

# 초음파 리니어액츄에이터 및 전동기

장 석 명

(충남대 공대 전기공학과 부교수)

## 1. 서 론

人間の 生活이 발전함에 따라 便利함을 더욱 追求하게 되며, 이로 인하여 産業工程은 물론, 사무기, 가전제품, 주거시설등 各分野의 自動化에 따라 각종 電動機나 액츄에이터등의 驅動力의 필요성은 나날이 증가해 가고 있다. 따라서 기존 구동장치의 소형, 輕量, 輕薄, 高密度化로의 改善은 물론 새로운 장치의 發明및 開發이 세계적으로 지대한 관심을 끌며 연구되고 있다.

그 중에서도 超音波電源에 의해 勵磁되어 振動하는 固定子와, 回轉子사이의 接觸摩擦에 의해 直進力 또는 回轉力을 발생시키는 超音波 액츄에이터와 電動機가 1973년 美國의 Barth에 의해 처음으로 提案되었고 1981년 日本의 Sashida가 모델을 더욱 改善시켜 제시함으로써 본격 개발 및 응용의 場을 열었다. 그후 1985년경 부터는 日本의 Matsushita社를 주축으로 괄목할만한 발전을 보이며 개발중이며 지금은 IBM社 등에서도 컴퓨터 등 여러분야에서 그 特殊한 利點을 살려 응용개발을 시도하고 있는 段階이다. 그러나 既存 電動機들이 차지하고 있는 분야로의 본격침투를 통한 응용경쟁을 위해서는 학문적인 研究와 산업계에서의 應用노력이 병행되어 지속적으로 이루어져야 만한다.

超音波 驅動장치는 기존 액츄에이터나 電動機의 原理나 構造와는 전혀 다른 형태로, 여자전류를 흘리는 倦線과 磁性體로 이루어진 磁氣回路 등의 既存

電動機에서의 필수 構成要素가 전혀 없이도 필요한 구동 토오크를 발생시키는 가장 구조가 간단한 형태이다. 즉 壓電재료에 交流電源을 인가하면 振動하는 성질을 이용하는 것으로 壓電材料를 固定子로 하고 回轉子 또는 移動子(리니어 액츄에이터의 경우)를 접촉시켜 놓고 고정자에 超音波 電源을 인가하면 상호간의 摩擦에 의하여 힘을 받게 되어 回轉子/移動子が 운동하게 되는 원리를 이용한 것이다.

이러한 構造상의 특징으로 같은 토오크를 발생시키는 기존 電動機의 1/5정도까지 얇고 가볍게 할 수 있는 등의, 특별한 우수한 利點이 있어 소형 카메라는 물론 비디오 카메라 렌즈의 自動 zooming장치, 팩시밀리 종이 移送裝置, 로봇의 서보제어장치등 特別한 분야의 驅動장치로 개발이 진행되고 있다.

그러나 超音波를 이용한 전동기나 액츄에이터의 개발이 시작된 것은 단지 수년 밖에 되지 않아, 광범한 분야에서의 응용개발을 위해서는 효과적인 구동장치로 개선을 해야 하지만 特別한 利點에 반해 아직도 여러가지로 미흡한 점이 많다. 즉 효과적인 壓電材料의 개발, 특성解析, 最適設計, 制御技術등의 연구를 통한 응용개발이 필요한 실정에 있다. 따라서 본 稿에서는 이 분야에 관심이 있는 분들에게 도움이 되고자 超音波 액츄에이터와 전동기의 기본적인 구동원리를 중심으로 하여 소개, 기술하기로 한다.

## 2. 超音波 驅動원리

超音波로 여겨지는 리니어 액츄에이터와 전동기의 驅動原理를 설명하기 위하여 아래와 같이, 直流전원을 인가하여 定在波를 발생시키는 방법, 壓電세라믹스의 구조를 적절히 하고 交流전원을 인가하므로써 進行波를 발생시키는 방법, 진행파를 이용하여 直線型/回轉型의 구동장치를 만드는 원리에 대해 기술하기로 한다.

### 2.1 定在波의 발생장치

壓電세라믹스는 본래 電氣에너지를 가하면 變形이 일어나 機械적인 에너지로 變換시키는 성질이 있다.

