

방사 전자파에 의한 미소 간극 방전원의 방전 전류파형 추정

Estimation of Discharge Current Waveshapes in Short Gap Discharge by Radiated Electromagnetic Fields

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. 시간영역 전자계 측정용 안테나를 사용하여 적절한 위치에서 관측한 측정 전계 또는 측정 자기계로부터 방전전류를 추정하는 1 안테나 법(단일 전자계 법)과 2 안테나 법(복수 전자계 법)을 제시하고, 측정된 전계를 이용하여 1 안테나 법 및 2 안테나 법에 의한 방전전류의 파형을 추정(복원)하고 있다. 추정된 방전 전류파형은 Wilson & Ma의 방전 전류 측정 결과와도 비교하여 본 논문에서 제시한 2가지 추정법 이론의 타당성을 확인하고 있다.

Abstract

This paper presents the method for an estimation of discharge current waveshapes in short gap discharge by radiated electromagnetic fields. The method of current waveform estimation described is using the one antenna method(single field method) and two antenna method(complex 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 estimation theory, the discharge current waveshape estimation was performed by one and two antenna methods 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 하

는 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 한다. 따라서 FBT가 절연 파괴에 이르기 전에 부분적으로

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

· 논문 번호 : 990913-073

· 수정완료일자 : 1999년 11월 12일

발생하는 부분 방전을 미리 검출하여 FBT의 결합을 사전에 알아내는 것은 대단히 유용하다.

그리고, 정전기 방전(ESD, ElectroStatic Discharge)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.

전자파를 이용한 전력용 기기의 결합 검출에 관한 연구는 주로 방전원으로부터 발생하는 방사 전자파의 주파수 스펙트럼을 실험적으로 고찰하고 있는 것이 대부분이며^{[1]·[3]}, 부분 방전에서의 방전원 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 적절한 위치에서 측정하여 이로부터 방전전류의 파형을 추정하는 추정법 이론을 보고하였다^{[4],[5]}. 관측된 방사 전자계를 이용하여 방전원의 특성(전류파형)을 추정하는 추정법 이론으로서 이미 문헌^{[4],[5]}에서 언급한 것과 같이 두 가지의 추정법 이론을 생각할 수 있다. 즉, (1) 한 개의 안테나를 사용하여 측정한 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 측정한 복수의 전계 또는 전계와 자계로부터 방전원의 전류파형을 추정하는 "2 안테나 법(또는 복수 전자계 법으로 명명하며, EE 방법과 EH 방법으로 구분)"이 그것이다. 여기서 E 및 H는 각각 관측된 전계 및 관측된 자계를 의미한다.

추정법 이론으로서 방전원을 다이폴 모델로 근사시켜 계산된 순방향 문제(또는 순문제, forward problem)의 방사 전자계로부터 역방향 문제(또는 역문제, inverse problem)와 관련시켜 방전원의 방전 전류에 관한 식을 유도하고 있다. 본 논문에서는 위에서 설명한 두 가지의 추정법 이론을 사용하여 측

정 전계로부터 방전전류의 파형을 추정하고, 추정된 방전 전류파형을 실험결과와도 비교하여 추정법 이론의 타당성을 확인하였다.

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].

$$\mathbf{E}(\rho, z, t) = \hat{\rho}E_{\rho} + \hat{z}E_z \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(\rho, z, t) = \hat{\phi}H_{\phi} \quad (2)$$

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

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

$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{l}{2\pi} \frac{\rho}{R} \left(\frac{i}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i}{\partial u} \right) \quad (5)$$

여기서, R 은 방전원으로부터 관측점 (ρ, ϕ, z) 까지의 거리이며 $R = \sqrt{z^2 + \rho^2}$ 이다. $u = t - R/c$ 이며, c 는 광속, ϵ_0 는 진공의 유전율을 나타낸다.

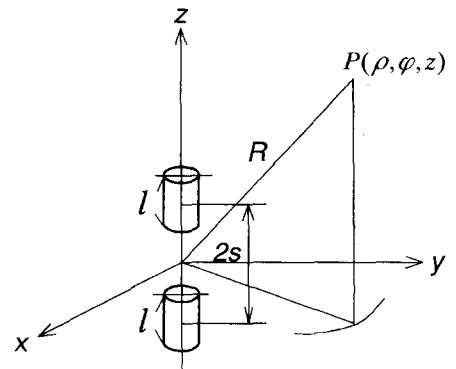


그림 1. 미소 간극 방전의 다이폴 모델
Fig. 1. Dipole model of small gap discharge.

