

강유전체층을 갖는 선대선 방전 플라즈마장치의 코로나 방전 및 오존발생 특성

論 文

53C-7-6

Corona Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Wire-to-Wire Plasma Reactor with a Ferroelectric Pellet Layer

文 在 德* · 申 正 民** · 韓 相 玉***

(Jae-Duk Moon · Jung-Min Shin · Sang-Ok Han)

Abstract - A discharge plasma reactor using a ferroelectric pellet packed bed is now used as a removal means of pollutant gases, such as NO_x, SO_x and VOCs. When an ac voltage is applied to this plasma reactor, then the pellets are polarized, and great electric fields are formed at each top and bottom contact points of the ferroelectric pellets. Thus the points of each pellet become covered with intense corona discharges, where an electrophysicochemical reaction is taking place strongly. However these strong discharges also elevate the temperature of the pellets greatly and concurrently decrease the output ozone generation, as a result, the overall removal efficiency of gas becomes decreased greatly.

A new configuration of discharge plasma reactor using a ferroelectric pellet layer and a wire-to-wire electrode has been proposed and investigated experimentally. It is found that an intensive microdischarge is taking place on the surface of ac corona-charged ferroelectric pellet layer of the proposed reactor, which concurrently enhances the efficiency of plasma generation greatly. And, this type of configuration of plasma reactor utilizing a wire-to-wire electrode and a ferroelectric pellet layer could be used as one of effective plasma reactors to remove pollutant gas.

Key Words : Nonthermal Plasma Reactor, Corona Discharge, Wire-to-wire Electrode, Ferroelectric Pellet Barrier, Ozone

1. 서 론

대기환경공해의 주된 원인인 질소산화물(NO_x)과 유황산화물(SO_x) 등은 산성비의 주 원인중의 하나이며, 휘발성 유기물질(VOCs) 등은 인체의 호흡기관과 신경계에 큰 장애를 주는 유독가스로 알려져 있다[1-3]. 이들 유해가스의 유효한 제거수단의 하나로 비열 방전 플라즈마(non-thermal discharge plasma)의 전기물리화학적 작용(electrophysicochemical reaction)을 이용할 수 있음이 밝혀져 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.[4-6]

현재 유용되고 있는 방전 플라즈마장치는 선대원통형(wire-to-cylinder type)[7,8], 유전체장벽형(dielectric barrier type)[9-12], 강유전체충진형(ferroelectric pellet packed bed type)[12-16]으로 크게 나뉘어 연구되어 왔다. 그러나 이상의 어느 것도 산업적인 적용에는 그 성능이 부족하며, 방전의 증척[6], 복합처리방법[7,10] 등이 제안되어 있으나, 실 적용에는 아직도 미진한 것으로 평가되고 있다.[8]

강유전체충진형 방전 플라즈마장치는 오존발생 및 유해가

스 제거 등에 유용될 수 있는 특성을 가지고 있으나, 강유전체 방전기구적 그리고 구조적으로 유해가스 처리영역이 고밀도 방전전력으로 가열 고온화되어 유해가스 처리효율을 저감시키는 문제점이 될 수 있다.[17] 따라서, 효과적인 가스 처리를 위해서는 강유전체 코로나방전의 발생기구, 전극의 구조가 가스처리성능에 미치는 영향 등에 대한 구체적이고 기본적인 연구가 필요한 실정이다[13,14].

본 논문에서는, 강유전체충진층 방전과 코로나 선방전을 중복 이용할 수 있는 새로운 형태의 비열방전 플라즈마장치를 제안하고, 강유전체충상의 코로나 방전과, 강유전체구층을 갖는 선대선형 비열 방전플라즈마장치가 효과적인 중복방전을 생성 가능성을 실험적으로 조사하였으며, 제안한 플라즈마장치의 강유전체구층을 설치 유무에 따른 코로나방전의 특성과 오존발생특성을 실험적으로 연구 검토한 결과이다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 강유전체구층을 게재한 선대선 비열 방전 플라즈마장치의 방전 및 오존발생 특성을 조사하기 위한 실험장치 개요도를 나타낸 것이다. 실험장치는 교류 고전압 전원부와, 비열 방전 플라즈마장치부와, 고전압과 방전전류를 측정하기 위한 측정부와, 그리고, 플라즈마장치에의 공기인입부 및 출력공기중의 오존측정부로 구성되어 있다.

