

# 펄스반복율의 가변에 의한 대기압 아크방전중의 고효율 금속산화물 제거 특성

論 文

52C-4-6

## High Efficient Metal-oxide Removing Characteristics as Pulse Repetition Rates in the Atmospheric Arc Discharge

李 有 秀 · 宋 祐 正 · 金 壽 源 · 丁 鍾 漢 · 金 龍 哲 · 金 熙 濟

(Yu-Soo Lee · Woo-Jung Song · Su-Weon Kim · Jong-Han Joung · yong-cheol Kim · Hee-Je Kim)

Abstract - The pulsed power system is widely used for many industries and environments. Generally, we call the "RUST", the reddish brown surface, that was made on iron surface or some other metals, when they are contacted by water and air. the main substance of rust is oxide-ionization. In other words, the chemical symbol of rust on iron surface is iron oxide(III) hydrate  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ .

In this study, we have designed and fabricated our system which has a compact pulse generator with switching MOSFET. Also we have studied the metal-oxide removing characteristics using in the atmospheric arc discharge.

It has been investigated their removing characteristics by the change of charging voltage and pulse repetition rates. From this result, we can find out that the removal area is increased from 3.80 to 8.04[cm<sup>2</sup>], when pulse duration is increased from 100[pps] to 400[pps].

**Key Words** : Metal-oxide, Arc discharge, Pulse power, Firing voltage, Positive · Negative polarity, MOSFET

### 1. 서 론

오늘날 산업전반에 걸쳐서 펄스파워 기술의 여러 가지 특성들이 연구 및 개발되고 있다. 펄스파워 시스템은 플라즈마를 이용한 전자기에너지를 시·공간적으로 압축시켜 순간적으로 대전력을 얻을 수 있는 급준 임펄스 장치로써 환경 빛오·폐수처리에 적용되며 그 산업적 응용범위가 매우 넓다. [1~3] 대표적 응용분야 중에서 분진(Dust)을 제거하기 위한 전기집진기, 펄스코로나 방전을 이용하여 플랜트의 배기가스를 제거하기 위한 탈황/탈질 전원시스템, 폐수처리, X선 발생장치, 오존발생기, 레이저발생 전원 등에 사용되고 있다.[4~6] 그리고, 더욱 실용적이고 경제적인 펄스발생장치를 이용하여 환경오염원을 해결하기 위해 많은 나라들의 관심이 고조되고 있다.[7~8]

현재 여러 산업분야에 금속은 매우 많이 사용되며 없어서는 안될 중요한 물질인 것은 분명하다. 하지만 금속은 공기 중에 있는 산소·수분·이산화탄소 등에 의해서 금속의 표면이 부식된다. 이와 같은 이물질인 부식생성물의 총칭을 '금속산화물'(Metal-oxide)이라 하는데 대표적으로 '녹'(Rust)이 이에 해당된다. 이 과정이 발생되면 금속의 부식성 및 금속특성에 부정적 영향을 초래한다. 이와 같은 이유로 여러 나라들이 금속산화물에 대한 생성 및 제거 메커니즘을 확립하기

위해 물리·화학적으로 많은 규명 및 시도가 있었다.[9] 예를 들어, 산화가 발생하지 않는 금속재료 혹은 비금속재료 등이 개발되었지만 그 결과는 여전히 만족스럽지 못한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 대기압, 상온에서 금속산화물을 이루고 있는 물질을 직접 제거하기 위해 수십 kV이상의 침투 전압을 발생시킬 수 있는 펄스발생기를 제작하였으며, 금속 표면의 금속산화물질에 아크방전을 이용한 펄스에너지를 직접 방사함으로써 금속산화물 제거과정 및 그 특성에 관한 연구를 하고자 한다.

