

양방향성 초음파 리니어 모터의 제작 및 특성 평가

권재화*, 이수성*, 노용래**

* 경북대학교 센서공학과

** 경북대학교 기계공학부

Fabrication and Evaluation of Ultrasonic Bi-directional Linear Motors

Jae-Hwa Kwon*, Su-sung Lee* and Yongrae Roh**

*Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

**School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

*jhwon@usound.knu.ac.kr, *susung@usound.knu.ac.kr, **yryong@knu.ac.kr

요 약

본 연구에서는 원활한 정재파 생성과 양방향 구동이 가능한 새로운 형태의 초음파 리니어 모터를 제작하고, 그 특성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 모터는 $\lambda/4$ 간격으로 이빨 구조를 가지는 스테이터의 상, 하부에 압전소자를 90°의 위치 위상차를 갖도록 부착한 형태로, 상, 하부 압전소자에 각각 동위상, 180도의 시간 위상차를 가지는 교류 전압을 인가함으로써 양방향 구동이 가능하도록 하였다. 또한, 원활한 정재파를 생성할 수 있는 최적의 구조를 결정하기 위해, 여러 가지 형태의 경계조건들에 대해 유한요소해석법을 이용하여 모델링하여 각 이빨들의 변위를 관찰함으로써 각각의 구조에 대해 타당성을 검증하였다.

위 결과를 바탕으로 세 종류의 초음파 리니어 모터를 제작하여 구동실험을 하였고, 실험 결과에 따라 속도와 추력 및 양방향성이 가장 우수한 최적의 구조를 결정하였다. 본 연구에서 제작한 모터는 최대 82.4cm/s의 속도와 0.46N의 추력을 가졌다.

1. 서 론

초음파 모터는 구조가 단순하고, 소형, 경량이며, 빠른 응답성과 저속에서 높은 토크와 소음을 거의 무시할 수 있고, 속도제어를 단순한 알고리즘으로 쉽게 구현할 수 있고, 강한 자기장과 전기장에도 영향을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 로봇팔의 액추에이터나 정밀위치제어 등 여러 분야에서 활용되고 있다. [1-2] 현재 사용 중인 초음파 모터는 회전형인 로터리 모터가 주종을 이루고 있으며, 직선형인 리니어 모터는 아직 초보적인 단계에 있다[3]. 회전형 모터를 직선운동이 필요한 곳이 이용하기 위해서는 회전운동을 직선운동으로 변환시킬 수 있는 부수적인 장치가 필요함으로 큰 부피와 중량으로 소형화가 어려우나 리니어 모터는 간단한 구조로 소형화가 가능하다[4].

현재 개발된 리니어초음파모터로는 진행파형 리니어 모터[5], 하이브리드트랜스듀서(hybrid transducer)형

[6], 멀티모드 진동자(multi-mode vibrator)를 이용한 것[7] 등이 있다. 진행파를 이용한 것과 하이브리드형은 모두 두 성분의 압전체로 이루어져 위상이 서로 다른 두 개의 정재파로 진행파를 생성시키거나, 타원운동을 발생시킨다. 그러나, 진행파의 경우, 유한한 길이의 스테이터에서 순수한 진행파의 생성이 어렵고, 효율이 낮은 단점이 있고[6], 하이브리드형은 구조와 구동이 복잡하기 때문에 활용하기가 어렵다[4]. 멀티모드 진동자형은 이에 비해 구조나 구동이 좀 더 간단하나, 굴곡모드와 종방향모드가 동시에 존재해야 하기 때문에, 이 두 모드의 고유주파수를 일치시켜야 하는 정확한 설계가 필요하므로 적용에 제한이 따른다[8].

이와는 다른 형태의 리니어 모터로 정재파를 이용한 것이 있다. 정재파를 이용한 리니어 모터의 가장 큰 문제는 양방향성의 구현이었다. 기존에 개발된 정재파를 이용하여 양방향 구동이 가능한 모터로는 두 개의 서로 다른 진동 모드(B4 모드와 B5모드)를 이용하여 양방향 구동이 가능하도록 한 것이 있다[9]. 이 모터는 비교적 단순한 구조를 가지고 있으나, 구동 방향에 따라 서로 다른 진동 모드를 이용하므로 구동 주파수가 달라지고, 따라서 속도와 추력 특성이 크게 달라지므로, 구동 방향에 따라 동일한 특성을 얻기가 어렵다. 또 다른 형태로는 구동 방향이 서로 반대가 되도록 위치 위상이 다른 정재파를 생성시키는 두 개의 스테이터를 이용하여 방향에 따라 한쪽 스테이터만 구동함으로써 양방향 구동이 가능하도록 한 것이 있다[10]. 이 모터는 두 개의 압전체를 사용하나 실제 구동에는 방향에 따라 하나의 압전체만 사용하게 된다.