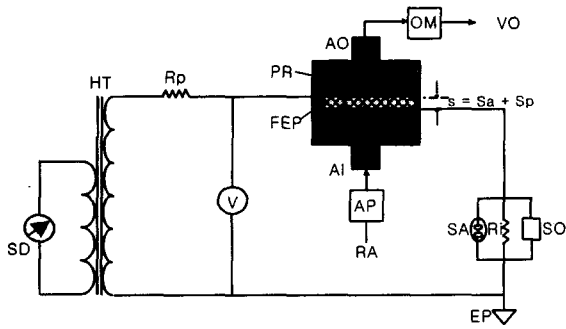
* 正 會 員 : 慶 北 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

** 學 生 會 員 : 慶 北 大 工 大 電 氣 工 學 科 碩 士

*** 正 會 員 : 忠 南 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2004 年 3 月 2 日

最 終 完 了 : 2004 年 3 月 30 日

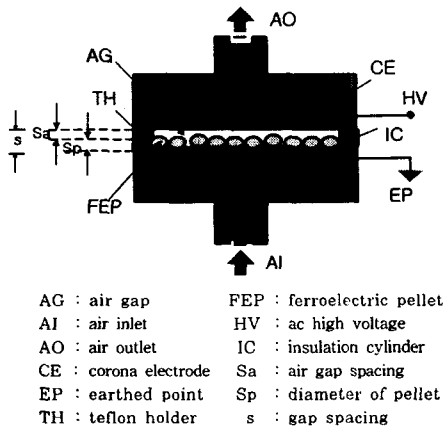


- | | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| AP : air pump | Rp : protection resistor |
| AI : air inlet | s : corona gap spacing |
| AO : air outlet | SA : surge arrester |
| EP : earthed point | SD : ac slidacs |
| HT : high volt transformer | SO : storage oscilloscope |
| FEP : ferroelectric pellet | PR : plasma reactor |
| OM : ozone monitor | V : ac voltage meter |
| RA : room air | VO : air vent out |
| Ri : current measuring shunt resistor | |

그림 1 실험장치 개요도

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

그림 2는 본 실험에서 제안한 강유전체구층을 제재한 방전 플라즈마소자를 나타낸 것이다. 절연체로 만들어진 원통 내에 적절한 방전공격(discharge spacing, $s=4\text{mm}$)이 설정된 선대선형 코로나전극을 설치하고, 하부 코로나 선전극상에 적정형상의 절연판(teflon plate, 1mm thick)을 상설하고, 이 절연판의 중심에 강유전체구층(ferroelectric pellet layer, FEP, TiO_2 , $\epsilon_r=150$, $sp=diam=1.5\text{mm}$)을 단층(monolayer)으로 설치하였다. 이 때 강유전체구층의 상부와 상부 선전극 간에는 기중방전이 일어날 수 있는 일정공간(s_a)을 설정하였다.

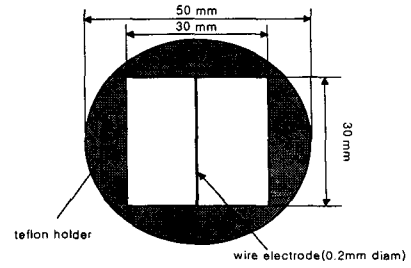


- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| AG : air gap | FEP : ferroelectric pellet |
| AI : air inlet | HV : ac high voltage |
| AO : air outlet | IC : insulation cylinder |
| CE : corona electrode | Sa : air gap spacing |
| EP : earthed point | Sp : diameter of pellet |
| TH : teflon holder | s : gap spacing |

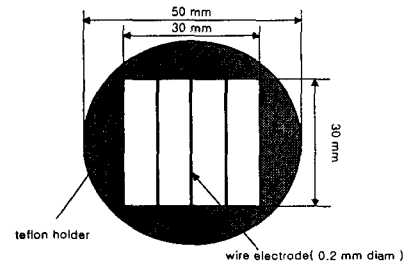
그림 2 제안한 방전 플라즈마 소자의 개략도

Fig. 2. Schematic of proposed plasma reactor with a ferroelectric pellet layer.

