

회전모멘트 힌지 설계에 따른 캔틸레버형 횡방향 구동 Fast Tool Servo 연구 개발에 관한 고찰

이승준*, 정재호**,#

*부산대학교 부품소재산업협력연구소, **경남정보대학교 기계계열

A Study on the Development of a Cantilever & Swing-Type Fast Tool Servo with Rotational Moment Hinge Design

Seung Jun Lee*, Jae Ho Jeong**,#

*Industrial Liaison Innovation Cluster, Pusan National Univ.,

**Kyungnam College of Information & Technology.

(Received 13 April 2020; received in revised form 02 July 2020; accepted 06 July 2020)

ABSTRACT

The growth of the AR/VR market due to the advent of the 4th Industrial Revolution begins with the development of the display industry. The development of OLED and flexible displays is further accelerated by the development of R2R technology. Micro-processing technology using a fast tool servo (FTS), the core technology in R2R processes, is making technological progress in increasingly diverse ways. This paper proposes a method to develop an FTS for horizontal driving and presents this method through experiments and analyses. To develop a swing-type FTS based on a seesaw motion, a rotational moment hinge structure was designed for each type, and research was conducted to determine an effective design method. A cantilever-based swing-type FTS was developed in two variations: one with single-side hinges and another with dual-side hinges. The parameters in the design of the swing-type FTS are rotational moment, natural frequency, and material selection. In conclusion, an FTS with a single-side hinge demonstrates the high performance required for micro processing.

Key Words : Swing Type FTS(횡방향구동 고속공구대), Micro Processing Technology(미세공정기술), Hinge Structure Design(힌지구조설계), Cantilever Type FTS(캔틸레버형 고속공구대), Fast Tool Servo(고속공구대)

1. 서 론

근래에 비약적인 시장 성장과 기술의 발전을 이루고 있는 AR·VR 산업은 4차 산업 혁명 시대의 도래에 따른 IoT 및 IT 기술과 최첨단 플렉서블

디스플레이 기술 발전의 총체적 결과물이다.

4차 산업 혁명 기술의 발전에 따라 OLED를 기반으로 한 플렉서블 디스플레이 산업의 중요도는 더욱 증대되고 있으며 2020년에 들어선 현재 새로운 패러다임을 맞이하고 있다^[1]. Display 기술의 발전 트렌드는 2030년까지 AR·VR 산업 핵심 기술인 3D Display 시장의 증가로 Flexible 과 OLED(Organic Light-Emitting Diode)의 수요가 급

Corresponding Author : jungjh@eagle.kit.ac.kr

Tel: +82-51-320-2936, Fax: +82-51-320-1595

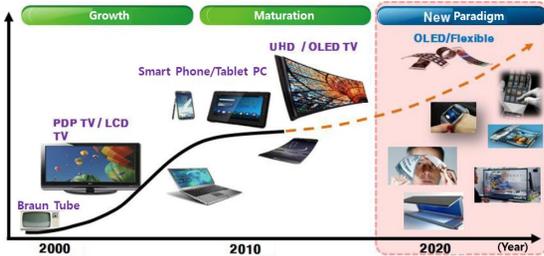


Fig. 1 History of display industry^[1]

격히 늘어날 전망이다. 이러한 미래지향적 기술과 산업을 위해 미세패턴 가공기술은 중요한 핵심 기술 중 하나이다. Display 제품의 핵심부품 중 하나인 Back Light용 광학필름은 Roll to Roll 공정에 의해 대량 생산되며 필름의 광효율은 패턴의 크기와 형상에 따라 좌우된다. 이러한 패턴의 크기와 형상은 금형인 Master Roll 표면에 정밀패턴인쇄 기술을 이용하여 만들어 진다. 롤금형은 Ni-P도금으로 표면처리 된 고정도 황산동을 주로 활용한다. 롤금형의 정밀패턴인쇄 기술은 오늘날 레이저 기반 가공기술을 이용하기도 하지만 고정밀을 요구하는 디스플레이 산업에서는 아직도 형상정밀도에서 우위에 있는 기계기반 절삭가공 시스템을 사용하고 있다. 프리즘 패턴은 다이아몬드 툴을 이용한 선삭으로 가능하나 웨이브 패턴 또는 3D 패턴에는 Fast Tool Servo(FTS)가 사용된다.

