

가포화 자기스위치 MPC를 적용한 저온 플라즈마의 펄스에너지 전송효율 특성

論文
52C-9-3

The Study on the Optimal Transmission Efficiency Characteristics of Pulse Energy Using Magnetic Pulse Compressors

李有秀* · 丁鍾漢* · 鄭賢株* · 金文煥** · 金熙濟***

(Eu-Soo Lee · Jong-Han Joung · Hyun-Joo Jung · Moon-Hwan Kim · Hee-Je Kim)

Abstract - In this paper, we have studied about optimal transmission efficiency characteristics of pulse energy in a coal plant for removing environmental polluted gas. The electrical efficiency of pulse power systems depends on impedance of the reactor. To obtain high efficiency, we used MPC(Magnetic pulse compressor) as the power switch and tested their characteristics as electrode length of the reactor and charging voltage of capacitor. As results, we obtained a compressed pulse such as pulse voltage of 10kV, rising time 200ns and pulse width of 500ns. With increasing electrode length, the load impedance was decreased but the electrical efficiency was increased.

Key Words : optimal transmission efficiency, MPC, compressed pulse, electrode length, impedance, reactor

1. 서론

산성비, 지구온난화, 오존층 감소와 스모그는 현재 전세계적인 문제로 대두되고 있으며, 최근 발전소 오염규제가 더욱 강화되는 시점에 와 있다. 이러한 문제의 해결책을 위한 여러가지 방법들이 산업에 적용되어 왔으며^[1-2], 더욱 실용적이고 경제적인 방법으로 이러한 환경오염원을 해결하기 위해서 많은 나라들이 관심을 가지고 있다.^[5] 그 중에서 최근에 혁신적인 처리 방법이 저온 플라즈마를 이용한 오염원 제거 방법이다. 방전현상을 이용한 대표적인 건식법으로는 전자빔법과 펄스코로나법이 있다. 전자빔법은 X-선과 같은 방사선을 막을 수 있는 설비로 인해 시설비가 증가하지만, 플라즈마법은 질산산화물이나 아황산가스를 동시에 처리할 수 있으며 2차 오염원이 발생하지 않아서 시설비가 경제적이므로, 펄스코로나 방전에 대한 여러가지 특성들이 전기적, 광학적, 화학적 제약을 통해서 현재까지 폭넓게 연구되고 있다.^[3-4]

화학적 산화반응의 촉진에 필요한 전체 에너지 소모를 결정짓는 요소로는 첫째, 코로나 방전에 의해서 유도된 화학 반응의 한용도이고, 둘째, 주 전원에서 코로나 방전 스트리머로 전달된 에너지의 전송효율이다. 그러나, 직접적인 라디칼 형성이 주는 요인 이외에도 복잡하고, 다양한 물리적, 화학적 현상이 SOx, NOx의 동시 산화에 결정적인 역할을 한다.^[6-] 특히, 최대 에너지 전송효율은 전력스위치, 전극구조, 비선형 특성을 갖는 임피던스의 정합 등에 기인한다. 본 연구에 사용된 전력스위치로는 고효율의 자기스위치 MPC(Magnetic

pulse compressor)로써 인덕터의 가포화특성을 이용하여 펄스 에너지를 압축시켰다. 최대 펄스에너지 전송효율을 위해 종래의 선 대 원통, 선 대 평판과 같은 일반적 방전극 구조에서 벗어나 전류가 3차원적으로 흐르도록 최대 전극길이 48m의 방전극인 핀(Fin) 전극 및 튜브(Tube)형태의 방전극을 배치하여, 압축된 펄스 에너지를 부하에 인가한 결과 상승시간 200ns, 에너지 지속시간이 500ns, 펄스 첨두전압 110kV이상의 압축 펄스를 얻을 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 MPC에 의해 압축된 펄스 에너지를 실제 소형 화력발전소의 축소형 반응기에 인가한 경우 증성기체분자에 최대 전리가 발생하는 시간동안의 충전전압(20~35kV) 및 전극길이(1~48m)에 따른 부하임피던스 변화, 펄스 첨두전압/전류, 펄스 에너지 전송효율 및 특성변화 등에 관한 연구결과를 서술하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험장치 구성도

2.1.1 펄스압축회로

그림 1은 32kW 펄스발생기의 펄스압축회로를 나타낸다. 직류고전압 전원은 1대의 용량이 50[kV], 8[kJ/sec]를 4대 병렬로 연결하여 사용하였다.

