

## 풍차형 초음파 모터의 특성 연구

이재형, 박태곤

창원대학교 전기공학과

### A Study on the Characteristics of Windmill Type Ultrasonic Motor

Jae-Hyung Lee and Tae-Gone Park

Changwon National University

#### Abstract

As industrial technology was developed, necessity for small size motor was increased on various fields such as medical treatment and robotics. The motor should be simple structure, and it has easy process of manufacture to overcome the limit of miniaturization. So, "the windmill type ultrasonic motor" is enough to satisfy these conditions. In this paper, windmill type ultrasonic motor which was proposed by B.Koc and K.Uchino, was analyzed and fabricated with modified endcap shape. Displacements of arms of the proposed endcap were compared with the previous endcap, using the finite element analysis program (ANSYS). Better rotational characteristics was expected in proposed model as result of FEA. Experimentally, rotary motors of 3.5 [cm] diameter were fabricated, and the speed and torque of the motor were measured. As a result, speed and torque were changed in proportion to the electrical input voltages. And low efficiency which was different from an expectation was obtained in this motor. So, various problems should be improved for practical use.

**Key Words** : Miniaturization, Windmill type ultrasonic motor, Endcap, Finite element analysis

#### 1. 서론

산업기술이 발달함에 따라 의료나 로보틱스 등의 다양한 분야에서 소형모터에 대한 필요성이 증대되었다. 일반적으로 모터가 소형화의 한계를 극복하기 위해서는 간단한 구조로 인해 제작이 용이해야 하며, 아울러 작은 크기에서도 양호한 효율을 가져야 한다. 여기서 '풍차형 초음파 모터'는 이러한 조건들은 만족시키기엔 충분하다[1,2].

'풍차형 초음파 모터'는 Burhanettin Koc, Kenji Uchino 등에 의해 이미 제안되었다. 그림 1과 그림 2는 이들에 의해 제안된 풍차형 초음파 모터의 구조를 보여준다. 그림 1의 모터는 풍차형상의 금속 endcap을 가지고 있다. 본 모터는 압전 세라믹이 진동할 때 endcap leg의 비틀림에 의해 회전자를 회전시킨다. 이와는 달리, 그림 2의 모터는 풍차형상의 구멍이 난 금속 endcap을 가지고 있다. 본 모터는 이전과는 달리 압전 세라믹이 진동할 때 endcap arm이 회전자에 충격을 주어 회전자를

회전시킨다. 그림 2의 모터는 금속 endcap의 제작이 용이하고 회전자를 더욱 안정하게 지지할 수 있어서 그림 1의 모터보다 발전된 형태라고 말할 수 있다[1-3].

본 논문에서는 그림 2의 모터에서 endcap의 형상을 수정하여 보다 효율적으로 회전자를 회전시키는 모터를 제작하는 데 목적이 있다. 그래서 기존의 모터와 새로이 제안하고자 하는 모터의 특성을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 비교하였다. 아울러 실제 모터를 제작하여 속도와 토크 그리고 효율에 관한 특성을 살펴보았다.

#### 2. 구조와 동작원리

그림 2와 같이 두께방향으로 분극된 원환형 압전 세라믹에 교류전원이 인가되면, 원의 중심을 기준으로 수축과 팽창을 반복하는 경방향 진동을 하게 된다. 본 압전 세라믹에 네 개의 팔을 가지는 금속 endcap을 부착하고, 중앙에 회전자를 삽입하

여 팔 끝과 접촉을 이루면 모터가 완성된다. 전원이 인가되면 압전 세라믹의 진동이 금속 endcap에 전달되어 네 개의 팔들이 회전자에 충격을 가한다. 결국 endcap의 팔과 회전자 사이의 접촉으로 인해 발생하는 마찰력에 의해 모터는 회전하게 된다[3].

