

# 루프형 자기센서를 이용하여 뇌방전이 발생한 방향을 탐지하는 기법

## (A Methodology of Finding the Direction of Lightning Discharge using Loop-type Magnetic Field Sensors)

이복희\* · 조치연 · 조성철

(Bok-Hee Lee · Chi-Youn Cho · Sung-Chul Cho)

### Abstract

This paper deals with a methodology that applies the time-varying magnetic fields produced by the cloud discharges to find the direction of thunderstorm movement. We investigated the basic performance of the magnetic field measurement system composed of multi-turn loop-type sensors, the differential amplifier and active integrator. As a result, the response characteristics of the magnetic field sensor system to sinusoidal signals was excellent. The frequency bandwidth ranges from about 1 kHz to 500 kHz, the response sensitivity was 0.16mV/nT. In addition, we proposed the algorithm that determines the direction of lightning discharges using the comparison of the output signals of right-angled loop-type magnetic field sensors. The accuracy of the direction finding of lightning discharges is fairly well within the measurement error of less than 5°. The magnetic field measurement system proposed in this work can be used to track the direction of thunderstorm movement.

Key Words : Thunderstorm, Time-varying Magnetic Field, Lightning Discharge, Direction Finding, Loop-type Magnetic Field Sensor, Active Integrator, Differential Amplifier

## 1. 서 론

최근 ICT설비의 급속한 발전과 보급으로 모든 사회 시스템이 뇌서지에 매우 취약한 초소형 전자기기를

기반으로 하는 정보통신망으로 구성되어 있다. 뇌서지에 의한 정보통신망의 소손과 오동작은 금융, 군사, 산업, 행정 등의 모든 분야에서 시스템 기능의 마비를 가져올 수 있으며, 이에 따른 경제적인 손실도 막대할 것으로 예상된다[1-4]. 뇌서지에 의한 정보통신설비를 비롯한 사회시스템의 고장과 우발적 사고를 방지하기 위해서는 뇌방전을 예지할 수 있는 시스템의 개발과 적용이 필수적이다. 낙뢰의 발생을 예지하기 위한 기반기술이 꾸준히 연구되어 왔으며[5-8], 뇌운의 위치와 방향, 거동상태를 비롯하여 뇌방전에 의해 방사되

\* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학과 교수  
\* Main(Corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2014년 7월 23일  
1차심사 : 2014년 7월 26일  
심사완료 : 2014년 8월 14일

루프형 자기센서를 이용하여 뇌방전이 발생한 방향을 탐지하는 기법

는 자계를 검출하는 시스템의 구현은 대단히 중요하다. 현재 외국에서는 뇌방전에 의해서 발생하는 전자기 파라미터의 측정과 해석에 관해서 활발히 연구가 진행되고 있고 뇌운의 탐지 및 낙뢰경보시스템의 적용을 IEC표준[9]으로 도입하기 위한 작업이 이루어지고 있으나 우리나라에서는 거의 연구되지 않고 있는 실정이라서 이 분야에 대한 적극적인 연구와 관심이 필요하다.

뇌운까지의 거리, 방향, 이동경로에 대한 정보를 안다면 낙뢰의 발생을 예측할 수 있으므로 낙뢰에 의한 피해 또한 줄일 수 있을 것이다. 현재 우리나라에서 사용되고 있는 낙뢰위치표정시스템은 대부분 외국에서 수입하고 있는 실정이며, 낙뢰의 발생빈도, 세기, 위치표정 등의 파라미터를 탐색하는 수준으로 아직 낙뢰의 발생을 예측하는 기술은 미흡한 실정이다.

현재 우리나라에는 충북 진천에 위치한 기상청 국가 기상위성센터에 연구용으로 시설한 Viasla사 제품인 낙뢰경보시스템이 운용되고 있다. 이 낙뢰경보시스템의 특징은 낙뢰의 발생방향을 8분할로 관측하며, 운방전은 무지향성으로 단지 발생지점까지의 거리만을 표출하는 방식이다[10]. 지역에 따라 다르기는 하지만 뇌방전의 대략 90%정도가 운내방전, 운간방전, 공전 등의 운방전으로 발생하고 있으며[11-12], 운방전의 발생상황을 검출할 수 있는 센서가 개발된다면, 뇌운의 거동상태에 관한 정보를 수집할 수 있어 낙뢰의 발생을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 루프형 자기센서를 이용하여 운방전으로 발생하는 자기신호를 검출하고 분석하여 뇌운이 이동하는 방향을 탐지하는 기법을 제안할 목적으로 수행한 연구결과에 대하여 기술하였다. 운방전에 의한 자기검출용 센서시스템은 루프형 직교자기센서와 증폭회로 및 적분기로 구성하였으며, 센서시스템으로 검출된 출력신호는 A/D 컨버터를 이용하여 디지털신호로 변환시켰다[13]. 변환된 디지털 신호를 National Instrument Co제품의 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 분석하고, 뇌방전의 방향을 탐지하는 기법을 제안하였다. 뇌방전이 발생하는 방향을 탐지하는 센서시스템의 기본성능을 파악하고 실증실험을 통한 활용성에 대하여 기술하였다.