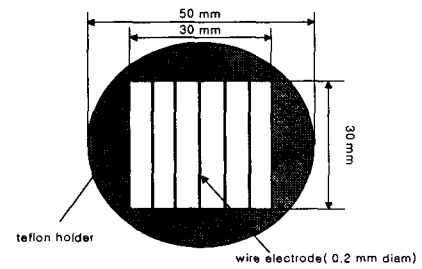
그림 3은 본 실험에 사용된 선대선형 코로나 선전극의 개략도로서, 절연판(teflon holder, 1mm thick)의 중심에 정사각형($30\times 30\text{mm}^2$)의 공간을 만들고, 이 공간에 가는 선전극(stainless wire, 0.2mm diameter)를 그림 3과 같이 3종류(1, 3, 5 line)로 제작한 코로나방전 전극으로 사용하였다.



(a) 1 line electrode



(b) 3 line electrode



(c) 5 line electrode

그림 3 실험에 사용된 코로나 전극의 개략도

Fig. 3. Schematic diagram of corona electrode used.

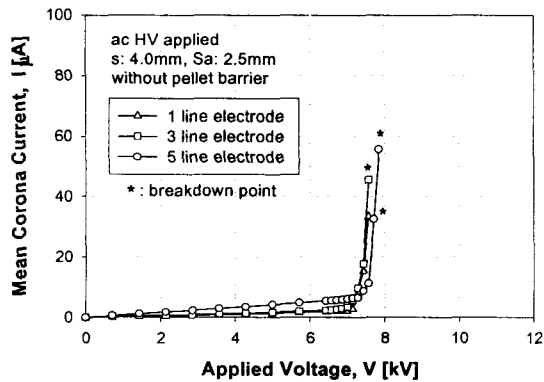
인가전원으로는 교류 고전압(ac power, 60Hz, 20kV, 0.3 A)을 사용하였고, 인가전압과 방전전류는 각각 고전압프로브(1,000:1, Tektronix P6015A)와 서지흡수소자(surge arrester, $V_z=250\text{V}$)가 병설된 평균 전류측정용 저항(shunt resistor, R_i , 10.00 k Ω)과 전압계(digital voltmeter, Fluke 75)와 축적형 오실로스코프(storage oscilloscope, Tektronix TDS 340 A)를 사용하여 측정하였다. 이 때의 코로나 전류는 전압계에 나타나는 평균전류(mean current)로 나타내었다.

인입 가스로는 실내공기(21 $^{\circ}\text{C}$, 25%RH)를 1 ℓ /min의 유속으로 고정하여 주입하여 실험하였으며, 출력오존농도는 오존모니터(Dasibi Ozone Monitor DY-1500)로 측정하였다.

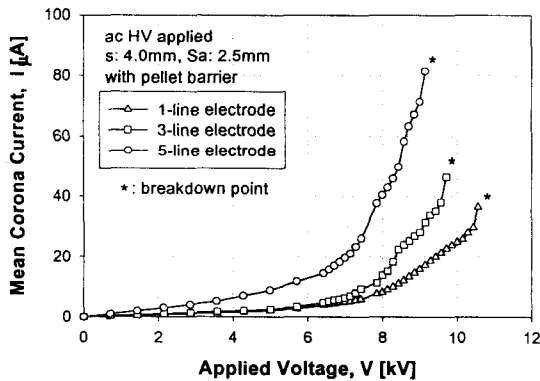
3. 실험결과 및 고찰

그림 4(a)는 강유전체구층의 유무가 코로나방전에 미치는 영향을 검토하기 위하여 제안한 플라즈마 소자의 코로나 I-V특성을 나타낸 것이다. 그림 4(a)와 같이 평균 코로나전류는 강유전체구 단층이 없는 경우, 인가전압의 증가에 따라 서서히 증가하는 전형적인 I-V특성을 보여준다. 코로나 선

전극 수가 5개로 증가하고 인가전압이 코로나 개시전압인 10kV를 지나면 코로나전류가 급격하게 증가하여 13.0kV에서 59 μ A의 값을 가진다. 그러나 강유전체구 단층을 갖는 경우, 방전 개시전압은 증가하고, 코로나 방전 전류는 매우 서서히 증가하나 5선 전극일 때 13.0kV에서 80 μ A로 1.4배의 더 큰 전류값을 가짐을 보여준다. 이는 선전극의 방전에 의한 이온들이 강유전체구 층상에 축적되고, 이 축적된 전하들에 의해 형성된 전압이 연면방전 전압을 초과하여 강유전체구 층상에서 마이크로방전을 발생시킴을 보여준다.