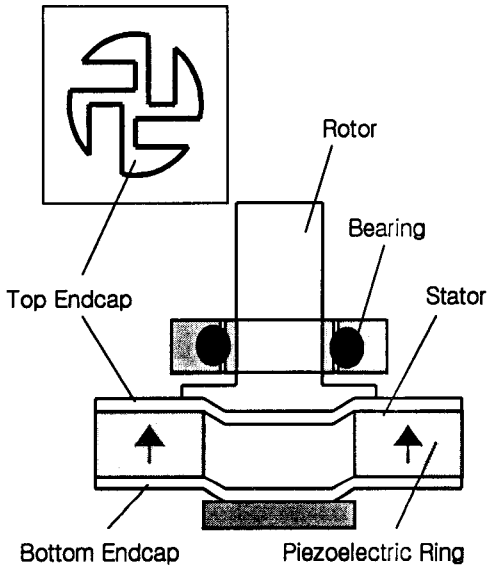


그림 1. 모터와 endcap의 구조 (초기모델).

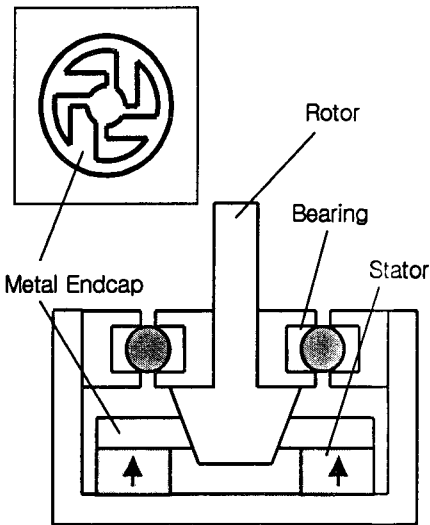


그림 2. 모터와 endcap의 구조 (발전된 모델).

여기서, 그림 3에 기존의 풍차형 초음파 모터의 금속 endcap의 형상과 팔의 변위를 자세히 나타내었다. 본 endcap은 회전자가 반시계 방향으로 회전하도록 팔들이 구성되었다. 이상적으로 endcap의 팔들은 수직으로 변위 하는 것이 가장 효과적이지만, 실제로 경방향 진동모드에서는 원의 중심을 향해 변위한다. 그래서 벡터 a는 팔의 실질적인 변위를 의미하고, 벡터 b는 회전자를 반시계 방향으로 회전시키는 변위의 성분이며, 벡터 c는 오히려 회전을 방해하는 성분이다. 결국 새로운 endcap 형상의 설계는 팔 변위의 벡터 c성분을 최소화하는 것이 주된 목적이다.

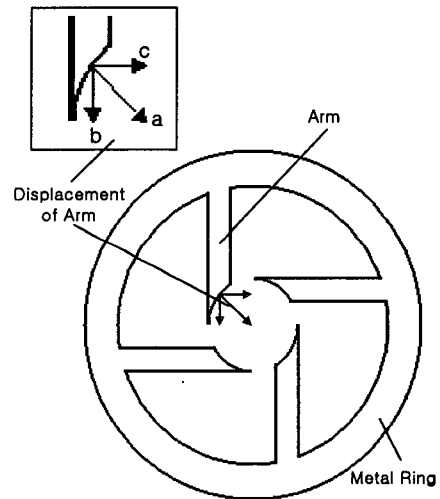


그림 3. 기존의 금속 endcap 형상과 팔의 변위.

그림 4에서는 새롭게 제안된 endcap의 모습을 나타내었다. 이것은 아주 단순한 원리를 바탕으로 하여 설계되었다. 그림 3에서 언급되고 있는 회전자의 회전을 방해하는 벡터 c의 성분을 최소화하려면 모든 팔들을 중앙선 상에 위치시키면 된다. 하지만 팔들이 중앙선 상에 위치하게 되면, 고정자의 팔들이 회전자에 충격을 가하더라도 회전자의 회전을 기대할 수 없다. 그러므로 고정자의 팔들은 회전자의 바깥쪽에서 접촉을 이루어야 한다. 이 두 가지 원리가 모두 endcap 디자인에 적용되면, 새로운 endcap의 형상은 그림 3의 기존의 endcap으로부터 부가적인 면적A를 가지게 된다. 추가된 면적 A는 팔이 이전의 모델보다 더욱 수직하게 변위할 수 있도록 보조하는 역할을 한다.

