

---

# 적층형 압전변압기를 이용한 AC-DC 컨버터 특성

신현용\*

Characteristics of AC-DC Converter using Multilayer Piezoelectric Transformer

Hyun-Yong Shin\*

요 약

본 연구에서는 분극의 이방성이 없는 ring-dot형 적층형 압전 변압기를 이용한 압전 AC-DC 컨버터를 개발하였다. 동작주파수 범위가 매우 좁은 압전 변압기의 특성을 고려하여 압전 컨버터는 발진주파수의 피드백 제어를 위한 PFM 구동방식과 출력제어를 위한 PWM 구동방식을 이용한 혼합형 구조로 설계되었다. 개발된 압전 컨버터의 최소 발열을 동반하는 안정적 구동을 보이는 최대전력 값은 25W였으며 허용전류 값은 약 900mA이었다. 압전 컨버터의 출력전압의 크기는 구동 발진주파수의 크기에 따라 제어가 가능하였으며, 최대 전력에서 효율적이고 안정적인 동작특성을 나타내었다.

ABSTRACT

In this study, piezoelectric AC-DC converter using ring-dot type multilayer piezoelectric transformer with no anisotropic of polarization was developed. Considering the characteristics of piezoelectric transformer which is very narrow operating frequency range, piezoelectric converter was designed with mixed structure of PFM driving method for feedback control of oscillation frequency and PWM driving method for output control. Maximum power and allowed current of the developed piezoelectric converter showing stable driving with minimum heat was 25W and 900mA, respectively. The output voltage of the piezoelectric converter was controlled by the driving oscillation frequency and showed stable and efficient operating characteristics at the maximum power.

키워드

Multilayer ceramics, Piezoelectric transformer, AC-DC converter, Piezoelectric property, Resonance frequency  
다층 세라믹, 압전 변압기, AC-DC 변환기, 압전 특성, 공진 주파수

## 1. 서 론

전기-기계에너지의 가역적 변환 특성을 갖는 압전 세라믹스는 1970년대 이래로 레조네이터, 액츄에이터 및 초음파진동자와 같은 소자로 널리 응용되어왔으며, 최근에는 전자제품의 소형화 및 경량화의 추세에 따

라 의료기기, 모바일기기 및 에너지 하베스팅 분야로 그 응용범위가 넓게 확장되고 있다[1, 2]. 압전변압기는 LCD 백라이트용 CCFL의 구동을 위한 인버터에 널리 사용되어 왔으나 최근에는 LED로 조명원이 변화되어 감에 따라 그 응용 분야가 저전압, 대전류를 요구하는 AC-DC 혹은 DC-DC 컨버터용 소자로 변

---

\* 남서울대학교 전자공학과(eeshin@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2012. 07. 26

심사(수정)일자 : 2012. 11. 23

게재확정일자 : 2012. 12. 10

화되고 있다. 그간 상용화되어 있는 일반적인 압전 변압기는 1, 2차 축의 분극방향이 상호 수직이어서 대전류를 얻기 어려운 단점을 가지고 있다[3]. 이를 극복하기 위해 압전소재 자체의 특성향상을 위해 전기기계결합계수 및 압전특성의 향상을 위한 연구가 널리 수행되어 우수한 특성의 압전소재에 관한 연구결과가 다수 보고된 바 있다[4,5]. 한편으로는 분극방향이 이방성을 없애고 임피던스의 감소를 통해 대전류를 얻기 위해 적층형 압전 변압기에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다. Ring-Dot형 압전 변압기는 기존의 압전 변압기의 극히 낮은 전류수준을 큰 폭으로 향상시킬 수 있는 압전 변압기 구조로 응용분야를 컨버터 및 에너지 하베스팅 분야로 확대 적용할 수 있는 연구가 보고되고 있다[6,7]. 압전 변압기의 강압특성[8]을 이용해야 하는 AC-DC 컨버터로의 활용을 위해서는 압전 변압기의 출력 정전용량이 입력에 비해 클수록 큰 전류를 유도할 수 있기 때문에 변압기의 1, 2차 축 구조의 변화 뿐 만아니라 적층형 구조로 제조함으로써 원하는 고출력 소자로 개발이 가능하다.