여기서 기체방전이 절정에 달하여 전극 재료의 일부가 증발해서 기체가 된 상태를 아크방전(arc discharge)이라고 하는데 이것은 유전체의 완전 전로파괴를 유도하여 대전류를 발생시키게 한다. 이렇게 발생된 아크방전은 전자를 반전계 방향으로 가속하게 되어 전극표면에 충돌하여 전극재료의 일부를 제거시킬 수 있는 강력한 전자에너지를 가지게 된다.[10~11]

본 연구에 사용된 전극형태는 침대 평판의 전극방식으로 전압 및 전류를 측정하였으며, 또한 정·부극성 방식을 사용하여 방전개시전압을 측정하였다. 그리고, 정극성 방식으로서 통계적 지연시간을 고려하여 금속산화물질에 폭 4[ $\mu$ s]의 펄스에너지를 60[s]동안 인가하였다. 그리고, 일정 전극간격과 전압 조건 하에서 펄스반복율을 다양하게 가변하여 그에 따른 변화 특성을 조사하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 펄스발생기(Pulse generator) 시스템 구성도

그림 1은 펄스발생기의 블록도로서 금속산화물을 제거하

\* 準 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

\*\* 正 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

\*\*\* 正 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002 年 10 月 17 日

最 終 完 了 : 2003 年 2 月 12 日



에서는 순간적인 대전류를 발생시켜 전자의 최대 충격에너지를 얻을 수 있는 아크방전을 이용하여 금속표면의 산화물질을 제거하려고 한다.

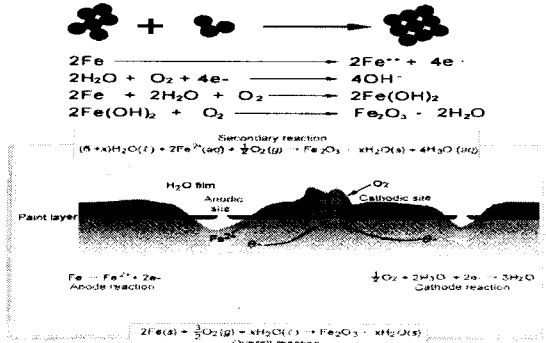


그림 4 용존 산소로 인한 배관의 부식  
 Fig. 4 Corrosion of the pipes in dissolved oxygen

### 3. 실험 결과 및 검토

그림 5는 PIC 제어부에서 출력되는 펄스반복율의 제어신호 및 MOSFET Gate 구동신호 파형을 나타낸다. 스위칭 주파수는 주 회로의 부하임피던스 매칭에 맞추어 펄스반복율(F)을 10~1000[pps]까지 일정하게 컨트롤하였으며 PIC프로세서에서 나온 제어신호가 증폭회로를 거쳐서 MOSFET구동 드라이버인 IR2110을 통해 MOSFET로 전달되어 시스템이 동작되는 것을 보여준다. 파형 A, B, C, D는 출력 신호로서 10, 100, 500, 1000[pps]의 펄스 타이밍 신호를 나타내고 있다. 이때 ON, OFF 타임의 기본 설정시간은 최대 펄스반복율을 가지는 D파형을 기준으로 설정하여 계산하였다. 즉, 1000[pps]의 펄스 스위칭신호의 ON-TIME은 300[μs], OFF-TIME은 700[μs]의 시간 간격을 가지고 펄스신호가 발생되게 구성하였다.

그림 6은 MOSFET의 드레인(D)-소스(S)사이의 전압  $V_{ds}$  및 부하의 방전 파형을 나타내었다. 그림 6에서 (1)은  $V_{ds}$  300[V]를 의미하며, (A)는 1:42의 펄스변압기에 의해 변성된 방전 파형을 나타낸다.

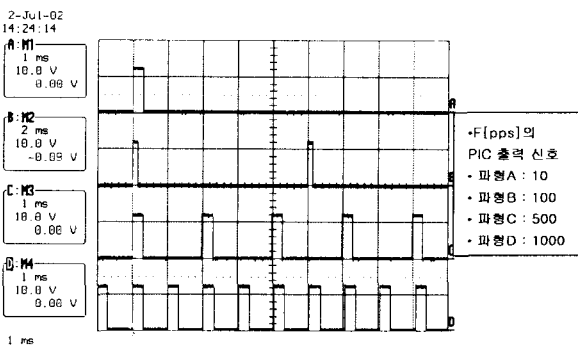


그림 5 PIC 프로세서의 펄스 입력 제어신호  
 Fig. 5 Waveform of control signal by the pulse input in PIC

대기압 상온에서 펄스폭 25[μs], Gap 7[mm]일 때 펄스전압 14[kV]에서의 펄스코로나 방전 파형이다

그림 7과 그림 8은 정·부극성 일 때 펄스코로나 방전시 펄스반복율에 따른 입력전압의 가변에 의한 방전개시 전압( $V_f$ )의 변화특성을 파형과 그래프로 보여주고 있다.