초기 LC공진 충전 스위치는 Deuterium 가스 충전 세라믹 싸이랏론(Model : CX1525A, Type : two-gap ceramic thyatron)을 사용하여 160[nF] C3에 충전을 시켜 MPC1에서 펄스를 압축한 후 펄스변압기(권선비=1:4)를 거쳐서 MPC2에서 최종적으로 500[ns]로 압축된 펄스를 반응기에 공급한다.

2.1.2 자기스위치(Magnetic Pulse Compressor)

자기 스위치는 코어의 포화특성을 이용한 일종의 스위치로

* 正 會 員 : 釜山大學校 電氣工學科 博士修了
** 正 會 員 : 新羅大學校 自動車工學科 助教授 · 工博
*** 正 會 員 : 釜山大學校 電氣工學科 副教授 · 工博
接受日字 : 2003年 2月 3日
最終完了 : 2003年 8月 11日

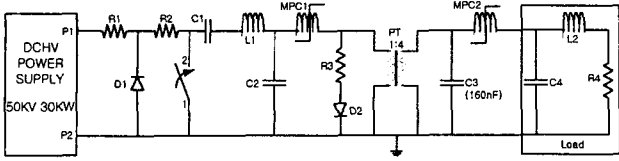
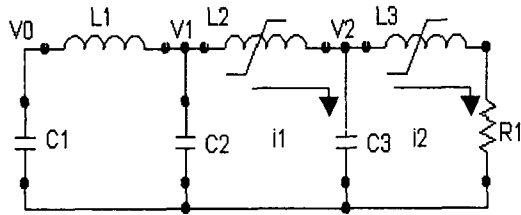
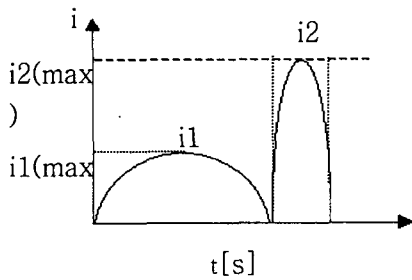


그림 1 펄스발생기의 펄스압축회로
Fig. 1 Pulse compression circuit of pulse generator

서 자기 코어의 포화가 일어나기 전에는 자성재료(Fe-base Amorphous core)의 높은 투자율로 인하여 인덕턴스가 매우 크기 때문에 개방회로처럼 동작하며 자기 코어가 포화되면서 투자율이 급격히 작아져서 마치 인덕턴스가 줄어들어 스위칭이 된 것 같이 빠르게 다음 단의 콘덴서에 공진충전이 되며 펄스폭이 압축된다. 이는 가스나 액체형 스위치에서와 같은 방전원리를 이용하지 않기 때문에 스위치의 소호를 위한 이온의 재결합 시간이 필요치 않아 대출력이면서 높은 동작 주파수모드에 적합하며 그림 2는 동작원리를 나타낸다.^[6] 그림 2(a)의 L₂ 및 L₃에 의해 압축된 펄스는 2(b)의 I₁과 I₂에 해당되며 I₂는 I₁에 비해서 펄스폭이 좁아지고 첨두치가 증가되어 펄스가 압축됨을 알 수 있다.



(a) 자기스위치 동작회로



(b) 압축된 전류펄스파형

그림 2 자기스위치 동작원리 개념도
Fig. 2 Operating diagram of MPC

코로나 발생시 펄스전압과 전류파형 측정은 각각 Haefely의 저항다이더(Model : WO550483-2, 1/10,000)와 Pearson current transformer (Model 4977, 1/100)를 이용하여 오실로스코프(Model : TDS744A)로 측정하였다. 표 1은 본 연구에 사용된 펄스발생기 및 MPC 자기스위치의 전기적 특성을 나타낸다.