(a) without pellet layer



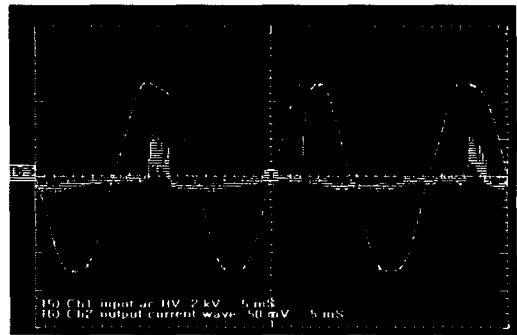
(b) with pellet layer

그림 4 강유전체구 단층의 유무에 따른 코로나 전류-전압 특성

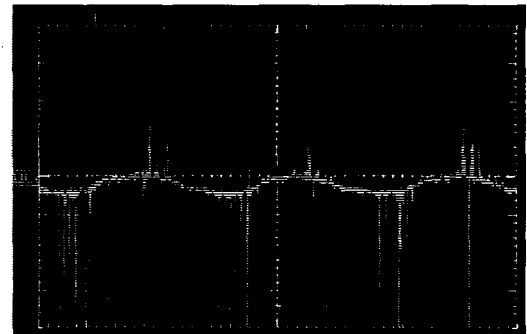
Fig. 4. I-V characteristics of proposed plasma reactor with and without pellet layer.

그림 5는 3선형 선전극간에 강유전체구 단층의 유무에 따른 코로나 전류 파형을 나타낸 것이다. 강유전체구 단층이 없는 경우, 코로나 전류 파형이 정(+)극성 방향에서만 나타나서 충분한 방전전력을 얻을 수 없음을 보여준다. 그러나 강유전체구 단층을 갖는 경우, 코로나 전류 파형은 정(+)극성 방향뿐만 아니라 부(-)극성 방향으로도 매우 크고 많은 회수의 부분방전(microdischarges)이 일어남을 보여준다. 이는 강유전체구 단층이 없을 경우에는 방전선상의 코로나방전만이 존재하지만, 강유전체구 단층이 있을 경우에는 방전선상의 코로나방전과 강유전체구상에 하전 축적된 전하에 의해 강유전체구의 표면에서 발생하는 마이크로방전이 중복

되어서 위와 같은 강력한 코로나 전류파형이 나타나게 된다. 이 때 방전선 표면에서 코로나 방전에 의해 생성 전하(Q)가 강유전체 표면과 하부 전극간(C)에 축적되게 된다. 이 지속적 전하의 축적은 유도전압($V=Q/C$)을 증가하게 하여 유전체 표면의 공기중 절연과파 전계(Ebd) 이상의 큰 전계($E \geq Ebd$)를 형성시키게 되고, 따라서 유전체 표면에서 2차로 마이크로방전이 유발되어 방전침으로부터의 1차 방전된 동일 전하가 다시 유전체 표면방전의 2차로 중복방전을 생성시키게 됨을 보여준다.