Fig. 2는 FTS를 이용한 롤금형 패턴링 공정의 개념도이다. 롤금형가공기는 선반의 축을 기본으

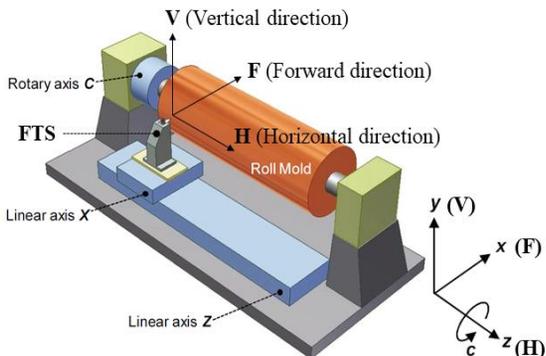
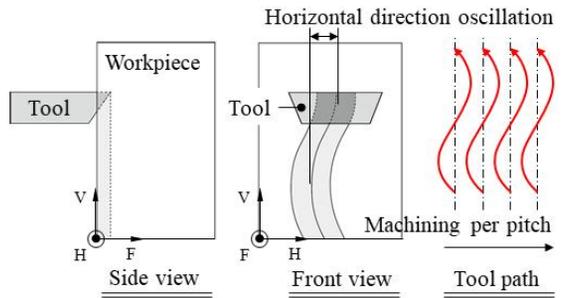


Fig. 2 The roll mold surface texturing process using ultra-precision lathe with FTS^[3]

로 사용한다. 하지만 FTS는 산업의 응용도에 따라 축의 방향이 각각 다르게 표현되므로 여기서는 쉬운 이해를 위해 FTS의 가공 툴을 기준으로 F(정방향), H(횡방향), V(수직방향)으로 설명하겠다.

4차 산업 혁명으로 더욱 고난이도의 3D패턴이 요구되어지고 있어 깊이(상/하) 방향으로의 진동에 따른 형상에서 나아가 횡(좌/우)방향으로의 진동에 따른 패턴도 활용도가 높아지고 있다. 따라서 횡방향 진동을 위한 FTS 개발은 디스플레이 산업 외에도 광학렌즈를 포함한 기능성 표면 시장에 중요한 기술적 요소라 할 수 있다^[4].

Fig. 3은 삼각 다이아몬드 툴을 체결한 횡방향 FTS를 이용하여 가공하는 프로세스와 패턴링 된 제품을 예시로 보여준다. 횡방향 진동 FTS의 개발 방안은 여러 가지가 있으나 우리는 지렛대 원리를 이용한 시소운동의 Swing type FTS 개발에 집중하였다. 시소운동을 응용하기 위해서는 모멘트 축이 있어야 한다. 모멘트 축은 단순하나 치수적 안