음 n 은 없는 것으로 가정한다.

Ⅲ. 전류파형의 추정 이론

3-1 역문제의 정의

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 전류 공간을 나타내며 오른쪽은 관측 전자계 공간을 나타낸다. 관측 전자계 공간에서 측정된 전자계로부터 원래의 방전 전류파형을 추정하기 위한 전류파형의 복원 과정은

$$g = Ai + n \tag{6}$$

$$i_0 = Xg \tag{7}$$

로 나타낼 수 있다.

식 (6)은 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 (7)은 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 방법은 다음과 같다. 이하 이상적인 경우를 생각하여 관측잡

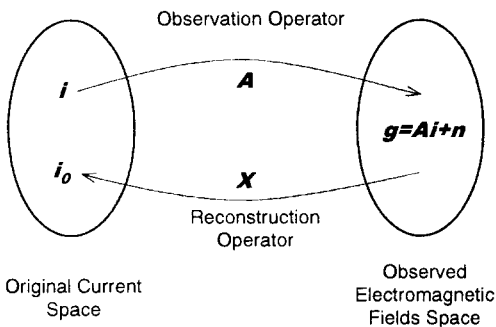


그림 2. 역문제의 정의

Fig. 2. Definition of inverse problem.

3-2-1 안테나 법(단일 전자계 법)

방전원으로부터 적절히 떨어진 공간의 한 지점에, 서 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 (3)~식 (5)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 전계강도가 미약한 경우라면 자계를 측정하는 H 방법이 효과적일 경우도 있다.

3-2-1 E 방법

먼저, 1 안테나 법 중에서 방사 전계를 측정하여 방전전류를 추정하는 E 방법을 적용하는 경우의 전류파형 추정법을 설명한다. 그림 3(a)는 1 안테나 법으로 방전 전류의 파형을 추정하기 위한 개략도이다. $z=0$, $\rho=r$ 의 위치에서 시간영역 전계 측정용 안테나로 측정된 시간영역의 방사 전계 $E_z(t)$ 를 이용하면 추정해야 할 방전전류는 식 (4)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(\omega) = \frac{F\{E_z(t)\}}{Z_E(\omega)} \tag{8}$$

여기서,

$$Z_E(\omega) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{cR^2} + j\omega \frac{1}{c^2R} \right) e^{-\frac{j\omega R}{c}} \tag{9}$$

이며, $R=r$ 이고 F 는 푸리에 변환을 나타낸다. 그리고, 식 (9)의 역수 $Z_E^{-1}(\omega)$ 은 E 방법에서의 복원작용소 X 에 해당한다.

식 (8)을 역푸리에 변환하면 다음 식과 같이 시간영역에서의 방전전류를 구할 수 있다.

$$i(t) = F^{-1}\{I(\omega)\} \quad (10)$$

여기서, F^{-1} 는 역푸리에 변환을 나타낸다.

3-2-2 H 방법

1 안테나 법 중에서 방사 자계를 측정하여 방전전류를 추정하는 H 방법을 적용하는 경우의 전류파형 추정법을 설명한다. $z=0$, $\rho=r$ 의 위치에서 시간영역 자계 측정용 안테나로 측정된 시간영역의 자계 $H_\phi(t)$ 를 이용하면 추정해야 할 방전전류는 식 (5)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(\omega) = \frac{F\{H_\phi(t)\}}{Z_H(\omega)} \quad (11)$$

여기서,

$$Z_H(\omega) = \frac{lr}{2\pi R} \left(\frac{1}{R^2} + j\omega \frac{1}{cR} \right) e^{-\frac{j\omega R}{c}} \quad (12)$$

이며, $R=r$, 식 (12)의 역수 $Z_H^{-1}(\omega)$ 는 H 방법에서의 복원작용소 X 에 해당한다.

식 (11)을 역푸리에 변환하면 다음 식과 같이 시간영역에서의 방전 전류를 구할 수 있다.

$$i(t) = F^{-1}\{I(\omega)\} \quad (13)$$

여기서, F^{-1} 는 역푸리에 변환을 나타낸다.