본 연구에서는 이미 개발되어 우수한 특성을 나타낸 적층형 압전 변압기를 이용하여 압전 변압기의 특성을 분석한 후, 최적의 임피던스 매칭조건의 확립을 통해 컨버터의 출력을 최대로 유도하고자 하였다. 이를 기반으로 AC-DC 컨버터를 설계하였으며, 압전 변압기와 컨버터의 전기적 특성변화를 분석하였다.

## II. AC-DC 컨버터 설계

본 연구에서 사용된 압전 변압기의 소재는 PMN-PZN-PZT계이며 구조 및 압전 변압기의 승압 특성, 효율, 입력전력변화와 동작 시 발열 특성은 J. Yoo 등이 발표한 논문에서 나타나 있다[9].

압전 AC-DC 컨버터의 핵심은 발진, 압전 변압기, 그리고 피드백 제어를 통한 입출력간 상호제어 기술에 있다. 압전 변압기는 권선형 변압기와는 달리 임피던스가 크고 정전용량이 커서 회로의 타 회로부와 매칭성에 따라 그 동작 특성이 크게 변하게 된다. 특히, 부하부와의 양립성 정도에 따라 효율 및 주파수 변동, 그리고 출력특성이 변하게 되고 이에 따라 압전 세라믹스에 발열이 생기게 되면 정상적인 변압기의

구동이 불가능해 진다.

일반적으로 AC-DC 컨버터가 적용되는 전기기기는 대부분이 작은 내부 임피던스를 가지고 있어 임피던스가 큰 압전 변압기와 적절한 매칭을 이루기가 어렵다[10]. 따라서 이러한 매칭성의 폭을 넓히기 위해서는 압전 변압기를 적층구조로 제작함으로써 상당히 응용범위를 넓힐 수 있을 뿐만 아니라 대전류로 구동시킬 수 있는 이점을 얻을 수 있다.

설계과정에서 첫째로 DC 전원공급기를 이용하여 부하의 변동에 따른 압전 변압기의 거동을 분석할 수 있도록 구성하여 수 십 V 미만의 소신호에서 압전 변압기의 부하 변동에 따른 출력의 변화를 관찰할 수 있는데 초점을 맞추었다. 다음 단계에서는 같은 소신호에서 부하의 변동에 따라 변동되는 구동주파수의 변화를 피드백 제어 할 수 있는 회로의 구성을 검토하기 위하여 VCO와 부하단 사이에 비교기를 설치하여 주파수 제어를 할 수 있도록 하였다. 부하와의 매칭정도에 따라 압전 변압기의 구동주파수, 효율 등 전기적 특성변화가 크게 나타나기 때문에 최적의 구동점을 추적하여 제어할 수 있는 회로의 구성은 필수적이다[11]. 또한, PFM(pulse frequency modulation) 방식을 적용하여 부하 의존성이 큰 압전 변압기의 주파수 제어를 원활히 하고자 하였다. 압전 변압기는 재료의 공진주파수 대역에서 동작하기 때문에 주파수에 대한 선택도에 민감하고, 그의 제어가 필수적인 단점이 있는 반면, 왜형이 극히 적은 깨끗한 출력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 세라믹 소자여서 누설자속의 발생이 없다는 장점을 가지고 있다. 이상의 설계과정을 통해 설계된 회로를 이용하여 초기단계에서의 소신호 대신에 AC 상용전원을 입력신호로 하여 구동시켰다. 압전 변압기를 이용한 인버터의 경우에는 고정 발진 주파수에 PWM(pulse width modulation) 방식을 채택하는 경향이 있는데, 이는 펄스폭에 의해 출력의 크기를 제어하기 용이하기 때문이다. 그러나 컨버터를 구성하기 위해서는 부하의 다양성을 확보해야하고, 이러한 부하의 변동성과 압전 변압기와의 매칭문제 때문에 주파수를 피드백 제어하기 쉬운 PFM 회로도 추가적으로 구성되어야 한다. 다음 단계에서는 정해진 주파수와 부하를 이용하여 최종 출력특성 변화를 제어할 수 있는 회로부를 추가하였다. 그림 1은 설계 전 과정을 나타낸 것으로 주파수 제어부를 제거한 상태

에서 출력을 제어하기 위한 회로구성요소를 나타낸 것이다. High-side driver 단에 공급되는 신호의 펄스 폭을 조정함으로써 최종적으로 출력되는 DC 신호의 변화를 관찰할 수 있도록 dead time 제어부를 설치하였다. 구성된 회로를 이용하여 제어 가능한 범위에서 출력 전압 및 전류의 크기를 변화시킬 수 있도록 하였다. 따라서 압전형 AC-DC 컨버터의 구동방식은 크게 PFM과 PWM 방식을 복합 적용한 형태로 구성되었다[12].