## 2. 측정장치 및 방법

본 연구에 사용된 운방전에 의해 발생하는 자기측정 시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 남북(S-N)방향과 동서(E-W)방향의 시변자계를 검출하는 2개를 직교시킨 루프형 자기센서, 차동증폭기와 능동성 적분기로 이루어진 신호처리부, 루프형 자기센서의 검출신호의 비로 뇌방전이 발생한 방향을 산출하는 해석/표출부로 구성되어 있다.

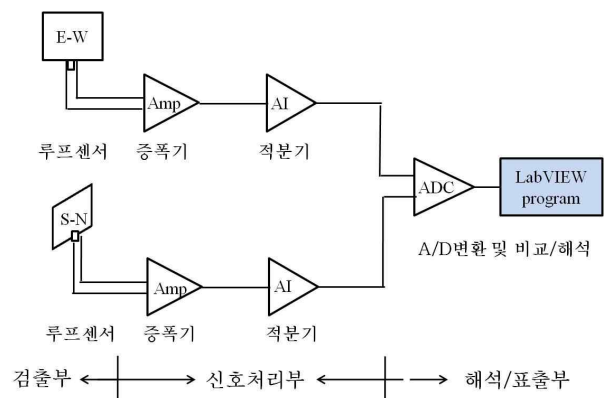


그림 1. 시변자기측정시스템의 구성도

Fig. 1. Configurational chart of the measurement system of time-varying magnetic field

멀티턴 루프형 자기센서의 주파수응답특성과 검출 감도가 감지면적과 감긴 수에 의해 결정되므로 이들 요인을 고려하여 폭과 높이가 150mm×150mm의 크기로 직경 0.5mm인 에나멜동선 20턴을 감아 제작하였다. 원거리에서 검출하는 뇌방전으로 발생하는 자계의 세기는 미약하므로 루프형 자기센서로 검출하고 증폭해야 한다. 또한 뇌방전에 의한 자계의 검출에 수반되어 발생하는 동상잡음을 제거하기 위해서 차동증폭기를 사용하였다[14-15].

루프형 자기센서는 입사되는 자계의 미분신호를 검출하므로 원래의 자기파형으로 관측하기 위해서는 적분기가 필요하다. 본 연구에서는 연산증폭기(CMRR : 100dB, Slew Rate : 12V/μs, 소비전력 : 150mW)를 이용하여 검출된 신호를 증폭한 후 적분하였다. 또한 적분기의 적분커패시터와 적분저항에 추가적으로 저역 통과필터를 설치하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자계측정시스템의 기본특성

본 연구는 운방전에 의해 발생하는 자계 파형의 주파수 스펙트럼을 주요 검출대상으로 하는 측정계의 구현을 목표로 하였다. 제작된 루프형 자계측정 시스템을 이용하여 운방전에 의한 자계 파형을 관측할 경우, 검출센서의 응답감도와 주파수대역 등의 기본성능을 파악하기 위해서는 교정실험의 수행이 필요하다. 따라서 본 연구에서 자계센서의 교정장치로 ANSI/IEEE-644표준[16]에서 권장하는 사각루프(1.5m×1.5m) 교정장치를 사용하였다. 교정장치의 중앙에 자속밀도 56nT의 자계를 발생시켰을 때, 자계측정시스템의 출력전압-주파수특성을 그림 2에 나타내었으며, 주파수대역 범위에서 응답전압은 거의 일정하게 나타났다.

