

뇌방전에 의한 유도전압의 측정에 대한 기초적 연구

(A Basic Study on the Measurement Induced Voltages due to Lightning Discharges)

이복희 · 조성철* · 임주홍¹ · 이우철

(Bok-Hee Lee · Sung-Chul Cho · Ju-Hong Eom · Woo-Chul Lee)

(인하대 차세대고전압전력기술연구센터, ¹기초전력연구원)

Abstract

This paper deals with the device for measuring the time-varying magnetic fields and induced voltages caused by lightning discharges. The two magnetic field measuring systems were designed and made. One consists of the loop-type magnetic field sensor with the active integrator operated by a differential amplifier. The other consists of the loop-type magnetic field sensor and Labview software. The loop-type magnetic field sensor detects the time derivative of the magnetic field being measured, and the signal detected is integrated by the Labview software. As a consequence, from the calibration experiments, the frequency bandwidth of the full measuring system ranges from 400 [Hz] to 1 [MHz] and the response sensitivity are 0.98 [mV/nT] and 2.2 [mV/nT] for the magnetic field sensor of 2 turns and 6 turns, respectively. Also, the results obtained by the two measuring devices well agreed with each other.

1. 서 론

최근 산업사회시스템의 고도정보화에 따라 일렉트로닉스를 사용한 계측이나 제어시스템이 전력설비와 전력계통의 운용에도 이용되고 있다. 이들 약전류 전자기기, 컴퓨터, 제어 및 보호 장치는 미약한 신호에 의해 동작하므로 외부로부터 불필요한 전자에너지가 침입하면 정확한 신호에 동작하지 못하고 고장 또는 오동작을 유발시키므로 전력설비운용의 신뢰도를 저하시키는 원인이 된다. 따라서 이들 전자기기의 신뢰성 확보가 중요한 과제로 되어 있으며, 그 중에서도 고장의 큰 원인이 될 수 있는 뇌방전에 의한 유도기전력의 정확한 데이터가 절실히 요구되고 있다.[1]

또한 우리나라에서 발생하는 뇌방전의 계절적 빈도, 극성, 강도 등의 통계적인 파악이 가능하게 되면 뇌과전압의 발생양상이나 특성의 해석이 가능하므로 전력계통의 절연설계를 비롯하여 피뢰기, 가공지선, 보호설비의 설정 등 뇌사고 방지에 큰 역할을 하게 될 것이다.

이에 본 연구에서는 뇌방전시에 발생하는 유도전압 및 자장의 변화를 관측할 수 있는 루프형 자장센서를 포함한 측정계를 설계·제작할 목적으로, A/D컨버터를 통한 디지털신호를 컴퓨터로 처리하고 분석을 하여 보다 신뢰도 높은 신호를 얻고자 하였으며, 측정계의 응답특성과 감도를 파악하기

위한 교정실험과 뇌임펄스전류에 의한 적용실험을 수행하여 측정신호에 대한 정확도를 평가하고, 그 결과에 대하여 분석하였다.

2. 이 론

루프형 자장센서의 원리는 식 (1)의 맥스웰 전자기방정식을 기초로 한다.

$$\int_L E \cdot dl = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dA = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

여기서 E 는 전기장의 세기, B 는 자속밀도, dl 은 루프의 선소(線素), dA 는 루프의 면적소, Φ 는 루프를 관통하는 자속이다. 루프형 자장센서의 전기적 등가회로를 그림 1에 나타내었다.

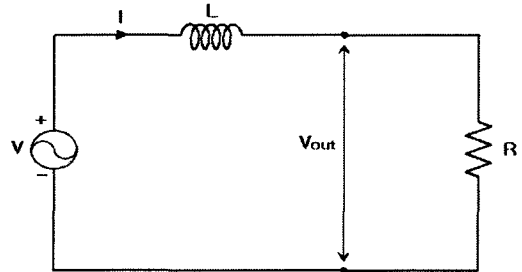


그림 1. 루프형 자장센서의 전기적 등가회로
Fig. 1. Electrical equivalent circuit of loop-type magnetic field sensor

여기서 L 은 루프의 자기인덕턴스이고, R 은 루프의 저항과 미분형 센서를 위한 출력저항과의 합이다. 미지의 자장 중에서 루프를 관통하는 자속수를 Φ [Wb]라고 하면, 자폐러데이의 전유도법칙에 의하여 유도전압 V 는

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

가 된다.[2]

자장센서의 감지면적에 대하여 자속밀도 B [Wb/m²]가 균일하다고 가정할 때 그림 1의 회로방정식은 키르히호프의 제 2법칙에 의하여

$$V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (3)$$

의 관계가 성립한다.