따라서 그림 1(a), (b)와 같이 압전세라믹스에 直流전원을 인가하면 收縮變形을 하려는 힘이 발생하게 된다.

또한 그림. 2(a)와 같이 壓電세라믹스를 얇은 層

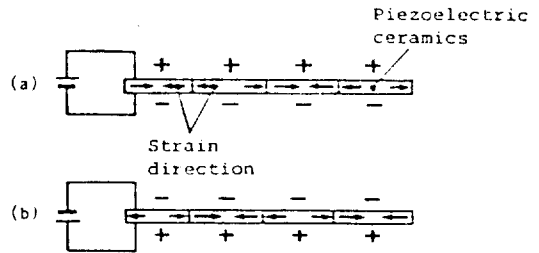


그림 1. 직류전원에 의한 압전물질의 변형력 발생

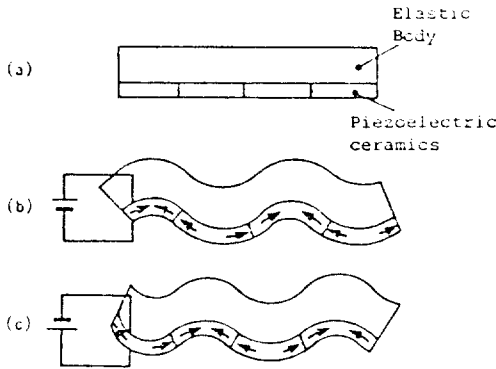


그림 2. 定在波의 발생원리 및 장치

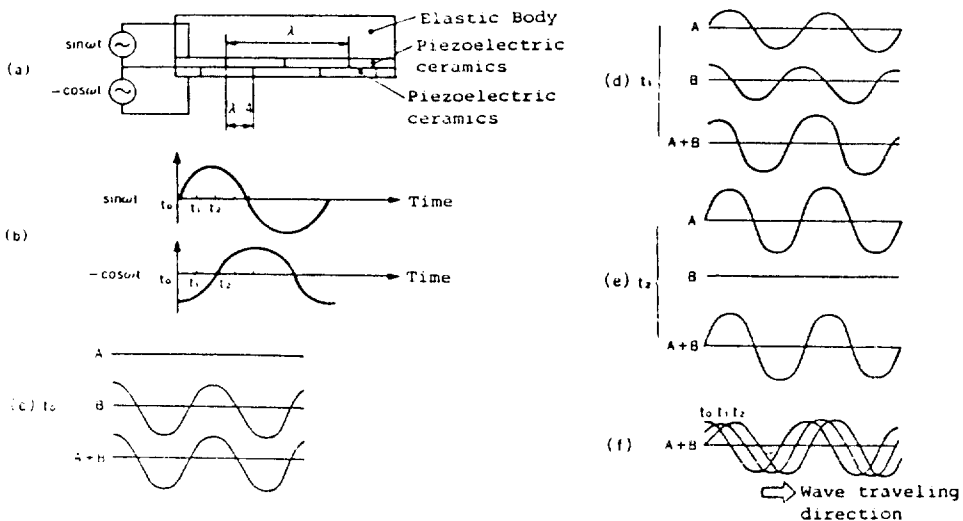
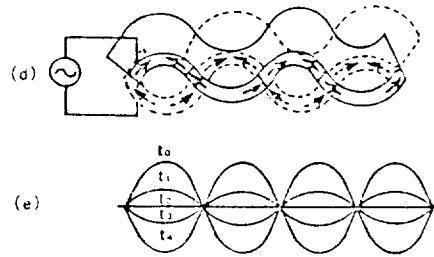
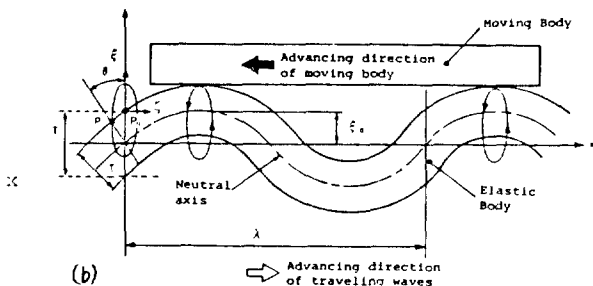
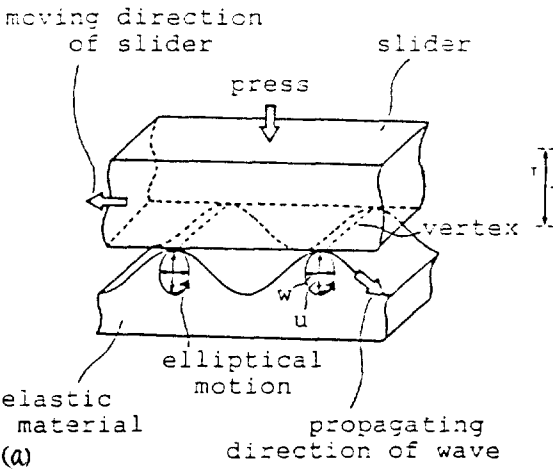