이상과 같이, 1 안테나 법에는 전계를 사용하는 E 방법과 자계를 사용하는 H방법을 생각할 수 있는데, E 방법이나 H 방법 모두 전류파형 추정법 이론의 전개 과정은 기본적으로 동일하다. 1 안테나 법은 한 개의 안테나를 사용하면 된다는 장점이 있지만 푸리에 변환 및 역푸리에 변환의 과정을 거쳐야 하므로 변환과정을 포함하고 있는 것이 단점일 수도 있다.

3-3 2 안테나 법(복수 전자계 법)

방전원으로부터 적절히 떨어진 공간의 두 지점에서 두 개의 안테나를 사용하여 관측한 측정 전계 또는 측정 자계를 이용하는 방법을 "2 안테나 법(Two Antenna Method) 또는 "복수 전자계 법(Complex Field Method)" 이라 명명하기로 한다. 이러한 2 안테나 법은 전계를 측정하는 경우와 자계를 측정하는 경우로 구분할 수 있는데, 두 지점에서의 전계를 측정하여 방전전류를 추정하는 방법을 EE 방법(Electric and Electric Field Method), 두 지점에서 전계와 자계를 각각 측정하여 추정하는 방법을 EH 방법(Electric and Magnetic Field Method)이라고 하였다.

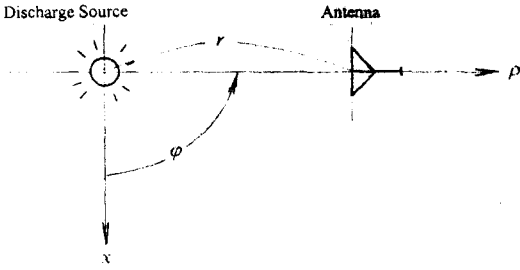
이와 같은 2 안테나 법에 있어서 복원 작용소는 순문제에서 구해진 식 (3)~식 (5)의 시간영역 전자계를 이용하여 구할 수 있다. 그리고 전계만을 측정하여 추정할 것인가 또는 전계와 자계 모두를 측정하여 추정할 것인가는 측정의 난이도에 의존하지만, 측정용 안테나의 개발 등을 고려하여 전계만을 측정하는 것이 바람직하다고 생각된다. 주위에 잡음이 많고 방사 전계강도가 미약한 경우라면 한 번의 자계 측정을 포함하는 EH 방법, 혹은 두 지점에서 모두 자계를 측정하는 HH방법이 효과적일 경우도 있다.

3-3-1 EE 방법

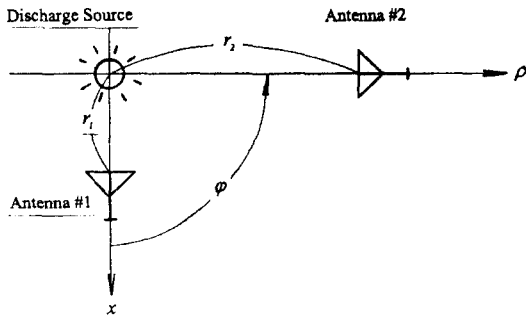
먼저, 2 안테나 법 중에서 두 지점에서의 방사 전계를 측정하여 방전전류를 추정하는 EE 방법을 적용하는 경우의 전류파형 추정법을 설명한다.

그림 3(b)는 2 안테나 법으로 방전 전류의 파형을 추정하기 위한 개략도이다. 그림 3(b)에 나타난 것처럼 r_1 및 r_2 의 위치에서 두 개의 시간영역 전계 측정용 안테나로 측정된 시간영역의 방사 전계 $E_{z1}(r_1, t)$ 및 $E_{z2}(r_2, t)$ 는 다음과 같다.

$$E_{z1}(r_1, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{3z^2}{cR_1^4} - \frac{1}{cR_1^2} \right) i + \left(\frac{z^2}{c^2R_1^3} - \frac{1}{c^2R_1} \right) \frac{\partial i}{\partial u} \right] \quad (14)$$



(a) One antenna Method



(b) Two antenna method

그림 3. 1 안테나 법(a)과 2 안테나 법(b)

Fig. 3. One antenna method(a) and two antenna method(b).

$$E_{z2}(r_2, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{3z^2}{cR_2^4} - \frac{1}{cR_2^2} \right) i + \left(\frac{z^2}{c^2R_2^3} - \frac{1}{c^2R_2} \right) \frac{\partial i}{\partial u} \right] \quad (15)$$

단, $R_1 = \sqrt{z^2 + r_1^2}$, $R_2 = \sqrt{z^2 + r_2^2}$ 이다.