루프형 자장센서의 응답특성을 구하기 위하여 계단함수인 자속밀도

$$B = \begin{cases} B_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

를 입력시킨 경우의 응답전압은

$$V_{out} = - AB \exp(-\frac{R}{L}t) \quad (4)$$

로 되며, 시정수는

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5)$$

이다. 출력신호는 시정수(L/R)로 감쇠되기 때문에 실제의 입력 자장을 실신호로 출력시키기 위해서는 적분기가 필요하다.

본 연구에서는 연산증폭기를 이용한 하드웨어적인 적분과 Labview를 이용한 소프트웨어적인 적분을 시도하였다.

3. 측정계의 구성과 방법

3.1. 유도전압 측정계의 제작

루프형 자장센서는 미국 LLP사 낙뢰위치표정장치의 방향탐지기(direction finder : DF)를 센서로 사용하였다. 이 센서는 동-서, 남-북방향의 두 개의 센서가 직교하며, 각각의 센서는 2턴과 6턴으로 서로 다른 응답감도를 가지고 있어서 측정하고자 하는 뇌방전의 거리를 고려하여 적합한 턴 수의 센서를 선택할 수 있다.

센서 한 변의 길이는 250 [mm]이며, 자체 인덕턴스와 저항은 3 [μ H], 0.6 [Ω](2턴), 21 [μ H], 1.5 [Ω](6턴)의 특성을 가지고 있다. 이와 같은 회로특성을 가지고 있는 자장센서를 미분형 센서로 만들기 위해서는

$$L \frac{dI}{dt} \gg RI \quad (6)$$

의 조건을 만족해야 한다. (6)의 조건을 만족시키는 넓은 주파수대역의 미분형 센서를 만들기 위해서 센서 출력단에 저항을 연결하여 실험하였다. 출력저항의 변화에 따른 정현파 입력에 대한 자장센서의 응답전압의 특성을 그림 2에 나타내었다.

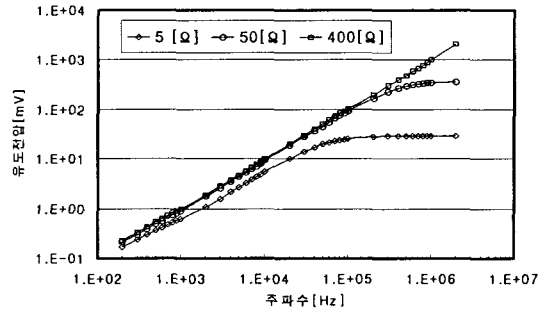


그림 2 출력임피던스의 변화에 의한 응답전압-주파수의 특성

Fig. 2. Characteristics of the response voltage verse frequency as a parameter of output impedance

출력임피던스가 5 [Ω]과 50 [Ω]일 때 포화가 되는 현상은 5 [Ω]과 50 [Ω]의 저항 값이 식 (6)을 만족시키지 못하기 때문에 자기적분형 센서로 동작을 하고 있다고 볼 수 있다.[1] 따라서 1 [MHz]이상의 주파수 대역을 갖는 미분형 센서를 만들기 위해서 출력저항 400 [Ω] 이상을 적용하였다.

자장센서에 의하여 감지된 미분신호를 증폭과 동시에 적분시킬 수 있는 능동성 적분회로를 구성하였다. 미지의 시변성 자장이 센서에 의하여 검출되어 출력되기까지의 전체 측정시스템을 그림 3에 나타내었다.