그림 3. 進行파의 발생원리 및 장치

으로 하고 그 위에 탄성체로 이루어진 또 한 층을 부착시킨 후 直流電源을 인가하면 그림. 2(b)와 같이 變形을 하게 되며, 또한 直流전원의 極性을 바꾸어 인가하면 그림. 2(c)와 같이 變形된다. 그림. 2(d)는 交流전원을 인가한 경우로 周波數에 따라 變形을 反復하게 되어 마치 벌레가 꿈틀거리듯 上下운동을 하게 된다.

### 2.2 進行波의 발생 장치

앞 절에서와 같이 定在波에 의해서는 回轉子/移動子を 橫방향으로 이동시키지 못하고 上下운동만 하게 된다. 그러나 그림. 3(a)와 같이 압전세라믹스를 2層構造로 하고 그 위에 탄성체층을 부착시킨 후 압전세라믹스의 名層에  $\sin \omega t$ 와 위상이 90도 轉移된



a : 초음파 전동기 原理  
b : 탄성체의 進行波와 直進力 발생

그림 4. 탄성체에 의한 進行波와 直進力 발생

$-\cos \omega t$ 의 교류전원을 각각 인가하면 그림. 3(c), (d), (e), (f)와 같이 進行波 移動磁界를 발생시킬 수 있다. 즉 그림. 3(e)와 같이 시간  $t_0, t_1, t_2$ 로 됨에 따라 波動이 移動하게 된다.

### 2.3 驅動原理

그림 4. (a)와 같은 압전세라믹스의 탄성체로 이루어진 固定子에 進行波를 발생시키며 移動子を 눌러 압력을 가해주면 그림 4(b)와 같은 變形에 의해 고정자와 接觸摩擦을 하며 移動子が 움직이게 되므로 리니어 액츄에이터가 된다. 이때 이동자가 타원형의 궤적으로 움직이는 과정을 구체적으로 나타내면 그림 5와 같다.

또한 그림. 6과 같이 압전세라믹스에 의한 고정자를 회전형 구조로 하고 進行波를 발생시키면 이동자가 회전하게 되는 토오르크를 발생시키게 되어 超音波 전동기가 된다. 그림. 7은 원통형 전동기의 고정자에  $\cos \omega t, \sin \omega t$ 의 교류전원을 인가하는 경우 回轉型의 波動을 만들어 회전운동을 하게하는 토오르크를 발생시킴을 보이고 있다.