(a) Tool path of the horizontal type FTS

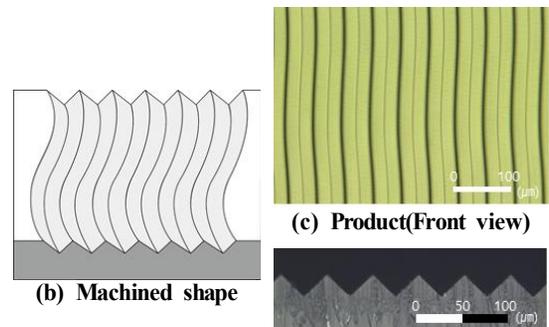


Fig. 3 Micro machining process using the horizontal type FTS

정성이 우수하고 운동범위가 넓으며 강성이 강한 Notch type(노치)힌지를 선택하였다. 노치힌지는 유연성과 스프링 복원력도 좋아 모멘트 축으로 활용하기에 적합한 모델이다^[5]. 힌지를 중심으로 진동하는 Swing type FTS를 개발하기 위해 대표적으로 두 가지 타입의 구조설계를 진행하였다. 원하는 범위를 위한 설계를 거쳐 제작하고 실험과 측정을 통해 성능을 비교하였다. 본 논문은 그동안 연구했던 Swing type FTS의 두 가지 힌지 구조에 대한 성능의 차이점에 대한 원인을 이론적으로 분석하고 해석을 통해 증명하는 고찰이다.

2. 개발 및 실험

2.1 이론적 배경

Swing type FTS 개발은 지렛대 원리를 이용한 시소운동을 기반으로 설계하였다. 지금까지 지렛대 원리를 응용한 다양한 구동 메커니즘을 개발하였으며 주로 초정밀 나노스테이지 연구에 활용되는 대표적인 기술이다^[6,7]. 이러한 지렛대 원리를 FTS 횡방향 진동 메커니즘에 응용하여 노치힌지를 중심으로 시소 운동하는 캔틸레버형 모델을 고안하였다.

캔틸레버 구조는 지지점의 위치에 따라 처짐 현상이 발생하고 진동시 내적요인이 가중되는 문제

점이 있다. 따라서 설계의 기본 개념은 지지점의 위치를 고려하여 Fig. 4와 같이 직삼각형과 직사각형 지지타입으로 나누었다. 시소회전 중심의 힌지(h_1)로 고정되는 기점(P_3)에서 p 의 예압에 의해 고정되는 지점(P_1)까지의 거리(d_p)와 툴의 끝 지점까지의 거리(d_t)를 1:1로 지정하였고 이는 두 타입 모두 동일하다. 구동 메커니즘은 PZT(납 티탄산 지르코늄)압전소자에 전압을 인가하여 p 에 하중(F)이 부가되면 증폭량 만큼 P_1 이 이동하게 된다. 이때 h_1 을 중심으로 모멘트가 작용되고 툴은 PZT가 인가한 힘의 반대 방향으로 이동한다. PZT가 압축할 때 스프링(s)에 의해 원점으로 복귀한다. 이를 한 주기로 파형신호를 보내면 진동을 반복하게 된다. (a)는 모멘트 축을 형성하는 h_1 으로 고정되는 P_3 와 p 에 의해 고정되는 P_1 그리고 s 에 의해 고정되는 P_2 로 다소 불안정한 직삼각지지형 구조이다. 정삼각 지지형으로 안정적인 구조로 설계하려면 캔틸레버 중심에 상, 하로 힌지를 설계하여야 하는데 이는 제작에 있어서 많은 어려움이 있다. 하여 이를 보완하기 위해 h_1 의 반대면에 힌지(h_2)를 추가하여 고정점 P_4 를 설계한 사각구조의 지지점을 가진 (b)타입을 고안하였다. 하지만 이 타입은 회전에 대한 구조적 문제점을 안고 있다. PZT가 구동하면 P_3 를 중심으로 회전 모멘트가 인가되는데 그 반대 지점인 P_4 는 변형되는 양만큼 P_3 로 원주를 그리며 이동한다. 이때 (a)는 P_3 의 회전모멘트에 의해 P_4 에서 P_5 로 이동이 자유로운 반면 (b)는 h_2 의 구속에 의해 P_5 로의 이동에 제약이 있을 것으로 예상된다. 이러한 현상은 단단한 재질일수록 심화된다. 그러나 본 연구에서 사용할 재질은 스테인레스 합금(STS304)으로 유연성과 복원성이 우수하다. 그러므로 앞에서 언급한 구조적인 문제점은 크지 않을 것으로 예측되어 내구성에서 유리한 직사각의 지지형(b)으로 개발하고자 하였으나 두 가지 타입을 모두 제작하여 비교 실험을 통해 검증하고 결과에 대해 원인 분석 및 고찰하였다.

