

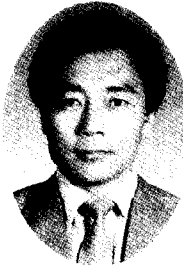
초음파 액츄에이터의 특성 및 기술동향



이능현
경원대 공대 전자공학과 교수



이덕출
인하대 공대 전기공학과 교수
겸 학장, 대한전기학회 회장



이상훈
대전전문대학 전기과 교수



김용혁
경원전문대학 전기과 부교수

고⁽¹⁾ 이후 1976년 소련의 V.V Lavrinenko에 의한 보고가 있었으나⁽²⁾ 어느것도 아이디어로서의 수준을 벗어나지 못한 상태였다고 할 수 있다. 1980년대가 되면서 초음파 액츄에이터의 실용화를 위한 연구가 본격적으로 이루어지기 시작하였으며 시작품이 최초로 보고된 것은 1982년 일본의 유비다(指田)에 의해서였다⁽³⁾

이후 특히 일본의 여러 기업 연구소를 중심으로 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되어 부분적으로는 종래의 전자(電磁)식 액츄에이터의 성능을 능가하는 초음파 액츄에이터가 회전형 모터의 형식으로 선을 보이기 시작했다.

그 결과 1986년에는 진행파 방식의 초음파 모터⁽⁴⁾와 에너지 효율성이 좋은 비틀림 진동평형 초음파 모터⁽⁵⁾가 거의 비슷한 시기에 상품화를 위한 시작품으로 제시된 바 있으며 금후 이들에 대한 연구개발은 더욱 급속도로 진행될 전망이다.

현재 연구개발되고 있는 초음파 액츄에이터의 구동방식은 크게 나누어 정재파 구동방식과 진행파 구동방식으로 구분될 수 있다.

정재파 구동방식은 에너지 변환 효율이 높은 장점이 있지만 회전방향이 한쪽으로 한정된다는 결점이 있다. 반면에 진행파 구동방식은 양방향 회전이 가능하여

1. 초음파 액츄에이터의 연구동향

초음파 액츄에이터라고 하면 종래의 대출력 초음파 발생소자로서 이용되어 왔던 전왜진동자나 자왜진동자를 스테이터(stator : 고정자)로 이용하고 이들 진동자로부터 발생하는 기계적 진동 에너지를 스테이터와 접촉되어 있는 로-터(rotor : 운동자 또는 회전자)에 전달하여 로-터에 기계적 변형이 발생되도록 함으로써 액츄에이터로서의 기능을 갖게 하는 에너지 변환소자의 일종이라 할 수 있다.

따라서 초음파 액츄에이터의 에너지원은 음파가 아닌 진동에너지가 된다. 초음파 진동자의 아이디어는 1973년 미국의 H.V Barth에 의한 IBM의 기술보고서에서 언급된 것이 최초의 것이었

서-보용 액츄에이터로서의 이용 가능성이 있는 장점이 있지만 에너지 변환 효율이 그다지 높지않은 결점도 있다.

초음파 액츄에이터는 회전운동형 이외에 직선운동형의 것도 있지만 그 특색면에서는 회전운동형과 크게 다르지 않다. 초음파 액츄에이터를 전자식 액츄에이터와 비교할 때 가장 큰 이점은 저속운전시에도 높은 에너지 변환 효율이 얻어지고 있다는 점이다.

그러나 초음파 액츄에이터는 일종의 마찰전도형이라 할 수 있기 때문에 그 출력파워에 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 전자식 액츄에이터중에서 소형모타와의 경합이 치열해질 것으로 전망된다.

2. 정재파와 진행파의 발생기구

(1) 정재파 발생기구

그림 1-(a)와 같이 분극방향이 교대로 바뀌도록 압전세라믹스의 작은 시편을 일렬로 배열시킨 구조로 된 평판세라믹스에 (b)와 같은 극성의 전압을 인가하면 각 시편마다 늘어나거나 줄어드는 것이 교대로 나타나는 변형(歪)이 발생된다. 또한 (c)와 같이 전압의 극성을 반대로 하여 인가하면 각 시편마다 변형(歪)방향도 반대로 된다.