표 1 펄스발생기 및 MPC스위치의 전기적 특성
Table 1 Specification of Pulse generator and MPC

Parameters	Value	Parameters	MPC1	MPC2
Average power[kW]	30	Core flux density[T]	3.4	3.4
Peak power[MW]	240	Core sectional area[cm ²]	87	29
Peak output voltage[kV]	120	Coil turns	4	12
Pulse energy[J/p]	100	Peak voltage[kV]	40	160
Rising time[ns]	200	Saturation time[μs]	3.9	1.2
Pulse width[ns]	500	Saturation inductance[μH]	2	6

2.2 반응기의 구조

반응기의 기하학적 구조와 방전극 형상은 첨두전압, 전류, 상승시간 및 펄스에너지에 큰 영향을 준다. 그림 3은 반응기의 전극배치 구조를 나타낸다. 전극형태는 핀 대 튜브 형상의 전극을 사용하였으며, 전극재질은 스테인레스강(SUS)이며, 전극간격은 80[mm]로 고정된 상태에서 정극성을 인가하여 전극길이를 충전전압을 변환시켜가며 반응기에 펄스전압을 인가하였다.

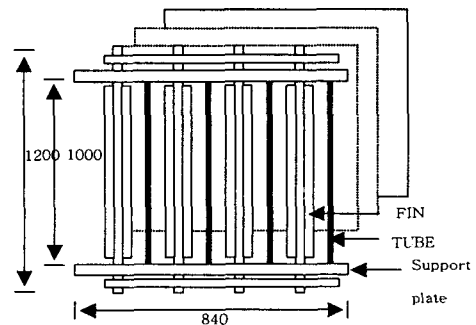


그림 3 반응기의 전극배치 구조[단위:mm]
Fig. 3 Electrode arrangement in reactor

그림 4는 전극길이가 12[m]인 반응기 내부의 핀과 튜브사이의 방전을 촬영한 그림으로 내부의 밝게 나타나는 부분이 국부적으로 절연이 파괴된 스트리머성 코로나방전을 나타낸다.

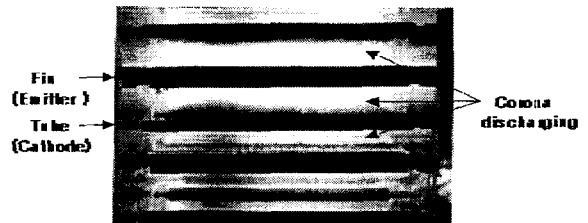
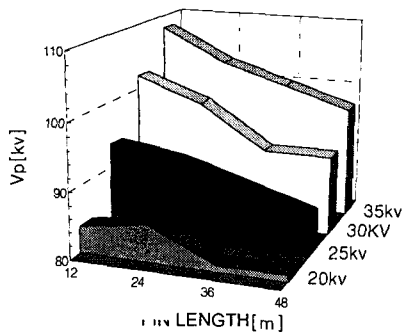


그림 4 반응기 내부의 스트리머성 코로나방전
Fig. 4 Streamer corona discharging in reactor

2.3 실험결과

2.3.1 전극길이 및 충전전압에 따른 펄스 침투전압/전류 변화 특성

실험조건은 순수 전기적 특성을 해석하기 위해 유량을 흘리지 않은 상태로 상온, 대기압에서 실험하였으며, 반복율은 10[pps]로 고정시킨 상태에서 충전전압(1차 콘덴서 충전전압 : 20~35kV ; 그 이후에서는 아크방전으로 진행)과 전류가 흐르는 전극길이를 변화시켜 반응기에 나타나는 여러가지 출력 특성을 해석한다. 그림 5는 반응기의 전극길이 및 충전전압 증가시 출력전압의 변화관계를 알 수 있는 그림으로써 전극길이 증가할수록 충전 콘덴서(1차 콘덴서)의 충전전압에 관계없이 반응기에 나타나는 펄스 침투전압은 대부분 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 전극길이를 12[m]에서 48[m]로 4배 증가시킨 경우 펄스 침투전압은 3~10[kV] 정도의 변화가 있으며, 충전전압이 커질수록 펄스 침투전압 변화의 폭도 증가한다. 이는 충전전압이 일정한 경우 전극 길이가 증가하면 부하 커패시턴스의 증가로 인하여 부하 임피던스가 감소하게 되어 결국 반응기의 전극사이에 나타나는 침투전압이 감소하게 된다. 즉, 전극사이에 형성되는 전계[kV/cm]가 전극간격의 함수뿐만 아니라 방전전극의 길이에 의존적임을 알려 주는 결과로 해석된다. 또한, 동일한 충전전압과 반복율로 실험하였음에도 불구하고 전극 길이가 긴 경우보다 짧은 경우에 아크 발생횟수가 많았으며, 충전전압이 40[kV]에서는 전극 길이가 12[m] 이하에서 아크가 발생하는 반면, 24[m]이상인 경우에 대해서는 아크가 발생하지 않았다. 이것은 상기에서 설명한 바와 같이 전극길이가 작아지면 부하임피던스가 증가하여 침투전압이 높기 때문에 아크방전이 발생하게 되는 것이다.



