

## 운방전에 의해 발생한 전자장 펄스의 통계적 특성

(Statistical Characteristics of the Electromagnetic Pulses Radiated from Intracloud Discharges)

이복희\* · 정동철 · 이동문 · 안창환

(Bok-Hee Lee · Dong-Cheol Jeong · Dong-Moon Lee · Chang-Hwan Ahn)

### 요 약

본 연구에서는 뇌전자장 펄스에 관한 상세한 정보를 얻기 위한 목적으로 운방전에 의해서 방사되는 전자파 펄스를 측정하고, 이의 특성과 파라미터를 통계적으로 분석하였다. 운방전에 의해서 방사된 전자파 펄스는 낙뢰에 의한 것과는 확연하게 달랐으며, 후속 스토르크로 갈수록 주 방전에 의한 양방성 전자파 펄스의 영점교차시간과 펄스폭은 짧게 나타났다. 또한 주 방전에 의한 양방성 전자파 펄스의 파두부분에는 좁고 빠른 리더펄스가 중첩되어 나타났으며, 이 중첩된 리더펄스의 평균 개수는 정극성에서  $61 \pm 0.74$ , 부극성에서  $1.75 \pm 0.73$ 이었다.

### Abstract

In this paper, in order to obtain the detailed information about lightning electromagnetic pulses, the electromagnetic pulses radiated from intracloud discharges were measured, and their characteristics and waveform parameters were analyzed statistically. The electromagnetic pulses produced by intracloud discharges are distinctly different with those by lightning return strokes. The zero-crossing times and the full pulse widths of the large bipolar electromagnetic pulses are gradually decreased as the stroke proceeds. Also, the electromagnetic pulses tend to be bipolar, with narrow and fast leader pulses superimposed on the initial half cycle. The mean numbers of leader pulses superimposed on the initial half cycle were  $1.61 \pm 0.74$  and  $1.75 \pm 0.73$  for the positive and negative polarities, respectively.

Key Words : Lightning, Intracloud discharges, Electromagnetic pulse, Waveform parameter

### 1. 서 론

낙뢰의 특성과 영향에 관한 연구는 인체의 손상,

전력 및 통신설비에의 장애, 산불재해 등 실제적으로 중대한 사고를 유발시키므로 많이 이루어져 왔으나 운방전은 학술적인 측면에서의 연구가 주로 이루어져 왔다[1-4]. 최근에는 초소형 고속 반도체 소자의 출현으로 초고밀도의 집적회로를 사용하는 전자기기의 개발과 이의 이용이 일반화되면서 고속철도 운전제어기의 오동작 유발과 같은 뇌방전에 의한 전자파 피해가 새로운 사회문제로 대두되었다.

\* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2004년 4월 16일  
1차심사 : 2004년 4월 22일  
심사완료 : 2004년 5월 24일

EMI/EMC 측면에서 보면 운방전에 의해서도 고주파 성분의 전자파가 발생하므로 이에 대한 원인의 분석과 대책에 관한 연구가 필요하다. 특히 최근 뇌방전에 의해서 방사되는 뇌전자장 펄스(lightning electromagnetic pulses : LEMPs)에 의해서 전자회로에 뇌서지 전압이 유도되어 전자기기의 파손이나 오동작을 초래하는 장애가 늘어나면서 이 분야에 대한 연구의 관심이 집중되기 시작하였으나 아직 명확한 성과는 발표되고 있지 않았다[5].

따라서 본 연구에서는 운방전에 의해서 방사되는 LEMP를 측정하여 이들의 물리적 특성을 분석하기 위한 목적으로 광대역 전자장 측정시스템을 구성하여 뇌방전에 의해서 방사되는 전자장의 파형을 측정하고 분석하는 연구를 수행하였다. 또한 운방전에 의해 방사된 LEMP의 특성을 검토하고, LEMP의 영점교차시간과 펄스폭, 주 방전에 의한 양방성 LEMP의 상승부분에 중첩된 미소펄스의 발생빈도와 펄스 사이의 시간간격 등의 파라미터를 통계적으로 분석·검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 뇌방전에 의해서 방사되는 전자장 파형을 검출하고 기록할 수 있는 계속시스템을 구성하였으며, 그의 개략도와 사진을 각각 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 전장 센서는 외부 노이즈의 영향을 줄이기 위하여 반구형으로 제작하였으며, 센서의 직경은 30[cm]이고, 센서의 하부에 증폭기 및 버퍼회로를 설치할 수 있게 육면체의 금속함을 만들어 신호 처리회로 및 축전지를 내장하였다. 전장측정시스템의 주파수대역은 200[Hz]~1.56[MHz]이고, 응답감도는 0.96[mV/V/m]이다.