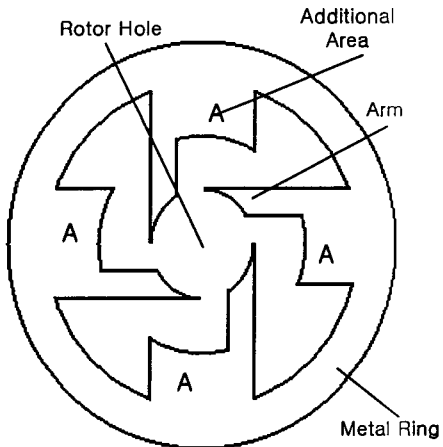


그림 4. 수정된 금속 endcap의 형상.

### 3. 유한요소해석

본 모터의 동작을 확인하기 위해 유한요소해석 프로그램을 이용하였다. 아울러 해석은 모터 동작의 핵심이 되는 고정자만이 대상이 되었고, 본 해석을 통해 기존의 모델과 새로이 제안된 모델의 특성을 비교하였다.

그림 5는 모델의 3차원 요소망을 나타낸다. 요소의 유형은 압전 세라믹은 solid5, 금속 탄성체는 solid45를 사용하였다. 그리고 세라믹과 금속사이의 접착층은 실제 모터를 제작할 때는 고려되지만, 해석에서는 생략하였다.

우선 모드 해석의 결과로부터, 기존의 모델이 43.357 [kHz], 제안된 모델이 42.466 [kHz]에서 각각 경방향 진동모드의 고유 주파수가 확인되었다. 아울러 본 주파수는 각 모터가 실제로 동작하는 공진 주파수로 예측된다.

모드 해석에서 확인된 각각의 공진 주파수에서 100 [V] 전압을 인가하여 하모닉 해석을 하였다. 그림 6의 (a)와 (b)는 각각 기존의 모델과 새로이 제안된 모델에 대한 하모닉 해석의 결과로서 변형 형상을 나타낸다. 두 모델 모두 팔들의 변위가 수직하지 않고, 원의 중심을 향함을 확인할 수 있다. 표 1은 네 개의 팔 중에서 위쪽에 위치한 팔 끝의 변위를 보여준다. x축 변위는 그림 3의 벡터 c와 대응하고, y축 변위는 그림 3의 벡터 b와 대응한다.

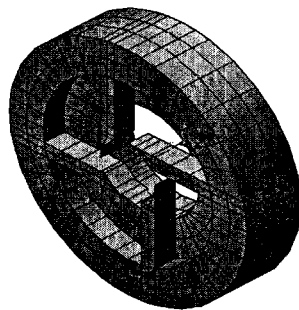
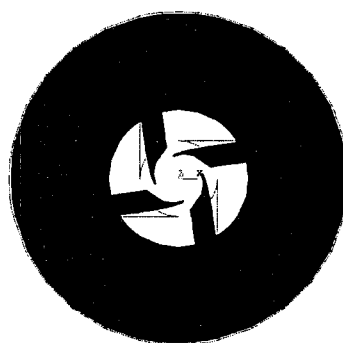
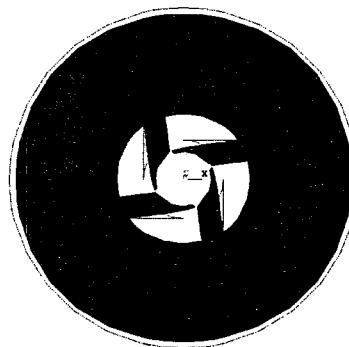


그림 5. 모델의 3차원 요소망.



