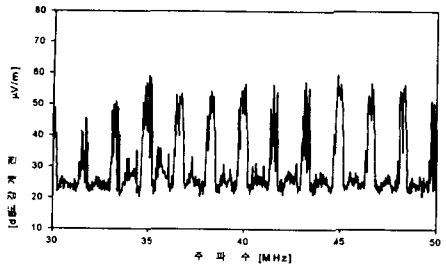
(d) 인가전압: 15.9[kV]



(e) 인가전압: 18.6[kV]



(f) 인가전압: 21.2[kV]



(g) 인가전압: 23.8[kV]

그림 2. 대기중 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼분포
Fig. 2. Distribution of frequency spectrum of radiated electromagnetic waves with discharge progress in air

그림 2는 대기중 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포이다. 그림 2의 (a)는 측정주파수 대역(30~50[MHz])에서 주변 노이즈의 주파수 스펙트럼을 측정한 그림이다. 전 대역에서 측정한 데이터는 700개로서 한번 Sweeping time (5[ms]/div) 동안에 주변환경의 기기에서 Switching 동작(on, off)이 발생하지 않으면 방사전자파의 전계강도가 30[dBμV/m]를 거의 넘지 않음이 관측되었다. 스위칭 동작에 의해 주변에 불요 노이즈가 침입하더라도 부분방전 신호와 쉽게 구별되고 불요 노이즈는 특히 주기성을 갖지 않음이 관측되었다.

이러한 점에 착안하여 전압을 서서히 상승시켜 (0.3[kV/sec] 정도) 방전진전과정을 모의 할 때 주파수 스펙트럼 분포 특성과 부분방전의 발생을 검출할 수 있는 전계강도가 30[dBμV/m]이상이 되는 데이터(이하 E_{30dB})의 수와 부분방전의 진전단계를 판단할 수 있는 40[dBμV/m]이상이 되는 데이터(이하 E_{40dB})의 수, 평균전계강도(이하 E_{mean})등을 분석하였다. Background noise의 Emean은 23.7[dBμV/m] 이다. 대기 중에서 Gap 40[mm] 침대 평판 전극사이가 완전히 절연파괴가 발생되는 전압의 평균절연파괴전압(이하 V_B)은 약 26.5[kV] 정도이다.

그림 2의 (b)는 7.6[kV] 전압부터 최초의 PD 신호라고 판단되는 35[MHz]와 40[MHz] 부근에서 Background noise 보다 약간 증가된 다른 신호가 발생한 스펙트럼 분포이다. 또한 E_{30dB}의 데이터가 1개 이상 나타나기 시작하였으며 전압을 증가시킬수록 E_{30dB} 이상의 데이터 수는 증가하였다.

즉 부분방전 진전의 발생 및 초기단계는 30~50[MHz] 부근에 E_{30dB} 이상의 데이터의 검출로서 판단이 가능하다.

그림 2의 (d)의 경우는 대기중 정펄스의 발생이 시작하는 부분방전 단계(그림 6의 (c) 참조)로서 이때 그림 2의 (d)는 E_{40dB} 이상의 데이터가 검출되기 시작한다. 즉 E_{40dB} 이상의 데이터가 발생하기 시작하면 대기중 부분방전에서 정펄스가 발생하는 단계로서 어느 정도 부분방전이 진전된 단계라고 판단된다.

그림 2의 (f)와 (g)의 단계는 절연파괴 직전의 단계로서 E_{mean}이 25.5dB로서 Background noise보다 약 2[dB] 이상 증가하고 또한 급격히 상승한 펄스성 주파수 신호가 나타난다. 이것으로 부분방전 진전의 마지막 단계인 절연파괴 단계의 판단이 가능하다.

