

1 안테나 법에 의한 미소 간극의 방전 전류파형 추정

Estimation of Discharge Current Waveshapes in Short Gap Discharge by One Antenna Method

김기채 · 이광식 · 이동인

Ki-Chai Kim · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee

요 약

본 논문에서는 미소 간극에서 방전이 일어날 때 발생하는 방사 전자파를 측정하여 이로부터 방전전류의 파형을 추정하는 방법에 관하여 검토하고 있다. 한 개의 시간영역 전자계 측정용 안테나를 사용하여 주어진 위치에서 관측한 측정 전계 또는 측정 자계로부터 방전전류를 추정하는 1 안테나 법(단일 전자계 법)의 이론을 확립하고, Wilson & Ma가 측정된 전계를 이용하여 1 안테나 법에 의한 방전전류의 파형을 추정(복원)하고 있다. 추정된 방전전류의 파형은 방전전류의 측정 결과와도 비교하여 1 안테나 법에 의한 추정법 이론이 타당함을 확인하고 있다.

Abstract

This paper presents the method for an estimation of discharge current waveshapes in short gap discharge by a radiated electromagnetic field. The method of current waveform estimation described is using the one antenna method(single field method) with a measured electric or magnetic fields at given field point by a time domain antenna. In order to verify the availability of the estimated theory, the discharge current waveshape estimation was performed by one antenna method using the measured electric fields of Wilson & Ma and compared with experiments.

I. 서 론

고기압 가스를 절연매체로 하는 가스절연개폐장치나 변압기 등과 같은 고전압 전력기기는 신뢰성 향상을 위해 기기의 운전 중에 이상 유무를 검출할 수 있는 항시감시시스템의 확립이 대단히 중요하다. 이와 같은 전력기기의 내부에서 절연 파괴가 일어나면 부분 방전에 의한 방사 전자파를 방사하게 되는데, 이 때 발생하는 전자파를 기기 외부의 적절한 위치에서 검출하여 기기의 이상 상태를 발견하고자 하는 연구가 보고되고 있다^{1)~3)}.

또한 개인용 컴퓨터로 대표되는 정보처리장치의 중요한 주변장치인 모니터 내부에서는 고압 발생용 변압기(FBT, Fly Back Transformer)가 절연 파괴시에 광대역의 주파수 스펙트럼을 포함하는 불요 전자파를 방출하게 되는데, 이 방사 전자파가 전자파 간섭원으로 작용하여 주변에 놓여진 전기전자기기 및 정보처리장치 등에 심각한 전자파 간섭(EMI, ElectroMagnetic Interference)을 일으키게 된다. 따라서 FBT가 절연 파괴에 이르기 전에 부분적으로 발생하는 부분 방전을 미리 검출하여 FBT의 결함을 사전에 알아내는 것은 대단히 유용하다.

그리고, 정전기 방전(ESD, ElectroStatic Discha-

영남대학교 전기전자공학부(School of Electrical and Electronics Engineering, Yeungnam University)

· 논문 번호 : 980311-033

· 수정완료일자 : 1998년 6월 18일

rge)의 분야에서는 ESD에 의해 방사되는 전자계가 넓은 대역의 주파수 스펙트럼을 포함하기 때문에 정보처리장치 및 전기전자기기 등에 중대한 전자파 간섭을 일으키게 하는 간섭원으로 작용한다. 특히 간접 ESD(indirect ESD)의 경우에는 직접 ESD(direct ESD)의 경우보다 더욱 심각한 전자파 간섭을 일으킨다는 사실이 알려져 있다.

이상에서와 같이, 가스절연개폐장치, 변압기, FBT 등과 같은 전력용 기기에서는 기기의 신뢰성 향상을 위해 결함을 사전에 검출할 수 있어야 한다. 이러한 경우에는 외부에서 측정된 방사 전자파의 정보로부터 방전원의 특성을 특정지을 수 있어야 한다. 그리고 ESD의 분야에서는 외부에서 측정된 방사 전자계로부터 방전전류를 추정하여 정전기 방전원의 모델 확립 및 정전기 방전 현상의 제반 특성을 파악할 필요가 있다.

전자파를 이용한 전력용 기기의 결함 검출에 관한 연구는 주로 방전원으로부터 발생하는 방사 전자파의 주파수 스펙트럼을 실험적으로 고찰하고 있는 것이 대부분이며^{[1]~[3]}, 부분 방전에서의 방전원의 모델화를 포함하여 방사 전자파로부터 방전원의 특성을 추정하는 추정법 이론에 관한 연구는 보고되어 있지 않다.