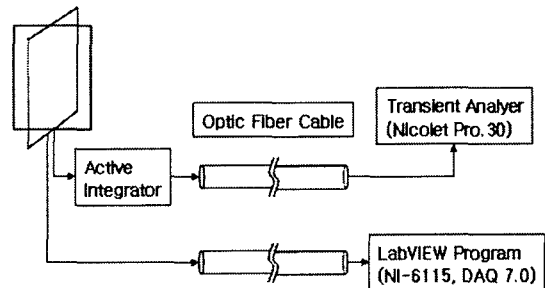


그림 3 자장측정시스템의 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of the magnetic field measurement system

본 유도전압측정시스템에서는 능동성 적분기를 통한 신호를 과도신호검출기(Nicolet Pro.30)로 데이터를 취득

하여 자장을 관측한 기존의 시스템과 미분된 신호를 직접 A/D 컨버터로 받아들여 유도전압의 분석과 함께 Labview 프로그램 내부의 수치적인 적분을 하여 자장 신호를 분석하는 새로운 측정 방식을 사용했다.

자장측정시스템에 사용된 연산증폭기(LM7171)의 Slew rate는 4100 [V/μs], 대역폭은 DC~200 [MHz], 입력임피던스는 차동모드일 때 3.3 [MΩ]이다. 차동적분기 앞단에 60 [Hz]필터를 삽입함으로써 주변의 상용주파수에 의한 60 [Hz]노이즈 성분을 제거시켰다. 또한 센서가 15층 건물의 옥상에 위치하고 있기 때문에 신호처리부가 있는 연구실까지 약 150 [m] 거리의 신호전송을 광케이블을 이용하여 신호감쇠를 최소화하였다. 새로운 데이터취득방법에 사용된 A/D 컨버터(NI-6115)는 12 bit의 분해능과 10 [MS/s]의 속도로 아날로그 신호를 디지털신호로 변환시켜 준다. 보드의 제어는 Labview (National Instrument Co.)의 DAQ 7.0 소프트웨어를 통하여 이루어진다.

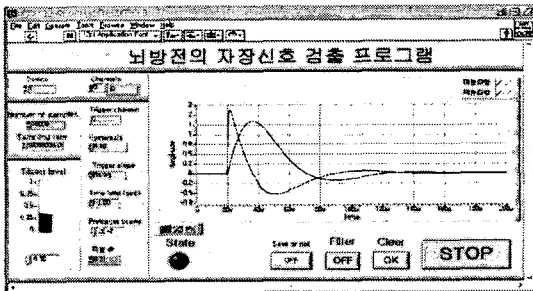


그림 4. 유도전압의 분석프로그램 (DAQ 7.0)
Fig. 4. Induced voltage analysis program (DAQ 7.0)

그림 4는 유도전압의 측정과 분석을 위한 프로그램의 화면을 보여주고 있다.

3.2. 교정실험 방법

유도전압측정계의 기본특성 즉, 센서를 포함한 전체 측정계의 응답도와 주파수대역 등을 파악하기 위해서는 단위계단 응답특성의 측정이 필요하다. 자장센서의 교정은 일반적으로 미리 알려진 크기와 방향의 균등자장을 자장센서에 도입하여 행하여진다.[3]

균등자장을 발생시키기 위하여, 기하학적으로 구조가 간단한 사각도체를 사용하였다. 따라서 사각도체(1.5 [m] × 1.5 [m])에 변류기를 관통시켜 입력전류를 측정하고, 센서를 포함한 측정계의 출력전압을 측정하는 방법으로 센서의 응답특성을 파악할 수 있는 교정실험계를 구성하였다.

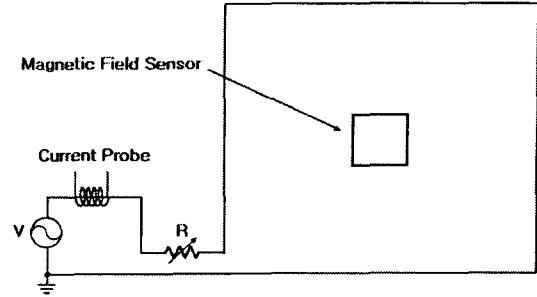


그림 5. 자장측정시스템의 교정장치
Fig. 5. Calibration setup of magnetic field measuring system

그림 5는 본 실험에서 적용한 유도전압 측정계에서 자장 측정을 위한 교정회로를 나타내었다.

루프형 센서에 입력되는 평균자속밀도는 교정용 사각루프(2a×2b)의 좌표계를 정의할 때 산출할 수 있으며 [4], 사각루프 중심에서의 자속밀도는

$$B_z(0,0,0) = \frac{\mu_0 IN\sqrt{2}}{\pi a} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 I 와 N 은 각각 사각루프의 입력전류와 권수이고, μ_0 는 공기의 투자율이다.