이러한 압전세라믹스에 그림 2-(a)와 같이 한면에 탄성체를 덧붙인 다음 압전세라믹스에 전압을 인가해서 변형을 발생시키면 그림 (b)에서 보는 것처럼 탄성체에는 압전세라믹스의 작은 시편이 늘어난 측은 골(골짜기)이 되고 줄어든 측은 산(마루)이 되는 굴곡변형이 발생한다. 그림 (c)와

같이 압전세라믹스에 인가하는 전압의 극성을 반대로 하게 되면 탄성체에 발생하는 굴곡변형의 모양도 반대로 나타나게 된다. 또한 그림 (d)와 같이 압전세라믹스에 교류전압을 인가하게 되면 탄성체에는 정재파가 발생하게 되는데 정재파란 그림 (e)와 같이 마디 부분은 항상 고정점이 되고 그 외의 장소에서는 반복적으로 상하운동이 계속되는 파형을 의미한다.

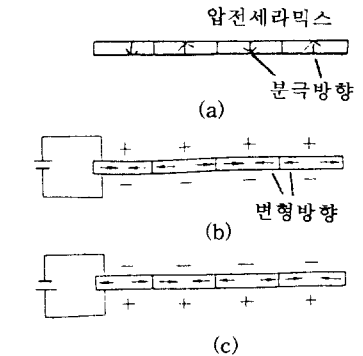


그림 1. 압전세라믹스의 변형

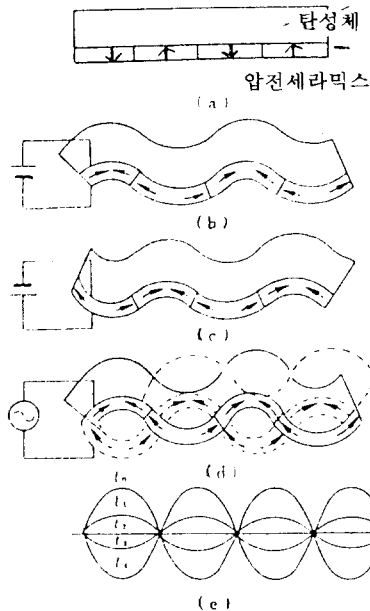


그림 2. 정재파 발생기구

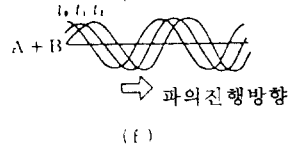
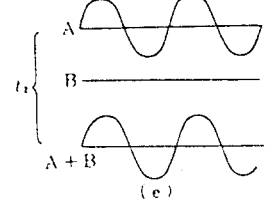
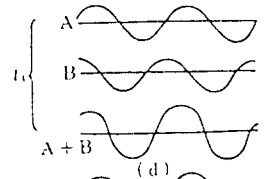
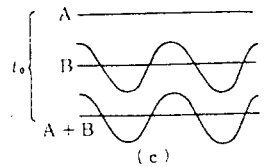
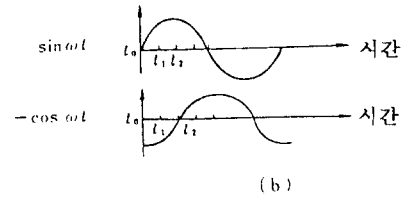


그림 3. 진행파 발생기구

(2) 진행파 발생기구

진행파는 정재파를 조합하여 발생시킬 수 있다. 그림 3-(a)에 보이는 것처럼 탄성체에 2매의 압전 세라믹스판을 1/4파장씩 교대로 엇갈리게 접착시키는 구조로 만든다. 즉, 기계적으로 90도씩 엇갈리게 해서 세라믹스판을 접착시킨 다음 각각의 세라믹스에 그림 (b)와 같이 90도 위상차

가 있는 교류전압을 인가한다.

