

방사 전자파에 의한 미소간격 방전의 전류파형 추정

° 김 기 채, 이 광 식, 이 동 인
영남대학교, 전기전자공학부

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

Ki-Chai Kim, Kwang Sik Lee, Dong In Lee
Yeungnam University
School of Electrical and Electronics Engineering

요 약

본 논문에서는 미소간격의 전극에서 방전이 일어날 때 방사되는 전자파로부터 방전전류의 파형을 추정하는 방법에 관하여 검토하고 있다. 시간영역 전자계 측정용 안테나로부터 임의의 위치에서 측정한 전계 또는 자계를 이용하는 1안테나법(단일 전자계법)과 두 지점에서 측정한 전계 또는 자계를 이용하는 2안테나법(복수 전자계법)을 제안하고 있다. Wilson & Ma가 제시한 두 지점의 전계로부터 2안테나법으로 추정된 방전전류의 파형을 Wilson & Ma의 실험결과와 비교하고 있다.

1. 서 론

기기내부의 미약방전으로 인한 방사전자파를 외부에서 측정하여 이로부터 기기의 이상상태를 검출하고자 하는 연구가 보고되고 있다[1]. 또한 정전기 방전과 같은 방전현상은 넓은 주파수 스펙트럼을 갖고 있으므로 정보처리 장치 및 기기 등에 심각한 전자파 간섭을 일으키게 하는 간섭원으로 작용한다. 전자의 경우는 외부에서 측정한 전자파로부터 방전원의 특성을 특정지을 수 있어야 하고, 후자의 경우는 정전기 방전의 모델을 확립하여 이로부터 정전기 방전의 제반특성을 검토해야 한다.

필자들은 미약방전이나 정전기 방전의 기본 모델로서 생각할 수 있는 미소간격의 전극을 생각하고, 방전이 발생할 때 방사되는 전자파를 측정하여 이로부터 방전전류의 파형을 추정하는 일방법에 관하여 보고하였다[2].

본 논문에서는 단발펄스 및 연속(주기)펄스에 대하여 하나의 측정전계 또는 측정자계를 이용하여 추정하는 1안테나법(또는 단일 전자계법, 또는 E 방법, H 방법)과, 두 가지의 측정 전자계를 이용하여 추정하는 2안테나법(또는 복수 전자계법, 또는 EE 방법, EH 방법)을 제안하고, 2안테나법(EE 방법)을 이용한 전류파형 및 전류의 시간미분 파형의 추정결과를 Wilson & Ma의 실험결과와 비교 검토하였다.

2. 시간의존 전자계

그림 1은 미소간격을 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 다이폴로부터 방사되는 시간의존 전자계는 다음과 같이 구해진다.

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

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

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

여기서, $R = \sqrt{z^2 + \rho^2}$, $u = t - R/c$ 이다.

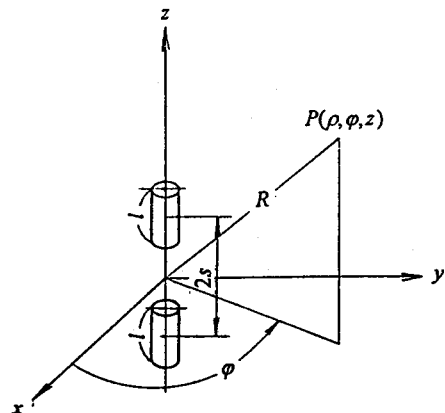


그림 1 미소간격 전극의 구조와 좌표계

3. 전류파형의 추정

3-1. 역문제

측정한 전자계로부터 방전원의 특성을 추정하는 문제는 역문제에 해당한다. 그림 2는 본 논문에서 취급하는 역문제의 정의를 나타내고 있다.

전류파형의 복원과정은 그림 2에 나타낸 것처럼 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$g = Ai + n \quad (4)$$

$$i_0 = Xg \quad (5)$$

여기서, i, g, n 및 A 는 각각 방전원의 전류, 관측전자계, 잡음 및 관측과정의 특성을 나타내는 작용소이다. 또한 i_0 및 X 는 각각 복원전류 및 복원작용소이다.

관측전자계 공간에서 관측된 측정 전자계로부터 방전원의 전류파형을 복원하는 구체적인 방법(즉 1안테나법 및 2안테나법)에 대하여 다음 절에서 살펴보기로 한다. 이하 관측잡음은 없는 것으로 가정한다.

