

특집 : 특수 전동기

초음파 모터의 응용분야

윤정필*, 강병복**, 차인수***

(*동신대 전기전자공학부 석사과정, **박사과정, ***교수)

1. 서론

21세기에 들어선 지금 사회전반에 걸쳐 자동화에 대한 관심은 날로 높아져 가고 있다. 그와 더불어 자동화에 필수적으로 들어가는 모터에 대한 연구도 활발해 지고 있다. DC-Motor, Step-Motor, BLDC-Motor 등이 주류를 이루고 있는 가운데, 우리나라에서는 아직은 불모지나 다름없는 초음파모터(Ultrasonic Motor)에 대해서 논하고자 한다.

70~80년대 AC-Motor, DC-Motor가 주로 선풍기, 냉장고에 쓰였고, 80년대부터 현재까지 주로 DC-Motor, Step-Motor, BLDC-Motor가 주류를 이루고 있는데, 이들 구시대적 모터들의 대안으로 떠오르고 있는 것이 리니어모터와 더불어 초음파 모터라 할 수 있다.

1986년 12월 일본 Shinsei사에 의해 처음 상용화 된 초음파 모터(USR-4-100)는 현재 소형정밀시장에서 다양한 형태로 쓰이고 있는데, 우리나라의 경우 그 응용분야가 아직 미진하다. 그 이유는 관련 초음파모터 기술의 부재로 연결될 수가 있는데, 다행히 최근 1-2년 사이 벤처기업의 출현이 늘고 있고, 또한 관련기술 특허도 늘고있어 향후 귀추가 주목된다.

본 원고에서는 이렇게 최신 모터기술로 주목받고 있는 초음파모터의 구조 및 원리, 현재 우리나라의 기술수준, 향후 응용분야에 대해서 보고하고자 한다.

2. 초음파 모터의 기본원리

2.1 초음파모터의 구조

압전 세라믹은 정·부 교대로 분극 처리해서 A상과 B상 두

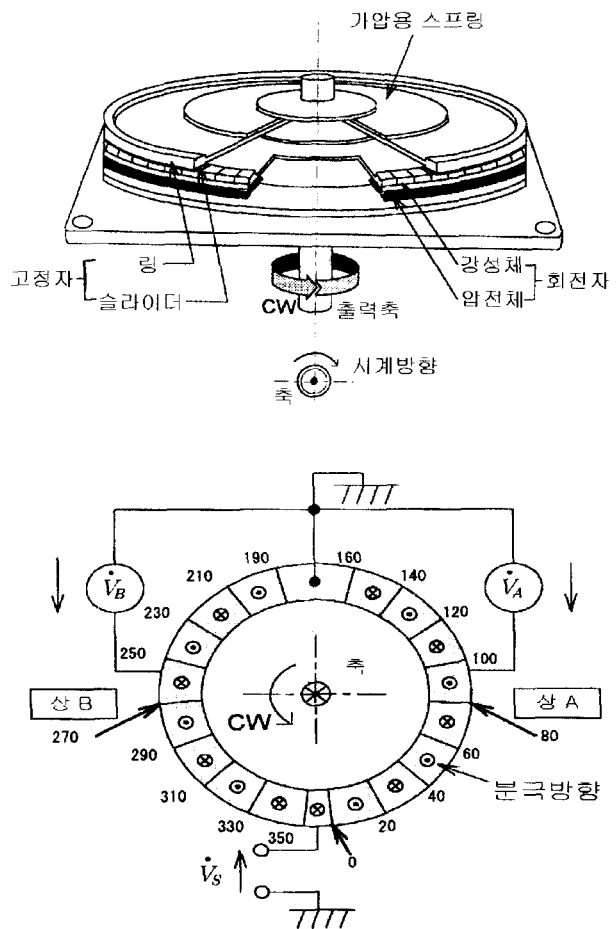


그림 1 진행파형 초음파 모터 구조와 피에조 전류 세라믹 구성

개의 부분으로 나누어 고정자 윗면에 접촉되어 있다. 각 상은 20°폭의 압전체 8개가 160°를 점유하고 있다. A상과 B상 사이에 별도의 10°폭을 두어 속도 조절용 피드백센서로 이용하도록 설계되어 있고 나머지 30°분은 그라운드로 이용하고 있어서 입출력 단자는 총 4단자가 된다.

2.2 진행파 발생과 동작 원리

그림 2는 초음파모터의 실제 구동원리를 나타낸다.