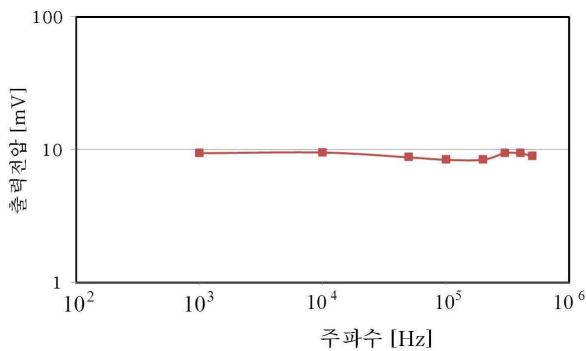


그림 2. 자계측정시스템의 주파수응답특성  
Fig. 2. Frequency response of the magnetic field measurement system

입력된 정현파 자계를 루프센서가 검출한 미분신호는 주파수에 비례하지만, 적분기는 주파수에 반비례하므로 적분기를 경유한 출력전압은 1kHz에서 500 kHz의 주파수범위에서 거의 일정한 값을 나타내게 된다. 자계측정시스템은 0.16mV/nT의 응답감도를 가지며, 주파수응답특성도 우수하여 운방전에 의해 발생하는 자계 파형을 측정하기에 충분한 성능인 것으로 판단된다.

#### 3.2 뇌방전이 발생한 방향의 판정

본 연구에서는 직교하는 2개의 멀티턴(multi-turn) 북남(N-S)방향 루프와 동서(E-W)방향 루프를 사용하여 운방전에 의해 발생하는 자계 파형을 검출하는 센서시스템을 제작하였다. N-S와 E-W검출코일 배치의 평면도를 그림 3에 나타내었으며, 1상한의 각도  $\theta$ 인 방향에서 정극성의 하향 뇌방전에 의해 자계가 발생할 경우 자계는 남-동 방향에서 북-서 방향으로 발생하며, 2개의 멀티턴 루프검출코일에는 단면을 통과하는 자속에 비례하는 유도기전력이 발생한다.

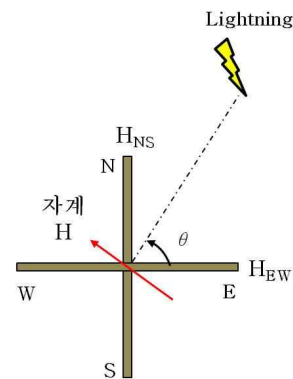


그림 3. 루프형 자계센서의 직교배치의 평면도  
Fig. 3. Top view of right-angled arrangement of loop-type magnetic field sensors

그림 3에 나타낸 조건에서 자계센서의 각 검출코일에 입사하는 자속의 양 즉, 센서의 검출전압은 검출코일의 면적을 관통하는 자계의 세기에 비례하므로 식 (1), 식 (2)과 같이 표현할 수 있다. 따라서 루프형 자계센서 둘레의 임의의 방향에서 뇌방전이 발생할 경우 남북(S-N)방향의 루프센서의 단면을 관통하는 자계의 세기( $H_{NS}$ )와 동서(E-W)방향의 루프센서의 단면을 관통하는 자계의 세기( $H_{EW}$ )에 비례하는 각 센서의 출력전압의 비율로부터 식 (4)와 같이 뇌방전이 발생한 위치의 각도  $\theta$ 를 산출할 수 있다.

$$H_{EW} = H \sin \theta \tag{1}$$

$$H_{NS} = H \cos \theta \tag{2}$$

루프형 자기센서를 이용하여 뇌방전이 발생한 방향을 탐지하는 기법

$$\cot\theta = \frac{H_{NS}}{H_{EW}} = \frac{v(t)_{NS}}{v(t)_{EW}} \quad (3)$$

$$\theta = \cot^{-1}\left(\frac{H_{NS}}{H_{EW}}\right) = \cot^{-1}\left(\frac{v(t)_{NS}}{v(t)_{EW}}\right) \quad (4)$$

여기에서  $v(t)_{NS}$ ,  $v(t)_{EW}$ 는 N-S검출코일과 E-W검출코일의 출력전압이다.