위의 식으로부터 방전 전류 및 방전 전류의 시간 미분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} i \\ \frac{\partial i}{\partial u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E_{z1} \\ E_{z2} \end{pmatrix} \quad (16)$$

여기서, 복원작용소 $X \equiv (A)^{-1}$ 의 요소는 다음과 같다.

$$A_1 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{3z^2}{cR_1^4} - \frac{1}{cR_1^2} \right) \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{z^2}{c^2R_1^3} - \frac{1}{c^2R_1} \right) \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{3z^2}{cR_2^4} - \frac{1}{cR_2^2} \right) \quad (19)$$

$$A_4 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{z^2}{c^2R_2^3} - \frac{1}{c^2R_2} \right) \quad (20)$$

따라서, 관측 전계 E_{z1} , E_{z2} 가 주어지면 식 (16)으로부터 방전 전류 및 방전 전류의 시간미분은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$i = \frac{A_4 E_{z1} - A_2 E_{z2}}{\Delta A} \quad (21)$$

$$\frac{\partial i}{\partial u} = \frac{A_1 E_{z2} - A_3 E_{z1}}{\Delta A} \quad (22)$$

여기서, $\Delta A = A_1 A_4 - A_2 A_3$ 이다.

3-3-2 EH 방법

2 안테나 법 중에서 방사 전계 및 방사 자계를 측정하여 방전 전류를 추정하는 EH 방법을 적용하는 경우의 전류파형 추정법을 설명한다. 그림 3(b)에서 보는 것처럼 관측전자계 공간에서 두 개의 안테나 (전계 측정용 및 자계 측정용 안테나)로 두 지점에서 관측된 전계 및 자계를 각각 $E_z(r_1, t)$ 및 $H_\varphi(r_2, t)$ 라 하면 전자계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_z(r_1, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{3z^2}{cR_1^4} - \frac{1}{cR_1^2} \right) i + \left(\frac{z^2}{c^2R_1^3} - \frac{1}{c^2R_1} \right) \frac{\partial i}{\partial u} \right] \quad (23)$$

$$H_\varphi(r_2, t) = \frac{l}{2\pi} \frac{r_2}{R_2} \left(\frac{i}{R_2^2} + \frac{1}{cR_2} \frac{\partial i}{\partial u} \right) \quad (24)$$

단, $R_1 = \sqrt{z^2 + r_1^2}$, $R_2 = \sqrt{z^2 + r_2^2}$ 이다.

식 (23) 및 식 (24)로부터 방전 전류 및 방전 전류의 시간미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} i \\ \frac{\partial i}{\partial u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E_z \\ E_\varphi \end{pmatrix} \quad (25)$$

여기서, 복원작용소 $X \equiv (B)^{-1}$ 의 요소는 다음과 같다.

$$B_1 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{3z^2}{cR_1^4} - \frac{1}{cR_1^2} \right) \quad (26)$$

$$B_2 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{z^2}{c^2R_1^3} - \frac{1}{c^2R_1} \right) \quad (27)$$

$$B_3 = \frac{l}{2\pi} \frac{r_2}{R_2^3} \quad (28)$$

$$B_4 = \frac{l}{2\pi} \frac{r_2}{cR_2^2} \quad (29)$$

따라서, 관측된 전자계 $E_z(r_1, t)$ 및 $H_\phi(r_2, t)$ 가 주어지면, 식 (25)로부터 방전전류 및 방전전류의 시간미분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i = \frac{B_1 E_z - B_2 H_\phi}{\Delta B} \quad (30)$$

$$\frac{\partial i}{\partial t} = \frac{B_1 H_\phi - B_3 E_z}{\Delta B} \quad (31)$$

여기서, $\Delta B = B_1 B_4 - B_3 E_z$ 이다.

이상과 같이, 2 안테나 법에는 전계를 사용하는 EE 방법과 전계와 자계를 사용하는 EH방법을 생각할 수 있는데, EE 방법이나 EH 방법 모두 전류파형 추정법 이론의 전개 과정은 기본적으로 동일하므로 본 논문에서는 전계를 사용하는 EE 방법을 중심으로 논의하고자 한다.