진행파가 발생한 고정자 표면질점의 운동은 타원을 그리는데, 그 회전방향이 진행파의 진행방향과 반대방향으로 그 위에 놓인 회전자도 진행파의 진행방향과 반대방향으로 회전한다. A상과 B상에 각각 정현파 전압을 인가하면 각상에 다음과 같은 정상파가 발생한다.

$$Y_A = 2A \sin(2\pi x / \lambda + \Psi_A) \cos(\omega_0 t + \theta_A) \quad (2-1)$$

$$Y_B = 2A \sin(2\pi x / \lambda + \Psi_B) \cos(\omega_0 t + \theta_B) \quad (2-2)$$

A상에서 발생한 정상파의 공간적 위상 Ψ_A 와 B상에서 발생한 정상파의 공간적 위상 Ψ_B 는 초음파 모터의 구조상 90°의 위상차를 갖는다. 그리고 A, B상에 공급하는 전원의 시간적 위상차가 90°이기 때문에 $\Psi_A = 0, \Psi_B = \pi/2, \theta_A =$

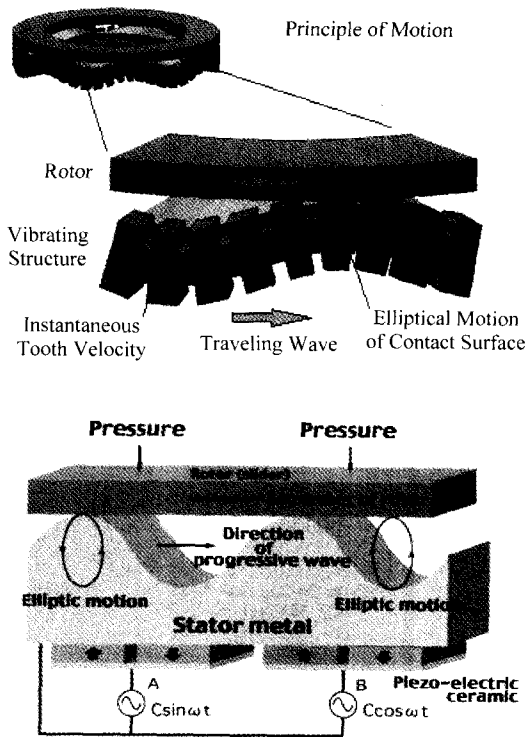


그림 2 진행파형 모터의 원리

$-\pi/2, \theta_B = 0$ 으로 놓을 수 있으므로 (2-1), (2-2)식은 다음과 같이 된다.

$$Y_A = 2A \sin(2\pi x / \lambda) \sin(\omega_0 t) \quad (2-3)$$

$$Y_B = 2A \cos(2\pi x / \lambda) \cos(\omega_0 t) \quad (2-4)$$

$$Y_0 = Y_A + Y_B = 2A \cos(2\pi x / \lambda - \omega_0 t) = \xi_0 \cos(nx - \omega_0 t) \quad (2-5)$$

ξ_0 : 정수(=2A), n : 원주상의 정상파수 ($2\pi x / \lambda = 9$)

식 (2-5)는 탄성체의 중성면의 종방향(축방향)의 변위를 나타내고 있다. 그리고 중성면이 탄성체의 두께 T의 중앙에 있다고 한다면, 이곳으로부터 T/2만큼 떨어진 표면의 횡방향(원주방향) 변위는 다음 식으로 표시된다.

$$X_0 = \xi_0 n (T/2) \sin(nx - \omega_0 t) \quad (2-6)$$

(2-5)식과 (2-6)식으로부터

$$\frac{X_0^2}{n^2 (T/2)^2} + Y^2 = \xi_0^2 (\sin^2(nx - \omega_0 t) + \cos^2(nx - \omega_0 t)) = \xi_0^2 \quad (2-7)$$

이 식에서 표면상의 절점이 타원운동을 하고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 지표면의 타원 운동을 일으키는 기계적 휨 진동(Bending Wave)은 지면에 접촉되어 있는 회전자에 마찰력으로 작용하여 회전력을 발생시킨다.

결국 각 상 A와 B의 전류는 그림 3과 같이 나타난다.