펄스파워 시스템에서 침대 평판 구조로서 일정한 간격(Gap:7[mm])으로 배치하여 일정하게 펄스반복율을 가하였으며 입력전압을 가변 시키면서 방전개시 전압을 측정하였다.

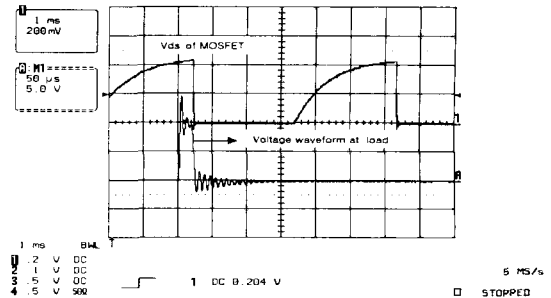


그림 6 드레인과 소스사이의 인가전압 및 방전파형  
 Fig. 6 Voltage of  $V_{ds}$  MOSFET and Discharging waveform

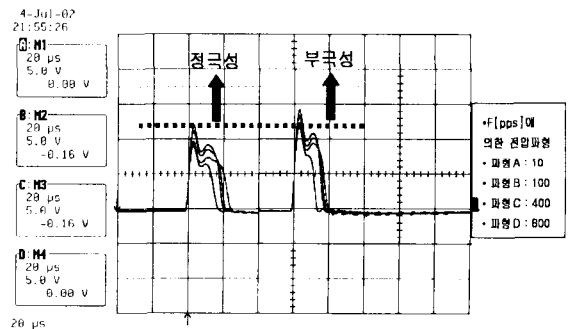


그림 7 정·부극성의 방전개시전압( $V_f$ ) 파형비교  
 Fig. 7 Firing voltage waveform of Positive & Negative polarity

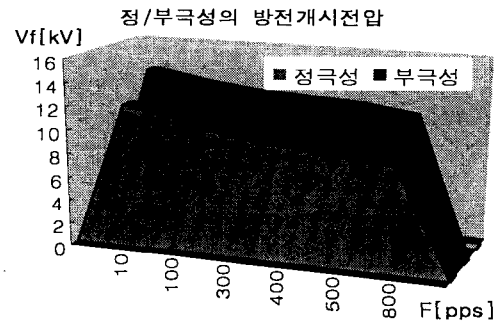


그림 8 펄스반복율에 따른 정·부극성의 방전개시전압( $V_f$ )  
 Fig. 8 Comparison firing voltage between Positive & Negative polarity by pulse repetition

일반적으로 펄스코로나 방전 동안에는 거의 안정하고 낮은 부하 임피던스를 가지지만, 펄스 에너지가 부하에 대부분 전송된 방전 후기에서는 급격한 임피던스의 변화를 나타내면서 부하 임피던스 값이 증가한다. 따라서, 방전을 시작한 후 펄스전압 및 전류가 첨두치에 도달할 경우 부하 임피던스는 최저치가 되고 그 후에는 부하 임피던스의 급격한 변화를 가지며 증가하는 특성을 지닌다.

그림 8은 펄스반복율에 따른 정·부극성의 방전개시전압이다. 일정한 전극간격, 온도, 충전전압에서 펄스반복율이 높을수록 방전개시전압이 선형적으로 낮아진다. 정극성과 부극성의 방전개시전압은 약 최저 2[kV], 최대 5[kV]의 차이가 발생한다. 부극성에서 100[pps]와 800[pps]의 경우를 보면 펄스반복율을 증가했을 때 방전개시전압이 2.6[kV]의 차이가 발생함을 알 수 있다.

그림 9는 첨대 평판의 전극구조에 일정한 간격에서 각각의 입력전압을 일정하게 주고 펄스반복율(F)을 10~400[pps]까지 가변한 경우 부하의  $V_{p-p}$  값을 나타낸다. 그림에서 입력전압 ( $V_{in}$ )은 C3의 충전전압을 의미하며 입력전압이 400[V]일 때 최대 첨두값이 되는 것을 알 수 있었으며, 이것은 실험장치의 C3의 충전용량이 가장 안정적이며 효율적이며 에너지가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 일정 전압에서 펄스반복율을 점점 높게 할수록 파형이 급격한 변화형상을 나타내었다. 이와 같이 방전개시전압은 정극성, 부극성, 펄스반복율 및 전극간격에 따라 그 정량적 값이 다르게 나타난다.