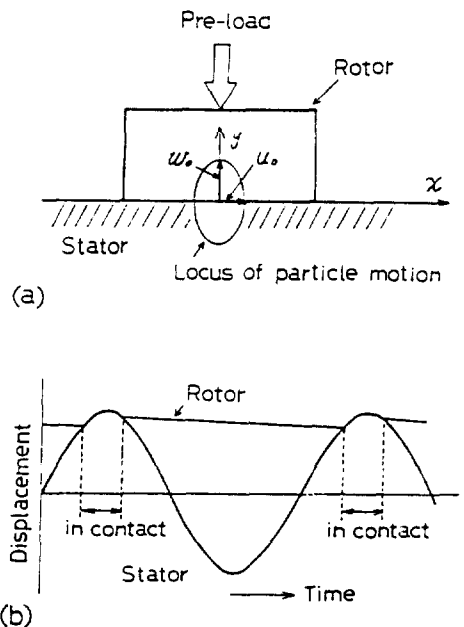


그림 5. 탄성체의 變形과 직진력 발생

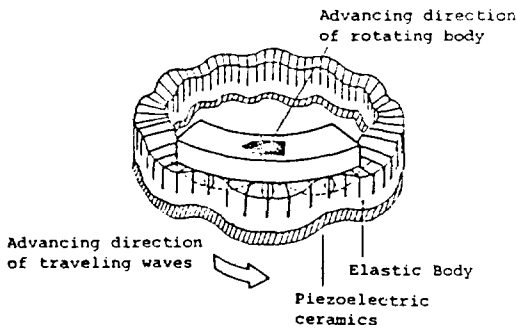


그림 6. 회전력 발생과 전동기의 원리

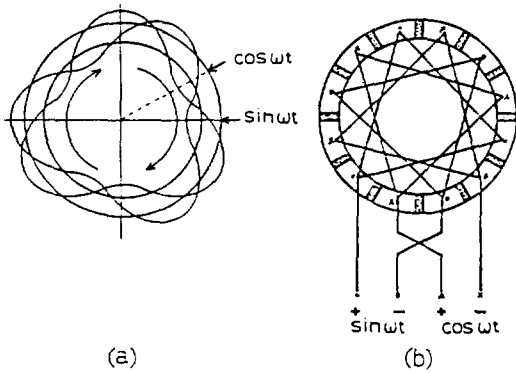
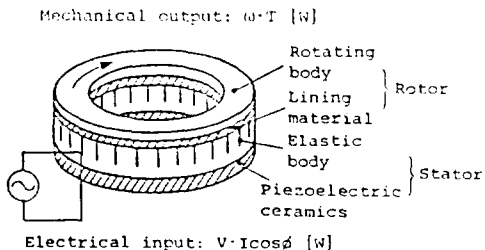


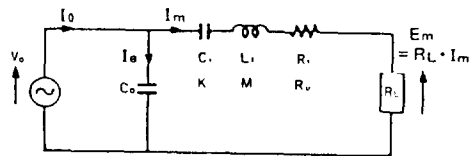
그림 7. 진행파에 의한 회전력 발생의 원리

### 3. 구조

그림. 8에서 초음파전동기의 일반적인 구조와 등가회로를 보이고 있다. 즉 고정자는 압전세라믹스와 탄성체, 회전자는 라이닝과 회전체로 구성되고 있으며 고정자에 교류를 인가하여 발생되는 토오크에 의



a: 일반적인 구조



b: 등가회로

그림 8. 초음파 전동기의 일반적인 구조 및 등가회로

해 회전함을 보인다. 또한 위와 같은 구조를 갖는 초음파전동기의 특성해석을 하는 경우 가장 기본이 되는 등가회로도 보이고 있다.

### 4. 구동 및 제어회로

초음파 리니어 액추에이터/전동기는 압전세라믹스로 이루어진 고정자에 초음파 전원을 공급하여 여자하기 때문에 구동방식이 특이하다. 따라서 초음파 전동기의 실험장치 시스템과 구동시스템의 각각의 예를 블록선도로 소개하면 그림. 9, 그림. 10과 같다.

또한 소형, 輕量이므로 기계적 慣性이 작아 高 토크를 발생시키므로 應答性이 매우 좋아 速度 및 位置의 制御시스템 驅動力 발생장치로 적합하다. 따라서 제어회로의 각각의 예를 블록선도로 나타내면 그림. 11과 같다.

### 5. 種類

초음파 전동기의 일반적인 종류는 디스크형과 링형으로 나뉘며 각각 아래의 그림. 12, 그림. 13과 같다.

### 6. 압전 세라믹스

초음파전원에 의해 진동력을 발생시키는 압전세라믹스는 일반적으로 PCM 세라믹스로 酸化鉛, 티탄 酸化鉛, 지르콘 酸化鉛이며 그림. 14와 같이 여러개의 전극으로 이루어진 디스크형으로 구성한다. 압전재료에 요구되는 것은 變換能力이 우수해야 하며, 內

