마모가 SAW 모터 구동특성에 미치는 영향

문봉호[†]

전남대학교

The Effect of Wear on the SAW Motor Driving Characteristics

Moon Bongho[†]

*School of Mechanical and Automotive Engineering, College of Engineering Science,
Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu-si, Jeollanam-do, Korea*
(Received May 25, 2011; Revised July 15, 2011; Accepted July 18, 2011)

Abstract – Recently the demand for a fast and precise actuator in semiconductor industries is growing larger. A SAW motor is now expected as a new friction-drive actuator to meet such demand. However, its friction and wear properties are almost unknown and its low stability and reliability still remain to be solved. In this research the tests of SAW motor were carried out and its durability was discussed. The effect of wear caused by friction on the driving force and driving speed were clarified.

Keywords – surface acoustic wave(표면 탄성파), friction drive(마찰 구동), SAW motor(SAW 모터), actuator(액추에이터), stability(안정성), reliability(신뢰성), wear(마모)

1. 서 론

IT(Information Technology)의 눈부신 발전에 따라 기기들이 고성능화되고 있다. 고성능화는 기기들에 탑재되어 있는 LSI(Large Scale Intergrated Circuit)의 저소비전력화, 저비용화, 고속화 등을 요구하고 있다. 이를 위해서는 LSI의 미세화와 고집적화가 필수불가결하다. LSI의 미세화와 고집적화를 위한 기술의 하나가 회로 패턴의 형성 시에 이용되어지는 전자빔 묘사용 정밀 위치 결정용 장치이다.

현재, 전자빔 묘사용 정밀 위치 결정용 장치로 DC/AC 모터, 스테핑 모터 등의 전자모터의 회전운동을 기어에 의해 감속하고, 볼나사를 이용하여 직선으로 변환하는 스테이지가 진공 중에서 구동되고 있다. 이때 전자모터에 이용되는 자석에서 발생하는 자장은 전자빔의 노이즈로 작용하고 있다. 이를 피하기 위해서 스테이지에서 모터가 멀리 떨어져 진공장치의 외부에 설치되므

로 장치가 대형화 된다. 또한 기어의 백래시에 따른 정도의 떨어짐과 소음등도 문제가 되고 있다. 이에 LSI의 고성능화를 위해서는 지금까지의 전자모터를 대신하는 비자성, 고속, 고정도의 액추에이터가 필요하다.

비자성, 고속, 고정도의 액추에이터로 초음파 모터(USM: Ultrasonic Motor)가 연구되고 있으며 일부는 실용화가 이루어져 있다. USM은 압전소자를 초음파 영역의 주파수로 미소 진동을 시켜 마찰력을 이용하여 동력으로 얻을 수 있는 마찰구동 모터이며, 고토크, 고분해능, 고보지력, 비자성 등의 장점을 가지고 있다[1].

Kurosawa가 시작한 탄성 표면파(SAW; Surface Acoustic Wave) 모터는 USM의 한 종류로 탄성체의 표면 위를 전파하는 Raleigh파의 타원운동을 이용하는 마찰구동 액추에이터이다[2,3]. 일반적으로 수십 kHz의 고주파에서 구동되는 USM은 높은 분해능을 나타내고 있다. SAW 모터의 구동 주파수는 9.61 MHz로 수십 kHz의 일반적인 USM보다 1000배정도 크다. 이것이 차세대의 빠르고 정확한 모터로 기대되는 이유이다. Kurosawa는 SAW의 원리에서부터 모델화하여 제품개

[†]주저자 · 책임저자 : mbh@chonnam.ac.kr

발까지 이루어졌다. 마찰구동으로 이루어지는 SAW에 대해 구동특성의 해석과 실험 및 모델화를 연구했지만 마찰 반복에 따른 재료의 평가부분에는 아직 연구가 미비한 상태이다[4-8]. 따라서 SAW 모터는 실제 사용에서 일정한 구동력과 구동속도를 얻지 못하는 낮은 안정성과 장시간 사용의 내구성 및 신뢰성의 문제를 가지고 있으며, 이는 상용화를 위해서는 풀어야 할 숙제이다.

본 연구는 안정성 및 신뢰성의 향상을 위해 SAW 모터 재료의 특성에 따른 구동특성인 구동력과 구동속도에서 마모의 영향을 해석한다.

