

볼트조임 란주반형 진동자를 이용한 모드변환형-단일공진모드 초음파 모터에 관한 연구

論 文
53C-3-1

A Study on the Mode Conversion Type - Single Resonance Mode Ultrasonic Motor Using Bolt Tightened Langevin Type Vibrator

李在炯*·朴泰坤**
(Jae-Hyung Lee · Tae-Gone Park)

Abstract - Mode conversion type ultrasonic rotary motor using bolt tightened Langevin type vibrator was studied. Driving frequency of the motor, displacements and elliptical trajectories at tip of the coupler were simulated by finite element analysis program (ANSYS). Speed and torque of the fabricated motor were measured as functions of input voltage and load. As results, from FEA the driving frequency of 40.8 [kHz] and useful elliptical trajectories were found. Fabricated motor rotated clockwise at frequency of 38.2 [kHz]. Speed and torque of the motor were increased when the input voltage was increased. Maximum speed, torque and efficiency were 75 [rpm], 0.14 [Nm] and 6.28 [%], respectively.

Key Words : Ultrasonic motor, Langevin type vibrator, Elliptical trajectories, Finite element analysis.

1. 서 론

1970년대부터 구소련에서 시작된 초음파 모터에 관한 연구는 간단한 구조, 저속-고토크, 정밀한 위치제어와 같은 초음파 모터의 특징을 제시하였다 [1,2]. 하지만 당시의 초음파 모터는 운전을 계속하면 마모와 온도변화를 비롯한 여러 가지 문제점 때문에 실용화 되었다는 보고는 없었다. 1980년대에는 일본의 Sashida에 의해 진동편형 초음파 모터가 제안되었지만 이 모터 역시 고정자와 회전자 사이의 마찰에 의한 마모로 인해 실용화되지 못하였다 [3]. 이러한 문제점을 극복하기 위해 Sashida는 진동과형 초음파 모터를 개발하였다 [4]. 본 모델은 초음파 모터를 대표하는 것으로, Canon사에선 카메라의 자동초점용 렌즈구동장치로 실용화하였으며, 이후 소형모터분야에선 전자기 모터를 대체하는 단계에 이르렀다 [5].

최근에는 미국, 일본과 같은 선진국에서는 초음파 모터를 이미 '차세대 모터'로 선정하여 그 연구와 개발이 매우 활발하다 [6,7,8]. 또한, 최근 중국에서도 직경 1 [mm]의 초소형 초음파 모터를 제작하여 초음파 모터의 소형화 분야에선 세계적인 기록을 보유하고 있다. 그러나 국내에서는 초음파 모터에 대한 연구 인력이 많지 않으며, 그 필요성에 대한 인식이 크게 부족한 상황이다. 최근 한 벤처기업에 의해 국내에서도 초음파 모터가 상용화되고 일부 대학 연구기관에 의해 다수의 논문이 발표되고 있어 새로운 연구영역을 구축하

고 있다 [9,10].

본 논문에서는, 볼트조임 란주반형 진동자에 종진동을 비틀림 진동으로 변환시키는 변환기를 결합하여, 변환기의 표면에 타원변위를 발생시키는 초음파 회전모터의 고정자를 설계하여 그 동작특성을 유한요소기법으로 시뮬레이션 하였다. 그리고 동작특성이 우수할 것으로 예측된 형태로 모터를 실제 제작하여 그 특성을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 구조와 동작원리

본 모터는 란주반형 진동자를 이용한 초음파 회전모터로서, 모드변환형-단일공진모드 초음파 모터로 분류된다. 그림 1의 (a)와 (b)는 각각 본 모터의 구조와 비틀림 커플러의 동작을 나타내고 있다. 그리고 표 1에서는 모터와 부품들의 치수를 확인할 수 있다. 모터의 구성요소 중에서 가장 근본적인 진동원은 압전 세라믹 디스크이다. 두께방향으로 분극된 압전 세라믹 두 장을 분극방향이 서로 마주보게 구성한 후, 이를 금속블럭 사이에 삽입하여 란주반형 진동자가 구성된다. 여기서 압전 세라믹의 전극에 교류전원이 인가되면 압전효과에 의해 진동하게 된다. 이어서 본 진동자에서 발생한 종-진동은 비틀림 커플러에 전달된다.