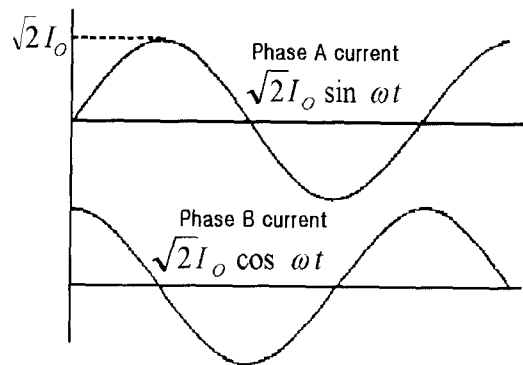


그림 3 상A와 상 B의 전류 (90° 위상차를 가질때)

3. 초음파 모터의 등가회로

초음파 모터를 구동하기 위한 2상 인버터의 전기적 부하를, 초음파 진동을 일으키는 피에조 전류 원소와 회전자와 탄성체(고정자)로 구성된 기계적 진동시스템에 기초를 둔다.

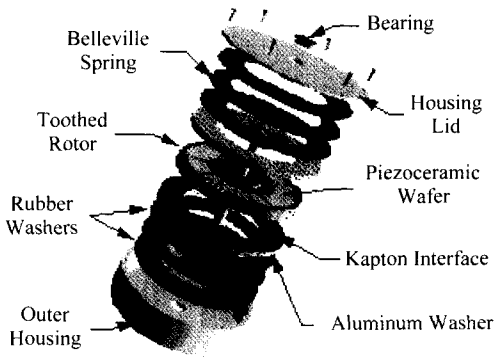
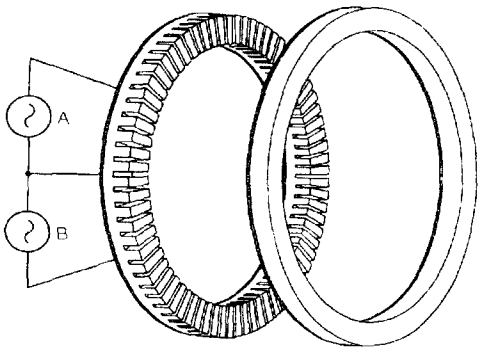
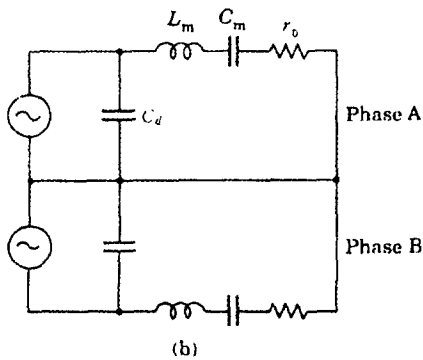


그림 4 초음파 모터의 고정자 구조



(a) 회전자와 고정자



(b) 등가회로

그림 5 회전자에 고정자가 붙어 있는 경우 및 등가 회로

초음파 진동 변형계통의 전기기계적인 변환이론에 의하면 다음과 같은 계통 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{F} &= -A\dot{E} + z_1\dot{v} \\ \dot{I} &= \dot{Y}_d + A\dot{v} \end{aligned} \quad (3-1)$$

위의 식에서

- \dot{E} = 초음파 모터상의 인가전압
- \dot{I} = 초음파 모터에 인가되는 인가전압
- \dot{v} = 초음파 모터상에 있어서 기계적 진동의 속도
- \dot{F} = 구동력
- A = 힘 인자
- z_1 = 기계적 임피던스
- \dot{Y}_d = 댐핑 임피던스
- C_d = 압전 전류원소의 댐핑 캐패시턴스를 나타낸다.
($\dot{Y}_d = j\omega C_d$)

세 개의 등가변수 m_1, r_1, s_1 을 이용하여 기계적 임피던스 z_1 은 다음으로 주어진다.

$$z_1 = r_1 + j(\omega m_1 - \frac{s_1}{\omega}) \quad (3-2)$$

초음파 모터의 어드미턴스는 $\dot{F} = 0$ 의 조건에서 식 (3-1)로부터 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{E}} &= \dot{Y}_d + \frac{A^2}{z} = \\ &= j\omega C_d + \frac{1}{\frac{r_1}{A^2} + j\omega \frac{m_1}{A^2} + \frac{s_1}{j\omega A^2}} \end{aligned} \quad (3-3)$$

식 (3-3)로부터 유도된 전기적 등가회로는 그림 6으로 나타내어진다.