(a)

```
ANSYS 5.5.1
APR 1 2003
17:07:35
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =7
FREQ=42357
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=MAX
DROX =.315E-05
DSCA=554.844
ZV =1
DIST=.013011
ZF =.003998
Z-BUFFER
```



(b)

```
ANSYS 5.5.1
APR 1 2003
15:56:24
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =6
FREQ=42466
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=MAX
DROX =.438E-05
DSCA=399.762
ZV =1
DIST=.018515
ZF =.003963
Z-BUFFER
```

그림 6. 고정자의 변형된 형상

(a) 기존의 모델 (b) 제안된 모델.

표 1. 팔 끝의 변위.

|                | displacement of x-axis [ $\mu\text{m}$ ] | displacement of y-axis [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------|--|--|
| previous model | 2.977                                    | 1.001                                    |
| proposed model | 0.281                                    | 0.286                                    |

결과로서 기존의 모델에서는 팔의 x축 변위가 y축 변위의 세 배가 되어 효과적인 회전을 기대할 수 없다. 그러나 새로이 제안된 모델에서는 오히려 y축 변위가 x축 변위보다 크게 나타남으로 인해, 기존의 모델보다 팔의 변위가 더욱 수직함을 알 수 있다. 이러한 결론은 새롭게 제안된 모델에서 더욱 효과적인 회전을 기대할 수 있음을 증명한다.

#### 4. 제작 및 실험 결과

##### 4.1 모터의 제작

앞에서 언급한 유한요소해석을 바탕으로 하여 새롭게 제안된 형상의 모터를 제작하였다. 표 2와 표 3은 각각 제작된 모터의 치수와 사용된 압전 세라믹의 재료 특성을 나타낸다. endcap의 재료는 알루미늄을 사용하였고, endcap과 세라믹은 에폭시로 접착되었다. 에폭시의 접착력을 향상시키기 위해 접착면을 폴리싱한 후 초음파 세척을 하였다. 그리고 건조기에서 충분히 건조한 후 접착이 이루어졌다. 아울러 결선은 도전성 접착제를 이용하여 세라믹의 전극에 직접 결선을 하였다. 아울러 고정자의 진동을 원활히 하기 위해 고정자의 바닥에 쿠션을 추가하였다. 그림 7에서 실제 제작된 모터의 모습을 확인할 수 있다.

표 2. 모터의 치수.

| parts         | inner diameter [mm] | outer diameter [mm] | thickness [mm] | width of arms [mm] |
|---------------|---------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| piezo ceramic | 15                  | 35                  | 5              | -                  |
| metal endcap  | 25                  | 35                  | 3              | 2                  |

표 3. 압전 세라믹의 재료 특성.

|                                 |   |      |
|---------------------------------|---|------|
| relative dielectric constants   | $\epsilon_{33} / \epsilon_0$                        | 1250 |
| piezoelectric charge constants  | $d_{33} (\times 10^{-12} \text{m/V})$               | 290  |
| piezoelectric voltage constants | $g_{33} (\times 10^{-3} \text{V} \cdot \text{m/N})$ | 27   |
| mechanical Q                    | $Q_m$   | 1800 |
| curie point                     | $T_c (\text{°C})$                                   | 340  |
| density                         | $\rho (\times 10^3 \text{kg/m}^3)$                  | 7.6  |

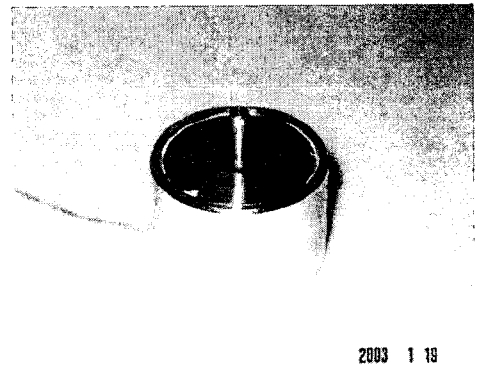


그림 7. 제작된 풍차형 초음파 모터.