따라서 위의 식 (7)에서 얻어진 평균자속밀도로부터 자장센서의 응답감도를 구할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 교정실험 결과

계측장치로서의 기본특성인 주파수대역과 응답감도를 파악하기 위하여 사각도체에 정현파 전류 및 구형파 전류를 인가시켜 입력전류의 파형에 대한 자장측정계의 출력파형을 측정하고 검토하였다.

측정계의 교정실험법으로는 사각도체에 직각파 전류 즉, 직각파 전류에 의하여 대기 중에 발생하는 직각파 자장을 자장센서에 인가시켜 출력파형의 감쇠시정수와 상승시간으로부터 주파수대역을 결정할 수 있으나, 교정용 코일의 인덕턴스의 영향이 포함되어 있기 때문에 상승시간이 대단히 완만해져 직각파 전류 또는 직각파 자속의 입력이 불가능하다.

또한, 직각파 입력에 대한 출력파형의 감쇠시정수와 상승시간을 적용하여 주파수 대역을 결정하는 것은 그 주파수대역 내에서 비선형적인 요소와 공진현상이 나타나지 않는 경우에 한하여 적용되므로 본 연구의 교정실험에서는 정현파 자속의 입력에 대한 응답특성을 측정하였다.

본 연구에서 검출용으로 사용한 루프형 자장센서는 식 (6)의 조건에서 입력신호의 미분량으로 미지의 신호

를 감지하므로 센서 자체만의 출력은 주파수의 증가와 더불어 검출전압은 증가하지만 적분기의 출력은 주파수의 증가에 따라 적분기간이 짧아지므로 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 루프형 자장센서, 차동증폭기, 능동성 적분기로 이루어지는 측정계를 구성하여 출력신호는 입력된 실신호로 출력되도록 하였다.

또한, 다른 방향의 자장센서에서 나오는 미분신호는 A/D 컨버터를 이용하여 아날로그신호를 디지털신호로 변환한 후, Labview 프로그램을 이용하여 수학적으로 적분을 하여 그 값을 실시간으로 출력한다. 측정하고자 하는 신호에 A/D컨버터로 들어오는 구간까지의 노이즈 영향만 없다면 하드웨어적으로 적분기를 구성해서 실신호를 얻는 방법보다 신뢰도가 더 높다고 볼 수 있다.

4.2. 주파수대역의 결정과 응답감도

사각도체로 이루어진 교정장치에 정현파 전류의 입력에 대해 자장측정계의 출력전압을 규격화시켜 그림 6에 나타내었으며, 제안한 자장측정시스템에 있어서 주파수대역 내에서 비선형적인 요소는 나타나지 않았다. 자장측정시스템의 하한 주파수대역은 최대응답의 $1/\sqrt{2}$ (3dB)배 이내의 범위로 결정하였으며, 상한 주파수대역은 A/D 컨버터의 제한된 샘플링속도로 인한 신호의 정확도를 떨어뜨리는 범위를 한계점으로 1 [MHz]로 결정을 했다. 따라서 본 자장측정계의 주파수 대역은 400 [Hz]~1 [MHz]로 산출되었다.

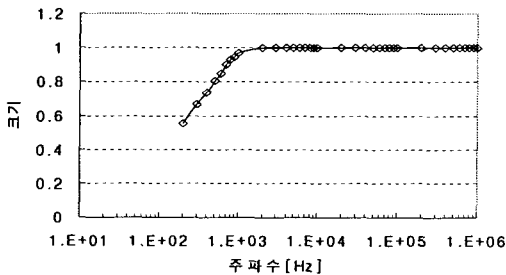
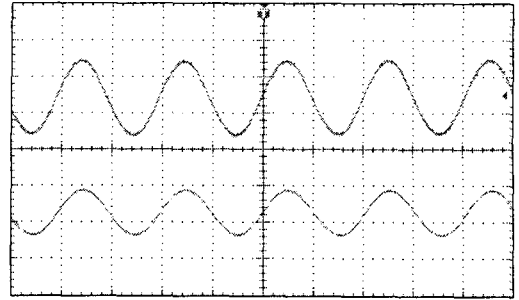


그림 6. 자장측정계의 주파수 응답특성
Fig. 6. Frequency response characteristics of the magnetic field measuring system

그림 6에서와 같이 주파수대역이 결정된 자장측정계로 미지의 자속 또는 자속밀도의 측정을 위해서는 감도 교정이 필요하므로 정현파 입력에 대한 측정계의 응답 특성을 측정하여 그 결과를 그림 7에 나타내었다.



