

FEM을 이용한 endcap 형상이 변형된 풍차형 초음파 모터의 특성연구

이재형, 박태곤, 김명호
창원대학교

A Study on the Characteristics of Windmill Type Ultrasonic Motor with Changed Endcap Shape Using FEM

J.H.LEE T.G.PARK M.H.KIM
Changwon National University

Abstract - In this paper, we proposed windmill type ultrasonic motor which has modified shape of Endcap. The motor was especially designed by FEM for high speed. As results, displacements of the windmill and the clover type motor was compared. Using clover type motor, more smooth rotation of rotor was achieved. If Z component of the displacement of the clover type motor can be applied for linear motor.

1. 서 론

초음파 모터란 압전 세라믹에 고주파 전원을 인가하여 압전 역효과에 의해 진동하는, 압전 세라믹의 진동을 이용한 액추에이터를 말한다. 1880년 큐리형제에 의해 압전효과가 발견되어 압전의 역사는 오래되었지만 초음파 모터의 응용은 부진하였다. 그러나 기존의 전자기식 모터의 단점들이 부각되고 양질의 압전재료가 개발되면서 최근 10년간 초음파 모터의 개발이 매우 활발하다.

본 논문은 많은 종류의 초음파 모터 중에서도 모터의 소형화에 적합한 장점을 가지고 있는 풍차형 초음파 모터에 관해 연구하였다. 풍차형의 기원은 moonie형 액추에이터이다. 최초 moonie형이 개발되었으나 제작 상에 단점이 있었다. 이를 보완해 slymbal형이 개발되어 제작이 비교적 용이하고 더 큰 진동변위를 얻게 되었다. 그 후 slymbal형의 금속 endcap에 슬롯을 내어 비틀림 변위를 얻게 되었고, 이를 이용해 개발된 회전모터가 windmill형 즉 풍차형이다. 원판형 또는 원환형의 압전 세라믹 한 장과 endcap을 이루는 금속, 그리고 베어링으로 구성된 풍차형 초음파 모터는 그 구조가 매우 간단하여 소형모터로서 아주 유리한 위치를 차지하고 있다. 그림 1의 (a),(b),(c)는 각각 이들의 모습을 보여준다.

본 논문에서는 기존에 제시된 풍차형 초음파 모터에서 endcap의 형상을 변형하여 특성을 개선하고자 하였다. 개선된 endcap의 형상은 마치 clover와 유사하다. 본 연구는 유한요소해석을 이용하여 모터의 핵심인 고정자의 특성해석을 주로 하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

풍차형 초음파 모터는 원판형 또는 원환형 압전 세라믹의 경방향 진동을 이용하여 회전운동을 발생하는 모터이다. 본 논문에서는 원환형을 모델로 한다. 그림 2는 원환형 압전 세라믹의 진동에 대한 변형형상을 보여주며 분극의 방향은 전극과 수직하다. 교번전계가 인가되면 그림과 같이 수축과 팽창을 반복한다. 풍차형 초음파 모터에서 회전자의 회전은 압전 세라믹이 수축할 때 발생하며, 이 때 원주상의 모든 점들은 원의 중심을 향하여 변위한다. 압전 세라믹이 팽창할 때는 회전자의 동작은 없으므로 모터의 동작은 간헐적이라고 말할 수 있다.