비틀림 커플러는 그림 1의 (b)와 같이 원형의 디스크를 중심으로, 아랫부분은 사각홈에 의한 평행한 두 다리가 위치하고 있으며 윗부분은 아래의 두 다리와 대각선으로 놓인 빔이 위치하고 있다. 이러한 구조의 비틀림 커플러는 종-진동이 아랫부분에서 전달되면 두 다리와 홈에 의해 굽힘-진동이 발생하게 되고, 윗부분의 빔은 굽힘-진동에 의해 비틀림-진동이 발생하게 된다. 다시 말해 란주반형 진동자와 비틀림 커플러로 구성된 본 모터의 고정자는 종, 굽힘, 비틀림의 진동모드변환을 동시에 이행하면서 동작하게 된다.

* 準 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 教授 · E博

接受日字 : 2003年 9月 4日

最終完了 : 2004年 1月 3日

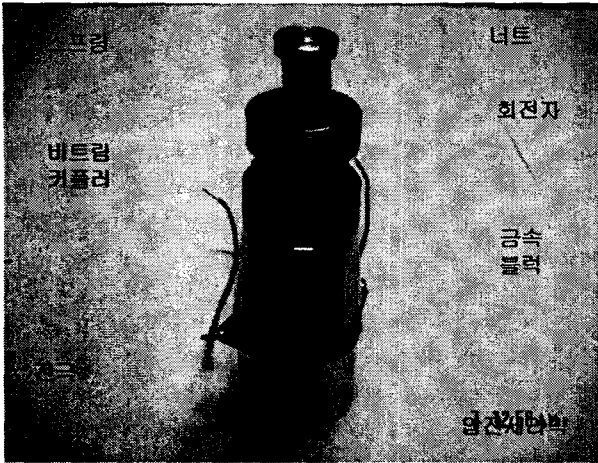
이러한 진동의 조합은 회전자와 접촉을 하는 빔의 끝 부분에서 타원변위를 형성하게 된다. 본 변위는 일반적으로 매우 미소하기 때문에 공진을 이용한 변위확대가 필요하다. 즉, 인가되는 전원의 주파수를 고정자의 고유 주파수와 일치시키면 기계적인 공진에 의해 모터를 구동하기에 충분한 큰 변위를 얻을 수 있다. 결국 이러한 변위확대 메카니즘과 더불어, 비틀림 진동이 발생하는 빔의 윗부분에 베어링에 의해 축에 삽입된 회전자를 올려놓고, 스프링에 의한 힘으로 적절한 접촉력을 유지시켜주면, 회전자는 접촉면 사이의 마찰에 의해 회전하게 된다.

관류반형 진동자와 비틀림 커플러의 금속재료는 각각 알루미늄과 동이다. 그리고 회전자는 베어링을 직접적으로 이용하였다. 베어링회전자는 베어링 본연의 역할과 회전자의 역할 그리고 마찰재의 역할을 동시에 수행한다. 이러한 다중기능을 가지는 회전자를 도입으로서 모터의 전체적인 구조를 간소화 할 수 있었다.

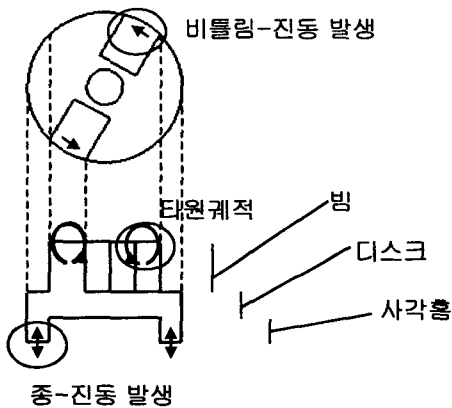
표 1 모터와 부품들의 치수.