* Vp : 반응기의 출력단에 나타나는 침투전압[kV]
 * electrode Length : 애노드의 길이[m]

그림 5 반응기의 전극길이 및 충전전압에 따른 침투전압 변화 특성

Fig. 5 Peak voltage characteristics of various electrode lengths & charging voltage in reactor

그림 6은 그림 5와 동일조건일 경우 반응기 출력에 나타나는 침투전류를 나타내었다. 그림 6에서 전극 길이가 길어질수록 충전전압이 20[kV]에서만 침투전류가 증가하며, 충전전압이 그 이상 증가할수록 전극 길이 24[m]까지는 침투전류가 함께 증가하지만 24[m]이상에서 다시 감소를 해서 점점 포화하는 경향을 나타낸다. 이것은 전자가 흐를 수 있는 전극의 길이를 증가시킨다 해도 어느 점 이후에서는 튜브전극에서

방출되는 자유전자의 수가 포화되기 때문이다. 따라서, 전류가 흐를 수 있는 전극의 길이를 증가시킨다 해도 어느 점 이후에서는 침투전류가 포화하는 특성을 가진다.

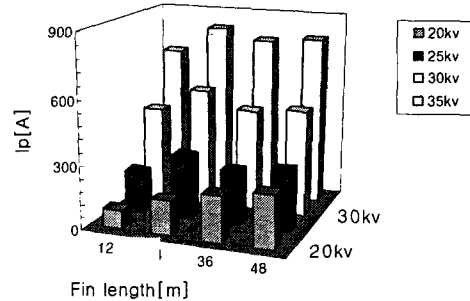


그림 6 전극길이에 따른 충전전압 및 침투전류와의 관계
 Fig. 6 Peak current characteristics of various electrode lengths & charging voltage in reactor

2.3.2 펄스에너지 전송시간 동안의 부하 임피던스 변화특성

그림 7은 시간에 따라서 반응기의 전극사이에 나타나는 펄스파형 및 임피던스 특성 변화를 나타내었다. 그림에서 침투전압이 97[kV], 침투전류 796[A]인 펄스에너지가 반응기에 인가된다. MPC에 의해 500[ns]로 압축된 부하 펄스전류는 부하 임피던스가 가장 낮은 경우에 반응기내에서 전리가 가장 활성화된다. 그림 7에서와 같이 부하 임피던스는 펄스인가 후 2~3[μs]에서 가장 낮게 나타나며, 그 때의 부하임피던스는 122[Ω]이다. 이 시간동안 전자는 최대로 가속되어 전리가 가장 활발히 발생하며 1[μs]정도 유지된다. 그 후 펄스에너지가 소모되어 전리과정이 끝나면서 임피던스 값의 급격한 증가와 더불어 펄스전류가 급감하게 된다.

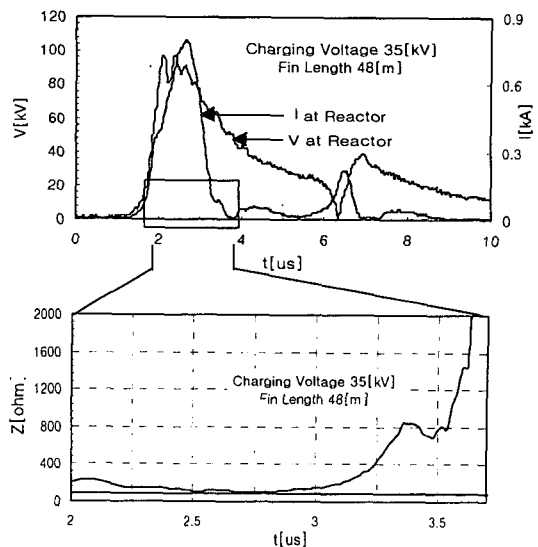


그림 7 반응기의 펄스파형 및 임피던스 특성
 Fig. 7 Impedance characteristics & pulse waveforms shown during pulse duration in reactor

그림 8은 전극 길이에 따른 임피던스 변화를 나타낸 그림이다. 충전전압 20[kV]로 동일한 경우 부하임피던스 변화를

보면 최소 300[Ω]에서 최대 1000[Ω]의 변화로 전극 길이에 따른 임피던스 변동폭이 3배이상 차이가 발생한다.