위상각  $\theta$ 가  $0 < \theta < \pi/2$ 인 경우(1사분면)와  $\pi < \theta < 3\pi/2$ (3사분면)인 경우 직교한 2개의 루프센서에 검출된 신호의 극성이 같으므로  $\cot\theta$ 의 값은 모두 양의 값을 갖는다. 또한 위상각  $\theta$ 가  $\pi/2 < \theta < \pi$ 인 경우(2사분면)와  $3\pi/2 < \theta < 2\pi$ (4사분면)인 경우 직교한 2개의 루프센서에 검출된 신호의 극성이 다르므로  $\cot\theta$ 의 값은 모두 음의 값을 갖기 때문에 같은  $\theta$ 의 값을 나타내게 됨으로 추가적인 판별요소를 적용하여 분석할 필요가 있다. 뇌방전이 발생한 위치에 따라 각각의 루프센서에는 그림 4에 나타난 바와 같이 위상각  $\theta$ 에 따라 정극성 또는 부극성의 신호가 검출된다.

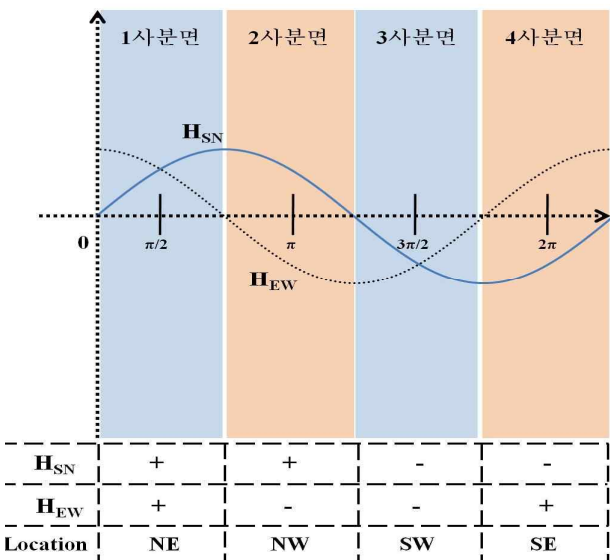


그림 4. 직교 루프형 자기센서의 검출신호의 극성  
Fig. 4. Polarity of the signals detected by right-angled loop-type magnetic field sensors

식 (4)로 산출한 위상각  $\theta$ 와 N-S방향에 놓인 루프센서의 검출신호의 극성을 기준으로 뇌방전이 발생한

방향각을 산정하였다. 예를 들면  $\cot\theta$ 의 값이 정(+)이고 N-S방향에 놓인 루프센서의 검출신호가 정극성인 경우  $\theta$ 는 1사분면각( $0 < \theta < \pi/2$ )으로 하였으며,  $\cot\theta$ 의 값이 정(+)이고 N-S방향에 놓인 루프센서의 검출신호가 부극성인 경우  $\theta$ 는 3사분면각( $\theta + \pi$ )으로 하였다. 또한  $\cot\theta$ 의 값이 부(-)인 경우도 마찬가지로의 방법으로 뇌방전이 발생한 방향각  $\theta$ 를 결정하였다. 뇌방전이 발생한 방향각의 산정 및 표출에 사용된 소프트웨어는 LabVIEW 프로그램 Ver.2009로써 데이터는 2개의 채널을 통해 각각의 멀티턴 루프센서에서 감지된 자기 파형을 관측하도록 하였다. 멀티턴 루프센서에서 검출된 신호의 크기와 극성으로부터 방향을 산정하고, 탐지된 방향을 좌표계에 표시하는 방식을 채택하였으며, 검출된 신호와 방향의 각도를 프로그램에서 자체적으로 저장하도록 하였으며, 소프트웨어의 Front Panel은 그림 5와 같다.

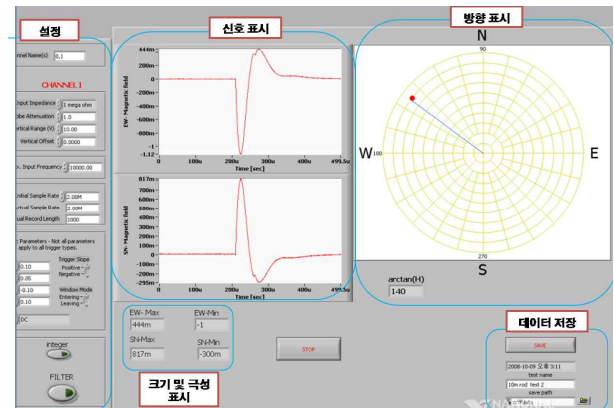


그림 5. 검출된 자계의 파형과 뇌방전의 방향각을 표출한 화면의 예

Fig. 5. Examples of the detected magnetic field waveforms and the screen of displaying the direction angle of lightning discharge