Table 1 Size of the motor and parts.

모터의 전체길이	108 [mm]
고정자의 직경	35 [mm]
고정자의 길이	80 [mm]
회전자의 직경	28 [mm]
회전자의 두께	9 [mm]
압전 세라믹의 두께	5 [mm]
압전 세라믹의 내경	15 [mm]
압전 세라믹의 외경	35 [mm]
관류반형 진동자의 길이	60 [mm]
사각홈의 깊이(비틀림 커플러)	5 [mm]
디스크의 두께(비틀림 커플러)	5 [mm]
빔의 높이(비틀림 커플러)	10 [mm]
사각홈과 빔이 이루는 각도	30°



(a)



(b)

그림 1 (a) 모터의 구조. (b) 비틀림 커플러.

Fig. 1 (a) Structure of the motor. (b) structure of the coupler.

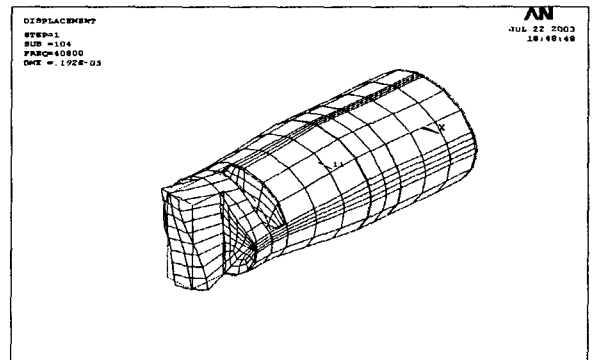
2.2 유한요소해석

본 연구에서는 ANSYS 7.0 유한요소해석 프로그램을 이용하여 제시된 모터의 고정자를 해석하였다. 모터의 동작은 고정자에 의해서 결정되기 때문에 고정자만 해석의 모델이 되었다. 그리고 실제 부품들은 볼트에 의해 결합되지만 해석의 편의를 위해 단순히 부품들의 접합하는 구조를 채택하였다. 우선 모드해석으로부터 고정자의 중-비틀림-굽힘의 진동모드에서 41.585 [kHz]의 고유 주파수가 확인되었다. 이어서 하모닉해석을 통해서 정현적인 전압이 인가되었을 때의 고정자의 동적거동을 관찰하였다.

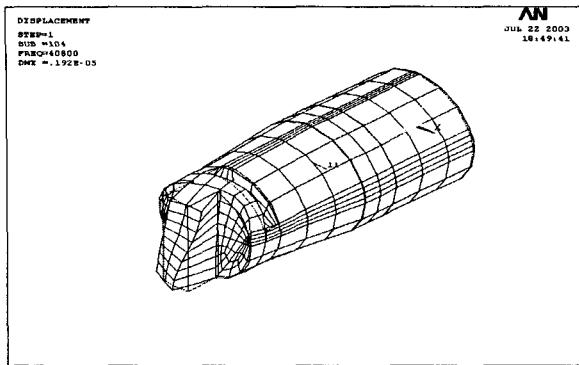
3. 실험결과 및 고찰

3.1 해석결과

그림 2의 (a)와 (b)는 유한요소해석의 결과로서, 각각 주파수 40.8 [kHz]에서 진동자가 수축과 팽창하였을 경우 변형형상을 나타낸다. 여기서 진동자가 수축과 팽창을 함에 따라 빔의 비틀림 방향이 반전되었다. 그러므로 본 모터의 고정자 구조는 회전자를 구동시킬 수 있음이 확인되었다.



(a)



(b)

그림 2 고정자의 변형형상. (a) 진동자수축 (b) 진동자팽창.
 Fig. 2 Deform shape of the stator. (a) contraction of vibrator (b) inflation of vibrator.