2. Driving Mechanism

초음파 모터의 일종인 탄성표면파 모터(SAW motor)의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

SAW 모터는 압전 재료의 양단에 전극(IDT: Inter-Digital Transducer)이 설치되어진 스테이터와 가동부인 슬라이더로 구성된다. SAW 모터의 구동 시스템에서

Fig. 1. Schematic view of SAW(Surface Acoustic Wave) motor.

Fig. 2. Driving mechanism of SAW motor.

IDT에 고주파전압을 인가하면 Fig. 2와 같이 압전 기관 표면에 Rayleigh 파가 발생한다.

Rayleigh 파는 대표적인 탄성표면파이며 파의 에너지가 표면근처에 집중되어져 있고 표면에서 불과 1파장이내에 90% 이상의 에너지가 포함되어 있다.

전파하는 Rayleigh 파의 변위 분포는 파의 진행 방향과 깊이 방향뿐이고 양자의 위상이 90도 벗어나기 때문에 압전기관 표면의 각점은 타원궤도를 그리며 여기에 하중을 걸어주면 슬라이더를 누르는 것에 의해 마찰력이 발생하여 구동된다.

3. 실험 장치 및 실험방법

3-1. 시험편

시험편은 Fig. 3과 같이 스테이터와 슬라이더로 구성된다.

스테이터는 탄성표면파 소자인 Lithium Niobate (LiNbO₃) 기관에 Al을 이용하여 전극인 IDT를 만든 것이며, 구동주파수가 9.61 MHz, Rayleigh 파의 파장이 400 μ m가 되도록 설계했다.

슬라이더는 표면특성 및 전기적 특성의 변화에 따른 구동특성 변화를 검토하기 위해 제작하였다. 표면특성의 변화를 위하여 Si와 표면에 HA-DLC를 1 μ m 코팅한 Si의 2종류 준비하였으며, 전기적 특성변화를 위해 앞에서의 2종류의 슬라이더에 저항의 차이를 주었다. 따라서 슬라이더는 전기저항 값 0.01 Ω , 10 Ω , 1000 Ω 의 Si 3종류와 보통의 DLC와 전기저항을 감소시킨 DLC의 2종류를 표면 코팅한 Si 등 5종류이며, 크기를 4 mm $\times$ 4 mm로 제작하였다. 본문에서는 DLC의 슬라이더 중에서 전기저항 감소 DLC를 WDLC, 보통 DLC를 DLC로 간단히 표기한다.

3-2. SAW 모터 실험장치

Fig. 3에 SAW 모터의 실험장치를 나타낸다.

스테이터는 구동면과 반대방향에 여진되어진 파가 기관 끝면에서 반사하여 모터의 구동에 의해 이용되어진 파와 간섭을 이루는 것을 피하기 위해 기관 끝면에 흡음재로서 세로판 테이프를 붙였으며, 스테이터 홀더에 의해 스테이터 마운트에 고정되어진다. 슬라이더는 직선운동 스테이지 위에 장착되어진 지그에 양면테이프를 접착되어진다.

슬라이더는 직경 3 mm의 강 구를 이용하여 접촉면이 자동적으로 방향에 관계없이 접촉할 수 있도록 설계

Fig. 3. Experiment of SAW motor.

Fig. 4. Schematic view of experimental apparatus for driving/evaluation of SAW motor.

하였다. 코일 스프링과 마이크로미터 헤드의 조절에 따라 0에서 98 N 사이에서 임의의 하중을 줄 수 있다.

3-3. 실험방법

Fig. 4에 실험장치의 전체 개략도를 나타낸다. 시험편은 아세톤 초음파 세정 후 실험을 하였다. 구동은 함수 발생기에서 9.61 MHz인 사인파의 신호가 구동주파수로 출력되며, RF Amp.를 이용하여 증폭한 후 스테이터 상의 IDT에 인가하였다.

본 실험에서는 슬라이더 이동속도를 LDV(Laser Doppler Vibrometer)로 측정하고 디지털 오실로스코프를 이용하여 기록을 행한 후 컴퓨터에서 해석해서 기록했다.

(a) Transient response of SAW motor.

Fig. 5. Calculation method of driving force from transient response of SAW motor.

모터 구동은 9.61 MHz의 파를 150,000과 켜 수 초에 있어서 단속적으로 인가하는 바스트 스텝 구동 방법으로 이루어진다.