이와는 달리 본 연구에서는 두 층의 압전체를 동시에 구동하는 새로운 구조로 정재파를 이용하여 동일한 특성으로 양방향 구동이 가능한 정재파형 초음파 리니어 모터의 개발하였다. 이 새로운 구조의 타당성과 최적 구조를 유한요소법으로 검증하고, 이에 따라 모터를 설계, 제작하여 구동실험을 하였다. 이 구동실험의 결과로 본 연구에서 제안한 새로운 구조의 초음파 리니어 모터의 성능을 평가하였다.

2. 정재파형 초음파 모터의 구동 원리

정재파형 초음파 리니어 모터의 구조는 그림 1과 같다. 이 모터의 구조는 금속 스테이터의 상하부에 각각 폴링된 압전소자를 폴링방향이 서로 반대가 되도록 교대로 부착하는데, 하부 소자는 상부 소자와 $\lambda/4$ 의 위치위상차를 두고 부착한다. 또한, 동위상과 180도 위상차를 갖는 두 종류의 고주파 고전압 발생회로를 스테이터 상, 하부에 부착된 압전소자에 각각 인가한다. 그러면, 상부 압전소자에 의해 발생하는 정재파와 하부 압전소자에 의해 발생하는 정재파가 서로 합성이 되어 새로운 정재파가 발생하는데, 상부와 하부 소자 사이의 인가전압의 위상차가 동위상일 때와 180도 위상차가 날 때, 각각의 정재파에 의해 합성되는 정재파의 node점이 이동하게 된다. 결국 이 node점이 이동하는 그 사이에 이빨을 위치시키면, 그 이빨의 운동 방향이 node점의 이동에 따라 변하게 되는 것이다.

3. 모델링 및 FEM 해석

3.1 초음파리니어 모터의 구조설계

이상의 이론을 바탕으로 새로운 형태의 정재파형 양방향 초음파 리니어 모터를 설계하였다. 앞의 그림 1과 같이 황동으로 된 스테이터의 상하에 폴링된 압전소자를 폴링 방향이 서로 반대가 되도록 교대로 배열하고, 상, 하 소자의 위치 위상차가 $\lambda/4$ 가 되게 압전소자를 배열하여 부착하도록 설계하였다.

압전 소자는 고출력에 적합한 PZT-1를 사용하여 상부에는 $\lambda/2$ 크기로 폴링 방향이 서로 반대가 되도록 교대로 총 4개를 부착하여 2λ 모드를 사용하도록 하고, 하부 소자도 역시 상부와 마찬가지로 2λ 길이로, 상부와 $\lambda/4$ 의 위치 위상차를 두기 위해 양끝에는 $\lambda/4$ 크기의 소자를 부착하고, 가운데 $\lambda/2$ 크기의 소자 3개를 폴링 방향이 교대가 되도록 부착하였다.

다음으로 스테이터에 이빨을 위치시켜야 하는데, 이빨은 직접 마찰제와 접하여 정재파에 의해 발생하는 변위에 의해 직접 마찰력이 발생하는 부분으로 앞의 x방향 변위 식에서 보았던 것과 같이 이빨 길이 T_n 이 길면 길수록 x방향으로의 변위가 큰 것을 알 수 있다.

이빨의 위치는 그림 1에서 보였던 것과 같이 대략 $\frac{n+1}{2}\lambda$; $n = 0, 1, 2, 3$ 의 위치인 상부 소자의 에칭면에 오게 하였다.

3.2 초음파 모터의 모델링

본 모터에서 가장 중요한 것은 스테이터 상에 원활한 정재파를 생성시키는 것이다. 또한, 실제 활용을 위해서는 load를 줄 수 있도록 스테이터에 케이스를 부착할 수 있어야 한다. 즉 원활한 정재파의 생성과 케이스를 부착할 수 있도록 스테이터 양끝단의 적절한 경계조건 설정해야 한다.

이를 위해 몇 가지 형태의 경계 조건이 다른 초음파 리니어 모터의 구조를 고안하였다. 그림 2는 세가지 종류의 경계조건으로 고안된 모터의 구조를 나타내고 있다. 이렇게 고안된 구조의 타당성을 검증하고, 원활한 정재파의 생성 및 양방향성을 확인하기 위해 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 해석은 유한요소 상용 해석 도구인 ANSYS를 이용하였다.