역시 유한요소해석을 통해, 주파수의 범위를 20 [kHz]에서 60 [kHz]까지 설정한 후, 주파수를 200 [Hz]씩 증가함에 따른 빔의 끝부분에서의 변위의 진폭과 위상을 살펴보았다. 여기서 X축 변위는 비틀림-진동을, Z축 변위는 종-진동을 관장한다고 말할 수 있다. 그림 3에서와 같이 진폭의 경우 X축 진폭이 가장 크고 Y축 진폭이 가장 작게 나타났다. 아울러 주파수 40.8 [kHz]와 44.2 [kHz]에서 비교적 큰 피크를 보인다. 그림 4의 위상의 경우 세 축이 주파수에 따라 위상차를 보이며 42.4 [kHz]에서 부호가 반전 된다. 여기서 진폭의 피크를 나타내는 두 주파수가 고정자의 공진주파수로 추정되며, 본 주파수는 모터의 동작 주파수로 예상할 수 있었다. 그리고 주파수에 따라 변위의 위상이 다르게 나타나는 것으로 보아, 본 모터는 주파수의 가변으로 양방향 운동을 실현할 수 있음을 예상할 수 있었다.

앞에서 언급한 바와 같이 초음파 모터의 동작은 고정자와 회전자의 접촉점에서의 타원궤적에 의해서 이루어진다. 하모닉 해석의 결과로부터 본 타원궤적을 얻을 수 있으며, 이는 최적의 모터설계와 모터의 특성을 파악하는 데 중요한 정보가 된다. 여기서 실질적인 타원변위는 3차원이다. 하지만 특성비교의 편의를 위해, Z-X평면상의 2차원 궤적만을 나타내었다. Z축과 X축의 변위는 각각 종-진동과 비틀림-진동을 관장하기 때문에, Y축 변위를 궤적을 생성하는 데 있어서 생략하더라도 모터의 특성을 파악하는 데 큰 무리가 없다.

먼저 그림 5는 주파수 40.8 [kHz]에서 beam의 위치에 따른 타원궤적이다. 그리고 node 163, 15, 431은 각각 beam의 시작점, 끝점, 꼭지점으로 정의할 수 있다. 결과로서 node 431에서 관측된 타원궤적이 가장 양호함을 확인할 수 있다. 아울러 본 위치는 회전자와 가장 활발한 접촉을 하는 지점이라 판단할 수 있다. 그림 6은 node 431 지점에서 관측된 입력전압에 따른 타원궤적의 모습이다. 이 때, 타원궤적의 크기는 입력전압과 비례적인 관계를 나타내었다. 그러므로 전압가변으로 인해 모터의 속도제어가 가능함을 예측할 수 있다.

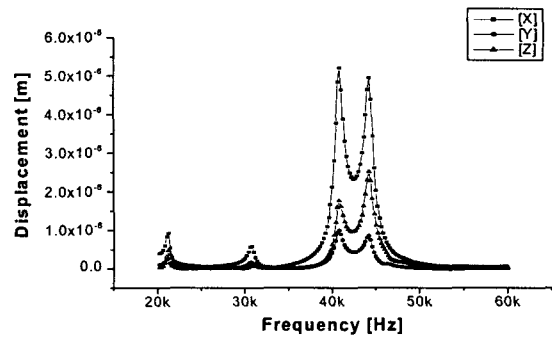


그림 3 주파수에 따른 변위의 진폭.
 Fig. 3 Amplitudes of the displacement as a function of frequency.

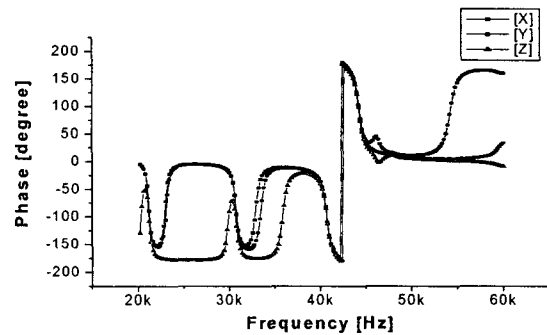


그림 4 주파수에 따른 변위의 위상.
 Fig. 4 Phases of the displacement as a function of frequency.