따라서, 필자들은 부분 방전이나 정전기 방전의 기본 모델로 사용되는 미소 간극의 전극을 생각하고, 전극에서 방전이 발생할 때 방출되는 전자파를 임의의 적절한 위치에서 측정하여 이로부터 방전전류의 파형을 추정하는 추정법 이론을 보고하였다^{[4], [5]}.

관측된 방사 전자계를 이용하여 방전원의 특성(전류파형)을 추정하는 추정법 이론으로서는 이미 문헌^{[4], [5]}에서 언급한 것과 같이 두 가지의 추정법 이론을 생각할 수 있다. 즉, (1) 한 개의 안테나를 사용하여 측정된 단일 전계 또는 단일 자계로부터 방전원의 전류파형을 추정하는 “1 안테나 법(또는 단일 전자계 법으로 명명하며, E 방법과 H 방법으로 구분)”과, (2) 두 개의 안테나를 사용하여 측정된 복수의 전계 또는 전계와 자계로부터 방전원의 전류파형을 추정하는 “2 안테나 법(또는 복수 전자계 법으로 명명하며, EE 방법과 EH 방법으로 구분, 참고로 HH 방법도 생각할 수 있으나 본 논문에는

서는 EE 및 EH 방법만을 생각함)”이 그것이다. 여기서 E 및 H는 각각 관측된 전계 및 관측된 자계를 의미한다.

본 논문에서는 위에서 설명한 두 가지의 추정법 이론 중에서 한 개의 안테나를 사용하여 관측한 하나의 측정 전계 또는 자계를 이용하여 추정하는 “1 안테나 법”의 “E방법”을 이용한 방전전류의 파형 추정법에 관하여 검토하고 있다. 추정법 이론으로서는 방전원을 다이폴 모델로 근사시켜 이로부터 계산된 순방향 문제(또는 순문제, forward problem)의 방사 전자계를 이용하여 역방향 문제(또는 역문제, inverse problem)와 관련시켜 방전원의 방전전류에 관한 식을 유도하고 있다.

그리고, 1 안테나 법의 E 방법으로 추정된 방전전류의 파형을 Wilson & Ma의 실험결과^[6]와 비교하여 1 안테나 법에 의한 추정법 이론의 타당성에 대해서도 검토하였다.

II. 시간의존 전자계

그림 1은 미소 간극을 갖는 방전원을 길이가 l 인 미소 다이폴로 가정한 것이다. 이 모델은 정전기 방전의 연구에서 Wilson & Ma의 모델 또는 NIST의 모델로 잘 알려져 있다. 이러한 미소 다이폴에 전류 i 가 흐를 때 시간 t 에 의존하는 방사 전자계는 원주 좌표계에서 다음과 같이 구해진다^[6].

$$E_{\rho}(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{\rho z}{R^2} \left(\frac{3i(u)}{cR^2} + \frac{1}{c^2R} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (1)$$

$$E_z(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{3z^2}{cR^4} - \frac{1}{cR^2} \right) i(u) + \left(\frac{z^2}{c^2R^3} - \frac{1}{c^2R} \right) \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right] \quad (2)$$

$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi} \frac{\rho}{R} \left(\frac{i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (3)$$

여기서, R 은 방전원으로부터 관측점(ρ, ϕ, z)까

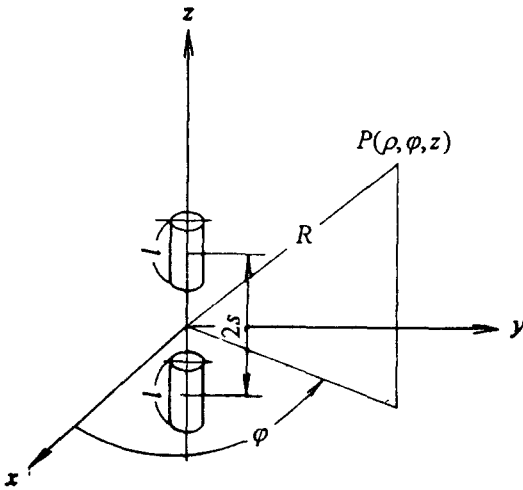


그림 1. 미소 간격 방전의 다이폴 모델
Fig. 1. Dipole model of small gap discharge.