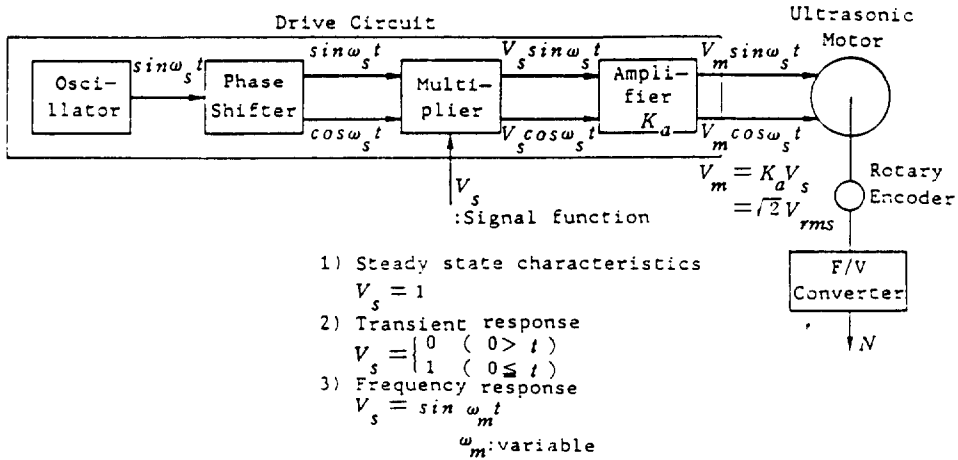


그림 9. 초음파 전동기 실험시스템의 블록선도

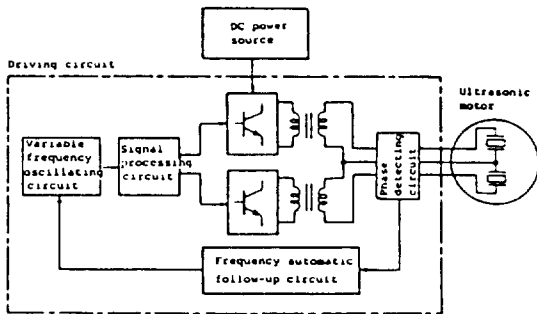
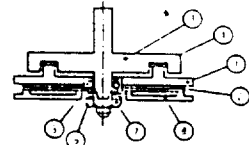
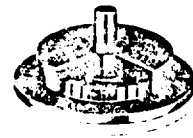


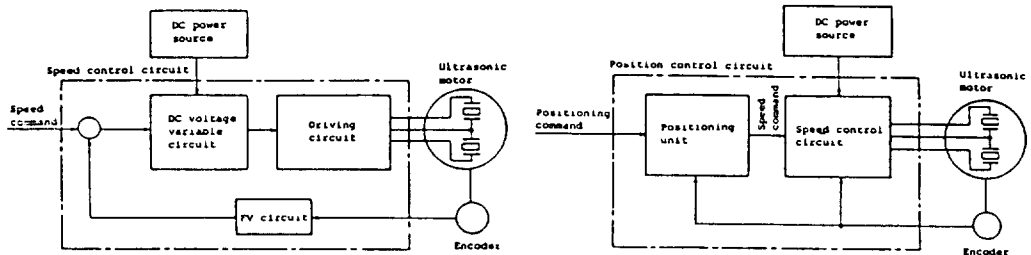
그림 10. 초음파전동기 구동회로의 블록선도

部損失이 작아야 하는 등의 특성이다. 위의 세가지 압전세라믹스의 일반적인 物性은 표 2와 같다.



① Elastic body	Stator	⑤ Bearing
② Piezoelectric ceramics		⑥ Belleville spring
③ Rotating body	Rotor	⑦ Nut
④ Lining material		⑧ Base