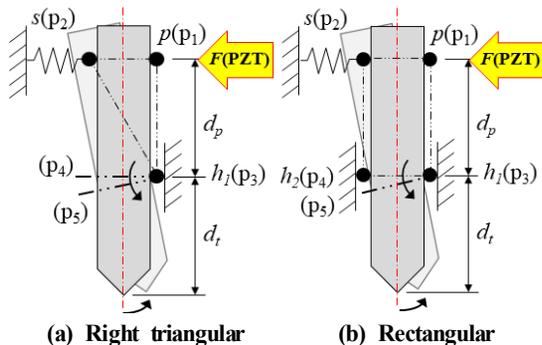


Fig. 4 Motional mechanism of (a)right triangular support type with single-side hinge and (b)rectangular support type with dual-side hinges

2.2 주파수응답특성 실험

앞서 설명하였던 이론적 배경을 바탕으로 1개의 힌지로 구성된 Single-side hinge(S)타입과 Dual-side

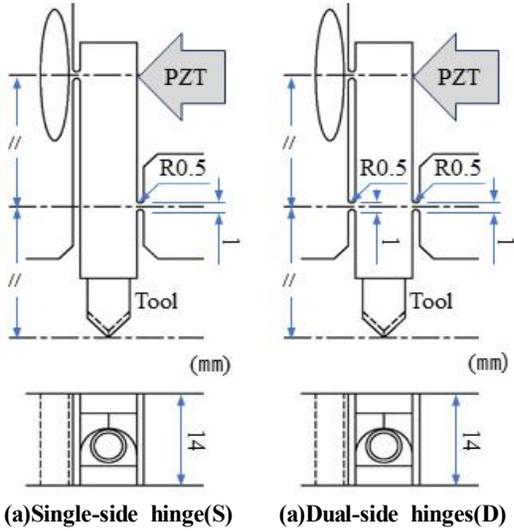


Fig. 5 Defaults of design according to types

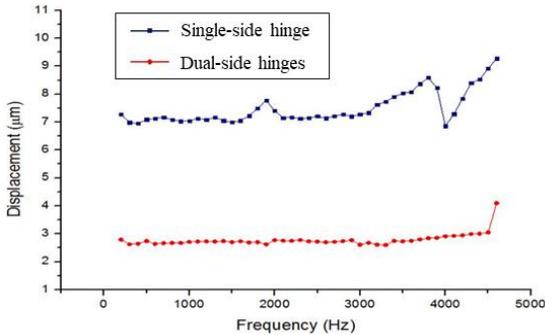


Fig. 6 Graph of frequency response characteristics

hinges(D)타입을 Fig. 5과 같은 제원으로 설계하여 제작하였고 400Vpp 전압을 인가한 상태에서 25nm 급 정전용량형 캡센서를 이용하여 주파수응답특성 실험을 하였다.

결과는 Fig. 6과 같이 나타났으며 S타입이 D타입보다 약 2.3배 변위가 큼을 알 수 있다. 이는 모멘트가 발생하는 힌지의 상호관계에 따른 결과로 예측된다. 즉, 두 개의 힌지 구조는 서로 다른 모멘트 점의 위치를 소유하고 있다. 따라서 구동시 서로의 모멘트 구동으로 인해 각 힌지의 운동을 방해하는 것으로 사료된다^[8]. 메커니즘 설계자들은 장비의 무게를 줄이고자 흔히 타공을 디자인한다.