3.3 Mode-1번

그림 2의 (a)와 같이 스테이터의 양 끝에 스테인레스 스틸로 된 케이스를 접착한 형태로 model해석 결과 그림 3과 같이 27.7KHz에서 2과장 모드의 공진주파수를 찾았다. 이 공진주파수에서 상, 하부 압전 소자에 인가되는 전기신호가 동위상일 경우와 역위상일 경우에 대해서 각각 과도해석을 통하여 각 이빨 끝 한 점에서의 변위를 관찰하였다. 그 결과 그림 4와 같이 각 이빨에서의 변위가 동위상일 때와 역위상일 때 서로 진행방향이 반대인 것을 알 수 있다.

3.4 Mode-2번

그림 2의 (B)와 같이 스테이터의 양 끝을 올려 케이스와 핀으로 고정시킨 형태로 model해석 결과 그림 5와 같이 27.7KHz에서 2과장 모드의 공진주파수를 찾았으나, 이 공진주파수에서 과도해석을 통해 각 이빨 끝 한 점에서의 변위를 관찰한 결과 그림 6에서 보는 것과 같이, 동위상일 때나 역위상일 때나 같은 방향으로 변위가 발생하므로 양방향성이 없는 것을 알 수 있다.

3.5 Mode-3번

그림 2의 (c)와 같이 스테이터의 양 끝을 조금 더 나오게 하여 그 위에 케이스를 핀으로 부착한 형태로 model해석 결과 그림 7과 같이 25.1KHz에서 2과장 모드의 공진주파수를 찾았고, 이 공진주파수에서 과도해석 결과, 그림 8과 같이 각 이빨에서 양방향성을 가지는 것을 확인하였다.

그러나, Model-1과 비교하였을 때, x방향으로의 변위가 Model-3 보다는 Model-1이 더 크고, 주파수도 더 높은 것을 알 수 있다. 변위가 크다는 것과 주파수가 더 높다는 것은 그만큼 더 빠른 속도를 가진다고 할 수 있으므로, 유한요소해석을 통하여 Model-1과 같은 구조가 양방향으로 구동할 수 있는 최적의 구조임을 알 수 있다.

4. 모터의 제작 및 구동 실험

3절의 유한요소해석 결과를 확인하기 위하여 세가지 모델의 초음파 리니어 모터를 실제로 제작하여 구동실험을 하였다.

구동실험 결과 유한요소해석에서와 같이 Model-2번 모터는 동위상일 때나 역위상일 때나 같은 방향으로만 구동되었다. 반면 Model-1과 3번 모터는 유한요소해석

에서 보였던 것과 같이 양방향으로 구동이 되었으나, Model-1번 모터가 Model-3번 모터 보다 더 빠른 속도로 양방향으로 구동되었다. 따라서, 유한요소해석의 과도해석에 의한 결과와 실제 실험 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 9와 10은 Model-1번 모터의 구동 실험 결과, 입력 전압과 부하 질량에 따른 속도와 추력을 나타낸다. 이 모터는 부하질량이 없을 때 최고 82.4cm/s의 속도를 가졌다. 추력은 부하질량 500g일 때 0.46N으로 측정되었다. 그림 9와 10의 결과에서 보이는 것과 같이 제작된 모터는 부하질량이 클수록 추력은 증가하나, 속도는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 저속에서 큰 힘을 가지는 초음파 모터의 공통적인 특성이다.

5. 결론

본 연구에서는 성능이 향상된 정제파형 초음파 리니어 모터의 구조를 제시하였고, 제시한 구조의 타당성을 유한요소해석과 구동실험을 통하여 검증하였다.

구동 실험결과, 본 연구에서 제작한 초음파 리니어 모터는 최고속도 82.4cm/s의 빠른 속도로 양방향 구동되었고, 500g의 부하질량을 주었을 때 0.46N의 추력을 가졌다.