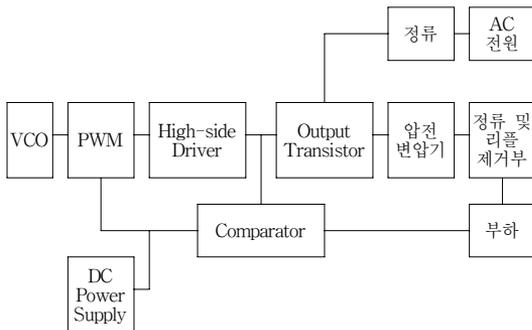


그림 1. 압전 AC-DC 컨버터 회로구성도  
Fig. 1 Block diagram for the piezoelectric AC-DC converter design.

PFM은 주파수의 변화로 전력을 제어하는 방식으로 다양한 분야에서 유용하게 사용되고 있으나 압전 변압기를 적용한 경우 공진 주파수 이외의 주파수에서는 효율이 급격히 떨어지는 현상이 존재 하였다. 이는 압전변압기의 공진주파수를 많이 벗어난 입력에서는 압전변압기의 입력이 저항부하로서 동작 하지 못하며 용량성 부하처럼 동작하는 현상이 일어난다. 따라서 Half Bridge 단에서 변압기쪽으로 전력을 전부 전송하지 못하고 허상 전류가 흘러 반송되는 전력이 존재하여 변압기 및 트랜지스터에 출력되지 않는 전력이 남아 발열을 일으키게 된다. 또한 제어되는 대역 폭이 좁아 비교적 정상적으로 제어가 되는 범위안에서의 최대 전력 출력은 비교적 쉽게 제어가 되는 반면 최소전력의 제어가 매우 어려운데 그 이유는 첫째 이유와 같이 전력 전송이 정확히 일어나지 못한 것과 같은 결과로 생각된다. 이와 같이 전력을 낮추기 위해 공진 주파수에서 벗어나다 보면 효율이 낮아지는 현상이 발생하게 되어 회로를 안정시키기가 매우 어렵게 된다. 이로 인해 PWM 방식을 적용하게 되었고

최종적으로 주파수와 펄스폭을 동시에 제어하는 방식으로 그림 2와 같은 입력단 회로가 구성되었다. 이와 같은 구성은 제어할 수 있는 대역폭이 넓어지는 효과가 있으며 발진되는 주파수는 전력을 제어하는 목적만이 아닌 압전변압기의 매칭점인 공진주파수 조정을 위해 사용되었다. 그림 2의 PWM 출력 및 half bridge 출력이 압전변압기를 거쳐 최종 부하로 연결되어 AC-DC 컨버터로 사용할 수 있게 된다. 압전컨버터의 출력특성을 측정하기 위하여 부하로는 개조한 형광등용 안정기를 이용하여 40W 이상의 입력신호가 가능하도록 설계변경하여 사용하였다.

이상의 설계과정을 거친 AC-DC 컨버터를 이용한 입력 전기신호에 따른 압전변압기 및 AC-DC 컨버터의 출력파형변화는 오실로스코프, 함수발생기(HP33120), 전력증폭기(Trek 50/750)에 의해 측정되었으며, 컨버터의 전기적 특성은 전력분석기(Voltec PM3300)을 이용하여 측정하였다.