##### 4.2 모터의 특성

실제 제작된 모터는 42 [kHz] 부근의 주파수에서 가장 양호한 동작을 보였다. 이는 앞서 시행한 유한요소해석의 결과와 거의 일치하는 값으로서, 해석의 결과가 비교적 정확함을 보여준다.

그림 8에서는 입력전압에 따른 모터의 속도와 토크를 나타내었다. 입력전압을 25 [Vrms]에서 55 [Vrms]까지 5 [Vrms]씩 증가하여 그 특성을 살펴본 결과, 속도와 토크는 모두 입력전압에 거의 선형적으로 비례하는 특성을 보였다. 속도의 경우 60 [rpm], 토크의 경우 4 [mNm]의 최고치를 보인다.

## 참고 문헌

- [1] Kenji Uchino, "Ferroelectric Devices", Marcel Dekker, p. 201, 2000.
- [2] Burhanettin Koc, Aydin Dogan, Yuan Xu, Robert E. Newnham, and Kenji Uchino, "An Ultrasonic Motor Using a Metal-Ceramic Composite Actuator Generating Torsional Displacement", Jpn. J. Appl. Phys, Vol.37, No.10, p. 5659, 1998.
- [3] Burhanettin Koc, Philippe Bouchilloux, and Kenji Uchino, "Piezoelectric Micromotor Using a Metal-Ceramic Composite Structure" IEEE, Vol.47, No.4, p. 836, 2000.

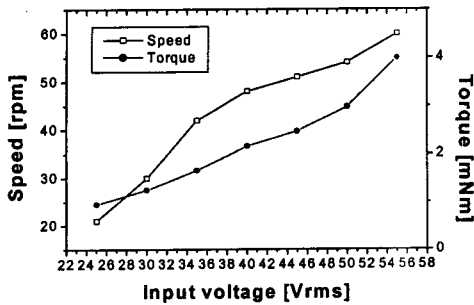


그림 8. 입력전압에 따른 속도와 토크.

본 연구에서 제작된 모터는 최고 0.23%의 아주 낮은 효율을 보였다. 이러한 이유는 유한요소해석을 통해 보다 효과적으로 경방향 진동을 일으키는 endcap의 형상은 확보되었으나, 실제 고정자와 회전자가 결합된 상태에서 팔의 굽힘 진동을 고려하지 않아 회전자의 원활한 회전을 유도하지 못했기 때문이라고 사료된다. 다시 말해 풍차형 초음파 모터의 고정자에서 팔의 변위는 경방향 진동뿐만 아니라 굽힘 진동과의 조화로부터 타원궤적을 형성해야 한다. 두 진동이 조화롭지 못하면 양호한 타원궤적을 형성할 수 없으며, 저조한 출력의 직접적인 원인이 된다고 판단된다. 또한 높은 효율을 위해서는 접촉부위에서의 마찰에 관한 특성개선과 더불어 진동자의 안정한 지지구조가 뒷받침되어야 한다고 생각된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 기존에 제안되었던 풍차형 초음파 모터에서, 고정자의 endcap형상을 수정하여 새로운 모델을 제안하였다. 유한요소해석의 결과로서, 새롭게 제안된 모터는 고정자의 경방향 진동모드에서 팔의 변위가 기존의 모터보다 더욱 수직하여 효과적인 회전이 기대되었다. 해석을 바탕으로 실제 모터를 제작한 결과, 속도와 토크는 입력 전압에 비례하는 특성을 보였고, 본 모터의 효율은 매우 저조한 특성을 보였다. 효율의 개선을 위해선 고정자의 경방향 진동과 팔들의 굽힘 진동이 조화를 이루는 정확한 설계가 뒷받침되어야 할 것이다.