3-2. 1안테나법(단일 전자계법)

관측전자계 공간의 한 지점에서 하나의 안테나를 사용하여 측정된 전계(또는 자계)를 이용하는 방법을 "1안테나법(One Antenna Methods)" 또는 "단일 전자계법(One Field Methods)"이라고 하자. 이 방법에 의한 복원 작용소 X 는 식(1) - 식(3)을 이용하여 구할 수 있다.

전계를 측정할 것인가 자계를 측정할 것인가는 측정의 난이도에 의존하지만, 단 한 번의 측정전계(또는 측정자계)를 이용하여 방전전류를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 설명을 간편하게 하기 위하여 전계를 중심으로 논의한다.

$z=0, \rho=r$ 의 위치에서 관측된 전계를 이용하면 복원전류는 식(2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} F\{E_z(r, t)\} \quad (6)$$

여기서,

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

이며, $Z^{-1}(\omega)$ 은 복원작용소 X 에 해당한다. 그리고, $R = \sqrt{z^2 + r^2} = r$ 이다.

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

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

이 방법을 사용하면 2회의 푸리에 변환 과정을 거쳐야 한다.

3-3. 2안테나법(복수 전자계법)

관측전자계 공간의 임의의 두 위치에서 2개의 안테나로 측정된 전계(또는 자계)를 이용하여 방전전류를 추정하는 방법을 "2안테나법(Two Antenna Methods)" 또는 "복수 전자계법(Two Field Methods)"이라고 하자. 2안테나법에는 (1) 두 위치에서 전계(E-Field)를 동시에 관측하여 추정하는 "EE 방법"과, (2) 전계와 자계(H-Field)

를 동시에 측정하여 추정하는 "EH 방법"으로 구분할 수 있다.

문헌(2)에서 제안한 방법은 하나의 안테나로 시간간격을 두고 측정된 두 위치에서의 전계를 이용하고 있으나, 단발펄스에 대해서는 적용할 수 없는 단점이 있다. 그러나, 본 논문에서 제안하는 2안테나법은 2개의 안테나를 사용하여 두 전자계를 동일 시각에 동시에 측정하므로 단발펄스에도 적용할 수 있다.

(1) EE 방법

방전원으로부터 각각 다른 거리에 놓여진 두 안테나로부터 전계를 관측하여 방전원의 전류파형을 추정하는 방법이다. 자계를 관측하는 "HH 방법"도 생각할 수 있으나 본 논문에서는 전계를 관측하는 EE 방법을 중심으로 논의하고자 한다.

두 개의 안테나로부터 관측된 전계를 $E_{z1}(r_1, t)$ 및 $E_{z2}(r_2, t)$ 라 하면, $z=0$ 에서 전계는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{z1}(r_1, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{i(u)}{cR_1^2} + \frac{1}{c^2 R_1} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (9)$$

$$E_{z2}(r_2, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{i(u)}{cR_2^2} + \frac{1}{c^2 R_2} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (10)$$

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

위의 식으로부터 전류 및 전류의 시간미분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} i(u) \\ \frac{\partial i(u)}{\partial u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E_{z1} \\ E_{z2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

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

$$A_1 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{cR_1^2} \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{c^2 R_1} \quad (13)$$

$$A_3 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{cR_2^2} \quad (14)$$

$$A_4 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{c^2 R_2} \quad (15)$$

식(11)로부터 방전전류 및 방전전류의 시간미분은 다음 식으로부터 복원할 수 있다.

$$i(t) = \frac{A_4 E_{z1} - A_2 E_{z2}}{\Delta A} \quad (16)$$

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} = \frac{A_4 E_{z2} - A_2 E_{z1}}{\Delta A} \quad (17)$$

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

(2) EH 방법

관측전자계 공간에서 두 개의 안테나(전계 측정용 및 자계 측정용 안테나)로 두 지점의 전계와 자계를 동시에 측정하여 방전원의 전류파형을 복원하는 방법

이다.