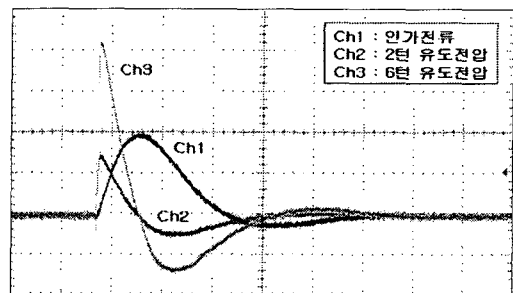
상 : 5.5 [nT/div] 하 : 20 [mV/div] Time : 1 [μs/div]

그림 7. 정현파 입력에 대한 자장측정계의 응답특성
Fig. 7. Response waveforms of the magnetic field measuring system to a sinusoidal input

사각도체로 이루어진 교정장치에 입력전류 9.8 [mA]를 흘려주었을 때 루프형 자장센서 범위에서의 자장의 세기는 3% 이내로 균일하였다. 이 때 자장의 세기를 평균하여 산출한 측정계의 평균 자속밀도는 11 [nT]이며, 6턴, 2턴 센서 각각의 자장측정시스템 출력전압은 24.4 [mV], 11.1 [mV]이므로 응답감도는 각각 2.2 [mV/nT], 0.98 [mV/nT]이다.

4.3. 임펄스전류에 의한 유도전압과 자장 파형

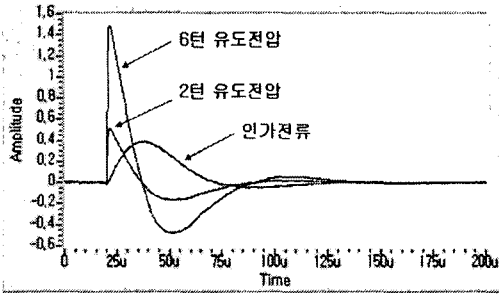
대전류 발생장치에 의하여 발생하는 9/21.7 [μs] 임펄스전류파형을 자속이 서로 쇄교되지 않게끔 전선간 거리를 충분히 유지한 모의실험계에 인가하고, 루프형 자장센서를 50 [cm] 떨어진 곳에 위치시킨 후 임펄스전류에 의하여 발생하는 유도전압과 자장을 측정하였다. A/D 컨버터를 통한 측정값의 신뢰도를 높이기 위해서 오실로스코프로 동일 실험을 반복하여 임펄스전류와 유도전압을 측정하였다. 그림 8은 두 가지 경우의 측정파형을 보여주고 있다.



Ch1 : 200 [mV] Ch2 : 500 [mV]

Ch3 : 500 [mV] Time : 20 [μs]

(a) 오실로스코프로 측정한 전류와 유도전압 파형

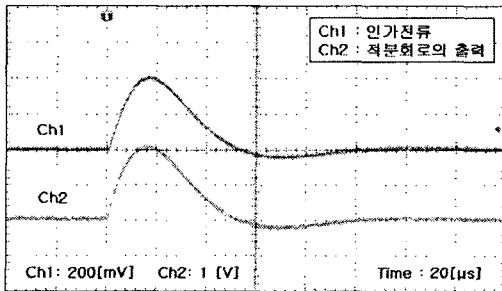


(b) A/D 컨버터로 측정된 전류와 유도전압 파형

그림 8. 임펄스전류에 의한 유도전압 파형
Fig. 8. Induced voltage waveforms due to impulse currents

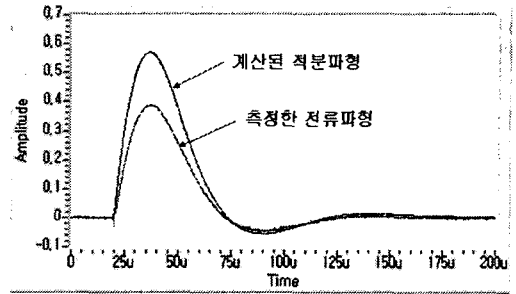
그림 8에서 보는 바와 같이 오실로스코프로 측정된 데이터와 A/D 컨버터를 통한 데이터의 파형이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 2턴과 6턴 센서의 유도전압은 루프자체의 인덕턴스에 비례해서 약 3배의 크기를 나타내고 있다. Labview 프로그램에서 보여 지는 신호의 크기는 [V]의 단위로서 실신호의 크기와 같은 값으로 인식된다.