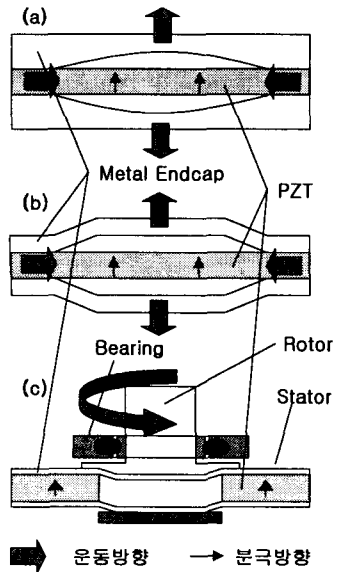


그림 1. (a) moonie형 액추에이터, (b) slymbal형 액추에이터, (c) windmill형(풍차형) 초음파 모터

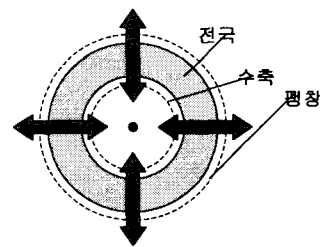


그림 2. 원판형 압전 세라믹의 진동

2.1.1 초기의 풍차형 초음파 모터

풍차형 초음파 모터의 초기 모델은 그림 1의 (c)와 같다. 금속으로된 endcap의 형상이 풍차와 같으며 그림 3에 나타내었다. endcap의 슬롯이 원인이 되어, 압전 세라믹이 수축할 때 leg가 한 쪽 방향으로 비틀어진다. 회전자는 비틀림이 발생하는 leg와 적당한 압력으로 접촉하고 있으므로 결국 접촉면에서의 마찰에 의해 회전한다. 실질적인 회전자의 운동은 간헐적이거나 초음파대의 주파수를 갖는 교번전계가 인가되면 외부에서 관측한 회전자의 회전은 연속적이다.

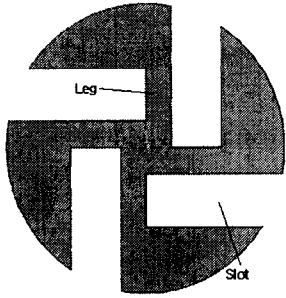


그림 3. 초기의 풍차형 초음파 모터의 endcap

본 모델은 Kenji Uchino(펜실베이니아 주립대학)에 의해 제안되어 초소형 모터로 개발되었다. 하지만 회전자의 지지를 위해 leg를 구부려야하며, 구부러진 leg와 회전자가 조화를 이루어야하는 제작상의 어려움을 가지고 있다.

2.1.2 회전자 삽입 방식의 풍차형 초음파 모터

역시 펜실베이니아 주립대학에서 기존의 endcap의 형상을 변형하여 새로운 풍차형 초음파 모터가 제안되었다. 이는 회전자를 endcap의 중앙에 삽입하는 방식으로 그림 4.에 변형된 endcap의 형상을 나타내었다. 기존의 풍차형 초음파 모터는 그림 3.과 같이 endcap 자체가 풍차의 형상을 가지고 있으나 새롭게 제안된 모델에서는 원판형 endcap에 풍차형상의 구멍을 낸 모습이다. 그리고 새로운 모델에서 회전자의 회전은, 압전 세라믹이 수축할 때 발생하는 leg의 비틀림과 회전자 사이의 마찰을 이용하는 종전의 방식과는 달리, 회전자가 leg들 사이에 삽입되어 비스듬한 각도에서 leg에 의해 충격을 받아 회전을 발생하는 방식이다. 이는 마치 당구공의 한 접이 큐대에 의해 충격을 받아 회전하는 방식과 유사하다. 본 모델에서는 leg를 구부려야하는 제작상의 번거로움을 해소할 수 있고, 회전자를 삽입하는 방식으로 인해 또 다른 응용을 기대할 수 있다.

그러나 그림 2.에서와 같이 원환형 압전 세라믹이 수축할 때 원주상이 모든 점들은 원의 중심방향으로 변위하기 때문에 실질적인 leg의 움직임은 벡터①을 따른다. 벡터①은 벡터②와 벡터③으로 분해되고, 벡터②에 의해 회전자는 회전하게 되며 벡터③은 오히려 회전을 저지하는 결과를 초래한다.

본 논문에서는 결국, 벡터③성분을 최소화하여 회전자의 회전을 더욱 원활히 하는데 연구의 초점을 모았으며, 이는 leg의 위치 변화로 실현할 수 있었다.

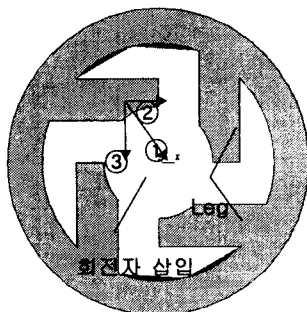


그림 4. 회전자 삽입 방식의 endcap 형상과 leg의 변위

2.1.3 leg 위치의 수정 (4엽 클로바)

그림 5.(a)에 수정된 leg의 위치를 가지는 endcap의 모습을 나타내었다. 그림 4.에서의 벡터③성분을 제거하기 위하여 leg를 반지름을 나타내는 선상에 위치시킨다. 이로 인해 leg는 원주상의 모든 점들과 같이 압전 세라믹이 수축할 때 원의 중심방향으로 변위하게 된다.