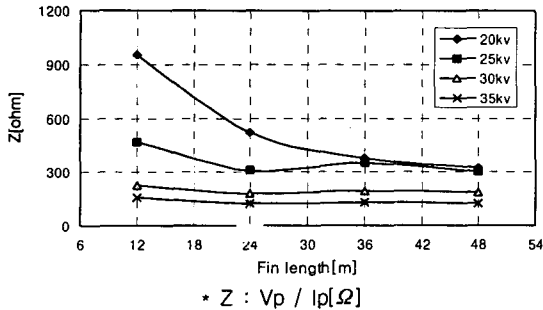


그림 8 충전전압 및 전극길이에 따른 임피던스 특성
Fig. 8 Impedance characteristics of various electrode lengths in reactor

표 2는 반응기의 전체효율을 나타낸다. 반응기의 에너지 전송효율은 펄스당 출력에너지와 커패시터에 저장된 입력에너지의 비율을 의미한다. 펄스당 에너지는 다음 식으로 구할 수 있다. 펄스에너지는 전압과 전류의 값을 시간에 대해 적분한 값으로 나타나며 식(1)과 같다.

$$E_{out} = \int_0^t V(t)I(t) \cdot dt [J/p] \quad \text{----- (1)}$$

입력에너지는 커패시터에 저장된 에너지를 말하며, 다음 식(2)와 같다.

$$E_{inp} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} [J] \quad \text{----- (2)}$$

표 2 반응기의 펄스에너지 전송효율[단위:%]
Table 2 The energy transmitting efficiency of reactor

Electrode Length[m]	Charging Voltage[kV] at Capacitor			
	20	25	30	35
12	12.9	28.8	47.9	58
24	23.2	42.8	58.3	66
36	29.4	44.6	59.7	70.3
48	38.8	50.6	65.3	73.2

전극길이 및 콘덴서의 충전전압이 증가할수록 반응기의 에너지 전달효율이 증가하여 최소 12.9[%]에서 최대 73[%]까지 증가된다. 이는 콘덴서의 충전전압과 전극길이의 증가로 인한 임피던스 감소 효과에 기인하며, 펄스발생기와 반응기의 임피던스 정합에 근접할수록 에너지 전달효율이 증가하게 된다. 각각의 충전전압에 대해서 전극 길이에 따라 효율이 증가하며, 충전전압이 증가할수록 효율도 증가하는 것을 나타낸다. 충전전압 35[kV]에서 전극길이가 2배 증가(전극 길이 24[m]와 48[m]) 시 24[m] 기준으로 펄스 발생기에서 반응기의 에너지 전달효율이 7[%]의 상승하였으며, 이는 충전전압 5[kV](권선비= 1: 4) 이상 상승시켰을 경우와 거의 동일한 효과이다. 그림 9는 전극

길이에 따른 펄스 전압의 변화 형상을 나타낸다. 전극길이가 증가하면 결과적으로 임피던스 감소와 함께 펄스폭이 증가하게 된다. 이것은 전극 길이 증가에 대한 부하의 커패시턴스가 증가하므로 결국 펄스폭이 증가하게 된다.

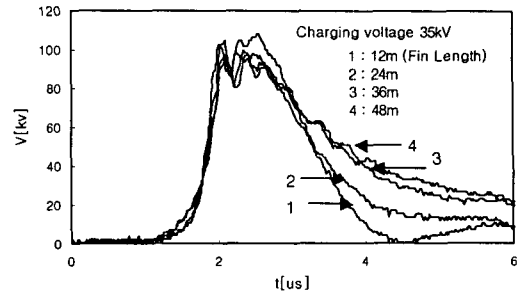


그림 9 전극길이에 따른 펄스전압 파형
Fig. 9 Pulse voltage waveforms of various electrode lengths

3. 결 론

발전소의 배가스(NOx, SOx)를 동시처리 및 처리효율을 증가하기 위해서는 펄스 발생기에서 출력된 펄스 에너지를 반응기에 충분히 전달되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 32[kW]의 펄스 발생기를 이용하여 MPC1, MPC 2에 의해 압축된 펄스를 전극길이 48[m]의 축소형 발전소 반응기를 이용하여 다음과 같은 실험결과를 얻었다.