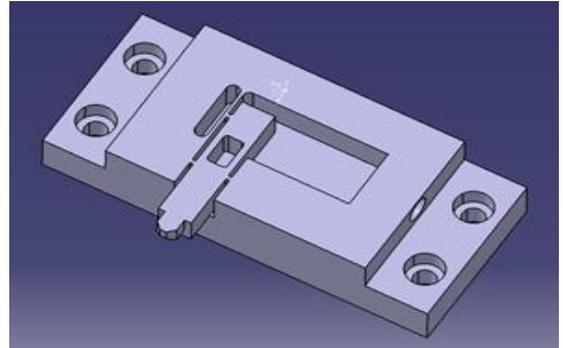


Fig. 7 Hall design to light in weight of structure

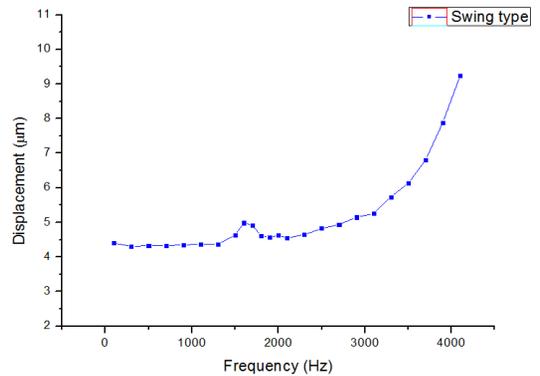


Fig. 8 Frequency response characteristics of swing type FTS designed hall^[9]

특히 FTS는 미세진동을 기반으로 하므로 고유진동수에 민감하다. 고유진동수는 장비의 무게와 연관성이 있어 캔틸레버 타입 구조물의 무게를 줄이고자 Fig. 7와 같이 중간에 타공을 디자인한다.

하지만 이는 오히려 고유진동수에 더욱 민감하게 만든다. 이는 이미 선행연구를 통해 증명되었으며 제작하여 주파수응답특성 실험한 결과를 Fig. 8에서 보여준다. Fig. 7과 같이 직사각 지지형인 D타입 이지만 주파수 3kHz에서부터 고유진동이 점차 증가됨을 확인하였다^[9,10].

본 실험은 4kHz 조건에서 가공하였으므로 타공형상의 구조물의 경우 변위가 증폭되어 시스템의 불안이 예상되어 적용하지 않았다.

2.3 가공 실험

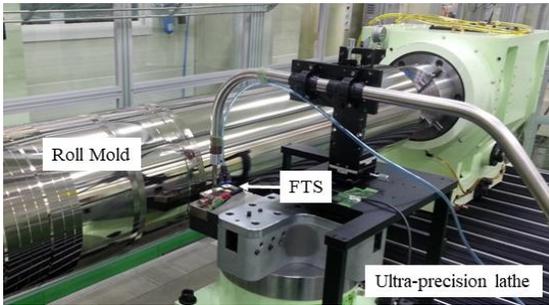


Fig. 9 Machining test using the ultra-precision lathe

Table 1 Experimental conditions in machining test

Classification		Conditions
Machine	Roll mold	$\phi 300\text{mm}$
	Spindle speed	30rpm
	Cutting depth	$7\mu\text{m}$
FTS tool	Waveform	Sine
	Output voltage	400Vpp
	Amplitude	S: $\pm 3\mu\text{m}$ D: $\pm 1.5\mu\text{m}$
	Frequency	4kHz

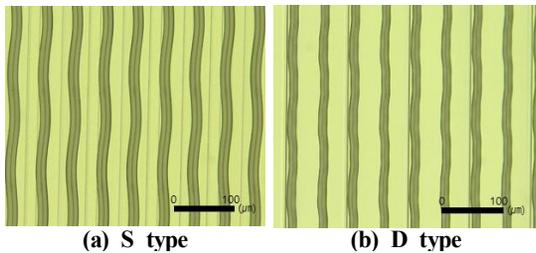


Fig. 10 Machining test results by swing FTS types

주파수응답특성 실험을 통해 D타입보다 S타입의 변위가 더 크음을 알 수 있었다. 하지만 현장에서는 변위의 효율성이 높다하여 무조건 사용되지 않는다. 금속을 가공하는 공정에 적합하려면 구조물의 안정성과 절삭력이 뒷받침되어야 한다. 그러므로 두 가지 타입 모두 제작하였으며 한국기계연구원(KIMM)에서 개발한 초정밀 롤금형가공기^[11]를 이용하여 현장평가를 실시하였다.