또한 전장센서에 의해 관측된 신호가 방사성분인지를 확인하기 위하여 자장 파형을 보조적으로 측정하였다. 루프형 자장센서는 한 변의 길이를 50[cm]로 제작하였으며, 전장에 의하여 차폐선에 유도전압을 없애기 위해서 차폐선의 중앙 부분을 절단하였다[6,7]. 센서에 의하여 검출된 신호를 왜곡 없이 전송하기 위하여 특성임피던스가 50[Ω]인 동축케이블을 사용하였다. 자장측정시스템의 주파수 대역은 270

[Hz]~2.3[MHz](-3dB)이고, 응답감도는 135[mV/μT]이다.

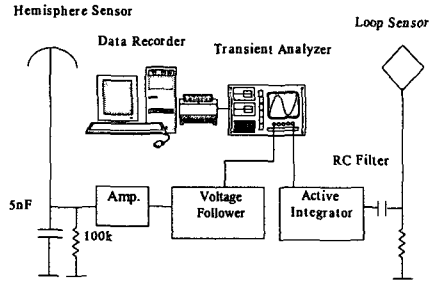
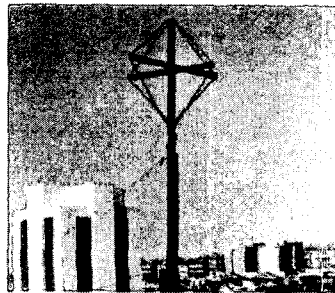


그림 1. 낙뢰에 의한 전자장 계속시스템의 개략도  
Fig. 1. A schematic diagram of the instrument system for measuring the lightning electromagnetic fields



(a) 전장센서



(b) 자장센서

그림 2. 전장센서과 자장센서의 사진  
Fig. 2. Photographs of the electric field and magnetic field sensors

검출된 신호의 취득장치의 분해능은 12[bit]이며, 검출된 신호를 200[ns]의 샘플링시간으로 디지털화시켜 1 event당 512[kbyte]로 저장된다. 뇌방전에 의해서 발생하는 전자장 파형의 측정 장치는 인천 소재의 인하대학교 교정에 설치하였으며, 측정 위치는

## 운방전에 의해 발생한 전자장 펄스의 통계적 특성

해안으로부터 약 1[km]정도 떨어진 장소이다. 본 논문에서는 1995~2000년 동안의 하절기에 발생한 운방전에 의한 전자장 펄스의 특성과 파라미터의 분석을 대상으로 하였으며, 판독이 애매하거나 오차를 유발할 것으로 예상되는 데이터는 분석 대상에서 제외시켰다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 뇌전자장 펄스의 특성

대기중에 존재하는 뇌운은 정(+)전하와 부(-)전하가 거의 수직으로 분리되어 형성되며, 정전하운이 상부에 부전하운이 하부에 위치하는 경우가 대부분이다. 운방전은 뇌운 안에 존재하는 정전하의 중심과 부전하의 중심 사이를 리더의 진전에 의해 교락된 후 전하운의 재결합과정에 의하여 발생하는 물리적 현상이다[5]. 본 연구에서 측정된 운방전에 의해서 방사된 전자장 파형의 예를 그림 3에 나타내었다. 주 방전이 일어나기 이전에 리더가 발생하며, 낙뢰의 리더보다는 더 긴 시간간격으로 나타났다.