3.2 동작특성

3.2.1 동작 주파수

제작된 모터의 동작 주파수를 확인하기 위해 입력전압을 50 [Vrms]로 고정하고, 주파수 가변에 따른 모터의 속도를 측정하였다. 그림 7은 주파수에 따른 속도를 나타내며, 여기서 음의 부호를 가지는 속도는 회전자의 시계 방향 회전을 의미한다. 본 모터는 속도의 피크점이 38.2 [kHz]의 주파수에서 나타났다. 이 때 회전자의 회전 방향은 시계방향이다. 31.5 [kHz] 부근에서 반시계방향의 회전이 확인되었으나 속도가 매우 느리며, 고정자의 과도한 종-진동으로 인해서 회전특성이 불안하였다. 그래서 본 모터는 단방향 운전용으로, 동작 주파수는 38.2 [kHz], 회전방향은 시계방향으로 결정하였다.

3.2.2 전압특성

그림 8에서는 입력전압에 따른 모터의 속도와 토크를 나타내었다. 결과로서 속도와 토크는 모두 입력전압에 비례하는 특성을 보였다. 이것은 해석의 결과에서와 같이 입력전압에 따른 beam에서 발생하는 타원궤적의 크기변화가 원인이 되었다고 사료된다. 그리고 본 실험에 있어서 속도와 토크의 최대값은 각각 75 [rpm]과 0.14 [Nm]를 나타냈다.

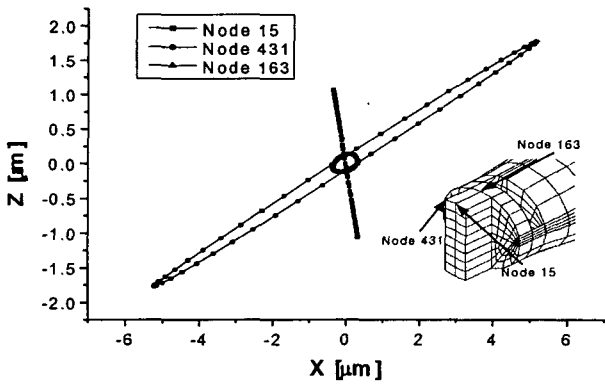


그림 5 beam의 위치에 따른 타원궤적.
Fig. 5 Elliptical trajectories depend on positions of the beam.

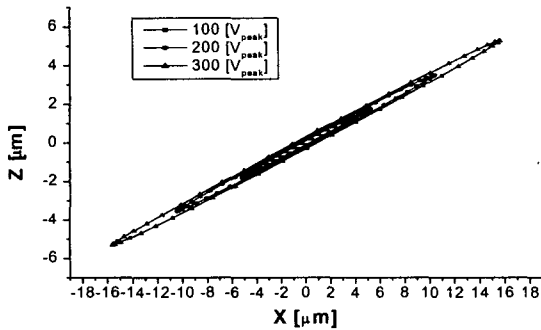


그림 6 입력전압에 따른 타원궤적
Fig. 6 Elliptical trajectories depend on input voltage.

3.2.3 부하특성

그림 9에서는 모터의 부하에 따른 속도와 효율을 나타내었다. 여기서 주파수는 동작 주파수인 38.2 [kHz]로 맞추고, 입력전압은 50 [Vrms]로 고정하였다. 그리고 부하를 10 [mNm]씩 증가하면서 그 특성을 관찰하였다. 단, 본 모터에서는 회전자 자체가 큰 부하의 역할을 하고 있지만 회전자 자체의 부하는 무시하였다. 그래서 측정된 결과는 무부하 상태에서도 상당한 부하가 작용하고 있다고 말할 수 있다. 결과로서 부하가 증가함에 따라서 속도는 선형적으로 감소하였고 효율은 증가하였다. 그리고 가장 높은 효율은 6.28 [%]로 나타났다. 본 연구에서 나타난 모터의 낮은 효율은 고정자와 회전자 사이에서 발생하는 미끄러짐이 주 원인이라고 판단된다. 효율의 개선을 위해선 보다 높은 토크가 요구되며, 이를 위해 마찰특성의 개선이 시급하다.