지의 거리이며 $R = \sqrt{z^2 + \rho^2}$ 이다. $u = t - R/c$ 이며, c 는 광속, ϵ_0 는 진공의 유전율을 나타낸다.

III. 전류파형의 추정 이론

3-1 역문제

방전원에서 방전이 일어날 때 방출되는 방사 전자파를 측정하여 관측 전자계로부터 방전원의 특성을 결정(방전전류의 추정 또는 복원)하는 문제는 역문제에 해당한다.

그림 2는 본 논문에서 취급하는 역문제의 정의를 나타내고 있다. 그림 2에서 보는 것처럼 왼쪽은 원래의 전류공간을 나타내며 오른쪽은 관측 전자계

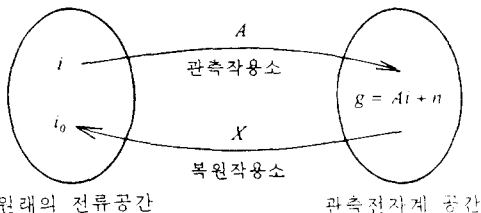


그림 2. 역문제의 정의
Fig. 2. Definition of inverse problem.
공간을 나타낸다. 관측 전자계 공간에서 측정된 전

자계로부터 원래의 방전 전류 파형을 추정하기 위한 전류 파형의 복원 과정은

$$g = Ai + n \tag{4}$$

$$i_0 = Xg \tag{5}$$

로 나타낼 수 있다.

식 (4)는 원래의 전류 공간으로부터 관측 전자계 공간으로의 작용을 나타내고 있으며, i 는 방전원의 전류, g 는 관측 전자계, n 은 잡음을 나타내고 A 는 관측 과정의 특성을 나타내는 관측작용소이다. 식 (5)는 관측 전자계 공간으로부터 원래의 전류 공간으로의 복원 과정을 나타내고 있으며, i_0 및 X 는 각각 복원 전류 및 복원작용소이다.

관측 전자계 공간에서 관측된 측정 전자계로부터 방전원의 전류파형을 복원하는 구체적인 방법(1 안테나법)은 다음과 같다. 이하 이상적인 경우를 생각하여 관측잡음 n 은 없는 것으로 가정한다.

3-2 1 안테나 법 (단일 전자계 법)

방전원으로부터 적절히 떨어진 공간의 한 지점(즉 관측 전자계 공간의 한 지점)에서 한 개의 안테나를 사용하여 관측한 측정 전계 또는 측정 자계를 이용하는 방법을 "1 안테나 법(One Antenna Method)" 또는 "단일 전자계 법(One Field Method)"이라 명명하기로 한다. 이러한 1 안테나 법은 전계를 측정하는 경우와 자계를 측정하는 경우로 구분할 수 있는데, 전계를 측정하여 방전전류를 추정하는 경우에는 E 방법(Electric Field Method), 자계를 측정하여 추정하는 경우에는 H 방법(Magnetic Field Method)이라고 하였다.

이와 같은 1 안테나 법에 있어서 복원 작용소는 순문제에서 구해진 식 (1)~ 식 (3)의 시간영역 전자계를 이용하여 구할 수 있다. 그리고 전계를 측정하여 추정할 것인가 자계를 측정하여 추정할 것인가는 측정의 난이도에 의존하지만, 측정용 안테나의 개발 등을 고려하여 전계를 측정하는 것이 바람직하다고 생각된다. 주위에 잡음이 많고 방사 전계 강도가 미약한 경우라면 자계를 측정하는 H 방법이 효과적일 경우도 있다. 본 논문에서는 전계를 측정하여 추정하는 E 방법을 중심으로 논의하며, H 방

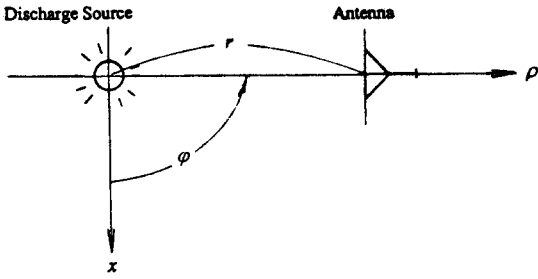


그림 3. 1 안테나 법(단일 전자계법)
Fig. 3. One antenna method(Single field method).

법은 E 방법과 추정법 이론의 전개 과정이 동일하므로 이론만 언급하기로 한다.