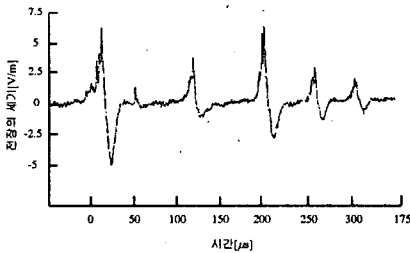


그림 3. 운방전에 의해서 발생한 LEMP의 예  
Fig. 3. Example of LEMPs radiated from intracloud discharges

LEMP의 파두부분은 비교적 빠른 상승시간을 가지며, 양극성(bipolar)진동의 파형을 나타내고, 리더 전류에 의한 1~3개의 펄스가 상승부분에 중첩되는 형태를 나타내는 것이 특징이다. 이러한 양극성 전자장 신호는 뇌운 내에 존재하는 정전하와 부전하가 리더에 의해 서로 만나 재결합에 의한 소멸과정 동안의 동적 특성이다[8,9]. 주 방전 이전의 미세한 펄스상의 신호는 정전하운과 부전하운 사이에 리더가 진전됨을 의미하며, 운방전에 의한 LEMP는 계단상의 리더에 의한 도전채널의 형성과 관련된 매우 빠

른 펄스상의 전류와 도전채널이 형성되는 도중 또는 도전채널의 형성 직후에 흐르는 양방성 전류서지성분에 의하여 발생된 전자장의 중첩인 것으로 생각된다. 즉, 정·부극성의 전하운 사이를 진전하는 리더가 단일 형상이 아니고 여러 개의 분기채널을 가지고 있기 때문인 것으로 추정된다.

더불어 운방전의 경우는 낙뢰의 경우와는 다르게 뇌방전이 발생되어 종료되기까지의 시간이 짧으며, 고주파 성분의 미세한 펄스를 포함하고 있으므로 방사 성분의 전자장이 주로 나타났다. 그리고 뇌방전에 의해서 넓은 대역의 전자파가 방사되며, 대기권 내의 자연전자 잡음은 대부분 뇌방전에 의해서 발생되는 것으로 알려져 있다.

#### 3.2 뇌전자장 펄스의 파라미터

##### 3.2.1 파라미터의 정의

운방전에 의한 LEMP는 뇌방전의 진전형태와 규모에 따라 동일하지는 않았지만 양상은 뚜렷하게 나타났다. 양극성, 상승부분에 리더 펄스의 중첩 등 명확한 특징을 가지고 있으며, 그림 4에는 운방전에 의한 LEMP의 특성을 나타내는 파라미터의 정의를 나타내었다. 운방전에 의한 정·부극성의 LEMP를 분석하였으며, 극성의 구분은 동시에 관측된 전자장 파형을 기준으로 판정하였다[8,9].

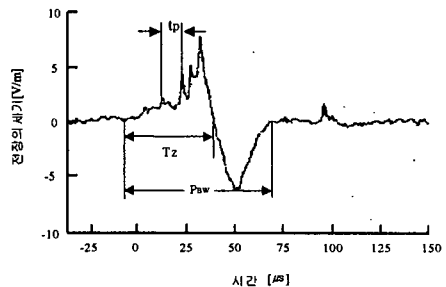


그림 4. 운방전에 의한 LEMP 파라미터의 정의  
Fig. 4. Definition of the parameters of LEMP radiated from intracloud discharges

영점교차시간( $T_z$ )은 파형이 시작되는 규약원점으로부터 극성이 바뀌는 시점까지 걸리는 시간, 펄스폭( $P_{BW}$ )은 운방전의 영점으로부터 펄스의 피크를 지난 후 반대 극성의 피크를 지나 나타나는 영점까지의 시간으로 규정하였다.