2 안테나 법은 두 개의 안테나를 사용하여 두 지점에서의 전자계를 측정하므로 1 안테나 법보다는 전류파형의 추정 정밀도가 높지만 측정시의 오차(잡음) 혼입은 1 안테나 법보다 높아질 것이다. 이상의 전류파형 추정과정은 Iwasaki & Ishikami [7]의 전하 추정방법과 유사하다.

IV. 방전전류의 추정결과 및 검토

4-1 1 안테나 법

그림 4는 Wilson & Ma^[6]가 미소 간극 방전원으로부터 방사되는 시간영역 전계의 측정결과를 나타낸다. 본 절에서는 이를 사용하여 "1 안테나 법"의 "E 방법"으로 방전 전류를 추정한다.

그림 4의 측정 전계를 사용하여 식 (8)로부터 추정된 방전 전류의 파형을 그림 5에 나타낸다. 그림 5

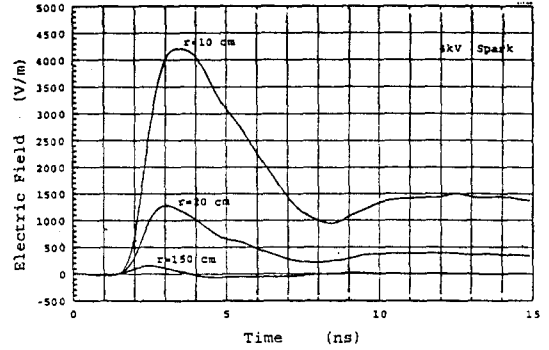
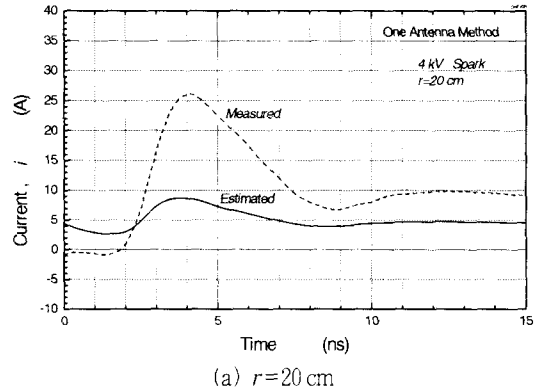
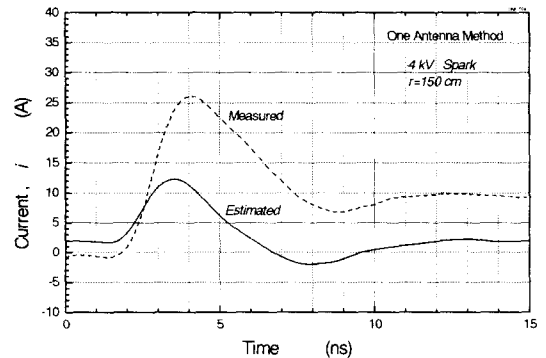


그림 4. 거리에 따른 방사 전계강도
Fig. 4. Radiated electric fields as a function of distance.



(a) $r=20$ cm



(b) $r=150$ cm

그림 5. 방전 전류파형의 추정결과
Fig. 5. Estimated discharge current waveshapes.

로부터 알 수 있는 것처럼 방전 전류의 파형 추정치는 Wilson & Ma의 전류파형 측정치^[6]와 전류의 크기 및 최대치가 나타나는 시각에 차이가 있으나 비교적 그 경향이 잘 복원되고 있음을 알 수 있다. 전

류의 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 6 참조). Fujiwara^[8]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 방전 전류의 추정(복원)이 가능할 것으로 생각된다. 보다 정확한 추정이 가능하려면 실제의 방전원과 잘 일치하는 방전원의 모델 개발이 필요하다.