(a) without pellet layer

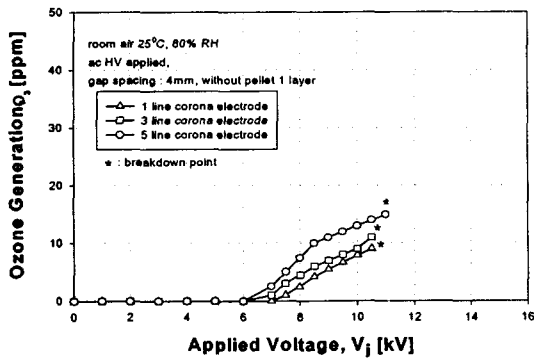


(b) with pellet layer

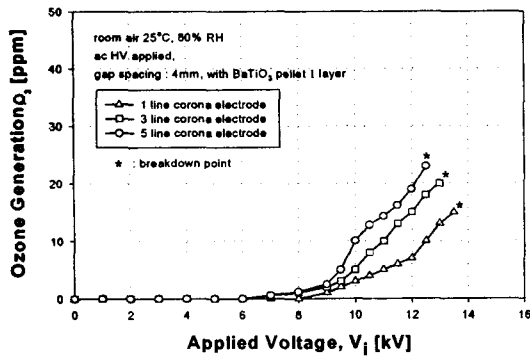
그림 5 강유전체구 유무에 따른 비열 플라즈마발생장치의 전압·전류 파형

Fig. 5. Current oscillogrammes of plasma reactor with and without pellet layer.

그림 6는 강유전체구 단층의 유무와 코로나 전극의 형태에 따른 오존발생량을 인가전압을 변수로 하여 나타낸 것이다. 강유전체구 단층이 없는 경우, 인가전압과 코로나 방전선의 증가에 따라 출력 오존량도 증가하는 것을 보여준다. 반면, 강유전체구 단층을 갖는 경우가 선전극만일 경우에 비해 오존 발생량의 증가가 크다는 것을 보여준다. 이는 선전극의 방전에 의해 생성된 오존뿐만(최대 약 15ppm) 아니라 강유전체구 층상에 하전 축적된 전하들에 의해 발생된 마이크로방전에 의해 발생된 오존이 중복되어 출력 오존량이 크게 증가(최대 27ppm, 약 1.8배)됨을 보여준다. 이상의 결과는 제안된 장치가 선대선형 플라즈마발생장치보다 더욱 유효하게 적용될 수 있을 가능성을 보여준다.



(a) without pellet layer



(b) with pellet layer

그림 6 강유전체구 유무에 따른 플라즈마장치의 오존발생특성
Fig. 6. Ozone generation characteristics of plasma reactor with and without pellet layer.

4 결 론

본 연구에서는 새로운 강유전체구층을 갖는 선대선형 비열 방전 플라즈마장치를 제안하고, 선형 전극의 구조와 강유전체구층의 유무에 따른 코로나 방전과 오존발생에 미치는 영향을 실험적으로 연구 검토하였다. 교류 고전압을 인가한 실험 결과, 선대선형 방전 플라즈마 장치에 강유전체구를 설치한 경우가 설치하지 않은 경우에 비해 약 1.4배의 큰 코로나 전류와 약 1.8배의 많은 오존이 발생하는 것이 확인되었다. 이와 같이 큰 코로나 전류와 많은 오존이 발생하는 이유는, 강유전체구층을 갖는 선대선형 비열 방전 플라즈마장치의 경우, 선전극상의 코로나전류가 선전극상의 코로나 방전과 강유전체구층 표면의 마이크로방전을 중복발생시키기 때문에 일어나는 결과라고 생각된다.