$8/20\mu s$  임펄스전류의 주요 주파수성분은 약 30kHz 이므로 운방전에 의해 발생하는 자계의 주요 주파수 성분과 비슷하다. 따라서 제안된 루프형 자기센서 시스템을 이용해 운방전에 의해 발생하는 자계를 측정하여 뇌운의 방향을 탐지하는  $8/20\mu s$  임펄스전류를 이용한 모의실험을 실시하였다. 루프형 자기센서의 정밀한 방향검출의 성능을 평가하기 위해서 임펄스전류

의 입사에 따른 방향검출 실험을 수행하였다. 루프형 자기센서 둘레의 임의의 방향에서  $8/20\mu s$  임펄스전류를 흘린 경우 각 루프센서에 검출된 자기 파형과 제안한 뇌방전이 발생한 방향각의 산정법으로 표출한 예를 그림 6에 나타내었다.

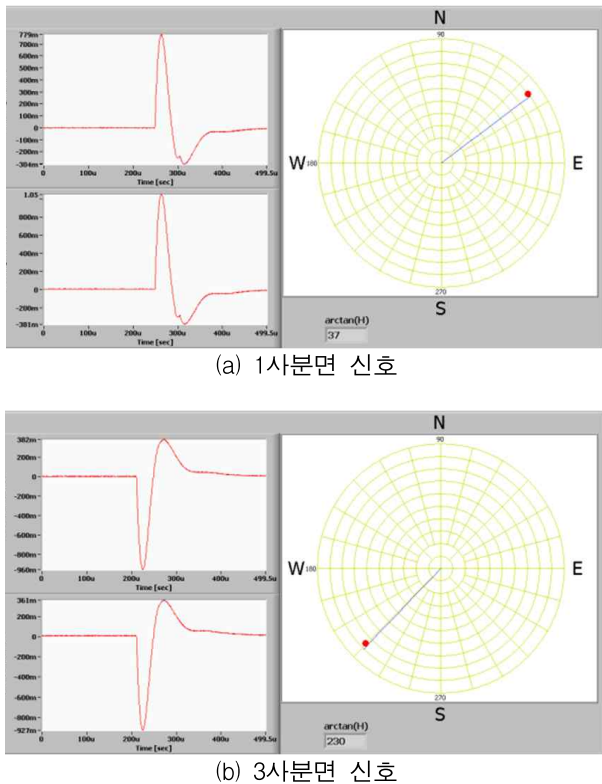


그림 6. 뇌방전 방향각 탐지의 예  
Fig. 6. Typical examples of detections of direction angle of lightning discharges

본 연구에 적용된 멀티턴 루프형 자기센서의 검출 코일이 감긴 수가 20턴으로 검출코일이 감긴 폭이 약 13mm이다. 루프센서의 기하학적 치수에 의해 뇌방전이 발생한 방향각의 검출신호에 나타나는 오차를 분석하였다. 20m 떨어진 위치에  $8/20\mu s$  임펄스전류를 흘린 경우 입사방향에 대한 오차를 평가하였다. 루프형 자기센서의 검출단면적에 수직인 방향에서 뇌방전이 발생한 경우 오차는  $2^\circ$  이하이었다. 또한 입사각이  $\pi/6 < \theta < \pi/3$  인 범위에서의 오차는 거의 없었으며, 루프센서의 검출단면적에 평행인 방향에서 뇌방전이

발생한 경우 검출오차는 약  $5^\circ$  이하인 것으로 분석되었다.

#### 4. 결 론

직각으로 교차시켜 배치한 루프형 자기센서로 뇌방전에 의해 발생하는 자기 파형을 관측하여 뇌운이 위치한 방향을 탐지하여 낙뢰가 진입하는 방향을 예측할 수 있는 관측시스템을 구성하고, 이의 기본특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

멀티턴 루프형 자기파형 측정시스템의 주파수대역은 약 1kHz~500kHz이고, 응답감도가  $0.16mV/nT$ 로 뇌방전에 의해 발생하는 자기 파형의 검출이 적합한 관측시스템을 구현하였다. 뇌방전에 의해 발생하는 자기 파형의 측정이 가능하고, 뇌방전이 발생할 위치의 방향을 표출할 수 있으며, 표출방향의 오차는  $5^\circ$  이하이다. 본 연구에서 제안한 뇌방전이 발생하는 방향을 탐지하는 자기측정시스템은 전계의 세기로부터 뇌운까지의 거리를 추정할 수 있는 전계측정시스템과 병용하면 낙뢰의 발생을 예측할 수 있는 고성능의 낙뢰경보시스템의 구현에 활용될 것으로 기대된다.