하지만 이와 같은 구조에서는 leg가 회전자에 충격을 가할 뿐 회전을 발생할 수 없다. 회전자의 회전을 위해서 반지름을 중심으로 대칭적인 leg의 절반을 제거한다. 그리하여 leg는 회전자의 회전을 유발시키며 벡터③ 성분을 최소화하여 기존의 모델보다 회전자의 회전을 더욱 원활히 할 수가 있다. 이를 그림 5.(b)에 나타내었으며, 수정된 leg의 위치로 인해 풍차형의 endcap형상은 마치 4엽 클로바와 같은 모습을 갖추게 되었다. 앞으로 본 논문에선 구별의 편의를 위해 기존의 endcap 형상을 갖는 모터를 풍차형, leg 위치가 수정된 endcap 형상을 갖는 모터를 클로바형이라 칭하기로 한다.

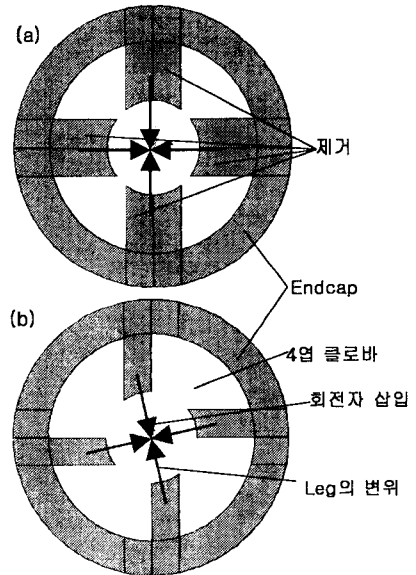


그림 5.(a) 수정된 leg의 위치를 갖는 endcap
(b) leg의 절반을 제거한 최종적인 endcap

2.2 유한요소해석

이론적 배경에서 이상적인 endcap의 형상을 결정되었고, 이를 모델로 하여 유한요소해석을 통해 기존의 모델과 비교하였다. 해석에는 'ANSYS'가 사용되었다. 풍차형 초음파 모터의 동작은 고정자에 의해 결정되기 때문에 고정자만이 해석의 모델이 되었다. 아울러 압전 세라믹과 endcap사이의 접촉층은 모터의 기계적인 특성의 변화요인이지만 비교하려는 두 모델의 공통적인 조건이므로 생략하였다.

2.2.1 모델링

ANSYS에서는 요소의 유형을 설정해야한다. ANSYS는 3차원 압전 해석 시 진동의 원체가 되는 압전 세라믹은 solid5, endcap과 같이 압전 세라믹의 진동이 전달되는 탄성체는 solid45 라는 요소의 유형을 권장하고 있으며 본 논문에서도 그대로 적용되었다.

그림 6.의 (a)와 (b)는 해석에 사용된 두 모델의 모습을 보여준다. 표 1.에서 해석에 사용된 압전 세라믹과 알루미늄 재질을 갖는 endcap의 재료물성치를 나타내었고, 표 2.에서는 모델의 치수를 나타내었다.

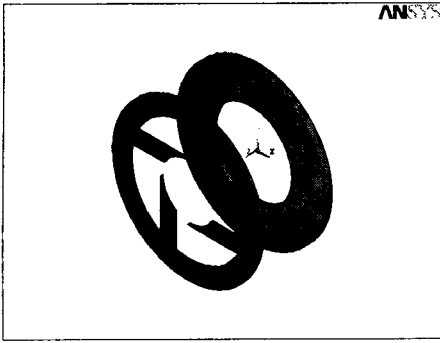


그림 6.(a) 풍차형 초음파 모터의 모델링

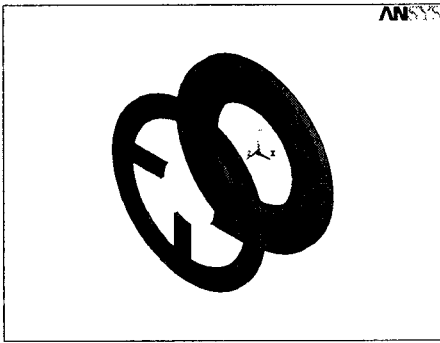


그림 6.(b) 클로바형 초음파 모터의 모델링

표 1. 재료물성치

재료	밀도 [kg/m ³]	유전율 [F/m]	탄성 계수 [N/m ²]	포와송비
압전 세라믹	7730	8.7969 e+09		
알루미늄	2690		7.03 e+10	0.345