이렇게 하면 2매의 압전세라믹스 A, B는 각각 그림 (c), (d), (e)에 보이는 것처럼 90도 위상차가 나는 정재파 진동을 하게 된다.

이때 탄성체는 정재파 A, B의 합성파의 형태로 진동하게 되고 그 결과 그림 (f)에서 보는 것처럼 시간에 따라 진행되는 진행파가 된다.

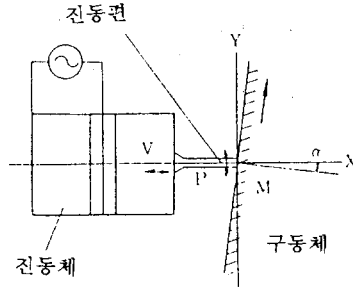


그림 4. 스러스트 진동편 구동방식의 원리

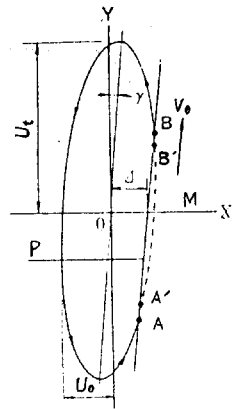


그림 5. 진동편 첨두의 운동

3. 초음파 액츄에이터의 구동원리

(1) 정재파에 의한 구동원리

(a) 스러스트(thrust)진동편에 의한 구동

유비다가 제안한 구동방식으로 이 액츄에이터의 기본구성은 그림 4와 같다. 동그림을 보면 초음파 진동자 V와 진동편 P로 구성되는 스테이터와 로터인 회전원판 M으로 구성되고 있다. 회전원판과 진동편의 첨두는 회전원판의 원주상에서 접촉되도록 구성되어 있고 진동편의 길이방향과 법선방향과는 각도 α 만큼 기울어져 있다.

이제 X-Y좌표의 원점을 진동편 P의 첨두로 하고 진동편의 길이방향을 X축, 그것과 직교하는 방향을 Y축으로 한다. 또한 진동편은 탄성체이고 그 진동방향은 X축 방향이 된다. 회전원판과 그 회전축은 강체이고 진동편으로부터의 진동력에 의해 변형되지 않는 것으로 한다.

이상과 같은 구성에 있어서 진동편을 진동자에 의해서 진동시키는 경우의 진동편 P의 첨두 부분의 운동은 그림 5와 같다.

즉, 진동편 P는 강체인 회전원판이 있기 때문에 그 첨두가 A

에 접촉하면 동시에 압축응력을 받아 굽어지게 된다. A→B사이에서는 굽어진 상태로 그 첨두 부분이 회전원판의 회전운동에 따라 움직이고 진동편이 X축의 역방향으로 운동한 것에 수반하여 B점에서 이탈하게 된다. B→A간은 진동편 첨두의 자유운동 구간이 된다. 이상이 진동자 진동의 진동의 1주기간에 대한 진동편 첨두의 운동이며 다음 주기 이후는 같은 상태의 운동을 반복하게 된다.

이 구동방식은 단적으로 말하면 기다란 봉으로 물밀을 비스듬히 썰러 넣으면서 배를 추진시키는 즉, 노를 저어 배를 추진시키는 원리와 유사하다고 할 수 있다. 유비다의 보다 상세한 해석에 따르면 그림 5에 있어서의 A-A'간은 진동편첨두가 회전원판과의 마찰력에 의해서 상승작용을 일으키기까지의 가속구간이며 B-B'간은 그 마찰력의 감소로 인해 야기되는 감속구간이다. 그림 6은 이 때의 상태를 나타내는 위상평면상의 궤적을 보여준다.

v_y 는 진동편 첨두의 Y방향속도 성분이며 ω 는 회전원판의 각속도이다. 이와같은 구동원리는

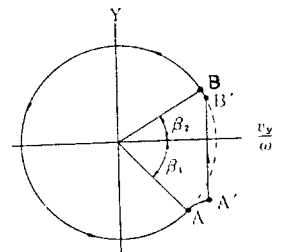


그림 6. 진동편 첨두운동에 대한 위상평면상의 궤적

유공압분야에서 오래전부터 이용되고 있는 axial plunger형 액츄에이터의 원리와 거의 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 이 구동방식에 있어서의 구동 토크를 그림 7에 의해 설명하면 다음과 같다.