3.2.3 응용가능성

본 모터는 카드이송장치로 응용되어질 때 상당한 장점을 가질 수 있으리라 본다. 무엇보다도 베어링을 직접적으로 이용한 베어링 회전자는 모터 자체적으로 베어링, 마찰재, 회전자의 다중 기능을 수행하며, 카드이송장치에서는 롤러의 역할 또한 직접적으로 수행할 수 있다. 이와 함께 본 모터가 가지는 저속-고토크의 특징으로 인해, 현재 사용되고 카드이송장치의 많은 수의 기어들을 생략할 수 있다. 또한 간단한 구조로 인해 제작이 용이하고 모터의 크기를 축소하는

일이 어렵지 않아서, 일반적인 전자기 모터와 비교해 상당한 경쟁력을 가질 수 있다.

하지만 모터의 안정적인 동작을 위한 진동자 지지구조 및 장시간 사용을 위한 커플러의 내마모성, 그리고 낮은 효율과 약간의 소음발생 문제들이 거둬진 연구를 통해서 개선되어야 할 것이다.

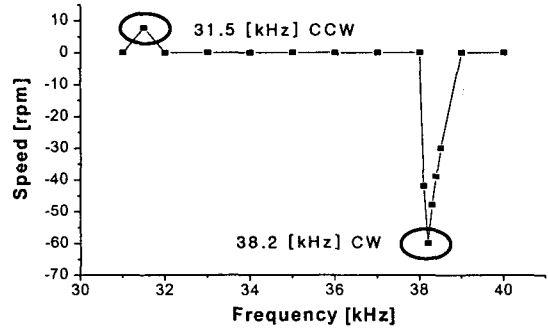


그림 7 주파수에 따른 모터의 속도.
Fig. 7 Speed of the motor depend on frequency.

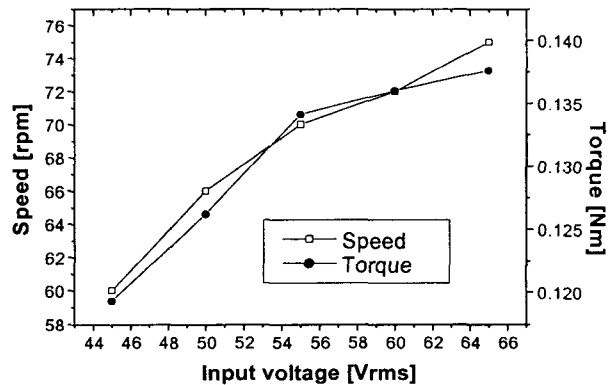


그림 8 입력전압에 따른 모터의 속도와 토크.
Fig. 8 Speed and torque of the motor depend on input voltage.

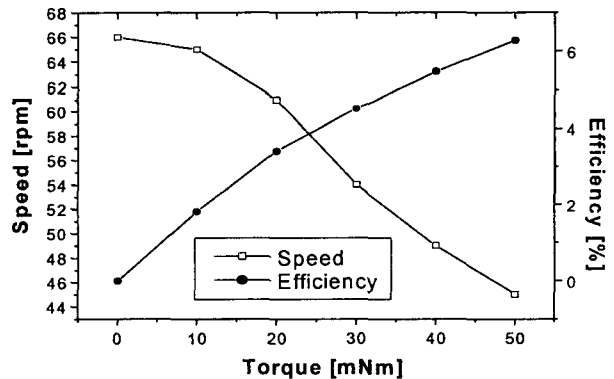


그림 9 부하에 따른 모터의 속도와 효율.
Fig. 9 Speed and efficiency depend on load.