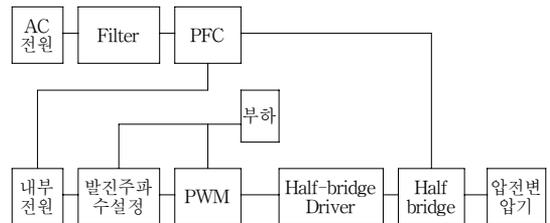


그림 2. 압전 AC-DC 컨버터 입력단 회로구성도  
Fig. 2 Block diagram of input terminal for the piezoelectric AC-DC converter

### III. 결과 및 고찰

적층형 압전변압기를 적용하여 제작된 AC-DC 컨버터를 이용하여 부하변동에 따른 입출력 특성변화에 대하여 고찰하였다. 그림 3은 압전변압기에 가해진 발진주파수 변화에 따른 출력전압의 변화를 나타낸 것이다. 동작주파수는 약 68kHz였으며, 사용된 부하 저항을 130Ω으로 하였을 때 부하에 30VDC가 출력되고 있음을 나타낸 것이다. 그림 4는 압전변압기에 가해지는 신호의 발진주파수 변화에 따른 입력전력을 나타낸 것이다. 발진주파수 68kHz, 출력전압 30VDC에서 최대 27W의 전력을 나타내고 있다.

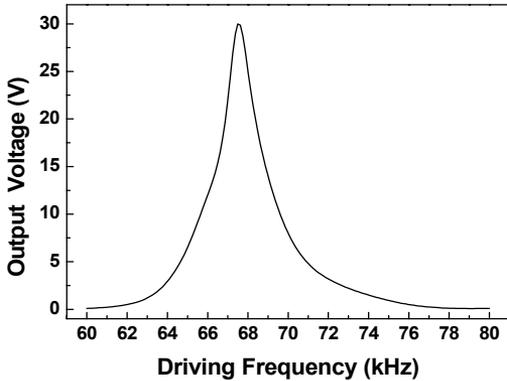


그림 3. 동작주파수 변화에 따른 컨버터 출력전압  
Fig. 3 Output voltage of piezoelectric converter as a function of operating frequency

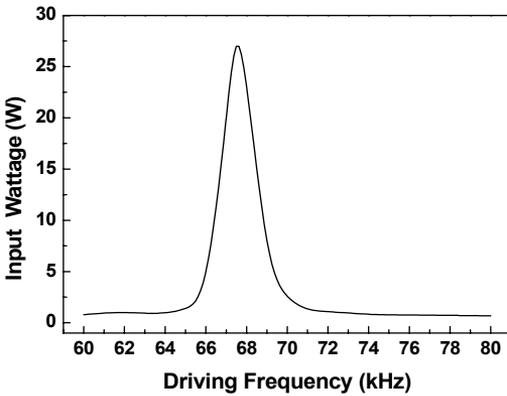


그림 4. 동작주파수 변화에 따른 컨버터 입력전력  
Fig. 4 Input power of piezoelectric converter as a function of operating frequency

압전변압기의 출력전압, 즉, 부하로 입력되는 전압 크기 변화에 따른 부하에 흐르는 전류를 측정하여 그림 5에 나타내었다. 출력전압 30VDC에서 최대 900mA의 전류가 유도되었다. 일반적인 Rosen형 압전 변압기의 경우 수십 mA 정도의 출력전류를 이끌어 낼 수 있는 것에 비해 전류값은 매우 높아 저전압 대전류에도 적용해 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

그림 6은 부하 임피던스를 약 4Ω에서 450Ω 까지 변화시켰을 때 출력전압의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과는 부하저항이 수 KΩ 정도에서 우수한 매칭을 보이는 상용화된 벌크형 압전변압기 결과에 비해 임피던스 매칭 폭이 훨씬 증가하였고, 상대적으로 임피

던스가 낮아짐에 따라 일반 부하에 적용할 수 있는 범위가 증가하였음을 나타내는 것이다. 이는 앞서 설명한 전류의 증가와 더불어 적층형 소자의 또 다른 장점이라 할 수 있다.

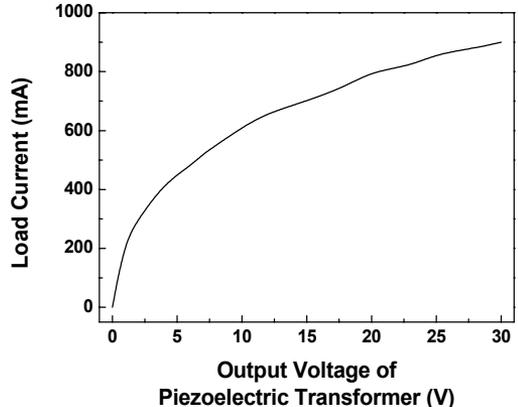


그림 5. 압전변압기 출력전압에 따른 압전컨버터 출력전류

Fig. 5 Output current of piezoelectric converter as function of output voltage of piezoelectric transformer