이제 진동편에 의한 X방향의 힘을 F_x 라하면 회전원판의 접선 방향의 힘 F_t 는

$$F_t = F_x \sin \alpha \cdot \sin \theta \quad (1)$$

이 된다. 여기서 α 는 회전원판의 경사각, θ 는 회전원판원주상의 위치각이다. 또 F_x 는 진동편의 스피링상수를 K_0 로 하고 X방향의

변형(歪)을 ΔX 로 하면

$$F_x = K_0 \Delta X \quad (2)$$

로 된다. 따라서 F_t 는

$$F_t = K_0 \Delta X \sin \alpha \cdot \sin \theta \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 결국 구동 토크 T는

$$T = F_t r = r K_0 \Delta X \sin \alpha \cdot \sin \theta \quad (4)$$

로 된다. 여기서 r는 회전원판 중심과 진동편 첨두까지의 거리이다. 또, ΔX 는 진동자의 발진각주파수 ω 의 함수이다.

이러한 형의 액츄에이터는 그 기구면에서 볼 때 역회전이 불가능하다고 여겨지지만 유공압에 있어서의 axial plunger형 모터에서는 정·역의 회전이 가능하다. 예를들어 θ 를 180도 돌려놓은 위치에 또하나의 독립된 진동자와 진동편을 놓음으로써 원리적으로는 가능하다고 할 수 있다. 큰 토크를 얻고싶을 때는 식(4)에 의해 분명한 것처럼 θ 를 90도로,

r, α 는 크게하여 즉, 회전원판의 회전중심으로부터 가능한 한 떨어진 위치에서, Y축에 수직인 X축을 포함하는 면상에 진동편첨두의 접촉위치를 두고, 가능한 한 회전원판의 경사를 크게 하는 것이 바람직하다. 스러스트 진동편 방식에 있어 가장 큰 문제점은 진동편첨두와 회전원판과의 마찰에 의한 마모문제라 할 수 있다. 이 때문에 현재로서는 이 방식을 채용하여 실용화하는 문제는 그리 쉬운일은 아닌 듯 싶다.

(b) 비틀림 진동편에 의한 구동

이 진동방식에 의해 회전원판

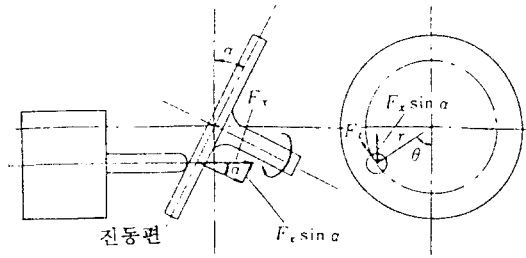


그림 7. 구동토크의 발생원리

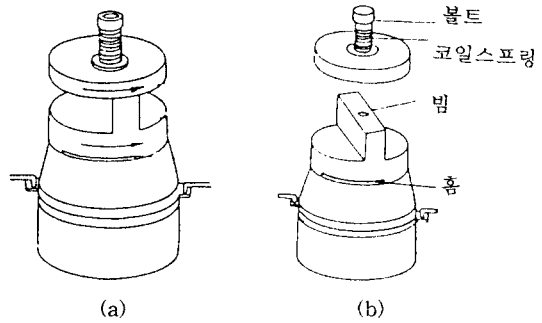


그림 8. 비틀림 진동편형 액츄에이터의 구성

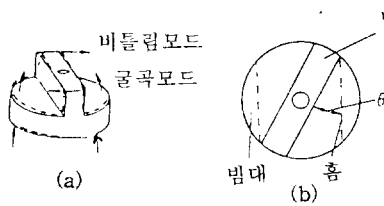


그림 9. 비틀림진동의 발생

에 회전토크-를 부여하는 기본적인 원리는 앞의 스러스트 진동편의 경우와 아주 흡사하다.