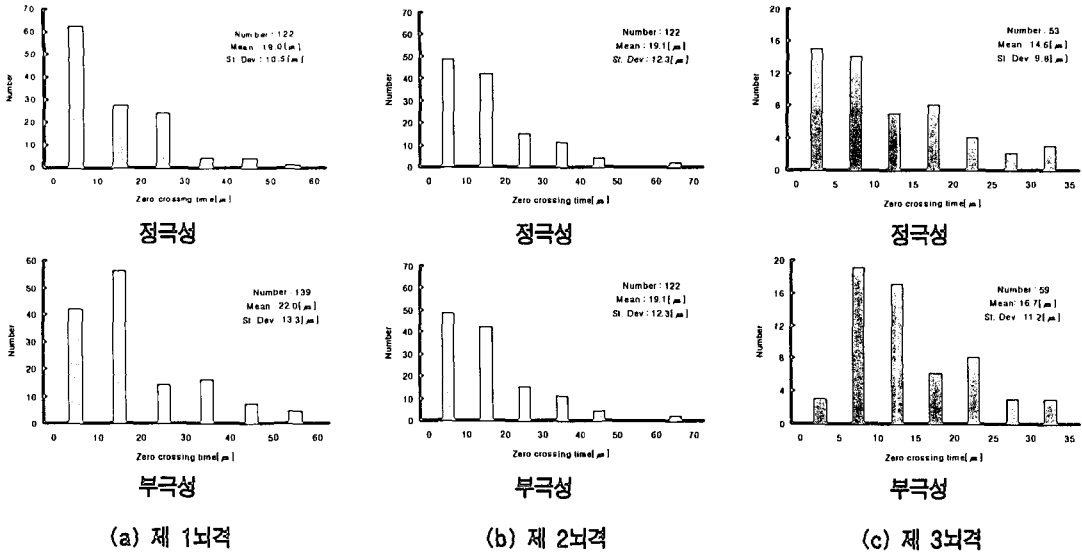


그림 5. 영점교차시간의 분포  
Fig. 5. Histograms of the zero-crossing time

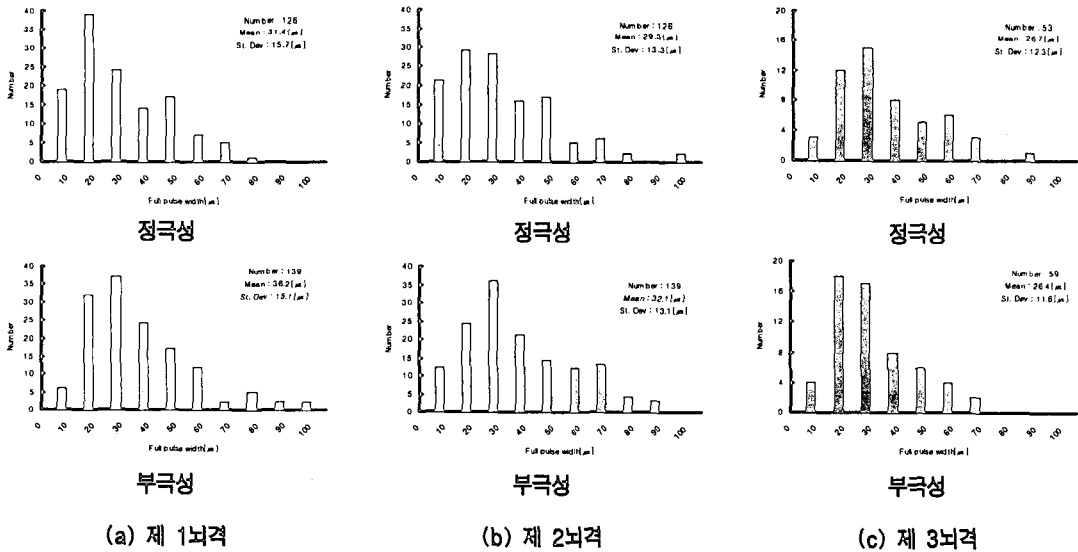


그림 6. 펄스폭의 분포  
Fig. 6. Histograms of the full pulse width

### 3.2.2 영점교차시간의 분포

운방전에 의한 LEMP의 영점교차시간은 거리의존성을 가지며, 20[km]이상의 거리에서 관측된 경우에 방사성분을 주 성분으로 하는 전자기장 파형이 관측되므로 이러한 데이터를 분석 대상으로 하였다. LEMP

의 영점교차시간의 분포를 그림 5에 나타내었다.

### 3.2.3 펄스폭의 분포

운방전은 리더의 진전 후에 나타나는 펄스의 형태는 영점으로부터 피크까지의 상승부분과 피크에서

### 운방전에 의해 발생한 전자기장 펄스의 통계적 특성

다시 영점을 지나 반대 극성의 펄스가 나타났다. 이는 뇌운 내에 존재하는 정전하와 부전하가 리더에 의해 서로 만나 재결합되어 소멸과정 동안에 반복적으로 발생하는 동특성에 의한 것으로 추정된다.

LEMP의 펄스폭 분포에 대해서 통계적으로 분석한 결과를 그림 6에 나타내었다. LEMP의 펄스폭 분포는 극성의존성이 거의 나타나지 않았으며, 후속뇌격으로 진행할수록 점차적으로 감소하는 양상을 나타내었다. 정극성에 대해서 제 1뇌격에서 후속뇌격으로 진전할수록 감소하고 있음을 볼 수 있다.