그림 6은 유효 다이폴 길이가 5.8 cm일 때, 식 (2)로부터 계산한 전계강도를 문헌[6]의 실험 결과

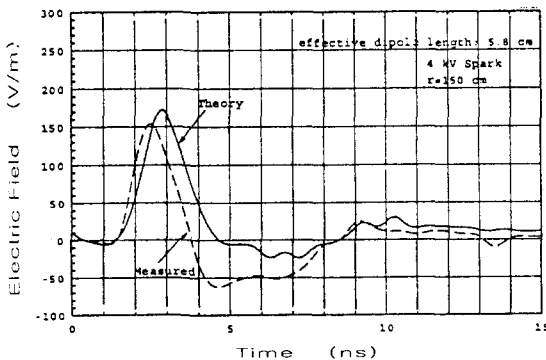


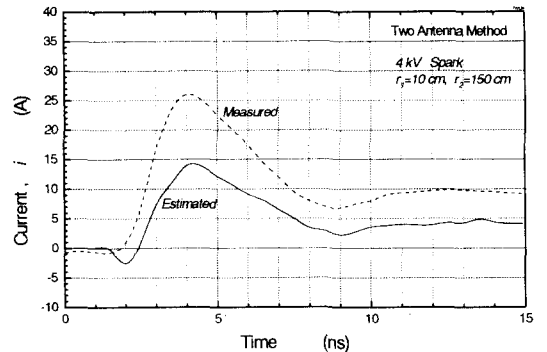
그림 6. 방사 전계강도의 이론치와 실험치
Fig. 6. Comparison of theoretical electric field and experimental results.

와 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 방전 전류의 파형을 추정할 수 있다.

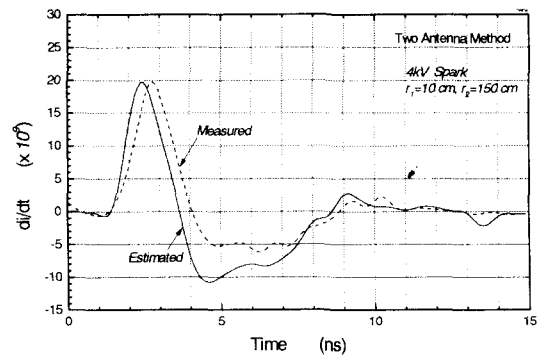
4-2 2 안테나 법

본 절에서는 미소 간극 방전원으로부터 방사되는 시간영역의 측정 전계를 사용하여 "2 안테나 법"의 "EE 방법"으로 추정된 방전전류에 대하여 검토한다.

그림 4의 측정 전계를 사용하여 식 (21) 및 식



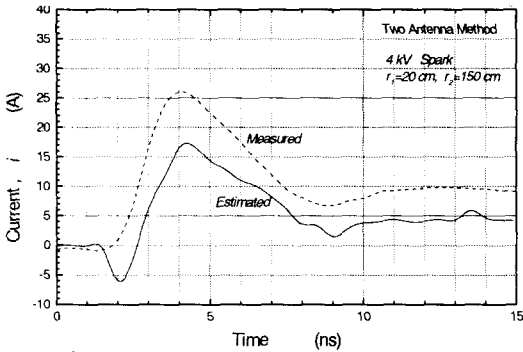
(a) i



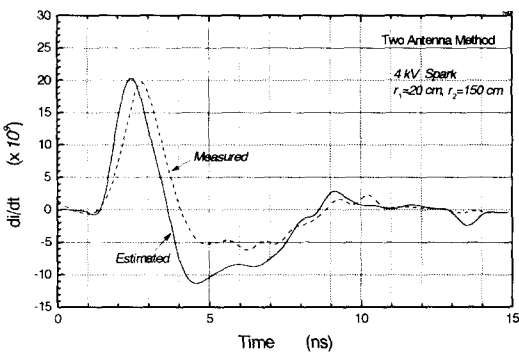
(b) di/dt

그림 7. 2 안테나 법에 의한 방전 전류파형의 복원 ($r_1=10$ cm, $r_2=150$ cm).

Fig. 7. Estimated discharge current waveshapes by two antenna method ($r_1=10$ cm, $r_2=150$ cm).



(a) i



(b) $\frac{di}{dt}$

그림 8. 2 안테나 법에 의한 방전 전류파형의 복원 ($r_1=20\text{ cm}$, $r_2=150\text{ cm}$)

Fig. 8. Estimated discharge current waveshapes by two antenna method ($r_1=20\text{ cm}$, $r_2=150\text{ cm}$).