관측된 전계 및 자계를 각각 $E_z(r_1, t)$ 및 $H_\theta(r_1, t)$ 라 하면, $z=0$ 에서 전자계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_z(r_1, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{i(u)}{cR_1^2} + \frac{1}{c^2R_1} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (18)$$

$$H_\theta(r_1, t) = \frac{l}{2\pi} \frac{r_2}{R_1} \left(\frac{i(u)}{R_2^2} + \frac{1}{cR_2} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (19)$$

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

식(18), (19)로부터 방전전류 및 방전전류의 시간미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} i(u) \\ \frac{\partial i(u)}{\partial u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E_z \\ H_\theta \end{pmatrix} \quad (20)$$

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

$$B_1 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{cR_1^2} \quad (21)$$

$$B_2 = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{c^2R_1} \quad (22)$$

$$B_3 = \frac{l}{2\pi} \frac{r_2}{R_1^2} \quad (23)$$

$$B_4 = \frac{l}{2\pi} \frac{r_2}{cR_1^2} \quad (24)$$

관측된 전자계 $E_z(r_1, t)$ 및 $H_\theta(r_1, t)$ 가 주어지면, 식(20)으로부터 방전전류 및 방전전류의 시간미분은 다음과 같이 구해진다.

$$i(t) = \frac{B_4 E_z - B_2 H_\theta}{\Delta B} \quad (25)$$

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} = \frac{B_3 H_\theta - B_1 E_z}{\Delta B} \quad (26)$$

여기서, $\Delta B = B_1 B_4 - B_2 B_3$ 이다.

4. 계산결과 및 검토

그림 3 은 Wilson & Ma[3]가 제시한 전계의 세기이다. 이들 각각의 전계는 예측치이지만 본 논문에서는 이를 사용하여 "2안테나법"으로 방전전류를 추정하고자 한다. 이들의 전계를 사용하여 식(16) 및 식(17)로부터 추정된 방전전류 및 방전전류의 시간미분 파형을 그림 4 에 나타낸다. 그림 4 로부터 알 수 있는 것처럼 전류 및 전류의 시간미분 파형의 추정치는 Wilson & Ma 의 측정치[3]와 그 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 4 에 나타낸 전류의 시간미분 파형의 실험치는 전류파형의 실험치로부터 스플라인 함수를 사용하여 구한 것이다. 전류의 크기에 차이가 발생하는 것은 문헌(3)에서는 미소간격을 다이폴 모델로 표현할 때 다이폴의 길이를 명확히 언급하지 않고 있는데에 기인하는 차이이다.

Wilson & Ma 가 보고한 전계강도의 실험결과는, 본 논문에서의 식(2)를 사용하여 검토한 결과, 유효다이폴

길이로써 5.8 cm 일때 이론치와 실험치가 잘 일치하고 있음이 확인되었다(그림 5 참조). Fujiwara[4]도 본 논문의 결과와 동일한 결과를 보고하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 유효다이폴 길이로써 5.8 cm 를 사용하고 있다.

Wilson & Ma 는 다이폴의 길이를 명확히 언급하고 있지는 않지만 이들의 실험결과를 이용하기 위하여 본 논문에서는 Wilson & Ma 의 계산결과 및 실험결과를 부분적으로 이용하였다. 관측된 전계를 이용하면 방전전류의 정확한 복원(추정)이 가능할 것으로 생각된다.

그림 5 는 유효다이폴 길이가 5.8cm 일때 식(2)로부터 계산한 전계강도를 Wilson & Ma 의 실험결과와 비교한 것이다. 그림 5 로부터 이론치와 실험치는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, EE 방법을 사용하여 전류파형을 복원할 때, 본 논문에서 이용한 Wilson & Ma 의 전계 계산치[3]는 외삽의 개념을 적용하면 타당한 것으로 생각할 수 있다.

5. 맺음말

미소간격의 전극에서 방전이 일어날 때 발생하는 전자파를 관측하여 측정된 전자계로부터 방전전류를 복원(추정)하는 1안테나법(단일 전자계법, E 방법 및 H 방법) 및 2안테나법(복수 전자계법, EE 방법 및 EH 방법으로 구분)을 제안하고, 추정법 이론 중에서 2안테나법의 "EE 방법"을 이용한 방전전류의 추정에 관하여 검토하였다.

본 논문의 결과는 관측된 방사 전자파로부터 방전원의 방전전류를 추정할 수 있음을 시사하고 있다. 기기 내부의 절연파괴 예측 등과 같은 실제문제에 적용하기 위해서는 방전원에 대한 다중 다이폴 모델의 확립 및 시간영역 전자계 측정용 소형 안테나의 개발 등이 필요할 것이다. 이에 관한 연구는 남겨진 과제이다.