4. 결 론

본 논문에서는 란쥬반형 초음파 진동자를 이용하여 모드 변환형-단일공진모드 초음파 회전모터에 관해 연구하였다. 모터의 제작에 앞서 시행한 유한요소해석으로부터 진동자의 수축과 팽창에 따른 beam의 비틀림이 확인되었다. 그리고 주파수에 따른 변위의 특성 살펴본 결과, 40.8 [kHz]와 44.2 [kHz]에서 진폭의 피크점이 확인되었다. 또한 주파수에 따른 각 축 변위의 위상이 다름이 확인되었다. 이어서 해석의 결과를 이용해 고정자의 가상적인 타원케적을 생성할 수 있었다. 여기서 커플러의 beam에서 발생하는 타원케적은 beam의 꼭지점에서 가장 양호하게 형성되었다. 그리고 본 케적은 입력전압에 비례하여 그 크기가 증가하였다. 제작된 모터는 시계방향으로의 동작만이 양호하게 나타났고 이 때 동작 주파수는 38.2 [kHz]로 결정되었다. 그리고 본 모터의 속도와 토크는 모두 입력전압에 비례하였다. 또한 부하토크의 증가에 따라 선형적으로 속도가 감소하는 일반적인 특성을 보였다. 아울러 본 실험에 있어서 모터의 최고 효율은 6.28 [%]로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Barth. H. V, "Ultrasonic driven motor", IBM Technical Disclosure bulletin, p.2263, 1973.
 [2] Gromakovskii. V. A, "On the possibility of using a piezoelectric motor for direct actuation of the drive shaft of a video tape recorder", Tekhnika Kino I Televideniya, pp.33-43, 1978.
 [3] Toshiiku Sashida and Takashi Kenjo, "An introduction to ultrasonic motors", pp.84-100, 1993.
 [4] Sashida. T, Kenjo. T, and Takahashi. H, "Test system designed for use in production lines of ultrasonic motors", JIEE Technical Report, pp.117-123, 1992.
 [5] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nakamura, "Ultrasonic Motors Theory and Applications", pp.1-7, p.93, 1993.
 [6] Burhanettin Koc, Aydin Dogan, Yuan Xu, Robert E. Newnham and Kenji Uchino, "An ultrasonic motor using a meta-ceramic composite actuator generating torsional displacement", Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 37, No. 10, p.5659, 1998.

[7] Takeshi Morita, Minoru Kuribayashi Kurosawa and Toshiro Higuchi "Cylindrical micro ultrasonic motor utilizing bulk lead zirconate titanate (PZT)", Jpn. J. Appl.Phys, 38, No. 5B, p.3347-3350, May 1999.
 [8] Hyeoung woo Kim, Shuxiang Dong, Pitak Laoratanakul, Kenji Uchino and Tae gone Park, "Novel method for Driving the ultrasonic motor", IEEE, Vol. 49, No. 10, pp.1356-1361, October 2002.
 [9] 우상호, 김동연, 김진수 "L1-B4모드와 L1-B8모드 초음파 선형 전동기의 특성 비교", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (C), pp.1518-1520, 2002. 7.
 [10] 이동균, 한득영, 최지원, 김현재, 윤석진 "선형 초음파 모터 설계 및 제작", 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, pp.776-778, 2003. 7.

저 자 소 개



이재형(李在炯)

1976년 10월 18일생. 2002년 창원대 전기공학과 졸업. 2002 3월~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-283-8376

Fax : 055-263-9956

E-mail : hyoung220@hotmail.com



박태곤(朴泰坤)

1954년 2월 20일생. 1976년 2월 홍익대 전기공학과 졸업. 1980년 8월 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982 2월~1987년 2월 홍익공업전문대 조교수. 1987년 3월~현재 창원대 전기공학과 교수. 1989년 12월~1991년 2월 일본 동경공대 객원 연구원. 1998년 2월~1999년 2월 미국 펜실베니아 주립대 객원교수.

Tel : 055-279-7511

Fax : 055-263-9956

E-mail : tgpark@sarim.changwon.ac.kr