따라서 이와 같은 강유전체구층을 갖는 선대선형 방전 플라즈마장치는 유해가스 제거를 위한 새로운 하나의 수단으로 적용될 수 있는 가능성을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] EPA, "Supplement F to Compilation of Air Pollutant Emission Factor", Vol. 1, US EPA Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park N.C. (1993)
- [2] Akimoto, H. and N. Narita, "Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emission from fuel consumption and industrial activities in Asia with 1×1 resolution", Atmos. Environ., 28 (1994) 213-225
- [3] 박순용, 김철희, "남한지역에서의 연료 사용량으로 추정 한 SO₂와 NO_x 배출량의 연별 변화 경향", 한국기상학회지, 31, 1 (1995) 65-78
- [4] 新版靜電氣ハンドブック, 日本靜電氣學會, 27-38 (1998)
- [5] J. S. Chang, A. J. Kelly, J. M. Crowley, Handbook of Electrostatic Processes, Marcell Dekker, Inc., (1995)
- [6] NATO Advanced Research Workshop on Non-thermal Plasma Techniques for Pollution Control, Cambridge Univ, England U.K., 1-8 (1992) 21-25
- [7] Jae-Duk Moon, Geun-Taek Lee, Suk-Hwan Chung, "Discharge and SO₂ and CO Gas Removal Characteristics of a Nonthermal Plasma Reactor in a Crossed DC Magnetic Field," Records of IEEE-IAS Annual Meeting (1997) 2045-2051
- [8] G. Dinelli, L. Civitano and M. Rea, "Industrial Experiments on Pulse Corona Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ from Flue Gas", IEEE Trans. on IA, 26,3 (1990) 535-541
- [9] S. K. Dhali and I. Sardja, "Dielectric-Barrier Discharge from Processing of NO_x/SO_x", J. Appl. Phys., 69 (1991) 6319-6324
- [10] M. B. Chang, M. J. Rood and M. J. Kushner, "Removal of SO₂ from Gas Streams Using a Dielectric-Barrier Discharge and Combined Plasma Photolysis", J. Appl. Phys. 69 (1991) 4409-4417
- [11] K. Urashima, J. S. Chang and T. Ito, "The Effect of AC Applied Voltage Phase Differences on the NO_x Reduction from the Combustion Flue Gases by Superimposed Surface and Silent Discharge Plasma Reactors" IEEE Trans. on IA, 31, 6 (1995) 1425-1431
- [12] T. Oda, R. Yamashita, I. Haga, T. Takahashi and S. Masuda, "Decomposition of Gaseous Organic Contaminants by Surface Discharge Induced Plasma Chemical Processing-SPCP", IEEE Trans. on IA, 32, 1 (1996) 118-123
- [13] K. Jogan, A. Mizuno, T. Yamamoto, and J. S. Chang, "The Effect of Residence Time on the CO₂ Reduction from Combustion Flue Gasses by an AC

Ferroelectric Packed Bed Reactor”, IEEE Trans. on IA, 29, 5 (1993) 876-881

[14] A. Mizuno, Y. Yamazaki, S. Obama, E. Suzuki and K. Okazaki, “Effect of Voltage Waveform on Partial Discharge in Ferroelectric Pellet Layer for Gas Cleaning” IEEE Trans. on IA, 29, 2 (1993) 262-267

[15] T. Yamamoto and B. L. Jang, “Aerosol Generation and Decomposition of CFC-113 by the Ferroelectric Packed-Bed Plasma Reactor,” Records of IEEE-IAS Annual Meeting (1996) 1830-1836

[16] A. Ogata, N. Shintani, K. Mizuno, S. Kushiyama and T. Yamamoto, “Decomposition of Benzene Using Non-Thermal Plasma Reactor Packed with Ferroelectric Pellet”, Records of IEEE-IAS Annual Meeting (1997) 1975-1982

[17] Jae-Duk Moon, Geun-Taek Lee, Sang-Taek Geum, Discharge and NOx removal characteristics of nonthermal plasma reactor with a heated corona wire, J of Electrostatics, 50 (2000) 1-15

저 자 소 개



문재덕 (文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 사대 과
 학교육과(물리전공) 졸업. 1975년 동 대학
 원 전자공학과 졸업(공석). 1982년 일본 동
 경대학 대학원 전기공학과(공박).
 1986~87 Canada, UWO, Dept of EE &
 Applied ES Lab, Visiting Assistant
 Professor, 1993 日本豊橋技術科學大學 방
 문교수, J of Electrostatics Editorial Board,
 IEEE IAS Senior Member, 현재 경북대학
 교 전자전기컴퓨터학부 교수
 Tel : 053-950-5601
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : jdmoon@knu.ac.kr



한상옥 (韓相玉)

1946년 5월 12일생. 1974년 충남대 전기공
 학과 졸업. 1978년 단국대학교 대학원 전기
 공학과 졸업(공석). 1986년 인하대학교 대학
 원 전기공학과(공박). 1985년 독일 하버노대
 객원교수, 1989년 일본 나고야대 객원교수,
 현 충남대학교 전기공학과 교수
 Tel : 042-821-5655
 Fax : 042-823-7970
 E-mail : sohan@cnu.ac.kr



신정민 (申正民)

1978년 8월 1일생. 2002년 경북대 전기전자
 공학부 졸업(학사). 2004년 동 대학원 전기
 공학과 졸업(석사)
 Tel : 053-940-8601
 Fax : 053-950-5508
 E-mail : bluestar7923@hotmail.com