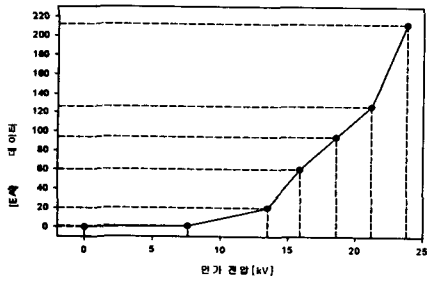


그림 3. 대기중 인가전압에 따른 E30[dB]의 데이터 수
Fig. 3. Number of E30[dB] with increasing voltage in air

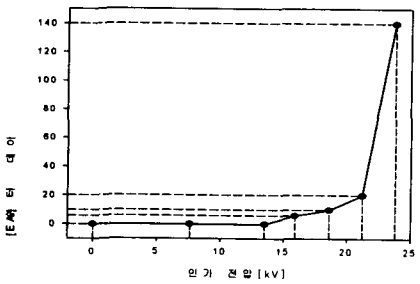


그림 4. 대기중 인가전압에 따른 E40[dB]의 데이터 수
Fig. 4. Number of E40[dB] with increasing voltage in air

그림 3은 부분방전 진전에 의한 E_{30dB} 이상의 데이터 수를 나타낸 것이다. E_{30dB}의 데이터 검출로서 부분방전의 발생과 부분방전 진전의 초기단계의 판단이 가능하다.

그림 4는 부분방전 진전에 따른 E_{40dB}의 데이터 수를 나타낸 것이다. 부분 방전시 전압전류 파형에서 정 전류 펄스가 발생하는 부분방전이 어느 정도 진전된 단계에서 E_{40dB} 이상의 데이터가 검출되기 시작하였다.

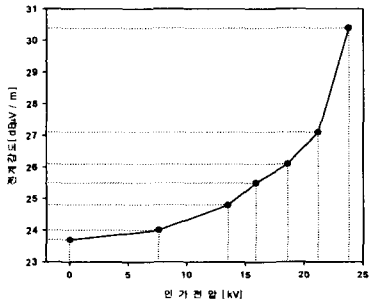
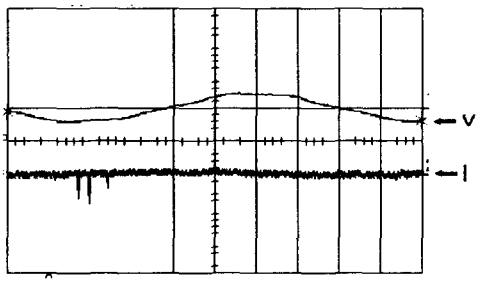
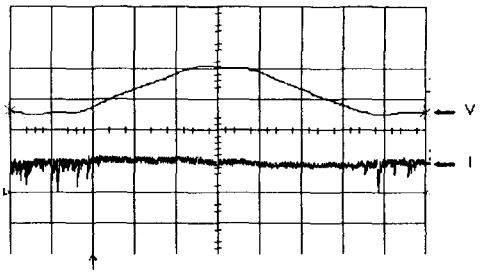


그림 5. 대기중 방전진전에 따른 평균전계강도
Fig. 5. Mean value of electric field strength with increasing voltage in air

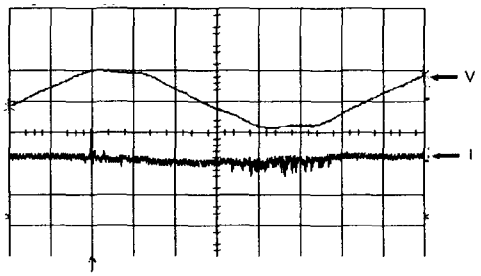
그림 5는 부분방전 진전에 의한 평균 전계강도를 나타낸 것이다. 전압을 증가하면 평균 전계강도는 증가하며 특히 Background noise 보다 약 2[dB] 이상 증가하면 절연파괴 직전의 단계라는 판단이 가능하다



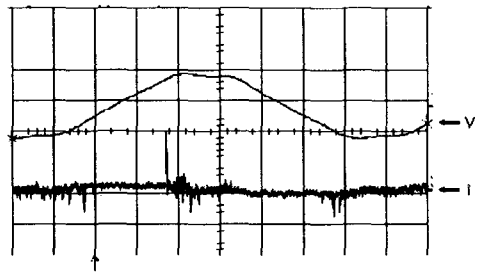
2[ms/div], 2[mA/div], 25[kV/div]
(a) AC 7.6[kV]인가