그림 12. 디스크 형



a : 속도제어회로

b : 위치제어회로

그림 11. 초음파 전동기 제어회로의 블록선도

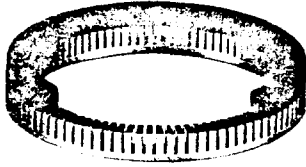


그림 13. 링형

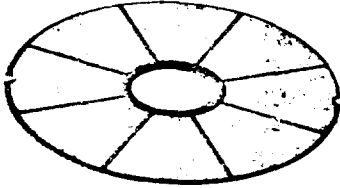


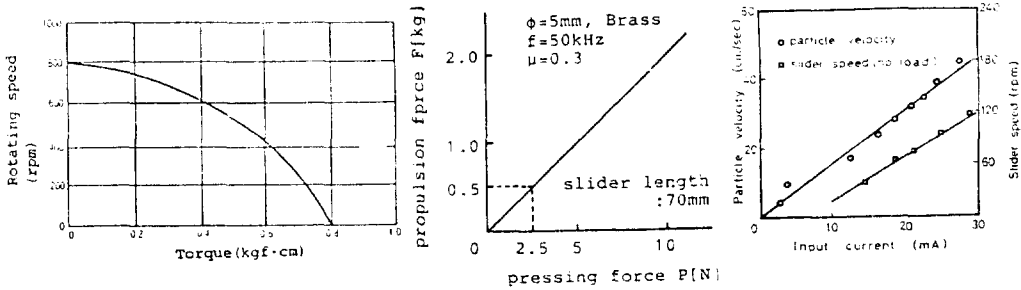
그림 14. 디스크형 압전세라믹스의 형태

## 7. 운전특성

일반적인 운전특성을 소개하면 아래의 그림, 15와 같다. 즉 토오크와 회전속도의 관계개 수하특성으로 200rpm에서 십數 rpm 근처에서도 매우 큰 토오크가 발생함을 볼 수 있으며 (a), 이종자/회전자를 누르는 壓力에 따른 특성 (b), 입력전류와 속도에 관한 특성 (c)을 각각 볼 수 있다. 또한 표. 1은 세가지 모델의 디스크형 전동기의 특성을 소개한 경우이다.

## 8. 특 징

압전 세라믹스와 탄성체로 구성되며 超音波전원으



a : 속도-토오크

b : 누르는 압력-힘

c : 입력 전류-속도


그림 15. 운전특성

표 1. 압전 세라믹스의 재료정수

		PCM-5	PCM-30	PCM-83
Specific inductive capacity	$\epsilon_{11}, \epsilon_{33}$	1900	1200	1900
Coupling factor	$K_{12}$	0.66	0.53	0.66
	$K_{21}$	0.43	0.35	0.43
	$K_{33}$	0.71	0.69	0.69
Young's modulus	$Y_{11}$ N/m <sup>2</sup>	$6.3 \times 10^{10}$	$8.5 \times 10^{10}$	$8.0 \times 10^{10}$
	$Y_{33}$ N/m <sup>2</sup>	$5.7 \times 10^{10}$	$7.0 \times 10^{10}$	$6.7 \times 10^{10}$
Piezoelectric constant	$d_{12}$ m/V	$-186 \times 10^{-12}$	$-122 \times 10^{-12}$	$-120 \times 10^{-12}$
	$d_{33}$ m/V	$423 \times 10^{-12}$	$273 \times 10^{-12}$	$351 \times 10^{-12}$
Piezoelectric constant	$g_{12}$ Vm/N	$-12.3 \times 10^{-3}$	$-11.3 \times 10^{-3}$	$-8.7 \times 10^{-3}$
	$g_{33}$ Vm/N	$29.2 \times 10^{-3}$	$25.5 \times 10^{-3}$	$20.3 \times 10^{-3}$
Poisson's ratio	$\sigma^*$	0.24	0.29	0.31
Mechanical	Q	70	2000	610

표 2. 디스크형 초음파 전동기의 특성

Model name (Conventions)				UCM-1FD	UCM-4FD	UCM-9FD
Characteristics	Frequency	kHz	1.0	2.0	4.0	
	Output Voltage	V	12	24	48	
	NO-HOLD CURRENT	mA	700	1400	2800	
Change	Starting Torque	Kilogram	0.103	0.206	0.412	
	Dimensions	mm	51.0	63.5	76.0	
	Weight	g	15	20	40	



로 구동되는 리니어 액츄에이터와 전동기는 아래와 같이 既存 장치들과는 전혀 다른 특이한 장점을 갖는다. 즉,

(1) 小型, 輕量

既存 전동기들은 여자전류를 흘리는 倦線과 磁氣回路등의 필수 구성요소로 인하여 그 크기를 감소시키는데 거의 한계점에 달했다고 본다. 그러나 超音波 전동기는 磁性體와 倦線을 필요로 하지 않는 등 構造가 단순한 특징으로, 같은 토크를 발생시키는데 既存 전동기의 1/5정도로 부터 1/10정도 까지로 얇게 薄형으로 할 수 있다.