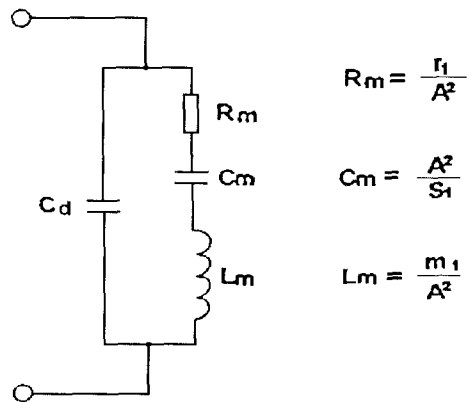


그림 6 초음파 모터의 전기적 등가회로

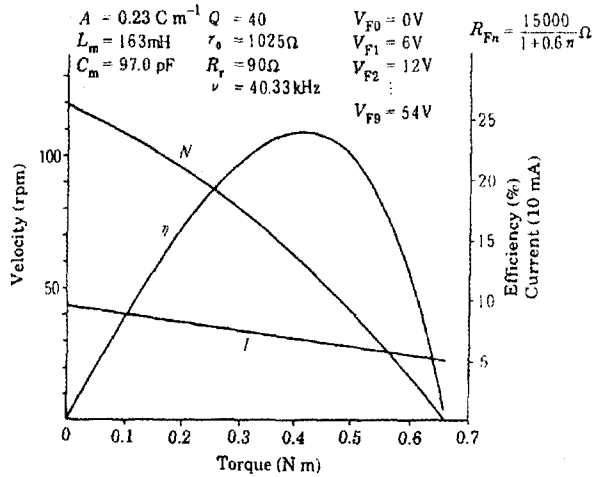


그림 7 초음파 모터 속도-토크곡선 예제

그림 7은 초음파 모터의 등가회로의 파라미터에 따른 속도와 토크의 관계를 나타내 주고 있다. 상기 그림의 경우 구동 주파수가 40.33 KHz에서의 동작특성을 보여주고 있고, 토크와 속도는 반비례함을 나타내 준다.

4. 초음파 모터의 특성

초음파 모터는 기존의 전기적 모터와 완전히 다른 전기 기계에너지 변환기계이다. 그 원리는 압전 파동자에 교류전압을 인가하여 진동하는 성질을 이용해서 그 파동을 마찰력에 의해 기계 역학적으로 꺼내는 것이다.

초음파 모터는 압전소자에 의한 초음파 진동을 이용한 마찰 구동형 모터인데, 기존 전자식 모터와는 달리 자기회로, 즉 철심과 코일이 없는 단순구조를 갖는 소형모터로서 그 특성은 다음과 같다.

- ▷ 전압을 변화함으로써 회전수를 변화시킬 수 있다.
- ▷ 비교적 저속으로 큰 토크가 얻어진다.
 - Direct Drive에 적합하다.
- ▷ 원판형, 링형의 모터를 만들기 쉽다.
 - 링형 속빈 부분의 유효량이 고려된다.
- ▷ 기계적 시정수가 매우 짧고, 정밀 위치 제어가 가능하다.
- ▷ 단위 중량당 발생 토크 및 출력이 크다.
- ▷ 단순한 구조로서 형상의 자유도가 크고, 리니어 모터의 실현이 용이하다.
- ▷ 기존 모터와 달리 자계와 무관하며, 정속 운전이 가능하다.
- ▷ 정·역회전이 가능하다.
- ▷ Break 토크가 크다.

이 외에도 많은 특유의 장점을 갖고 있기 때문에 응용분야만 잘 선정하면 기존 모터를 채용하는 경우보다 훨씬 유리한 시스템 구축이 가능하다. 초음파 모터를 구동용으로 이용했을 경우 위치제어는 물론 토크 제어를 단순한 알고리즘에 의해서 손쉽게 실현할 수 있고, 감속기어 없이 Direct Drive 방식을 취할 수 있을 뿐만 아니라 동역학계의 임피던스 제어가 가능하여 동적환경은 물론 접촉 작업용 로봇을 실현하기 위한 Actuator 구동용 모터로 각광을 받고 있다.

5. 초음파 모터의 개발효과 및 시장성.

소형정밀모터시장이 세계적으로 보았을 때 2000년 현재 130~150억\$의 시장을 형성하고 있는데, 이중 약 80%를 일본이 점유하고 있다.