먼저, 1 안테나 법 중에서 방사 전계를 측정하여 방전전류를 추정하는 E 방법을 적용하는 경우의 전류 파형 추정법을 설명한다. 그림 3은 1 안테나 법에 의한 방전전류의 파형 추정을 위한 개략도이다. 그림 3에서 보는 것처럼 $z=0, \rho=r$ 의 위치에서 시간영역 전계 측정용 안테나로 측정된 시간영역의 방사 전계 $E_z(t)$ 를 이용하면 추정해야 할 방전전류는 식 (2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(\omega) = \frac{F\{E_z(t)\}}{Z_E(\omega)} \quad (6)$$

여기서,

$$Z_E(\omega) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{cR^2} + j\omega \frac{1}{c^2R} \right) e^{-\frac{j\omega R}{c}} \quad (7)$$

이며, $R=r$ 이고 F 는 푸리에 변환을 나타낸다. 그리고, 식 (7)의 역수 $Z_E^{-1}(\omega)$ 은 E 방법에서의 복원 작용소 X 에 해당한다.

식 (6)을 역푸리에 변환하면 다음 식과 같이 시간영역에서의 방전전류를 구할 수 있다.

$$i(t) = F^{-1}\{I(\omega)\} \quad (8)$$

여기서, F^{-1} 는 역푸리에 변환을 나타낸다.

다음으로, 1 안테나법 중에서 방사 자계를 측정하여 방전전류를 추정하는 H 방법을 적용하는 경우의 전류파형 추정법을 설명한다. 그림 3에서 보는 것처럼 $z=0, \rho=r$ 의 위치에서 시간영역의 자계 측정용 안테나로 측정된 시간영역의 자계 $H_\phi(t)$

를 이용하면 추정해야 할 방전전류는 식 (3)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(\omega) = \frac{F\{H_\phi(t)\}}{Z_H(\omega)} \quad (9)$$

여기서,

$$Z_H(\omega) = \frac{lr}{2\pi R} \left(\frac{1}{R^2} + j\omega \frac{1}{cR} \right) e^{-\frac{j\omega R}{c}} \quad (10)$$

이며, $R=r$, 식 (10)의 역수 $Z_H^{-1}(\omega)$ 는 H 방법에서의 복원작용소 X 에 해당한다.

식 (9)를 역푸리에 변환하면 다음 식과 같이 시간영역에서의 방전전류를 구할 수 있다.

$$i(t) = F^{-1}\{I(\omega)\} \quad (11)$$

여기서, F^{-1} 는 역푸리에 변환을 나타낸다.

이상과 같이, 1 안테나 법에는 전계를 사용하는 E 방법과 자계를 사용하는 H 방법을 생각할 수 있는데, 잡음이 많고 방사 전계강도가 미약한 곳에서는 H 방법을 사용하는 것이 효과적인 경우가 있다는 것을 앞에서 언급하였다. E 방법이나 H 방법 모두 전류파형 추정법 이론의 전개 과정은 기본적으로 동일하므로 본 논문에서는 전계를 사용하는 E 방법을 중심으로 논의하고자 한다.

1 안테나 법은 한 개의 안테나를 사용하면 된다는 장점이 있지만 푸리에 변환 및 역푸리에 변환의 과정을 거쳐야 하므로 변환과정을 포함하고 있다는 점이 단점일 수도 있다.

IV. 방전전류의 추정결과 및 검토

그림 4는 Wilson & Ma^[6]가 미소 간극 방전원으로부터 방사되는 시간영역의 전계를 더블릿지드 혼 안테나로 측정한 방사 전계강도를 나타낸다. 본 논문에서는 이를 사용하여 "1 안테나 법"의 "E 방법"으로 방전전류를 추정한다.

그림 4의 측정 전계를 사용하여 식 (8)로부터 추정한 방전전류의 파형을 그림 5에 나타낸다. 그림 5로부터 알 수 있는 것처럼 방전전류의 파형 추정치는 Wilson & Ma의 전류파형 측정치^[6]와 전류의 크기 및 최대치가 나타나는 시각에 차이가 있으나