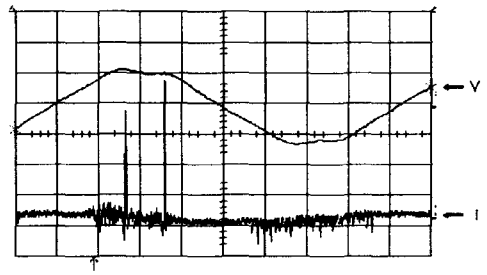
2[ms/div], 2[mA/div], 25[kV/div]
(b) AC 13.5[kV]인가



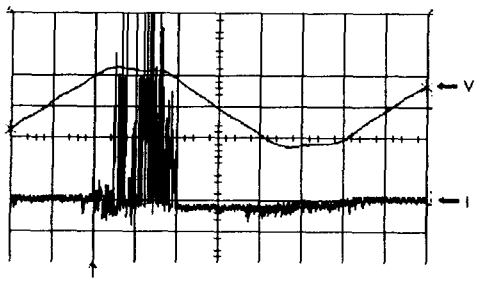
2[ms/div], 2[mA/div], 25[kV/div]
(c) AC 15.9[kV]인가



2[ms/div], 2[mA/div], 25[kV/div]
(d) AC 18.6[kV]인가



2[ms/div], 2[mA/div], 25[kV/div]
(e) AC 21.2[kV]인가



2[ms/div], 2[mA/div], 25[kV/div]
(f) AC 23.8[kV]인가

그림 6. 대기중 방전진전과정에 따른 전압과 전류파형
Fig. 6. Waveform of current and voltage with discharge progress in air

그림 6은 방전 진전과정에 따른 전압과 전류파형을 나타낸 그림이다. 그림 6의 (a)에서 최초 부분방전의 발생의 시작은 인가전압이 7.6[kV]일 때부터 부극성 부근에서 부 펄스가 발생되고 그림 6의 (b)처럼 부 펄스의 숫자가 증가한다. 즉 부분방전의 시작인 초기 단계(7.6[kV]~13.5[kV])는 부 극성 전압부근의 부펄스의 발생과 부펄스 수의 증가로서 판단이 가능하다.

그림 6의 (c)에서는 부분방전의 진전단계로서 부펄스의 크기는 조금 줄어들고 발생되는 폭이 약간 커지고 정극성 부근에 정펄스가 발생하기 시작한다. 그림 6의 (d)에서는 정극성 부근에 이러한 정펄스의 크기가 점점 상승하며 정펄스의 부근에서 펄스의 수가 증가한다.

그림 6의 (e) 단계에서는 정극성 부근에서 급격한 펄스의 수가 증가하고 정 부극성 부근에서 정부 펄스의 수가 각각 증가한다.

즉 부분방전 진전단계는 그림 6의 (C)에서 13.5[kV] 인가부터 정펄스의 발생을 알 수 있다. 이러한 정펄스의 증가로서 부분방전의 진전단계에서 절연파괴 단계로의 진전을 알 수 있다.

그림 6의 (f)단계는 절연파괴 직전의 단계로서 정극성 부근에 급격한 정펄스의 수가 대단히 증가하여 절연파괴 된다고 사료된다.

즉 교류전원에서 공기중 부분방전의 시작은 부극성 부근의 부 펄스에서 시작되며 다음 단계는 정극성 부근에 정 펄스의 발생과 이 정펄스의 급격한 크기의 증가로 인해 절연파괴의 단계로 진전된다고 사료된다. 이러한 과정은 반복된 실험에서 거의 동일한 단계를 거침이 확인되었다.