우리나라의 경우는 약 4조원의 시장규모가 형성되어 있는데, 소형정밀모터의 경우 거의 전량 수입에 의존하고 있는 형편이다.

전세계적으로 IT의 열풍이 불고 있다. 정보화의 가속화로 자동화 시스템의 규모 또한 거대해 지고 있는 것이다. 소형화를 추구하는 현대에서 이것이 의미하는 것은 부피가 크고, 자계의 영향을 받으며 소음이 심한 기존 모터들의 입지는 점차 좁아지고 있다는 것으로 바꾸어 말할 수도 있을 것이다. 컴팩트한 디자인·마그네틱 EMI/RFI 자계의 영향을 받지 않고, 소음이 없는 초음파 모터는 IT산업의 발전율과 비례하여 수요 또한 증가할 것으로 예상된다.

6. 초음파모터 기술동향 및 응용분야

6.1 국외의 경우

1986년 12월 일본 shinsei사에 의해 처음 상용화 된 이후로, 역시 초음파 모터의 선두주자는 일본이다. 일본의 경우 각 분야별 적용실적이 두드러지게 나타나고 있다. 시계, 자동차 Headrest, Back Mirror, MRI injector actuator, Automatic Roll screen motor, 자동초점카메라, Ultraminature robot actuator, 핵에너지 모세관수리용 작동장치 등 여러분야에 실제로 적용되고 있다. 미국의 경우 일본보다는 약간 뒤떨어지는 수준이지만, 위와 같은 다양한 분야에서 두각을 나타내고 있으며, 특히, NASA의 경우 우주탐사 로봇의 모터에 적용할 수 있도록 제어특성이 우수한 초음파 모터를 개발중이다.

6.2 국내의 경우

국내의 경우 서두에서도 언급하였듯이, 소형정밀모터설계는 선진국에 비해 많이 낙후되어 있다. 초음파 모터의 경우도 크게 다를 바가 없다. 아직까지 정확하게 산업화에 성공한 경

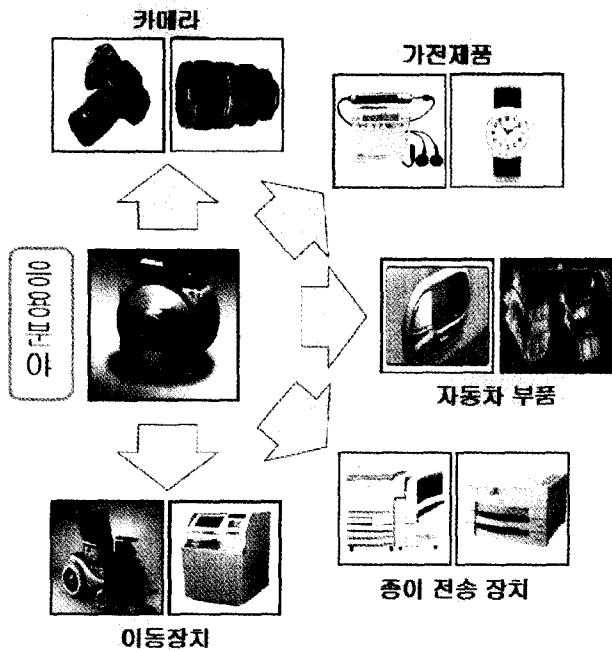


그림 8 초음파 모터의 응용분야

표 1 초음파 모터의 응용 분류

	응용사례	종류
카메라	자동초점카메라	원환 진동형
	Mirror 조리개	굴곡과 진동형
	Film Auto Rewinder	
자동차 부품	Seat 구동	원환 진동형
	Door-mirror	리니어 진행파형
	Door-lock 자동차 좌석 Head-rest 위치조정	굴곡과 진동형
이동장치	커튼구동 가구이동장치 자동개폐미닫이 카드반송장치	리니어 진행파형
	휠체어	굴곡과 진동형
가전제품 및 정밀기기	내시경 테이프 레코더	원환 진동형
	전자시계	
종이전송장치	복사기	리니어 진행파형
	프린터	
밸브	항공기 밸브 버터플라이 밸브	굴곡과 진동형
기타	우주 기계용 모터	
	미소 기계용 액츄에이터	

우는 거의 없으며, 업체 또한 손으로 꼽을 정도이다. 모든 기술에서 미국·일본에 비해 30~70%의 기술격차를 보이고 있다.

그림 8과 표 1은 초음파 모터의 응용분야와 초음파 모터 종류별 응용사례에 대한 간략한 정리이다.