본 연구에서 제안한 초음파 리니어 모터는 기존의 권선형 모터에 비해 부피도 작고, 다양한 모양으로 제작이 가능하기 때문에 직선운동을 필요로 하는 여러 분야에 응용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. K. Uchino, Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors, Kluwer Academic Publishers Boston, London, 1997.
2. T. Sashida, and T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford, Clarendon Press, 1993.
3. T. Hensel, and J. Wallaschek, "Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors," Ultrasonics, 38, pp. 37-40, 2000.
4. C. K. Lim, S. He, I. M. Chen, and S. H. Yeo, "A piezo-on-slider type linear ultrasonic motor for the application of positioning stages," Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, pp. 103 -108, 1999.
5. M. Kuribayashi, S. Ueha, and E. Mori, "Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor," J. Acoust. Soc. Am. 77(4), pp. 1431-1435, 1985.
6. K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha, "Characteristics of a hybrid transducer-type ultrasonic motore," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 38(3), pp. 188-193, 1991.
7. T. Takano, Y. Tomikawa, M. Yaginuma, and T. Ogasawara, "A linearly moving ultrasonic motor using a longitudinal and bending multi-mode vibrator," IEEE 7th Int. Symp. App. Ferro. pp. 521 -524, 1991.

8. C. H. Lee, S. H. Lee, H. K. Jung, J. K. Lee and K. S. Hong, "Analytic and numerical approaches for characteristic analysis of linear ultrasonic motor." Int. Conference IEMD, Electric Machines and Drives, pp. 619 -621, 1999.
9. S. He, W. Chen, X. Tao, and Z. Chen, "Standing Wave Bi-directional Linearly Moving Ultrasonic Motor," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 45(5), pp. 1133-1138, 1998.
10. Z. Wansheng, L. Weidong, W. Zhenlong, M. Qingguo and L. Wenzhuo, "Research on linear stepper ultrasonic motor and its application," IEEE Ultrasonics Symp. Proc. pp. 679 -682, 1999.

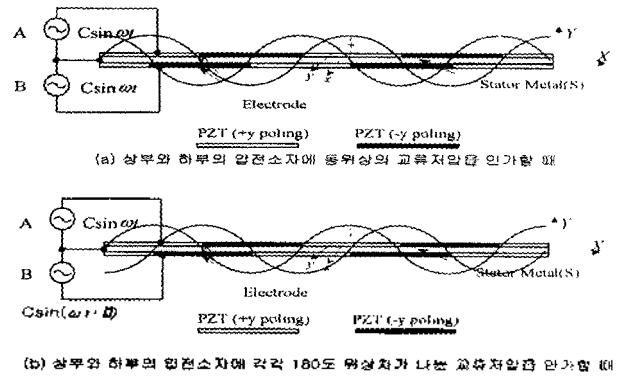


그림 1. 정제파를 이용한 초음파 리니어 모터의 구조와 원리.

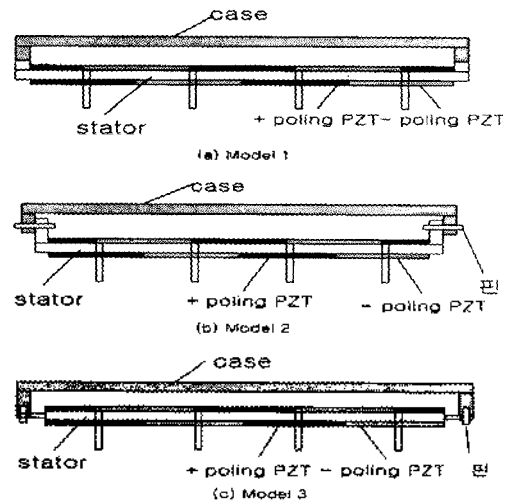


그림 2. 고안된 모터의 구조

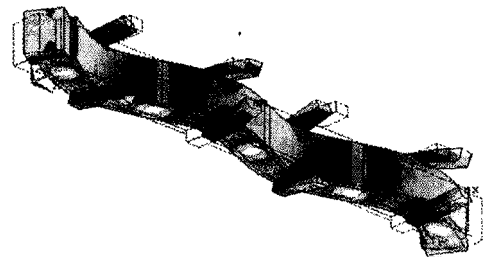


그림 3. Model-1의 Modal해석 결과.