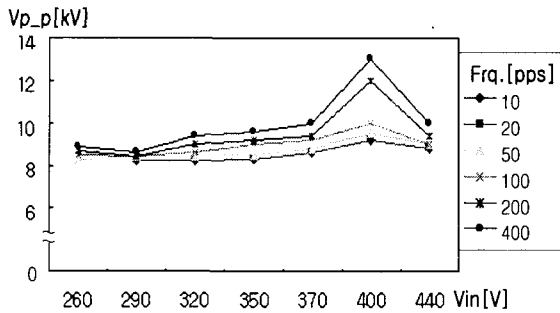


그림 9 입력전압( $V_{in}$ )과 주파수에 따른  $V_{p-p}$  변화  
 Fig. 9 Change of peak voltage in the input voltage and the frq.

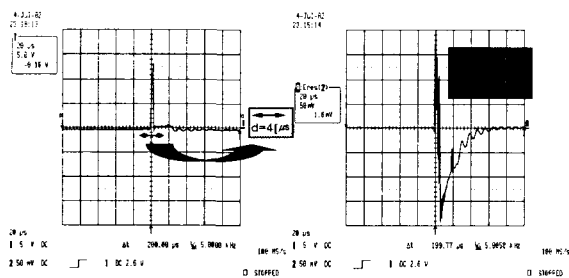


그림 10 펄스반복율 400[pps]일때 아크방전의 전압, 전류 파형  
 Fig. 10 Current & Voltage waveform of arc discharge in 400[pps]

그림 10은 입력전압  $V_{in}=400[V]$ , 400[pps]일 때 펄스변압기에 의해 변성된 아크 방전에 따른 전압 및 전류 파형의 변화 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 아크 방전시 전압, 전류의 펄스 폭이 줄어들고 전압은 감소하며 전로파괴에 의해 전류는 매우 급증하게 되는 것을 알 수 있다. 대기압 상온에서 펄스 폭 4[ $\mu s$ ], Gap:7[mm]일 때 펄스전압 13.2[kV]에서 대기압 질소가스로 인한 강렬한 방전 색을 관찰할 수 있다.

그림 11은 금속산화물에 직접 아크방전을 방사한 그림을 나타낸다. 그림 11(a)는 아크방전 이전의 순수 금속산화물 시편의 표면을 나타낸 그림이다.

그림 11(b)는 입력전압 400[V]일 때, 60[S] 동안 아크방전을 방사하는 과정을 나타낸 그림이다.

그림 11(c)는 같은 조건하에서 펄스반복율을 각각 10, 100, 400, 600[pps]으로 가변시킴에 따라 아크방전을 금속산화물 시편에 방사한 것이다. 여기서 펄스반복율에 따른 금속산화물과의 제거특성을 알 수 있다. 금속산화물이 제거된 부분은 거의 원에 가까운 모습을 보였다. 따라서 제거면적은 원의 반경에 따른 넓이로 계산하였다.

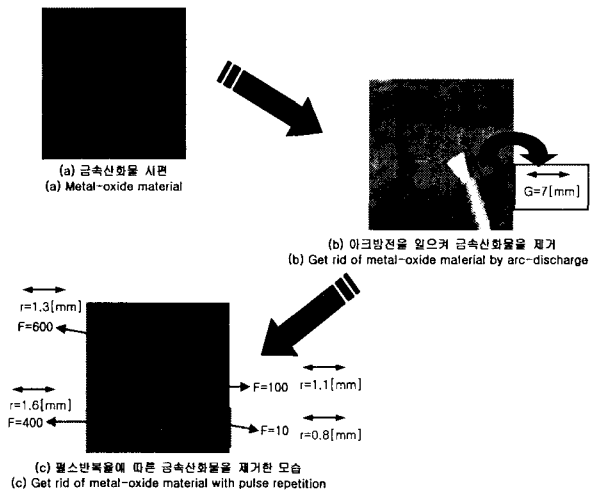


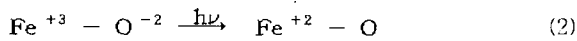
그림 11 아크방전을 이용하여 금속산화물을 제거하는 과정  
 Fig. 11 Processing removal of metal-oxide using arc-discharge