표 2. 모델의 치수

재료	내경 [mm]	외경 [mm]	두께 [mm]	Leg폭 [mm]
압전 세라믹	3	5.5	0.5	
알루미늄 Endcap		5.5	0.2	1

2.2.2 모드 해석 의한 공진주파수

모드 해석에서 고정자의 여러가지 고유진동모드에서의 고유진동수를 구할 수 있다. 이 때 원하는 진동모드에서의 고유주파수가 해석하려는 대상의 공진주파수가 되고, 이 주파수는 조화응답 해석에서 그대로 적용된다.

그림 7.(a),(b)는 모드 해석의 결과로서 고정자의 공진주파수를 나타낸다. 풍차형은 122.374[kHz]의 공진주파수를 가지며, 클로바형은 121.327[kHz]의 공진주파수를 가진다.

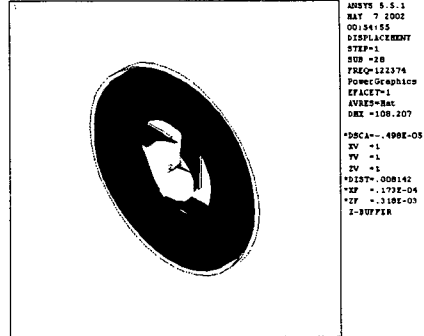


그림 7.(a) 풍차형 초음파 모터의 모드 해석

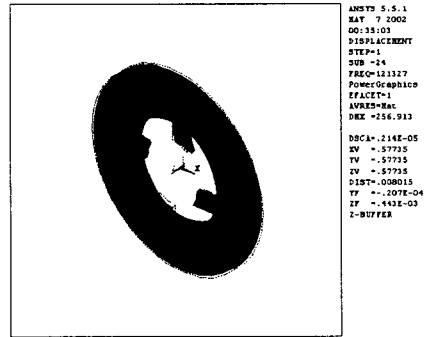


그림 7.(b) 클로바형 초음파 모터의 모드 해석

2.2.3 X, Y, Z 축에 따른 leg의 변위

그림 8.(a),(b)는 최종 결과로서 압전 세라믹의 양전극에 100[V]의 전위차를 주었을 때 발생하는 고정자의 변위이다. 점선은 변형전의 위치를 나타낸다. 두 모델 모두 모든 leg가 고정자가 그리는 원의 중심을 향하여 변위되고 있음을 확인할 수 있다. 붉은 색으로 표시 되는 부분은 응력이 최대인 부분을 나타내며 두 모델 모두 leg와 압전 세라믹이 만나는 부분에서 가장 큰 응력을 확인할 수 있다.