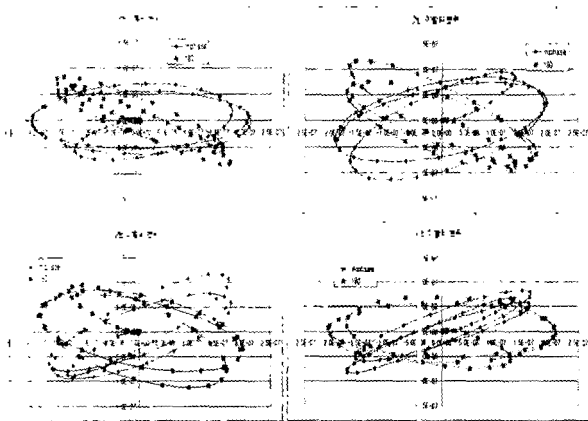


그림 4. model 1의 transient 해석 결과 각 이빨에서의 변위

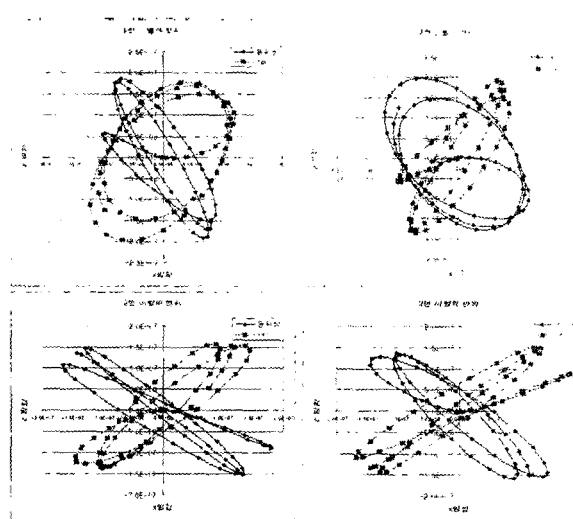


그림 8. model 3의 transient 해석 결과 각 이빨에서의 변위

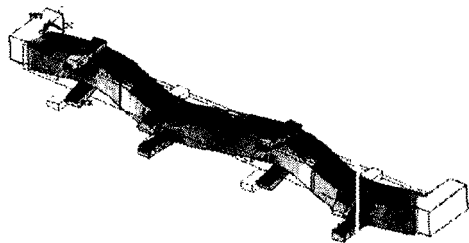


그림 5. Model-2의 Modal 해석 결과.

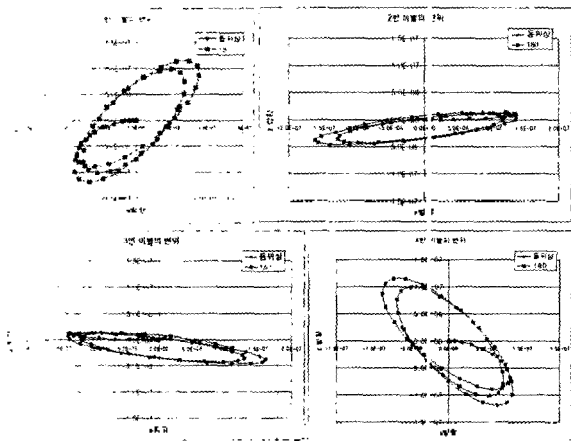


그림 6. model 2의 transient 해석 결과 각 이빨에서의 변위

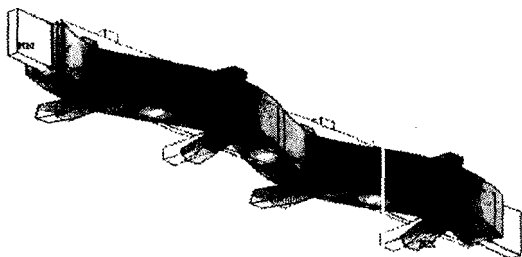


그림 7. Model-3의 Modal 해석 결과.

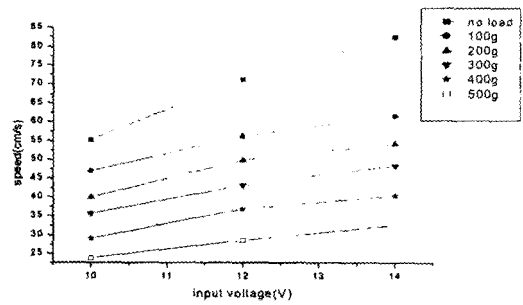


그림 9. Model-1의 부하 질량과 인가 전압에 따른 속도 변화.

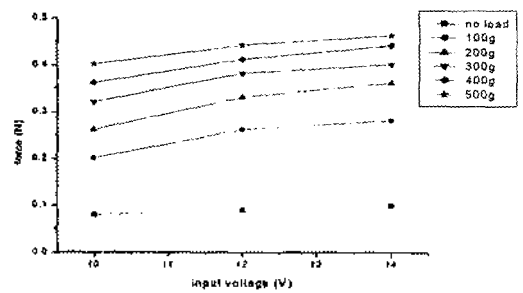


그림 10. Model-1의 부하 질량과 인가 전압에 따른 추력 변화.