7. 결론

21세기, 우리는 본격적인 3A(Home·Office·Factory Automation)시대에 접어들었다. 이것이 가능해지는 이유는, 초고속으로 성장해가는 IT산업의 영향이라 해도 과언이 아닐 것이다.

정보화의 급류를 타면서 시스템 또한 거대해지고 있다. 이로 인하여 정밀모터의 수요 또한 IT산업의 발전 비율과 비례하여 증가할 것이다.

30kHz 이상의, 인간의 청각으로는 들을 수 없는 주파수를 내며 회전하는 초음파 모터는, 인간에게 모터소리에 대한 스트레스를 감소시켜줄 것이며, 컴팩트한 사이즈로 인하여 시스템의 소형화를 이끌어 낼 수 있을 것이며, 로봇액츄에이터, 공장자동화, 광학기구분야, 전송장치분야, 이동장치 분야 등 각 전문 분야에서 큰 두각을 나타낼 것이다.

우리나라는 많은 부분에서 선진국에 비해 낙후되어 있으므로, 부단한 연구개발이 필요하며, 기존의 타국 제품과 겨룰 수 있는 가격경쟁력 및 품질 경쟁력이 뛰어난 제품을 조기에 생산하여 21세기 소형정밀모터 시장을 선점하여야 할 것이다. 또한, 개인적인 소견으로 초음파 모터의 개발 방향은 여러분야 중에서 광학, 반도체모터, 로봇틱스, 멀티기기용 등 고부가가치 수익성을 얻을 수 있는 고급 산업장비 쪽으로 가야할 것이다.

참고문헌

- [1] Hagood, N.W. and McFarland, A. J., "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. , Vol. 42, No. 2, March 1995, pp. 210~231.
- [2] Hagood, N. W. and McFarland, A. J., "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor", SPIE Paper no. 2190-52, Smart Structures and Materials 1994: Smart Structures and Integrated Systems, Nesbitt Hagood, Editor, SPIE Proc. Vol. 2190, 1994, pp. 814~828.
- [3] Toshiiku Sashida & Takashi Kenjo "An Introduction to Ultrasonic Motors", Clarendon

- Press · OXFORD, pp. 7~24, pp. 142~158. 1993.
- [4] Ueha, S. and Tomikawa, Y., "Ultrasonic Motors: Theory and Application", Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [5] McFarland, A. J., "Development of a Rotary Ultrasonic Motor for Spacecraft Applications", S. M. Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, M.I.T., Cambridge, MA, June 1995.
- [6] In-Su Cha. "The study of compensation on Temperature of Ultras-onic Motor with Robot Actuator by Fuzzy controller", 한국과학재단 보고서 (961-0916-078-1), pp. 5~13, 1997.
- [7] In-Su Cha, Hea-Am Park & et all "A study on the Design and Characteristic of the High Frequency Resonant Inverter fo Ultrasonic Motor Driver Using Fuzzy Controller", IECON'95. Orlando, Florida, USA, Novvember 1995, pp. 680~685.
- [8] 古家伸一 "屈曲進行波型超音波 モータの驅動特性と制御に關する研究" 平成8年. pp. 5~9, pp. 33~35.

〈 저 자 소 개 〉



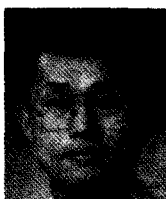
윤정필(尹 柱 必)

1975년 9월생. 2001년 2월 동신대학교 전기 전자공학과 졸업. 2001년 3월~현재 동신대학교 대학원 전기전자공학부 전력전자 및 제어계측 석사과정.



강병복(姜 秉 福)

1973년 1월생. 1995년 2월 동신대학교 전자공학과 졸업. 1997년 2월 동신대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2000년 7월~현재 동신대학교 전기전자공학부 강사. 2001년 3월~현재 동신대학교 대학원 전기전자공학부 박사과정.



차인수(車 仁 洙)

1959년 8월생. 1982년 2월 조선대학교 전기공학과 졸업. 1984년 2월 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 8월 조선대학교 전기공학과 제어계측전공 졸업(박사). 1997년 9월~11월 독일 Darmstadt대학 전력전자 연구소 방문교수. 2000년 7월~2000년 8월 동경농공대 전기공학과 전력전자연구실 중견과학자 연구. 1990년 3월~현재 동신대학교 전기전자공학부 교수.