- (1) 가포화 특성을 이용하는 MPC의 자기스위치를 사용하여 탈황/탈질에 적합한 상승시간 200[ns], 펄스폭(FWHM) 500[ns], 110[kV]이상의 매우 짧고 첨두전압이 높은 펄스를 발생시킬 수 있었으며, 전극간의 갭을 일정한 상태로 두고 전극 길이와 충전전압을 가변시킴으로서 야기되는 문제점과 그 원인을 파악하여 차후에 대처할 수 있도록 임피던스 정합에 접근하는 기술을 확립하였다.
- (2) 반응기의 전극길이 증가에 따라 첨두전압은 감소한다. 전극 길이를 12[m]에서 48[m]로 4배 증가시킨 경우 첨두전압은 3~10[kV]의 변화가 있으며, 충전전압이 커질수록 변화의 폭도 크게 나타나는 특성을 가진다.
- (3) 전극길이가 증가하면 충전전압이 20[kV]에서만 첨두전류가 증가하며, 충전전압이 그 이상 증가할수록 전극 길이 24[m]까지는 첨두전류가 함께 증가하지만 24[m]이상에서 다시 감소를 해서 점점 포화하는 특성을 가진다.
- (4) 충전전압 및 전극길이가 증가할수록 반응기로의 펄스 에너지 전달효율이 증가하였으며, 동일한 충전전압에서 전극 길이를 변화시킨 경우 최소 13[%]에서 최대 펄스 에너지 전송효율인 73[%]까지 얻을 수 있었다.
- (5) 펄스 에너지가 부하에 전송되는 동안 부하 임피던스가 일정한 것이 아니라 변동된다. 특히, 입력에너지가 일정함에도 불구하고 펄스 에너지가 인가되는 1[us] 시간 동안 최소 300[Ω]에서 최대 1000[Ω]의 변화하여 임피던스 변동폭이 3배이상의 차이가 발생하였다.

참 고 문 헌

- [1] Bernie M. Penetrante, Shirley E. Schultheis, Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Springer-Verlag, 1992.
- [2] J. H. Joung, "A Study on the Pulse Voltage and Cascading Ratio of Compact Pulse Generator using Cascading Method", presented at the KIEE, vol. 50C, pp. 329-333, 2001.
- [3] E. M. van Veldhuizen, Y. L. M. Creyghton, and W. F. Rutgers, "High resolution schlieren study of pulsed corona", presented at the 4th Int. Conf. On ESP, Beijing, China, 1990.
- [4] Y. L. M. Creyghton, E. M. Veldhuizen, and W. R. Rutgers, "Streamer characteristics of positive pulsed corona", presented at the 10th Int. Symp. on Plasma Chemistry, Aug. 1991.
- [5] Stanley Humphries, Principles of Charged Acceleration, John Wiley & Sons, New York, pp. 236 ~267, 1986.
- [6] S. Jordan, "Process in the electron beam treatment of stack gases", Radiat. Phys. Chem., vol. 31, pp. 21-28, 1988.
- [7] 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.



정 현 주 (鄭賢珠)

1975년 12월 5일생, 1998년 울산대학교 전기공학과 졸업, 2000년 부산대학교 석사 졸업, 現 국방과학연구소 연구원, 부산대학교 박사과정.
Tel : (051) 510-2770, Fax : (051) 513-0212
E-mail : hyunju30@hanmail.net



김 문 환 (金文煥)

일본 케이오대학 이공학연구과 수료(공학석사,공학박사). 일본 요코가와전기연구개발 근무, 한국전기연구소 책임연구원, 위덕대학교 전기공학과 전임강사, 現 신라대학교 자동차공학과 조교수
Tel : (051) 309-5701, Fax : (051) 309-5652
E-mail : mhkim@silla.ac.kr



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 큐슈 대학원 연구생 및 박사과정. 1990년 동 대학원 에너지변환공학 전공 졸업(공학박사). 1990년~1995년 한국전기연구소 선임연구원. 1995년~현재 부산대 전기공학과 부교수.
Tel : 051-510-2364, Fax : 051-513-0212
E-mail : heeje@pusan.ac.kr

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



정 종 한 (丁鍾漢)

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