본 연구는 2013년도 중소기업청 중소기업기술개발사업 (과제번호: S2116387)의 지원을 받아 수행되었음.

#### References

- [1] B. H. Lee and S. C. Lee, Protection of Information and Communication Facilities against Lightning, Department of publication of Inha University, pp.38~47, 2004.
- [2] L. Jike, Y. Qiangong, X. Ming, W. Zhigang, and Q. Zheng, "Statistics and Analysis of Lightning Probability of Radio Base Station", Proc. 30th ICLP, pp.1122.1-1122.8, 2010.
- [3] V. Cooray, The Lightning Flash, The Institution of Electrical Engineers, pp.488~501, 2003.
- [4] IEC 62305-4, Protection against lightning - Part 4: Electrical and Electronic systems within structures, Ed. 2, pp.13-35, 2010.
- [5] M. J. Murphy, R. H. Holle, N. W. S. Demetriades, "Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations". Proc. 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). Tucson, USA, 2008.

[6] J. Montanya, D. Aranguren, N. Pineda, G. Sola, D. Romero, and V. March, "Total lightning, electrostatic field and meteorological radar applied to lightning hazard warning". Proc. 20th ILDC. Tucson, USA, 2008.

[7] J. Inampué, D. Aranguren, H. Torres, J. Montanya, I. Santoyo, E. Olarte, C. Younes., "Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data". Proc. 10th Int. Sym. Lightning Protection. Brazil, 2009.

[8] M. A. S. Ferro; J. Yamasaki, D. R. M. Pimentel, K. P. Naccarato, M. M. F. Saba., "Lightning risk warnings based on atmospheric electric field measurements in Brazil", J. Aerosp.Technol. Manag., Vol.3, No.3, pp. 301-310, 2011.

[9] IEC TC 81, Protection against lightning - Thunderstorm warning systems, IEC 62793, Ed. 1, CD, pp.5-21, 2014.

[10] H. S. Shim and B. H. Lee, "Construction and Operation Characteristics of the Automated Lightning Warning System Based on Detections of Cloud-to-Ground Discharge and Atmospheric Electric Field", J. KIIE, Vol.27, No.11, pp.82-88, 2013.

[11] M. A. Uman, The Lightning Discharge, Dover Publications, Inc., pp.44~47, 2001.

[12] V. A. Rakov, Lightning - Physics and Effects, Cambridge University Press, pp.44~52, 610~648, 2003.

[13] B. H. Lee, D. M. Lee and S. C. Cho, "Features and Statistics on the Magnetic Field Waveforms Radiated by Intracloud Discharges", J. KIIE, Vol.19, No.6, pp.59-66, 2005.

[14] B. H. Lee, H. J. Gil, S. C. Cho, E. B. Shim, and J. W. Woo, "Measurement and Statistical Analysis of Magnetic Fields Produced by Cloud Discharges", Trans. KIEE, Vol.54C, No.6, pp.262-268, 2005.

[15] B. H. Lee, D. C. Jeong, D. M. Lee, and C. H. Ahn, "Statistical Characteristics of the Electromagnetic Pulses Radiated from Intracloud Discharges", J. KIIE, Vol.18, No.5, pp.112-117, 2004.

[16] ANSI/IEEE Std 644, IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines, pp.17-21, 1987.

◇ 저자소개 ◇



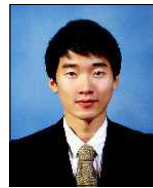
**이복희**(李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업  
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
1988~1989년 동경대학 객원연구원. 1999년  
Cincinnati대학 방문교수. 2010~2011년  
본 학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기  
공학부 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



**조치연**(趙治衍)

1987년 9월 5일생. 2012년 2월 수원대학교  
전자공학과 졸업. 현재 인하대학교 대학원  
전기공학과 석사과정.

Tel : (010)3513-4020

Fax : (032)863-5822

E-mail : zo.chiyoun@gmail.com



**조성철**(趙成哲)

1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대  
공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동  
대학원 졸업(석사). 2014년 8월 동 대학원  
졸업(박사). 현재 기초전력연구원 전력  
시험설비센터 선임연구원.

Tel : (02)885-9443

Fax : (02)883-0827

E-mail : canfeel@snu.ac.kr