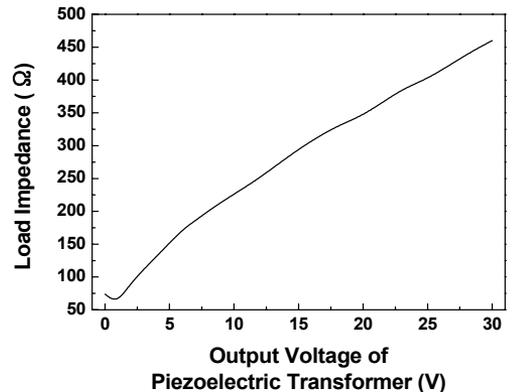


그림 6 부하 임피던스 변화에 따른 압전변압기의 출력전압

Fig. 6 Output voltage of piezoelectric transformer as function of load impedance

압전 AC-DC 컨버터의 입력전력과 압전변압기 출력전압사이의 관계를 그림 7에 나타내었다. 컨버터의 사양을 출력 30VDC로 하였을 경우 안정적으로 구동하는 최대 전력은 약 25W 인 것으로 나타났다. 이 결과는 압전변압기의 발열량  $\Delta T$ 를 30°C 이하로 제한

하였을 때 결과로 발열량이 커지면 내부 도메인 벽의 마찰력 증가에 따른 특성저하 및 공진주파수의 변화로 실제 제품에 적용할 수 없게 된다.

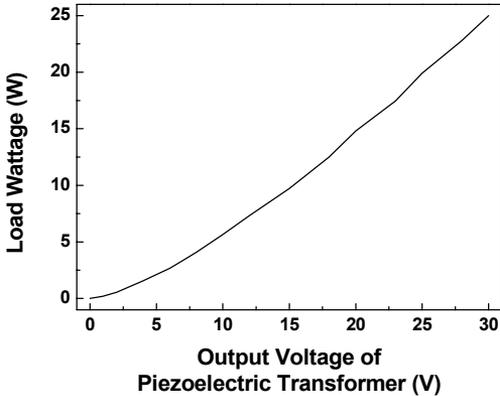


그림 7. 압전변압기 출력전압변화에 따른 압전컨버터 입력전력

Fig. 7 Input current of piezoelectric converter as function of output voltage of piezoelectric transformer

그림 8은 압전 AC-DC 컨버터의 각 주요 단자별 출력파형의 변화를 나타낸 것이다. 이미 그림 1과 2에서 설명한 바와 같이 AC220V의 상용전원신호가 컨버터의 각 부분에서 어떻게 변조가 일어나지를 나타낸 것이다. 정류, 발진, 변압, 정류의 과정을 거쳐 최종 부하에 유기되는 전압 파형으로부터 일반적인 AC-DC 컨버터와 같은 입출력 특성을 압전변압기를 이용하여 얻을 수 있음을 보이는 결과이다.

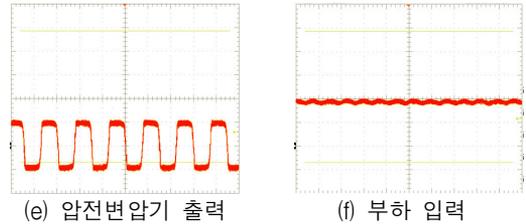
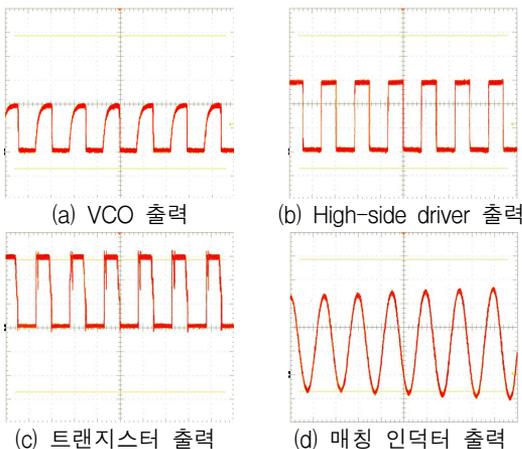