그림 11 및 표 1에서 알 수 있듯이 펄스반복율이 400[pps]일 때, 금속산화물의 제거면적이 가장 큰 것을 알 수 있다. 즉, 산화면적은 펄스반복율에 따라 각각 2.0, 3.8, 8.0, 5.3[ $cm^2$ ]으로 나타났으며 펄스반복율이 100[pps]인 경우와 4배 증가시킨 400[pps]인 경우를 비교하면, 그 면적은 약 2.1배의 차이를 보였다. 즉, 금속산화물의 제거면적은 400[pps]인 경우가 가장 효율적임을 알았다. 이것은 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이  $V_{p-p}$ 에 따른 C3의 방전전압의 첨두값이 400[pps]일 때, 최대값을 보이고, 이 때 가장 안정적이며 효율적으로 에너지가 전달되기 때문이다. 그러나 pps가 어느 수준을 초과하면, 본 실험에서 사용하고 있는 펄스 트랜스의 에너지 전달 효율은 도리어 감소하기 때문에 펄스반복율이 600[pps]가 되면 제거면적은 다시 줄어드는 경향을 보인다.

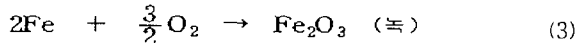
표 1 펄스 에너지 인가시 펄스반복율에 따른 제거 면적  
Table 1 Pulse Removed Area to Adjusting Pulse Repetition

[pps]	10	100	400	600
반경[cm]	0.8	1.1	1.6	1.3
제거 면적[cm <sup>2</sup> ]	2.0	3.8	8.0	5.3

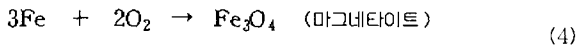
금속산화물을 제거하기 위해서 산화물 시료에 펄스에너지를 인가하면, 철원자의 에너지 상태를 나타내는 가전자 값이 3+에서 2+로 바뀌게 됨으로서, 금속산화물(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 대신 마그네타이트(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)가 생성되게 된다. 이 때 생성되는 마그네타이트 자체가 시료 표면에 보호막의 역할을 하여 발생된 금속산화물을 제거하게 되는 것이다.



▶ 철의 가전자 3+ 일 때



▶ 철의 가전자 2+ 일 때



위의 화학식에서 알 수 있듯이 가전자수가 변한 금속산화물이 떨어져 나오게 되며, 금속산화물이 모두 떨어져 나가면 시료의 표면은 점점 검은색으로 변하는데, 이것을 자철석(Magnetite, 磁鐵石)이라고 부르며, 그 화학식은 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>가 된다. 따라서 이 마그네타이트가 형성되면 철의 표면에는 더 이상 금속산화물이 생성되지 않게 된다. 즉, 금속산화물의 제거 및 산화 방지를 하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실험실에서 제작된 펄스파워시스템을 사용하여 충전전압을 0에서부터 640[V]까지 가변시킬 수 있도록 전원장치를 구성하였으며, 동시에 PIC 원칩 마이크로 프로세서를 활용하여 펄스반복율까지 조절 가능한 제어장치를 구성하였다. 아크방전을 이용하여 금속산화물 제거 특성에 관하여 연구된 결과는 다음과 같다.

- (1) 일정한 전극 간격(Gap:7[mm])에서 전극구조를 침대 평판으로 하여 일정 전압에서 펄스반복율을 가변하였더니 정·부극성에 따라 방전개시전압이 2~5[kV]의 차이가 발생하였다. 이에 따라 정극성인 경우 방전개시 전압이 낮게 나타나는 경향을 보였다.
- (2) 펄스반복율이 100[pps]에 대하여 400[pps]인 경우의 제거 면적을 비교해 보면, 전자는 3.8[cm<sup>2</sup>]이고 후자는 8.0[cm<sup>2</sup>]로 되어 약 2.1배의 차이를 보였다. 따라서 펄스반복율이 400[pps]인 경우가, 금속산화물질 제거에 가장 효율적인 것을 알았다.