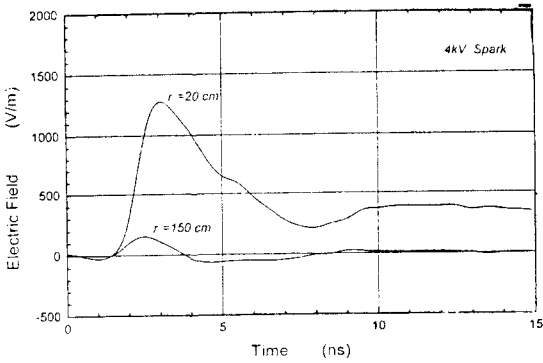
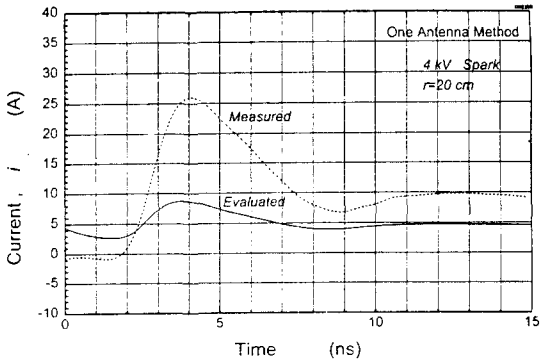
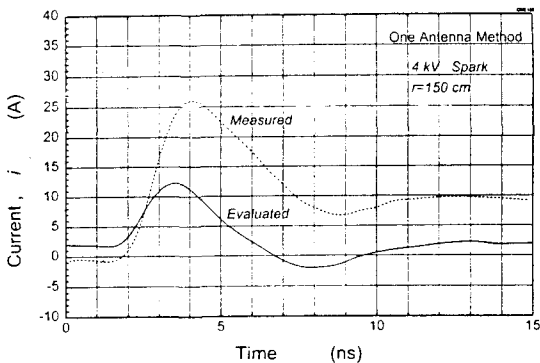


그림 4. 거리에 따른 방사 전기장도

Fig. 4. Radiated electric fields as a function of distance.



(a) $r=20$ cm



(b) $r=150$ cm

그림 5. 방전 전류파형의 추정결과

Fig. 5. Estimated discharge current waveshapes.

비교적 그 경향이 잘 복원되고 있음을 알 수 있다.

전류의 크기에 차이가 나는 것은 이론 계산에 사용한 방전원의 모델이 실제의 방전원과 차이가 있는 점, 그리고 시간 영역의 전계 측정시에 발생하는 측정 오차, 시간 영역과 주파수 영역의 변환 오차 등이 원인으로 생각된다.

전류파형 추정에서의 푸리에 역변환은 $N=1024$ 개의 복소 데이터에 관한 이산 푸리에 변환을 FFT (Fast Fourier Transform)를 사용하여 구했다.

Wilson & Ma는 다이폴의 길이를 명확히 언급하고 있지는 않지만 이들의 실험결과를 이용하기 위하여 본 논문에서는 Wilson & Ma의 계산결과 및 실험결과를 재검토하였다. 즉, Wilson & Ma가 문헌 [6]에서 보고한 전계강도의 실험결과를 본 논문에서의 식 (2)를 사용하여 검토한 결과, 방전원을 다이폴 모델로 근사할 때에는 유효 다이폴 길이가 5.8 cm일 경우 이론치와 실험치가 잘 일치하고 있음이 확인되었다(그림 6참조). Fujiwara [7]도 본 논문의 결과와 동일한 결과를 보고하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 유효 다이폴 길이를 5.8 cm로 하여 방전원의 특성 추정법을 검토하고 있으며, 그림 5는 유효 다이폴 길이를 5.8 cm로 하여 추정한 결과이다.

그림 5로부터 알 수 있는 것처럼 한 개의 안테나를 사용하여 방전원의 외부에서 관측한 측정 전계를 이용하면 방전전류의 추정(복원)이 가능할 것으로 생각된다. 보다 정확한 추정이 가능하려면 실제의 방전원과 잘 일치하는 방전원의 모델 개발이 필요하다. 따라서, 방전원 특성 추정법의 연구에 있어

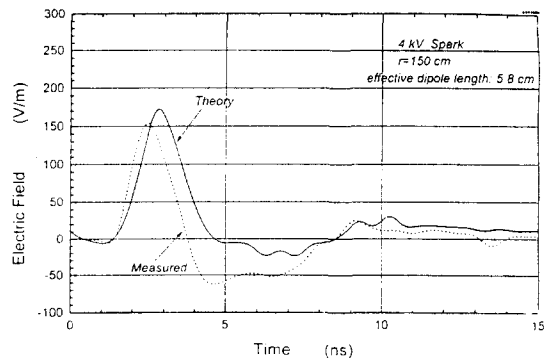


그림 6. 방사 전기장도의 이론치와 실험치

Fig. 6. Comparison of theoretical electric field and experimental results.