(22)로부터 추정된 방전 전류 및 방전 전류의 미분 파형을 그림 7 및 그림 8에 나타낸다. 그림 7과 그림 8로부터 알 수 있는 것처럼 방전 전류 및 방전 전류의 미분파형 추정치는 Wilson & Ma의 전류파형 측정치^[6]와 전류의 크기에 차이가 있으나 그 경향이 잘 일치하고 있으며, 전류파형의 최대치가 나타나는 시각은 비교적 잘 일치하고 있다. 특히, 원역장(far field)을 생성하게 하는 방전 전류의 미분파형은 그 경향이 아주 잘 일치하고 있다. 전류의 크기에 차이가 나는 것은 이론 계산에 사용한 방전원의 모델이 실제의 방전원과 차이가 있는 점, 그리고 시간 영역의 전계 측정시에 발생하는 측정 오차 등이 원인으로 생각된다.

그림 7 및 그림 8로부터 알 수 있는 것처럼, 두 개의 안테나를 사용하여 방전원의 외부에서 관측한 측

정 전계를 이용하면 방전 전류의 추정(복원)이 가능할 것으로 생각되며, 2 안테나 법은 1 안테나 법보다 추정 전류파형이 보다 더 측정결과에 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

보다 정확한 추정을 가능하게 하기 위해서는 실제의 방전원과 잘 일치하는 방전원의 모델 개발이 필요하다. 따라서, 방전원 특성 추정법의 연구에 있어서 방전원의 모델 개발은 시간영역 전자계의 측정과 함께 아주 중요한 위치를 차지하고 있음을 알 수 있다.

V. 맺음말

미소 간극에서 방전이 일어날 때 발생하는 방사 전자파를 관측하여 측정된 전자계로부터 방전 전류를 결정(추정 또는 복원)하는 방법으로는 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 법의 E 방법 및 2 안테나 법의 EE 방법을 이용한 방전 전류의 파형추정에 관하여 검토하였다.

본 논문의 결과는 방전이 일어날 때 발생하는 방사 전자파를 관측하여 이로부터 방전원의 방전 전류를 추정할 수 있음을 시사하고 있으며, 기기 내부에서 발생하는 절연 파괴의 예측 및 정전기 방전의 기본특성을 고찰하는 데에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 기대된다. 보다 실제에 가까운 방전원의 모델 개발은 남겨진 과제이다.

참 고 문 헌

- [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*,

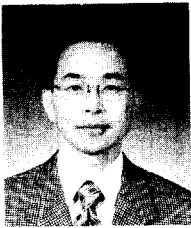
vol. 109-A, no. 3, pp. 103-110, 1989.

- [4] 김기채, 이광식, 이동인: "1 안테나 법에 의한 미소 간격 방전의 전류파형 추정", 한국전자파 학회 논문지, 제9권, 제4호, pp. 499-505, 1998.
- [5] K. C. Kim, K. S. Lee, and D. I. Lee: "On the estimation of ESD current waveshapes by radiated electromagnetic fields", *Proc. of 1999 Inter. Symp. On Electromagnetic Compatibility*, 18P404, pp. 145-148, Tokyo, 1999.
- [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] S. Ishigami and T. Iwasaki: "Evaluation of charge transition in a small gap discharge", *IEICE Trans.*, vol. E79-B, no. 4, pp. 474-482, Apr. 1996.
- [8] O. Fujiwara: "An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E79-B, no. 4, Apr. 1996.

김 기 채



1984년: 영남대학교 전자공학과(공학사)

1986년: Keio Univ. 대학원(공학석사)

1989년: Keio Univ. 대학원(공학박사)

1989년 4월~1993년 3월: 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원

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

1995년 9월~현재: 영남대학교 전기전자공학부 부교수, 한국전자파학회 평의원, 일본 IEICE Young Engineer Award(1988), 일본 전기학회 논문발표상 수상(1994)

[주 관심분야] EMC/EMI관련 안테나 및 측정시설, 소형 안테나 및 전자파 응용

이 동 인



1959년: 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업

1973년~1977년: 영국 Strathclyde Univ. 대학원 전기공학과 졸업(Ph.D.)

1982년~1983년: 미국 S. Carolina Univ. 방문교수

현재: 영남대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] 고전압 및 방전

이 광 식



1971년: 영남대학교 전기공학과(공학사)

1987년: 영남대학교 대학원 졸업(Ph.D.)

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