이렇게 측정된 신호를 적분하면 바로 임펄스전류의 자장신호를 검출할 수 있다. 본 실험에서는 능동성 적분기(LM7171)를 통한 적분과 DAQ 7.0 프로그램 내에서의 수치적인 적분을 동시에 시도해보았다. 자장신호 검출 역시 A/D 컨버터를 통한 측정값의 신뢰도를 높이기 위해서 오실로스코프로 동일하게 실험을 하였으며, 그림 9는 두 가지 경우의 측정파형을 보여주고 있다.



(a) 오실로스코프로 측정된 전류와 적분신호파형

그림 9 (a)에 능동성 적분기로 측정된 임펄스전류 파형의 파두장, 파미장을 분석한 결과 8.9/22.1 [μs]로, 인가한 임펄스전류파형과 거의 일치하였다. 또한 적분회로 출력의 크기를 보았을 때, 인가전류의 약 5배정도의 크기로 확인이 되는 것으로 보아 증폭기의 기능도 잘 수행하는 것으로 보인다.



(b) A/D컨버터로 측정된 전류와 계산된 적분파형

그림 9. 임펄스전류의 측정 파형과 계산 파형
Fig. 9. Measured and calculated impulse current waveforms

그림 9 (b)에서 수치적으로 계산된 적분파형의 크기는 적분 dt의 값에 따른 상대값으로 측정된 전류파형에 맞추어 크기를 조정하였다. 계산된 적분파형 역시 파두장과 파미장을 분석한 결과 8.8/22.2 [μs]로, 인가한 임펄스전류파형과 거의 일치하였다. 하지만 파두장의 길이가 조금 더 짧아지는 요인을 찾아 보정을 해야 하며, 알맞은 적분 dt의 선정으로 기준이 되는 크기를 설정해야 한다. 또한 매우 조그만 DC성분이라도 A/D 컨버터 내부로 인가된다면 적분된 값에 큰 영향을 주기 때문에 오프셋을 가장 최소화하는 회로를 구성함과 동시에 A/D컨버터 내부회로의 보상도 신경을 써야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 뇌방전에 의해서 발생하는 유도전압과 과도자장을 검출할 수 있는 자장측정계를 구성하여 교정실험과 적용실험을 통하여 측정장치의 성능을 평가한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PC기반의 새로운 측정시스템을 구축하여 하드웨어적 측정시스템의 신호와 비교 분석 한 바 거의 동일한 결과를 얻었다.

(2) 자장측정계의 주파수대역 400 [Hz]~1 [MHz], 응답감도 2.2 [mv/nT]로 뇌방전에 의한 광대역이며 미약한 유도전압과 자장의 측정이 가능함을 확인했다.

(3) 임펄스전류를 인가시켜 입력전류파형, 유도전압파형, 검출자장파형을 컴퓨터로 측정·분석한 결과, 디지털 신호로도 충분히 신호의 외곽과 감쇠 없이 측정할 수 있음이 입증되었다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인
프라구축 지원사업의 지원에 의하여 수행된 연구
결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] M. A. Uman, "The Lightning Discharge", New York :
Academic Press, pp11~36, 1987.
- [2] N. Kitawa and M. Kobayashi, "Field Changes and Variations
of Luminosity Due to Lightning Flashes", in Rec. Adv.
Atmos. Electricity. London : Pergamon. pp.485~501, 1959.
- [3] 이복희, 길경석, 박동화, "루우프형 센서를 이용한 자장측
정계", 센서학회지, Vol.4, No.2, pp.79~105, 1995.
- [4] "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power
Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power
Lines", ANSI/IEEE Std. 664-1987, pp.17~21, 1992.