절삭각 90°인 다이아몬드 툴을 체결하여 사용하였으며 Table 1의 가공조건으로 실험하였다. 실험 결과, 변위에 있어서는 두 타입 모두 주파수응답 특성 실험에서 보여줬던 결과 값과 유사하였다.

이는 두 모델 모두 강성 및 절삭력에서는 큰 차이가 없다는 것을 보여준다. 하지만 Fig. 10을 통해 알 수 있듯이 형상정밀도에서 S타입은 정형적 사인파형으로 부드럽게 가공되는 반면 D타입은 거칠고 부자연스러운 모습을 보여준다. 결국 시소운동의 모멘트 중심축을 이루는 두 힌지가 마주 봄으로써 간섭에 의해 서로를 구속하는 조건이 된 것으로 사료된다^[12,13].

3. 해석 및 고찰

3.1 유한요소 해석

두 타입의 차이점에 대해 지금까지의 연구를 기반으로 유한요소 해석을 통하여 결과와 비교하였다. 제작을 위해 설계된 치수대로 3D모델링을 하였고 0.4mm의 메쉬로 분할하여 힘이 가해졌을 때의 정적구조 변화를 해석하였다. 입력한 물성치는 제품과 같은 STS304의 물성치이다.

제품으로서의 성능은 툴의 변위에서 최종적으로 결정되므로 Fig. 11과 같이 PZT의 증폭된 힘이 가해졌을 때 툴의 끝점이 약 6 μm 이동할 수 있는 힘

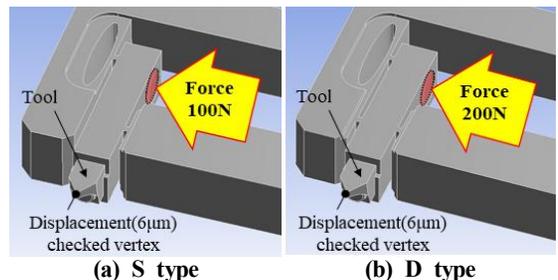


Fig. 11 Input force for static structure analysis

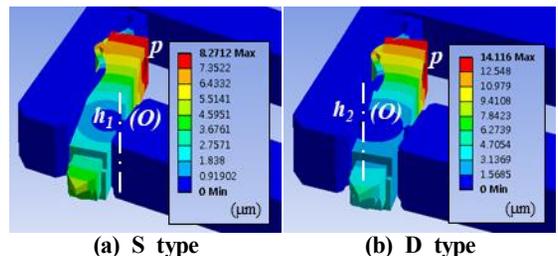


Fig. 12 Results of static structure analysis

을 찾아보았다. S타입은 100N, D타입은 200N으로 D타입이 S타입 보다 2배의 힘이 필요하였다. 이것은 주파수응답특성 실험 결과에서 확인한 변위의 차이점과 연관된다. 두 타입 모두 톨 끝점 변형값이 유사하게 나올 수 있도록 PZT 힘을 설정하여 해석한 결과는 Fig. 12와 같다. S타입은 설계의 의도대로 h_1 에서 모멘트 축(O)이 형성되는 반면 D타입은 h_2 에서 O가 형성되었다. 특히 톨 끝점이 두 모델 모두 동일한 값의 이동이 필요하다면 PZT의 힘은 S보다 D가 2배의 힘이 필요하였으며 p 의 변형도 2배가 되어야 한다.