즉, 회전원판의 원주상 근방에서 타원진동을 일으킴으로써 접선방향의 힘을 만들어 낸다.

이 방법에서는 매우 교묘한 방법으로 타원진동을 얻고 있다. 그림 8은 비틀림 진동편형 액츄에이터의 구성을 보여주고 있다. 여기서의 진동자는 종진동형의 것이지만 그림 9의 비틀림 진동편을 이용함으로써 종진동 모-드를

원판의 진동부분인 접촉부에서 비틀림 모-드로 변환시키고 있다. 비틀림 진동편은 가마솥 뚜껑과 비슷한 형상을 하고 있고 그 손잡이 부분(beam)이 비틀림 진동을 일으키는 부분으로서 회전원판(로-터)과 접촉하면서 구동력을 발생시킨다. 이 구동력을 발생시키는 기구에 있어서 가장 독특하고 중요한 부분은 그림 10의 분해도에서 볼 수 있는 것처럼 진동편의 밑부분 하부면에 얇게 파여져 있는 홈이라 할 수 있다. 이제 이 진동편 바닥면의 중심만을 본다면 볼트와 같은 장치로 고정시키고 그 중심 이외의 부분을 밑으로부터 밀어올리도록 하는 구조로 되어있다.

즉, 진동편 중심부분을 고정시킨후 밑으로부터 종모-드의 힘을 가하는 것이다. 그렇게 되면 진동

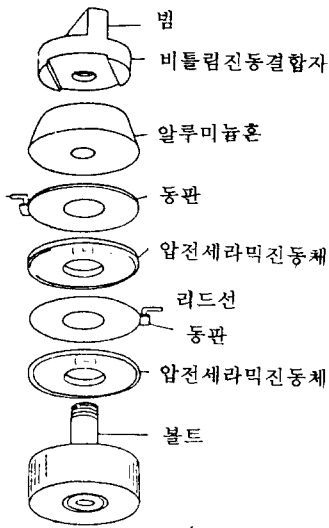


그림 10. 구동부의 분해도

편은 밑면 홈의 중심선을 축으로 하여 경첩이 접착되는 모양과 유사한 변형이 일어나게 된다. 그림 9에 이 변형모습(점선)을 보이고 있다. 종모-드의 밑으로부터의 힘에 의해서 굴곡모-드변형이 일어나도록 하는 셈이다. 그러나 진동편의 상부에는 홈의 중심에 대해 θ 만큼 기울어진 위치에 빔이 존재하고 이 부분에 있어서는 두께가 크게 다르기 때문에 굴곡모-드변형은 일어나지 않는 상태에서 빔부분은 비틀림변형이 일어나게 된다.

이것이 비틀림모-드변형의 발생원리라 할 수 있다. 그림 8-(a)에서 보는 것처럼 로-터인 회전원판을 코일 스프링을 이용하여 적당한 압착력이 발생되도록 빔부분에 볼트로 조여 놓으면 빔부분에서 비틀림모-드변형이 회전원판에 마찰력을 매개로하여 접선방향의 힘으로서 전달된다. 따라서 진동편 밑부분에 종 진동력을 가해주면 굴곡모-드가 발생하

는 구동기간과 굴곡모-드가 발생하지 않는 비구동기간이 진동반주기마다 나타나, 방향은 다르지만 결국 스러스트 진동편의 경우와 아주 흡사한 타원진동이 형성된다. 단, 빔의 상단면에 발생하는 비틀림 진동의 진폭은 빔의 바깥둘레 부분에서 최대가 되고 중심부에서는 영이되며 중심을 통과하면 진동의 위상이 역전된다.