#### 3.2.4 파두부분에 중첩된 펄스의 특성

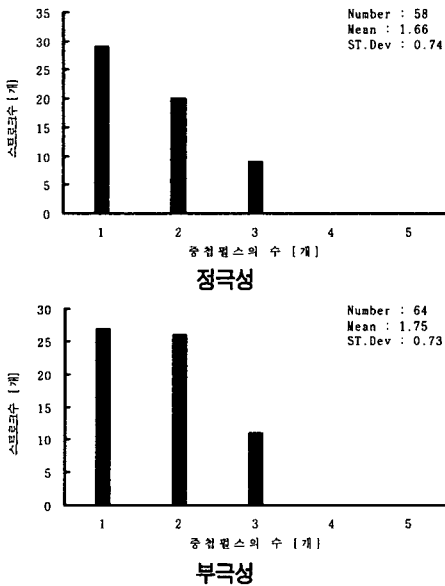


그림 7. 파두부분에 중첩된 리더펄스수의 분포  
Fig. 7. Distributions of the number of the leader pulses superimposed on the initial half cycle

운방전에 의한 LEMP의 파두부분에 나타난 중첩 펄스의 발생빈도수의 분포, 중첩펄스의 피크점사이의 시간간격을 분석하였다. 그림 7에는 주 방전에 의해서 발생한 LEMP의 파두부에 발생한 중첩펄스의 발생빈도에 대한 분포를 나타내었다. 정극성의 경우에는 중첩펄스의 평균 발생빈도가 1.66으로서 중첩 펄스의 수가 1개인 경우에 가장 많은 29개의 스트로크 분포를 나타내고 있다. 부극성 주 방전에 의한 전

자기장 파형의 파두부분에 중첩된 펄스의 평균 발생빈도는 1.75로서 정극성의 경우보다는 다소 크게 나타났으며, 빈도수 1~2에 주로 분포되어 있다.

주 방전에 의해 발생한 LEMP의 파두부분에서 중첩된 리더펄스의 피크점사이의 시간간격(tp)에 대한 스트로크 분포를 그림 8에 나타내었다. 중첩펄스의 시간 간격은 뇌격의 위치와 관측지점 사이의 거리에 대한 의존성은 나타나지 않았으며, 방전진전과정 동안에 발생한 리더의 분포와 관련성이 있는 것으로 볼 수 있다. 정극성의 주 방전 펄스의 파두부분에 나타난 중첩펄스의 평균 시간간격은 4.43[ $\mu$ s]로서 대부분 2~7[ $\mu$ s]사이의 넓은 범위에 분산되어 있어 상부에서 중첩되어 발생하는 중첩펄스가 불규칙적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 부극성인 경우에는 평균 시간간격이 4.78[ $\mu$ s]로서 정극성인 경우보다는 약간 길게 나타났으나 정극성과 비슷한 분포를 보이고 있으며, 10[ $\mu$ s]를 초과하는 경우도 더 많다.

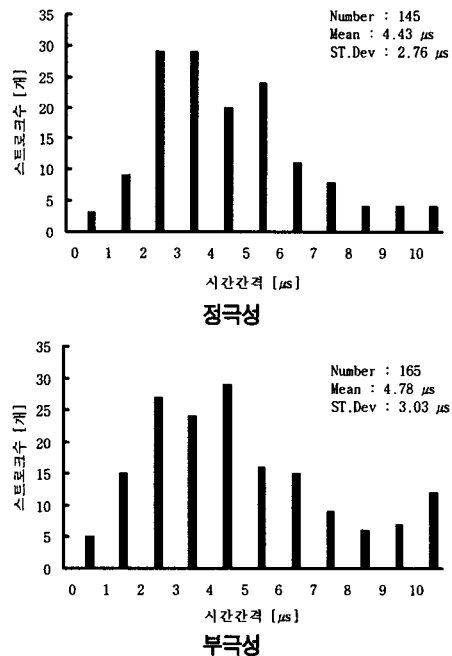


그림 8. 파두부분에 중첩된 리더펄스사이의 시간간격의 분포  
Fig. 8. Distributions of the time intervals between the leader pulses superimposed on the initial half cycle