3.2 이론적 고찰

캔틸레버형 횡방향 구동 FTS의 개발에 있어서 제작 및 실험과 해석을 통하여 두 모델간의 차이점을 확인하고 검증하였다. 앞에서 나열한 두 모델의 결과에 대한 원인은 근본적으로 힌지(h_1, h_2) 설계에 따른 구동 메커니즘의 차이에 있다. 이는 캔틸레버의 굽힘모멘트 이론에서 근거를 찾을 수 있는데 Fig. 13은 설명을 위한 개념도이다.

(a)는 힌지 하나로만 지지되는 타입으로서 p 지점에 힘(F)이 가해지면 h_1 을 회전축(O)으로 모멘트(M)가 형성되므로 \overrightarrow{HF} 의 벡터방향으로 길게 형성된다. 이때 거리 $L = L'$ 이고 최대굽힘모멘트 지점은 p' 이므로 보의 두께를 고려한 S 타입의 최대 굽힘모멘트($Mmax$)는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Mmax = (F \cdot L \cdot 2) / \cos\theta \quad (1)$$

또는

$$Mmax = (F \cdot (L + L')) / \cos\theta \quad (2)$$

(b)는 마주보는 힌지 두 개(h_1, h_2)로 지지됨으로써 h_1 을 중심으로 M 가 형성되지 못하고 고정점 h_2 에서 M' 가 형성되고 \overrightarrow{HF} 의 벡터는 h_2 에서 묶여버린다. 이로써 최대굽힘모멘트의 거리는 반(L)으로 줄어들게 되고 θ 는 S 타입 보다 미세하게 커지게 된다. 그러므로 D 타입의 최대굽힘모멘트 ($M'max$)는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

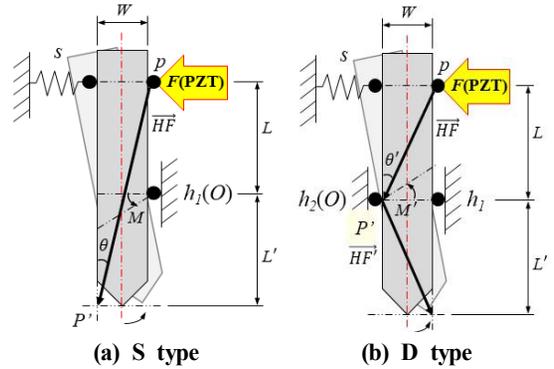


Fig. 13 Driving mechanism by swing FTS types

$$M'max = (F \cdot L) / \cos\theta' \quad (3)$$

두 타입 모두 PZT에 주어진 힘(F)과 보의 두께(w)가 같으므로 최대굽힘모멘트의 차이는 거리(L, L')와 비율인 θ 에 따라 결정된다. 이러한 원리로 S 타입이 D 타입 보다 두 배 정도의 적은 힘으로 같은 변위의 성능을 낼 수 있는 것이다.

가공 실험 결과(Fig. 10)와 유한요소 해석 결과(Fig. 12)에 대한 설명은 설계에 따른 벡터의 변화로 설명 가능하다. S 타입(a)은 지지점(h_1)이 하나로서 회전축을 기준으로 모멘트가 작용하고 반면 D 타입(b)은 힌지(h_1, h_2) 두 개로 고정되어 있음으로서 힘(F)에 의한 벡터(\overrightarrow{HF})가 고정되어 있는 반대편 힌지(h_2)로 향하게 된다. 유연힌지의 소재에 따른 물리적 특성과 설계적 요소에 의해 회전축이 h_2 로 이동을 하게 되고 M' 가 형성되게 된다. 이렇게 서로의 간섭으로 인해 회전축이 h_1 과 h_2 가 번갈아 가며 회전축이 된다. 이러한 원리로 정형파가 아닌 각진 사인파형이 형성되게 되는 것이다. D 타입은 소재의 물성치에 상당한 영향을 받는다. 만약 고강도, 고경질의 소재로 제품을 만들어 구동을 시키면 PZT가 오히려 파손되고 메커니즘은 아예 작동을 하지 않을 것이다.