참고문헌

- [1] K.Arai, X.Guoxiang and O. Sugimoto: "Micro-Gap Discharge Waveshapes and Radiated Electromagnetic Waves in Stmospheric Air and Sulphur Hexafluoride Gas", Trans. of IEE Japan, Vol.109-A, No.3, pp.103-110, 1989.
- [2] 김기채, 이광식, 이동인: "방사 전자파에 의한 미소간격 방전의 전류분포 추정에 관하여", 전자파학회 종합학술대회 논문집, Nov. 1996.
- [3] 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.
- [4] O.Fujiwara, "An Analytical Approach to Model Indirect Effect Caused by Electrostatic Discharge", IEICE Trans. Commun., vol.E79-B, no.4, April 1996.

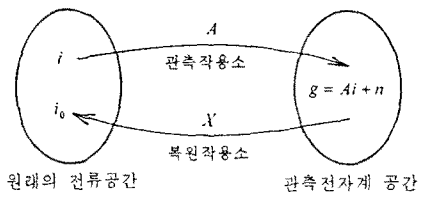


그림 2 역문제의 정의

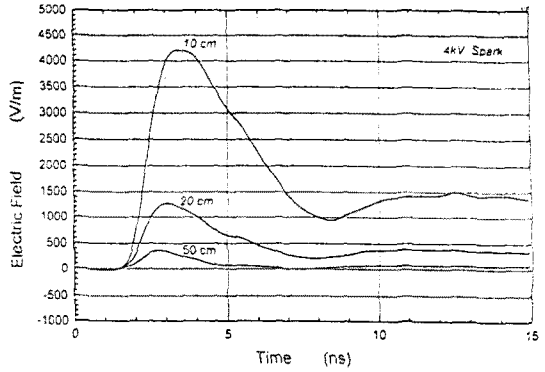
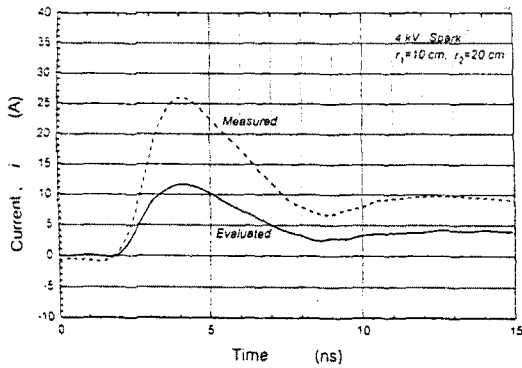
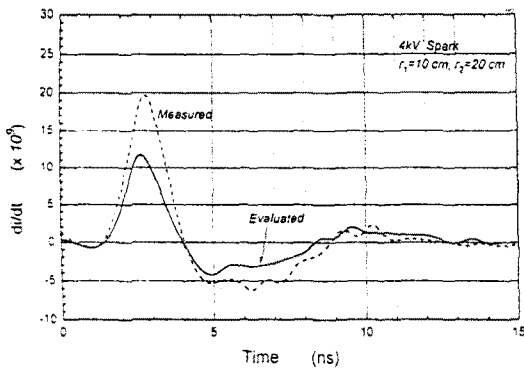


그림 3 전계강도의 예측치(Wilson & Ma[3])



(a) 전류파형



(b) 전류의 시간미분 파형

그림 4 방전전류 및 전류의 시간미분 파형의 추정치와 실험치

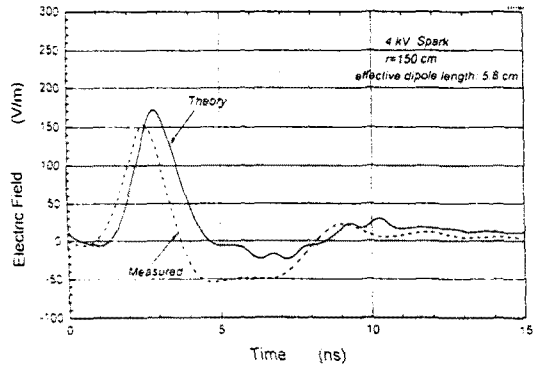


그림 5 전계강도의 이론치와 실험치