파를 발생해서 정지할 때까지 구동을 1 step이라고 정의한다. 구동특성의 평가는 진동계에 의해 얻어진 슬라이더의 이동속도 데이터를 이용하고 1 step의 구동에서 올라간 부분을 이차곡선으로 근사시켜 그 기울기가 최대값이 되는 점에서 최대 가속도를 구하고 그것에 구동부분의 질량을 곱하여 구동력을 구했다. 구동부분의 질량은 14.2 g이다.

Fig. 5에 실제의 슬라이더 구동특성의 예와 구동력 계산 방법을 나타낸다.

4. 실험결과

4-1. 구동 예하중

코일 스프링과 마이크로미터 헤드의 조절에 의한 구동 예하중이 구동력에 미치는 영향을 조사하기 위해 10Ω Si의 슬라이더를 이용하여 실험하였다. 그 결과를

Fig. 6. Preload on driving force.

Fig. 6에 나타낸다. 10Ω Si는 하중 증가에 따라 구동력은 증가하고, 대략 구동 예하중이 7-13N에서 구동력은 0.6N을 나타내고 있다. 13N 이상에서는 하중증가에 따라 구동력이 감소하고 있다. 따라서 본 실험에서는 구동력이 0.6N을 나타내는 7-13N의 하중에서 가운데의 10N을 구동력을 구동시키기 위한 구동 하중으로 사용하였다.

4.2. 구동력

슬라이더의 표면의 특성에 따른 구동력을 검토하기 위한 Fig. 7의 DLC와 Fig. 8의 1000Ω Si의 그래프는 점 하나에 한 step에서 얻어지는 구동력의 값으로 구동이 멈출 때까지의 결과를 나타낸 것이다. 1000Ω Si는 160 step이내에서 구동이 멈추었으나, DLC는 2000 step을 넘어서도 구동하였다. 이에 본 실험은 2000 step이내의 결과를 이용하였다. DLC에서는 구동력의 최소와 최대의 차가 0.18N 정도로 구동력의 질

Fig. 7. Driving force of DLC coated Si slider.

Fig. 8. Driving force of 1000Ω Si slider.

Fig. 9. Driving force of sliders.

편값 0.33N에서 보면 $\pm 30\%$ 이내의 오차를 가지고 있어 상용화를 위해서는 이 오차를 줄이는 것이 최대 관점이다.

본 논문에서는 각각의 그래프를 가지고 구동특성을 비교하기가 어려워, 추세선을 이용하여 한 그래프 안에서 슬라이더들의 구동특성을 비교 검토하였다.

Fig. 9는 슬라이더들의 구동력을 나타낸 것이다. Fig. 9에서 DLC코팅 Si 슬라이더는 1000Ω Si 슬라이더를 제외한 Si 슬라이더보다 초기의 구동력은 낮지만, 구동력의 감소가 작아 안정적이며 2000 step 이상의 구동으로 Si 슬라이더보다 내구성이 뛰어나다. Si 슬라이더는 저항이 작을수록 구동력은 커지는 전기적 특성이 크게 나타나고 있다. 0.01Ω Si는 DLC코팅 보다 1.5-2배 사이의 높은 구동력이 얻어지고 있지만 내구성과 안전성에서 큰 차를 보이고 있다. DLC코팅에서도 전기적 특성이 나타나고 있다. 저항이 작은 WDLC가 보통의 DLC보다 0.1N 이상의 구동력을 나타내고 있다. 전기적 특성의 차이가 구동력의 크기에서는 확연한데

Fig. 10. Reduction ratio of driving force of sliders.

반하여 감소의 대소는 확연히 알 수가 없다. 이를 위해 초기의 구동력을 각 step에서의 구동력으로 나눈 감소비를 이용하여 비교하였다. Fig. 10에 각 슬라이더들의 감소비 변화를 나타낸다. DLC코팅의 경우는 감소비가 WDLC가 DLC보다 감소폭이 적지만 1/10000수준으로 Si 슬라이더의 1/100에 비하면 무시할 수 있다. Si 슬라이더는 저항이 작은 순서로 감소율이 작다.