4. 결론

지금까지 캔틸레버형 횡방향 FTS의 힌지구조에 따른 제작 및 실험으로 두 모델간의 성능을 파악

해 보았고 해석을 통해 실험값이 틀리지 않았음을 확인하였으며 이론적 고찰을 통해 원인을 분석하였다. 이에 따른 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 시소원리를 이용한 캔틸레버형 구동 메커니즘을 설계할 때는 모멘트 축을 하나로 하는 것이 용의하다.
2. 만약 구조적인 안정감을 더 중요시하여 두 개의 힌지로 설계를 할 경우는 모멘트 축이 서로 간섭받지 않게 구성하여야 하고 소재 선정에 신중하여야 한다.
3. 캔틸레버형 구조 설계시 무게를 줄이기 위해 타공을 고안하는 것은 자칫 고유진동수에 민감한 디자인이 될 수 있으므로 신중을 기해야 한다.

REFERENCES

1. Lee, H. J., "Next-generation display industry status and standardization trend", KATS Technical Report, No. 97, pp. 4-11, 2017.
2. Jang M., Choi H. R., Yang H. C., "Plastic Electronics Research Trends", Polymer Science and Technology Vol. 22, No. 3, pp. 261-274, 2011.
3. Lee, K. I., Yang, S. H., "Measurement Method for Geometric Errors of Ultra-precision Roll Mold Machine Tool: Simulation", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 10, pp. 1087-1093, 2013.
4. Lee, S. J., Lee, D. W., Lu, H., Lee, S. M., Kim, M. R., Seo, M. N., "A Study of Element Design for Left & Right moving FTS", Proceeding of the KSPE Spring Conference, pp. 993-994, 2013.
5. Yuen, K. Y., Lu, T. Fu., Handley, D. C., "Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations", Precision engineering, Vol. 32, pp.63-70, 2008.
6. Choi, S. C., Kim, Y. W., Kim, J. G., Park, J. W., Lee, D. W., "Development of High Precision Nano-Stage using Magnified Mechanism", Proceeding of the KSMTE Autumn Conference, pp. 61-65, 2008.
7. Choi, S. C., Kim, J. G., Kim, Y. W., Park, J. W., Lee, D. W., "Developing Precision Nano-Stage for Precision Measuring System", Proceeding of the KSMTE Spring Conference, pp. 11-14, 2009.
8. Lee, S. J., Lee, D. W., Lee, S. M., Kim, M. R., Li, L., Lee, J. Y., "A Study on Bi-directional Motion Characteristics of FTS according to Hinge's Structures", Proceeding of the KSPE Autumn Conference, pp. 726, 2014.
9. Kim, M. R., Lee, S. M., Lu, H., Lee, S. J., Lee, D. W., "A Study on Development of Swing type Fast Tool Servo", Proceeding of the KSMTE Autumn Conference, p. 318, 2013.
10. Kim, M. R., Lee, S. M., Lu, H., Lee, S. J., Lee, D. W., "A Study on Characteristics for Swing type Fast Tool Servo Development", Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, p. 101, 2013.
11. Oh, J. S., Song, C. K., Hwang, J. H., Shim, J. Y., Park, C. H., "An Ultra-precision Lathe for Large-area Micro-structured Roll Molds", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 12, pp. 1303-1312, 2013.
12. Kim, M. R., Lee, S. J., Lee, S. M., Lu, H., Lee, D. W., "Machining Characteristic of Roll using Swing type Fast Tool Servo", Proceeding of the KSMTE Spring Conference, p. 214, 2014.
13. Kim, M. R., Lee, D. W., Lee, S. J., Kim, Y. W., Jung, Y. H., "Effects of hinge design of horizontal-swing fast tool servo (HFTS) for micro-patterning on a roll," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 95, pp. 233-241, 2018.