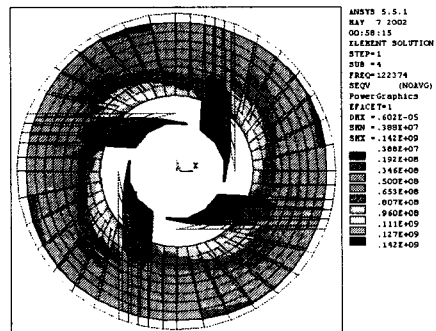


그림 8.(a) 풍차형 leg의 X, Y축 변위

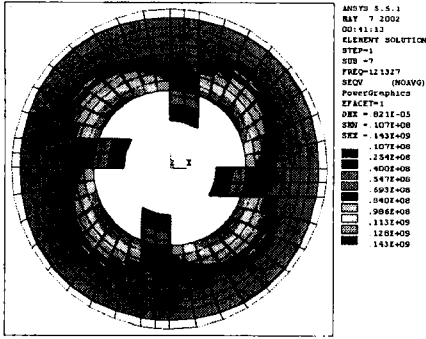


그림 8.(b) 클로바형 leg의 X, Y축 변위

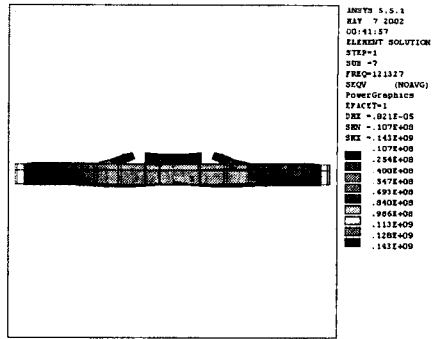


그림 9.(b) 클로바형 leg의 Z축 변위

여기서 leg의 한 절점을 선택하여 X, Y, Z 축의 변위를 관찰하였으며 그 결과를 절대값으로 표 3.에 나타내었다. X축의 변위는 회전자의 회전을 저지하는 성분으로, 본래의 목적에 맞게 leg의 위치가 수정된 풍차형이 풍차형보다 4배 가량 낮게 나타났다. Y축 변위는 회전을 회전 시키는 성분으로 클로바형이 풍차형보다 1.5배 가량 높게 나타났다. 이로 인해 새롭게 제안된 클로바형이 풍차형보다 회전을 더욱 원활히 회전시키는 것이 증명되었다. Z축의 변위는 회전자의 회전과 무관한 변위로서 클로바형이 풍차형보다 3배 가량 높게 나타났다. Z축의 변위는 모터를 불안정하게 만드는 요인으로 추정되고, 그림 9.(a)(b)는 해석 결과를 다른 각도에서 나타낸 것으로 Z축 변위를 확인할 수 있다.

표 3. 축에 따른 leg의 변위

모형	X축변위 [μm]	Y축변위 [μm]	Z축변위 [μm]
풍차형	2.04	3.56	1.68
클로바형	0.49	5.67	5.24

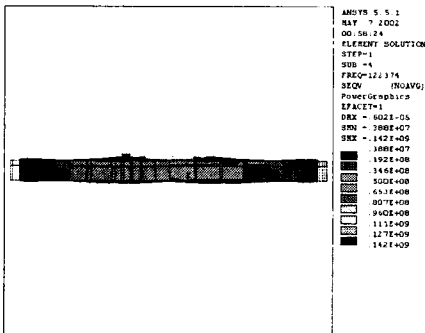


그림 9.(a) 풍차형 leg의 Z축 변위

3. 결 론

본 논문은 유한요소해석을 이용하여 회전자를 삽입하는 방식의 풍차형 초음파 모터를 연구하였다. 특히 leg의 위치를 수정하여 기존의 모델에서 발생하는 leg의 X축 변위를 최소화함으로써 회전자의 회전을 원활히 하는 모터를 설계하는 데 연구의 초점을 모았다.

모드 해석을 통해 고정자의 공진주파수를 찾았고, 100[V]의 전압을 인가하여 본 공진주파수에서 leg의 변위를 살펴보았다.

결과적으로 leg를 반지름을 나타내는 선상에 위치시킴으로써 X축 변위를 최소화하는 데 성공하였고 더불어 Y축 변위가 증가하였다. 이로써 클로바형 초음파 모터가 제안되었다.

leg의 X축 변위는 회전자의 회전을 방해하는 요소이긴 하지만 불필요하다고 단정할 순 없다. 대부분의 초음파 모터가 전자기식 모터에 비해 저속 고토크의 장점을 내세우고 있다. 모터가 저속으로 이용될 경우 오히려 X축 변위가 필요하다. 그래서 회전자 삽입 방식의 풍차형 초음파 모터는 leg의 위치를 수정하여 leg의 X축 변위를 조정할 수 있고 이로 인해 회전자의 회전 속도를 결정할 수 있다.

그리고 회전자의 회전과 무관한 Z축 변위는 회전모터의 응용에서 시스템을 불안정하게 만들 수 있는 요인으로 추정된다. 그러나 leg의 Z축 변위를 융통성있게 이용한다면 풍차형 초음파 모터를 이용한 선형모터를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 손창현, "유한요소해석 입문과 선형해석", (주)태성에스엔이, pp.424 438, 1999.
- [2]Kenji Uchino, "Ferroelectric Devices", Marcel Dekker, pp.207, 2000
- [3]Burhanettin Koc, Aydin Dogan, Yuan Xu, RobertE.Newnham, Kenji Uchino, "An Ultrasonic Motor Using a Metal Ceramic Composite Actuator Generating Torsional Displacement", JJAP, Vol.37, No.10, pp.5659 5662, 1998.
- [4]Aydin Dogan, Kenji Uchino, RobertE. Newnham, "Composite Piezoelectric Transducer with Truncated Conical Endcaps "Cymbal" ", IEEE, Vol.44, No.3, pp.597 605, 1997