#### 4. 결 론

운방전에 의해서 방사되는 전자장 펄스를 측정하고, 영점교차시간, 펄스폭과 중첩된 리더펄스의 시간간격 등의 파라미터를 통계적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 운방전에 의해서 발생한 LEMP의 초기 상승부에 리더 펄스가 중첩되며 양극성의 형태를 나타내는 특징을 가지고 있다. 영점교차시간은 주로 10~30[ $\mu$ s] 범위에 분포되었다. 또한 운방전에 의한 전자장 파형의 펄스폭은 20~60[ $\mu$ s]에 주로 분포되고 후속뇌격일수록 짧게 나타났다. 주 방전에 의한 전자장 파형의 파두부분에 나타나는 중첩펄스의 평균시간간격은 정극성 4.43 $\pm$ 2.76[ $\mu$ s], 부극성 4.78 $\pm$ 3.03[ $\mu$ s]의 범위에 분포되어 있어 매우 불규칙적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업에 의해 작성되었습니다.

#### References

- [1] W. H. Beasley, M. A. Uman and P. L. Rustan, "Electric Fields Proceeding Cloud-to-Ground Lightning Flashes", J. Geo. Res., Vol.87, No.7, pp.4883-4902, 1982.
- [2] C. D. Weidman and E.P. Krider, "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Wave Forms", J. Geo. Res., Vol.83, No.C12, pp.6239-6247, 1978.
- [3] M. A. Uman and E.P. Krider, "A Review of Natural Lightning : Experimental Data and Modelling", IEEE Trans., Vol.EMC-24, No.2, pp.79-105, 1982.
- [4] M. Ishii and J. Hjojo, "On the Statistics of Field waveforms Associated with Lightning Return Strokes", Proc. of ICOLSE, 3B-1, 1988.
- [5] B. H. Lee, S. C. Lee, C. H. Ahn and T. Kawamura, "Physical Properties of Radiation Fields Produced by Multiple In-Cloud Lightning Discharges", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.40, pp.299-306, 2001.
- [6] S. Y. Park, B. H. Lee, C. H. Ahn and K. O. Lee, "Characteristics of the Electric Field Waveform Associated with Cloud-to-Ground Lightning Discharges", Proc. 8th ACEE, pp. 605-1-4, 1996.10.
- [7] E. P. Krider and R. C. Noggle, "Broadband Antenna System for Lightning Magnetic Fields", J. Appl. Meteorol., Vol.14, pp.252-256, 1975.
- [8] C. D. Wiedman and E. P. Krider, " The Radiation Field Wave Forms Produced by Intracloud Lightning Discharge Processes", J. Geo., Res., Vol. 84, No. C6, pp.3159-3164, 1979.
- [9] B. H. Lee, S. H. Chang, C. H. Ahn, S. C. Lee and D. K. Jeon "Statistical Analysis of Electric and Magnetic

Fields due to Multiple Cloud Lightning Discharges", Proc. Int. Workshop on HVE., Vol. II, pp.19-24, 1999.

- [10] E. P. Krider, G. J. Radda, and R. C. Noggle, "Regular Radiation Field Pulses Produced by Intracloud Lightning Discharges", J. Geo. Res., Vol.80, No.27, pp.3801-3804, 1975.
- [11] V. Cooray and S. Lundquist, "Characteristics of the Radiation Fields from Lightning in Sri Lanka in the tropics", J. Geo. Res., Vol.90, No.D4, pp.6099-6109, 1985.
- [12] T. Ushio, et al., "Characteristics of pulse Trains Superimposed on the Electric Field changes of Japanese Winter Lightning", T. IEEJ, Vol.116-B, No.4, pp. 453-459, 1996.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수.  
Tel. (032)860-7398, Fax. (032) 863-5822,  
e-mail : bhlee@inha.ac.kr

##### 정동철 (鄭東哲)

1954년 9월 18일생. 1989년 2월 영남대 전기공학과 졸업. 2002년 2월 고려대학교 산업대학원 졸업(석사). 현재 한진중공업주식회사 근무, 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel. (032)860-7398, Fax. (032)863-5822  
e-mail : dcjeong@korea.com

##### 이동문 (李東汶)

1958년 4월 20일생. 1987년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 한진중공업주식회사 근무, 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel. (032)860-7398, Fax. (032) 863-5822,  
e-mail : lidm7@hanmail.net

##### 안창환 (安昌煥)

1959년 11월 4일생. 1983년 2월 원광대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전력공사 재직.  
Tel. (032)860-7398, e-mail : Chahn@kepeco.co.kr