(2) 진행파에 의한 구동원리

탄성체에 진행파가 여진되어 그림 11의 (a)→(b)→(c)→(d)→(e)와 같이 파가 진행되어가는 도중 탄성체 표면의 어느 한 점a에 주목하면 그 점은 그림에서 보는 것처럼 a→b→c→d→a의 순서로 움직이게 된다. 이 움직임을 합성하면 그림 (f)에 보이는 것처럼 진행파가 진행하는 방향과는 역방향으로 타원궤적이 그려지는 것을 알 수 있다. 이제 진행파가 여진되고 있는 탄성체 윗면에 그림 12와 같이 이동체를 얹어놓으

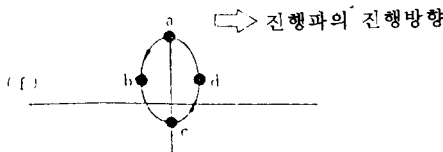
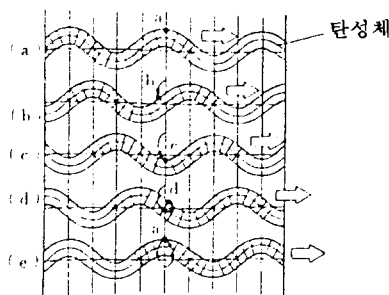


그림 11. 진행파에 있어서의 구동력의 타원궤적

면 이동체와 탄성체간의 마찰력과 타원진동력에 의해 이동체는 진행파가 나아가는 방향과는 역방향으로 움직이게 된다. 또 그림 13에서 보는 것처럼 탄성체를 링의 형상으로하고 진행파를 반시계방향으로 진행시키면 그 위의 회전체는 진행파의 방향과는 반대인 시계방향으로 회전한다. 회전체의 회전방향을 바꿀때에는 진행파의 진행방향을 바꿈으로써 가능하게 되는데 이를 위해서는 앞에서의 압전세라믹스 A, B에 가해지는 교류전압의 위상차가 반대로 90도씩 차가 나도록 해주면 된다.

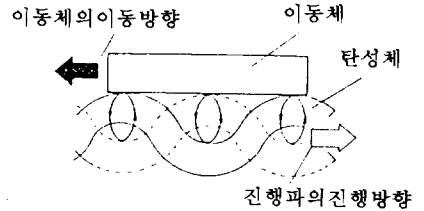


그림 12. 진행파의 구동원리

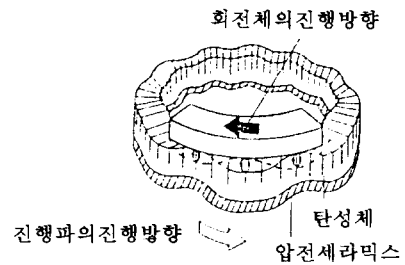


그림 13. 회전구동원리

참고 문헌

1. H. V. Barth : Ultrasonic Driven Motor, IBM Tech. Disclosure Bulletin, Vol. 16, No.7, P. 2263 (1973)

2. V. V. Lavrinenko, V. S. Vishnevski & I. A. Kartashev ; Bullentin of Keiv Polytechnical Institute Series, Radio-Electron, Vol. 13, P. 57 (1976)
3. 指田年生 : 超音波驅動モ-タの試作 - 原理の理論および實驗的 檢討 - 応用物理, 第五卷第六号, P. 713 ~ 720 (1982)
4. 松下電器産業モ-タ事業部 : 超音波モ-タ, ナショナル技術資料 (1986)
5. A. Kumada : Piezoelectric Ultrasonic Motor, Proc. 6th IMF, PP. 779 ~ 741 (1985)
6. 高森年 : ニュ-アクチュエ-タの原理と特性, 日本 ロボット學會誌, 第四卷 第五号, PP. 560 ~ 567 (1986)
7. 熊田明生 : 超音波モ-タとメカトロニック・フィ-ドバック, 応用機械工學, 10月号 (1986)

< 김진수 위원 >