- (3) 아크방전을 시료에 방사했을 때, 가전자수가 변한 금속산화물이 떨어져 나오게 되며, 금속산화물이 모두 떨어져 나가면 시료의 표면은 점점 검은색으로 변하게 되고, 이렇게 생성된 마그네타이트(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)가 더 이상의 금속산화물이 생성되는 것을 방지 및 억제시킬 수 있다는 것을 알았다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. M. van Veldhuizen, Y. L. M. Creyghton, and W. R. Rutgers, "High resolution schlieren study of pulsed corona", presented at the 4th Int. Conf. On ESP, Beijing, China, 1990.
- [2] H. J. Hall. "History of pulse energization in electrostatic precipitation", J. electrostatics. vol. 25, pp. 1-22, 1992
- [3] S. Masuda and S. Hosokawa. "Pulse energization system of electrostatic precipitator for retrofitting application". presented at EPA-EPRL 5th symp. on Transfer and Utilization of particulate Contr. Technol. Aug. 1984
- [4] J. S. Chang and S. Masuda, "Mechanism of pulse corona induced plasma chemical process for the removal of NOx, SOx from combustion gases", presented at the IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Conf., 1988.
- [5] J.H. Joung, "The EMTP Analysis and Characteristics of Load Impedance on Various Electrode length, Pulse Repetition in Pulse Corona Discharging", presented at the KIEE, vol. 51C, No. 4, pp. 158-164, APR. 2002.
- [6] Akira Homma, "High-voltage subnanosecond pulse transformer composed of parallel-strip transmission lines", presented at the Review of Scientific INS, vol. 70, pp. 232-236, 1998.[]
- [7] Robinson, M.1971, "Electrostatic precipitation" in W. Straussed Air Pollution Control, paryl wiley-interscience, New York
- [8] Bernie M. Penetrate, Shirley E. Schultheis, Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Springer-Verlag, 1992.
- [9] Identify a quotation : www. MERUS. KOREA
- [10] Miyake, M.; Takahashi, H.; Yasuoka, K.; Ishii, S. "The generation and application of micro discharge plasmas" Plasma Science, 1999. ICOPS '99. IEEE Conference Record - Abstracts. 1999 IEEE International Conference on , 1999
- [11] Hlina, J.; Nenicka, V. "Arc discharge rotation in external magnetic field-nonuniformities and formation of a nonlinear dynamic system " Plasma Science, IEEE Transactions on , Volume: 25 Issue: 5 , Oct. 1997

저 자 소 개



**이 유 수(李 有 秀)**

1961년. 5월. 19일생 1988년 부경대학교 전기공학과 졸업 1997년 부산대 산업대학원 석사졸업 2003년 부산대 대학원 박사과정 수료 現, 한국전력공사 북부산 전력소 근무  
Tel: 051-330-2353  
E-mail: eusoo@kepcoco.kr



**송 우 정(宋 祐 正)**

1973년 12월 15일생. 2000년 부경대학교 전기공학과 졸업.2001년 부산대학교 전기공학과 대학원 졸업 現 LG전자 근무  
Tel: 051-510-2770, Fax: 051-513-0212  
E-mail: heartpower@hanmail.net



**김 수 원(金 壽 源)**

1977년 2월 5일 생. 2002년 부산대학교 전기공학과 졸업. 2002년 3월~현재 부산대 대학원 전기공학과 석사 과정  
Tel : 051-510-2770, Fax:051-513-0212  
E-mail: suweon@dreamwiz.com



**정 중 한(丁 鍾 漢)**

부산대학교 전기공학과 석사졸업. 한국중공업 환경기술연구소 주임연구원. 現 부산대학교 전기공학과 박사수료. 現 창원전문대학 전자통신과 연구교수.  
Tel: 051-510-2770, Fax: 051-513-0212  
E-mail: ivan1@hanmail.net



**김 용 철(金 龍 哲)**

1986년 2월 부경대학교 전기공학과 졸업 2002년8월 부산대학교 산업대학원 전기공학과 석사졸업 2003년 현재 부산대 대학원 박사과정 現 한국전력공사 북부산 전력소 345kv 계통급전 및 초고압 전력설비. 주요관심부분: 전력기기 센서개발  
Tel: 051-333-5596  
E-mail: ks8766@korea.com



**김 희 제(金 熙 濟)**

1955년 10월 23일 생. 1980년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년~1983년 동 대학원 전기과 조교. 1983년~1985년 한국전기연구소 연구원. 1985년~1990년 일본 큐슈대학원 연구생 및 박사과정. 1990년 동 대학원 에너지변환공학전공 졸업(공학). 1990년~1995년 한국전기연구소 선임연구원. 1995년~현재 부산대 전기공학과 부교수.  
Tel : 051-510-2364, Fax : 051-513-0212  
E-mail : heeje@pusan.ac.kr