서 방전원의 모델 개발은 정전기 방전 연구에서의 ESD모델 개발과 함께 아주 중요한 위치를 차지하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 유효 다이폴 길이가 5.8 cm일 때, 식 (2)로부터 계산한 전기장도를 문헌^[6]의 실험 결과와 비교한 것이다. 그림 6으로부터 이론치와 실험치는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 1 안테나 법의 E 방법을 사용하여 방전원의 방전 전류파형을 복원할 경우, 방전원의 계산 모델로 이용한 다이폴 모델의 유효 다이폴 길이를 5.8 cm로 하면 측정된 전계로부터 원래의 전류파형에 가까운 방전전류의 파형을 추정할 수 있다. 보다 실제에 가까운 방전원의 모델을 개발하면 아주 정확한 방전전류의 파형추정이 가능할 것으로 생각된다.

V. 맺음말

미소 간극에서 방전이 일어날 때 발생하는 전자파를 관측하여 측정된 전자계로부터 방전전류를 결정(추정 또는 복원)하는 방법으로서 1 안테나 법(단일 전자계 법, E 방법 및 H 방법)과 2 안테나 법(복수 전자계 법, EE 방법 및 EH 방법)을 생각할 수 있는데, 두 가지의 추정법 이론 중에서 "1 안테나 법"의 "E 방법"을 이용한 방전전류의 파형추정에 관하여 검토하였다.

본 논문의 결과는 방전이 일어날 때 발생하는 방사 전자파를 관측하여 이로부터 방전원의 방전전류를 추정할 수 있음을 시사하고 있으며, 기기내부에서 발생하는 절연 파괴의 예측 및 정전기 방전의 기본특성을 고찰하는 데에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 2 안테나 법과 1 안테나 법의 비교 검토 및 보다 실제에 가까운 방전원의 모델 개발은 남겨진 과제이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [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] K. Arai, X. Guoxiang and O. Sugimoto, "Micro-Gap Discharge Waveshapes and Radiated Electromagnetic Waves in Atmospheric Air and Sulphur Hexafluoride Gas", *Trans. of IEE Japan*, vol. 109-A, no. 3, pp. 103-110, 1989.
- [4] 김기채, 이광식, 이동인, "방사 전자파에 의한 미소간격 방전의 전류분포 추정에 관하여", 전자파학회종합학술대회, B-6, pp. 90-94, Nov. 1996.
- [5] 김기채, 이광식, 이동인, "방사 전자파에 의한 미소간격 방전의 전류파형 추정", 전기학회학계학술대회논문집, DHO 22, pp. 1708-1711, July 1997.
- [6] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Field radiated by Electrostatic Discharges", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 33, no. 1, pp. 10-18, Feb. 1991.
- [7] O. Fujiwara, "An Analytical Approach to Model Indirect Effect Caused by Electrostatic Discharge", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E79-B, no. 4, April 1996.

김 기 채



1984년 : 영남대학교 공과대학 전자공학
학과(공학사)
1986년 : 일본 Keio Univ. 대학원 전기
공학과(공학석사)
1989년 : 일본 Keio Univ. 대학원 전기
공학과(공학박사)
1989년 4월~1993년 3월 : 한국표준

과학연구원 전자파연구실 선임연구원

1993년 4월~1995년 8월 : 일본 후쿠오카공업대학 정보공학과
조교수

1995년 9월~현재 : 영남대학교 전기전자공학부 조교수

현재 : 한국전자과학회 평의원

[주 관심분야] 전자파 이론 및 안테나, EMC/EMI, 전자파
측정 및 응용

이 동 인



1959년 : 서울대학교 공과대학 전기공
학과(공학사)
1973년~1977년 : 영국 Strathclyde
Univ. 대학원 전기공학과(공학박
사)
1982년~1983년 : 미국 S. Carolina

Univ. 방문교수

현재 : 영남대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] 고전압 및 방전

이 광 식



1971년 : 영남대학교 전기공학과(공학
사)
1987년 : 영남대학교 대학원(공학박
사)
1988년~1989년 : Nagoya Institute
of Technology 초청연구원

현재 : 영남대학교 전기전자공학부 교수

대한전기학회 방전고전압 연구회 총무간사 역임

현재 한국조명·전기설비학회 이사겸 대구·경북지회장

[주 관심분야] 방전 및 오존