그림 8. 압전 AC-DC 컨버터 단자별 입출력 신호파형  
Fig. 8 In & output signal waveforms at the terminal of piezoelectric AC-DC converter

#### IV. 결론

본 연구에서는 Ring-dot 형의 적층 압전변압기를 이용하여 AC-DC 컨버터를 설계하고 전기적 특성을 측정분석한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 압전변압기를 이용한 AC-DC 컨버터는 압전변압기의 효율적, 안정적 구동을 위하여 발진주파수의 피드백 제어를 위한 PFM 구동방식과 출력제어를 위한 PWM 구동방식을 이용한 혼합형 구조로서 정상적인 동작특성을 나타내었다.

(2) 압전변압기의 부하 의존성으로 인해 구동 발진주파수가 출력전압의 크기에 따라 60~80kHz 사이의 범위를 갖도록 조절되었으며, 출력전압은 발진주파수 및 부하에 따라 영향을 받으며, 이에 따라 입력전력 크기가 결정되었다.

(3) 개발된 압전 AC-DC 컨버터는 최소의 발열을 동반하는 안정적 구동을 보이는 최대전력값은 25W였으며 허용 전류값은 약 900mA이었다.

이상의 결과로부터 대전류형 압전 AC-DC 컨버터를 다양한 분야에 걸쳐 전원 공급 장치로 활용이 가능함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 2012년도 남서울대학교 학술연구비지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

[1] 이형규, 강형원, "압전트랜스퍼머 기술동향 및 전망", 세라미스트, Vol. 8, No. 1, pp. 45-49, 2005.

[2] 이수호, 박정학, 사공건, "압전진동자 재료와 응용기술:초음파 발진용 압전진동자와 응용기술", 전기전자재료학회지, Vol. 14, No. 4, p. 1, 2001.

[3] 박성준, "압전변압기 응용기술의 현황 및 전망", 월간전기산업, pp. 12-19, 2005.

[4] Y. D. Hou, M. K. Zhu, C.S. Tian, H. Yan, "Structure and electrical properties of PMZN-PZT quaternary ceramics for piezoelectric transformers", Sensor and Actuators A, Vol. 116, pp. 455-460, 2004

[5] H. L. Du, S. B. Qu, J. Che, Z. Y. Liu, X. Y. Wei and Z. B. Pei, "The effect of composition on microstructure and properties of PNW-PMS-PZT ceramics for high-power piezoelectric transformer", Materials Science and Engineering A, 393, pp. 36-41, 2005.

[6] S. Priya, "High power universal piezoelectric transformer", IEEE Trans. on UFFC Vol. 53, No. 1, pp. 23-29, 2006.

[7] G. Chung and K. Ngo, "Analysis of an AC/DC resonant pulse converter for energy harvesting using a micro piezoelectric device," J. Power Electronics Vol. 5, No. 4, pp. 247-256, 2005.

[8] M. Yamamoto, Y. Sakaki, A. Ochi, T. Inoue, and S. Hamamura, "Step-down piezoelectric transformer for AC-DC Converters", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40, pp. 3637-3642, 2001.

[9] J. Yoo, K. Kim, C. Lee, L. Hwang, D. Paik, H. Yoon, H. Choi, "Electrical properties of low temperature sintering multilayer piezoelectric transformer using  $Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O_3$ - $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zr,Ti)O_3$  Ceramics", Sensor and Actuators A 137, pp. 81-85, 2007.

[10] 정용채, "다단 인터리브드 부스트 컨버터의 입력 리플전류 수식 분석", 한국전자통신학회논문지, 6권, 6호, pp. 865-871, 2011.

[11] S. Hamamura and T. Zaitso, "AC-DC converter using piezoelectric transformer", NEC 기보, Vol. 51, No. 4, 1998.

[12] "AC/DC converter with a piezoelectric transformer", US patent, No.5, 969,954, 1999.

저자 소개



**신현용(Hyun-Yong Shin)**

1979년 2월 연세대학교 전기공학과 (공학사)

1981년 2월 연세대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)

1987년 7월 루이지애나주립대학교 대학원 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

1994년 9월~현재 남서울대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 전자재료, 반도체 공정, 센서 및 센서 응용