4-3. 구동 속도

슬라이더의 각 step에서 얻은 구동속도를 나타낸 것이 Fig. 11과 Fig. 12이다. DLC에서 구동속도는 크게 벗어난 한두 개를 제외하면 최소와 최대의 차가 0.04 m/s 정도로 절편의 구동속도 0.097 m/s에서 보편 $\pm 20\%$ 이내의 오차로 구동력의 오차 보다는 적다. 1000Ω Si도 구동력에 비해 수백 배 이상의 적은 감소를 나타내고 있다. 전체 슬라이더의 구동속도가 구동력보다는 안정적이다.

Fig. 13에 각 슬라이더들의 구동속도를 나타낸다. Fig. 13에서 1000Ω Si 슬라이더를 제외한 Si 슬라이더는 DLC코팅 Si 슬라이더보다 1.5-2배 정도의 큰 속도를 가지고 있다. 하지만 DLC코팅 Si 슬라이더는 Si 슬라이더보다 구동속도의 감소가 작아 안정적이며 2000 step 이상의 구동으로 Si 슬라이더보다 내구성이 뛰어나다. Si 슬라이더는 저항이 작을수록 구동속도는 커지고 있다. DLC코팅 Si 슬라이더에서도 전기적 특성이 나타나고 있다. WDLC가 DLC보다 0.02 m/s 이상의 구동속도를 나타내고 있다. 전기적 특성의 차이가 구동속도의 크기에서는 나타나는데 반하여 감소의 대소는 확연히 알 수가 없다. 초기의 구동속도를 각

Fig. 11. Driving velocity of DLC coated Si slider.

Fig. 12. Driving velocity of 1000Ω Si slider.

Fig. 13. Driving Velocity of sliders.

step에서의 구동속도로 나눈 감소비를 이용하여 감소의 폭의 크기를 비교하였다. Fig. 14에 감소비의 변화를 나타낸다. DLC코팅 Si 슬라이더의 경우는 감소비가 Si 슬라이더보다 월등히 우수하며, Si 슬라이더는 저항이 클수록 감소율이 작으나 그 차는 무시할 정도이다.

Fig. 14. Reduction ratio of driving velocity of sliders.

Fig. 15. Wear particle on the slider and stator.

5. 고 찰

본 논문은 슬라이더의 저항변화와 표면 변화에 따른 구동특성을 실험하였다. 전기적 특성차이에 의해 구동특성의 변화가 큰 것과 표면 특성에 따라 내구성 변화가 크게 나타나고 있는 것을 확인하였다.

본 고찰에서는 마모특성의 평가를 위해 표면 특성에 대해서만 고찰하며, 전기적 특성은 실험 결과로 그 특

성을 나타내며, 고찰은 추가적인 실험이 필요하다. 표면 특성에 대해서만 고찰하기 위해 실험 전후의 슬라이더의 표면 거칠기 측정 및 표면을 광학현미경으로 관찰하였다. 실험후의 측정은 마모입자의 부착으로 표면 거칠기의 측정이 불가능하였다. 실험 전 Si 및 DLC 슬라이더의 표면 거칠기는 $0.01\text{--}0.03\text{ }\mu\text{m}$ 로 표면 거칠기의 차이는 나타나지 않았으며, 성능이 우수한 스테이터의 연속사용에 따라 실험전에 Fig. 15(c)의 사진에서와 같이 같은 방향의 깊은 홈이 만들어져 있어 스테이터의 표면 거칠기 측정은 실시하지 않고 광학 현미경 관찰만 하였다. 본 실험에서는 표면 거칠기의 차이에 의한 구동 특성의 차이를 알 수가 없었다. 광학 현미경의 관찰 결과를 Fig. 15에 나타낸다. Fig. 15(a)에 2000회 이상의 구동 중에 실험을 끝낸 후의 DLC 슬라이더를 관찰한 광학 현미경사진으로, 슬라이더의 표면에 미세한 마모입자가 부착되어 있다. 스테이터의 표면에서는 마모입자를 볼 수 없었다. DLC와 Si 모두가 실험중의 스테이터의 표면에서는 마모흔만 보이고 마모입자를 볼 수 없지만, 슬라이더의 표면은 마모입자가 부착되어 있다. (b)의 사진은 1000Ω 의 Si 슬라이더의 사진으로 160회에서 구동이 멈추어 실험이 끝난 후의 표면을 관찰한 사진이다. (b1)에서 표면에 많은 마모입자가 부착되어 있다. 마모입자를 확대한 사진이 (b2)이다. 마모입자 큰 것은 덩어리 지어 모여 있다. (c)의 사진은 스테이터에 부착되어 있는 마모입자이다. 스테이터는 반투명성의 유리와 같이 생겼다. (c1)에서 마모입자들을 보면 초기마모입자들인 미세한 입자들을 볼 수 없고 덩어리 진 형태로 점진적인 마모로 인해 쌓여진 형태가 아닌 갑자기 생긴 마모입자인 것을 그림(c2)에서 알 수 있다. (c1)에서의 마모입자를 5배 확대한 (c2)의 마모입자를 보면 밑에 있는 마모흔이 보일 정도로 투명하며 넓게 퍼져 있다. 슬라이더의 마모입자는 스테이터의 마모입자들로 스테이터에서 마모입자가 발생하여 슬라이더로 응착한 것이다. 슬라이더에 응착한 마모입자가 커지면서 탈락하여 스테이터 표면에 떨어지며, 떨어진 마모입자는 슬라이더가 구동시에 슬라이더의 하중에 의해 넓게 퍼져서 표면에 남아 있다. 응착마모는 경도에 지배되는 형태로 DLC가 Si보다 높기 때문에 응착마모의 발생이 어려워 내구성이 높다. 구동 특성의 감소는 스테이터에서 발생하는 마모입자의 영향이다. 미끄럼 마찰시 스테이터에서 발생하는 마모입자가 슬라이더로 응착하며, 응착된 마모입자가 점점 커지면서 구동특성인 구동력과 구동속도