(2) 低速에서의 高 토크

固定子와 移動子/回轉子 사이에 壓力을 크게 가하는 경우 직경이 20mm인 전동기가 3kg.cm 이상의 토크 발생이 가능하다. 즉 힘/중량 비가 80w/kg으로 일반 소형전동기의 2.5배 이상이 된다. 따라서 低速에서 高토크를 요하는 경우 既存 전동기는 기어가 필요하나 超音波 액츄에이터/전동기의 경우 전혀 불필요(Gearless)하며, 멈추고자 할 때의 토크도 매우 커 별도의 장치가 필요 없다(Brakeless).

(3) 速度 및 位置制御의 우수성

直流電動機 이상으로 速度 및 位置의 제어성이 우수하여 精密制御가 가능하며 코킹 토크가 발생치 않는다.

(4) 制御의 應答性

크기에 비해 토크가 크고, 既存 전동기에 비해 회전자 慣性이 매우 작으므로 應答성이 數 ms 정도

로 迅速하여 서보 制御系統에 매우 유리하다.

(5) 磁氣적 騒音

既存의 전동기와 같이 磁性體나 倦線을 전혀 사용하지 않기 때문에, 磁氣的인 騒音이 전혀 없으며, 또한 強磁界속에서도 구동이 가능하다.

9. 응용

위에서 설명한 바와 같이 既存의 전동기보다 小型으로 얇게 제작이 가능하며 低速에서 高 토크를 발생시킬 수 있고 位置와 速度제어의 應答성이 매우 좋은 등의 특징으로 현재 아래와 같은 분야에서의 應用, 開發이 시도되고 있으나 앞으로 그 범위가 매우 넓어 질 것으로 전망된다.

- (1) 소형 카메라나 비디오 카메라 렌즈의 自動 zooming장치
- (2) 산업용 로봇의 서보장치
- (3) 팩시밀리나 컴퓨터 프린터의 自動 종이 移送 장치
- (4) 초음파 드릴링, 초음파 진동자
- (5) 사무기(OA), 주택 편의시설(HA), 공장 자동화(FA), 오디오/비디오 등 특별한 구동장치가 필요 되는 곳 등.

10. 앞으로의 연구과제

초음파 리니어 액츄에이터/전동기의 개발이 본격

적으로 시작된 것은 단지 數年 밖에 지나지 않는다. 따라서 개발, 응용 역사가 긴 기존의 전동기들과 경쟁을 하기 위해서는 아래와 같은 과제들을 중점으로 하여 학문적인 연구와 산업계에서의 응용능력이 병행되어야 한다.

(1) 재료

- 고정자와 이동자/회전자 사이 접촉면의 라이닝의 안정성과 수명연장을 위한 관점에서 效果的인 材料의 개발.
- 大出力 전동기의 개발을 위하여는 기계적인 힘을 크게 할 수 있는 압전재료의 개발.

(2) 특성해석

- 현재는 超音波 리니어 액츄에이터/전동기의 실제응용이 부분적으로는 이루어지고 있으나 運轉特性的의 理論的 解析이 매우 어려워 이 분야의 연구는 전혀 이루어지지 않은 형편이다. 따라서 전동기의 高効率化를 위해서는 우선적으로 토오크, 効率, 出力등의 운전특성의 해석이 이론적,

실험적으로 이루어져야만 한다.

- 損失, 振動특성의 해석을 통한 最適 構造設計가 이루어져야 한다.

(3) 제어기술

안정된 주파수의 자동 추적회로와 超精密, 超高速 應答回路의 개발이 이루어져야 한다.

## 11. 結 論

超音波 리니어 액츄에이터/電動機는 既存의 장치들과는 驅動原理나 構造가 전혀 다르다. 즉 압전세라믹스와 탄성체로 구성된 固定子에 超音波 電源을 인가하여 振動하게 하므로써 接觸摩擦에 의하여, 移動子/回轉子를 움직이게 하는 超音波 전동기의, 구동원리 및 기본 운전특성, 특징, 응용분야 등에 관하여 소개, 기술하여 이 분야에 관심있는 이들에게 도움이 되도록 하였다.