위의 실험결과를 살펴보면 실제 현장 적용에는 접지선을 통한 3상 불평형 전류와 누설전류가 흘러 부분방전 전류신호를 검출하기 어렵지만 실험실에서는 대단히 신뢰성이 높은 접지선을 통한 오실로스코프와 Active Probe에 의해 관측되는 부분방전의 전압전류 파형과 안테나와 Spectrum Analyzer에 의해 방사전자파를 측정 분석하는 본 실험의 방법을 비교하여 볼 때(그림 2와 그림 6 비교 참조) 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 부분방전을 검출하는 본 실험 방법의 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

대기중 부분방전의 발생에서 절연파괴까지의 단계를 관측하기 유리한 주파수 대역은 30~50[MHz]이고 본 실험 방법에 의한 방사전자파의 스펙트럼 분포 특성과 전계강도 30[dB] 이상의 데이터 수, 평균전계강도, 40[dB] 이상의 데이터 수 등을 고려하면 부분방전의 발생에서 절연파괴 직전의 관측 및 판단이 가능함을 확인하였다.

대기중 부분방전 진전의 발생 및 초기단계는 30~50[MHz] 부근에 E30[dB] 이상의 데이터의 검출로서 판단이 가능하다.

E40[dB] 이상의 데이터가 발생하기 시작하면 대기중 정펄스가 발생하는 부분방전으로서 어느 정도 진전된 단계라는 판단이 가능하다.

대기중 절연파괴 직전의 단계는 Emean이 25.5[dB]로서 Background noise보다 약 2[dB] 이상 증가하고 또한 급격히 상승한 펄스성 주파수 신호가 나타나면 부분방전 진전의 마지막 단계인 절연파괴 직전단계라는 판단이 가능하다.

이러한 결과는 안테나를 사용하여 방사전자파를 측정·분석에 의한 전력설비의 절연진단 시스템 개발에 중요한 기초 자료가 되리라 생각된다.

References

[1] Matumura et.al., : Method of diagnostic detection by radiated magnetic fields, Tech. Report of IEE Japan, HV83-52, 1983.

[2] B. F. Hampton and R. J. Meats: Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations, IEE Proc., 135, Pt. C, No.2, 1988.

[3] H. Okubo, H. Yamashita, N. Hayakawa, T.Ueda, M. Hikita, "Electromagnetic Spectrum Radiated from Gas Discharges and its Relation to Partial-Discharge Characteristics", ETEP Vol.7, No.1, pp 57~63, January/February 1997.

[4] Irwin. T, Lopez-Roldan, J, Charlson. C, "Partial discharge detection of free moving particles in GIS by the UHF method: recognition pattern depending on the particle movement and location", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE , Vol.3, pp2135~2140, 2000.

[5] A. Hamid, ZI. Kawasaki "Analysis of VHF-wide band Electromagnetic Noises from Partial Discharge Using Discrete Wavelet Transform", IEEE of PES, Vol.1, pp.263~268, 2001.

[6] Ki-Chai Kim, Kwang-Sik Lee and Dong-In Lee, "Estimation of ESD current waveshapes by radiated electromagnetic fields" IEICE Trans. commun., Vol.E83-B, No.3, pp.608-612, March 2000.

- 감사의 글 -

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호:R01-2000-00245)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

◇저자소개◇

박 광 서(朴光緖)
1970년 3월 23일생. 1997년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자공학부(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

최 병 주(崔炳柱)
1958년 12월 12일생. 1981년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과(석사). 1986년~1997년 한국전기연구소 전력기기연구부 선임연구원. 1996년 일본 큐슈대학 대학원(박사). 1997년~현재 서라벌 대학 전기과 교수.

김 기 채(金基采)
1959년 10월 19일생. 1984년 영남대학교 전자공학과 졸업. 1986년 일본 Keio Univ. 대학원 전기공학과(석사). 동 대학원 전기공학과 (박사). 현재 영남대학교 전자정보공학부 부교수.

김 이 국(金利國)
1946년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과(박사). 현재 경일대학교 전기공학과 부교수.

이 광 식(李廣植)
1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology초빙교수. 1995~1998년 당학회 대구 · 경북 지회장. 현재 영남대 공대 전자정보공학부 교수.