가 저하되며, 마모입자가 탈락이 되어 스테이터 표면에 남게 되어 쌓이면 구동을 멈추게 된다. 따라서 내구성 향상을 위해서는 표면의 설계가 중요하다.

6. 결 론

본 연구는 SAW 모터의 안정성 및 신뢰성의 향상을 위해 SAW 모터 재료의 특성에 따른 구동특성인 구동력과 구동속도에서 마모의 영향을 해석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) SAW 모터의 구동특성은 step이 증가함에 따라 감소하며, DLC코팅의 Si 슬라이더가 Si 슬라이더 보다 내구성이 뛰어 났다.
- 2) 전기 저항이 작을수록 구동특성은 향상되었다.
- 3) 구동 특성 감소는 마모입자의 영향으로 스테이터에서 마모입자가 발생하여 슬라이더로 응착한 마모입자가 점점 커지면서 구동력과 구동속도가 저하되며, 응착한 마모입자가 탈락이 되어 스테이터 표면에 남아 쌓이면 구동이 멈춘다.

후 기

본 논문에 많은 도움을 준 東北大學 足立幸志 先生에게 감사드린다.

참고문헌

1. 심영일, “새로운 액추에이터 초음파 모터의 개발,” *기계산업*, 제338권, pp. 76-80, 2005.
2. M. Kurosawa, M. Takahashi, and T. Higuchi, “Ultra-

- sonic Linear Motor Using Surface Acoustic Waves,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 43, No. 5, pp. 901-906, 1996.
3. M. K. Kurosawa, M. Takahashi, and T. Higuchi, “Elastic Contact Conditions to Optimize Friction Drive of Surface Acoustic Wave Motor,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 45, No. 5, pp. 1229-1237, 1998.
4. Takashi Shigematsu, Minoru Kuribayashi Kurosawa, “Friction Drive of an SAW Motor. Part I: Measurements,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 55, No. 8, pp. 2016-2024, 2008.
5. Takashi Shigematsu, Minoru Kuribayashi Kurosawa, “Friction Drive of an SAW Motor. Part II: Analyses,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 55, No. 8, pp. 2266-2276, 2008.
6. Takashi Shigematsu, Minoru Kuribayashi Kurosawa, “Friction Drive of an SAW Motor. Part III: Modeling,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 55, No. 10, pp. 2266-2276, 2008.
7. Takashi Shigematsu and Minoru Kuribayashi Kurosawa, “Friction Drive of an SAW Motor. Part IV: Physics of Contact,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 55, No. 10, pp. 2277-2287, 2008.
8. Takashi Shigematsu and Minoru Kuribayashi Kurosawa, “Friction Drive of an SAW Motor. Part V: Design Criteria,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 55, No. 10, pp. 2288-2297, 2008.