

# 마이크로 펀칭시스템 구현을 위한 심벌변위확대기구의 설계

최종필\*, 이광호\*, 이해진<sup>+</sup>, 이낙규<sup>+</sup>, 김성욱<sup>++</sup>, 주은덕<sup>++</sup>, 김병희<sup>+++</sup>

(논문접수일 2008. 7. 17, 심사완료일 2009. 1. 22)

## Design of Cymbal Displacement Amplification Device for Micro Punching System

JongPil Choi\*, KwangHo Lee\*, Hye-Jin Lee<sup>+</sup>, Nak-Gue Lee<sup>+</sup>,  
Seonguk Kim<sup>++</sup>, Andy Chu<sup>++</sup>, ByeongHee Kim<sup>+++</sup>

### Abstract

This paper presents the development of a micro punching system with modified cymbal mechanism. To realize the micro punching, we introduced the hybrid system with a macro moving part and micro punching part. The macro moving part consists of a ball screw, a linear guide and the micro step motor and micro punching part includes the PZT actuators and displacement amplification device with modified cymbal mechanism. The PZT actuator is capable of producing very large force, but they provide only limited displacements which are several micro meters. Thus the displacement amplification device is necessary to make those actuators more efficient and useful. For this purpose, a cymbal mechanism in series is proposed. The finite element method was used to design the cymbal mechanism and to analyze the mode shape of the one. The displacement and mode shape error between the FEM results and experiments are within 10%. A considerable design effort has been focused on optimizing the flexure hinge to increase the output displacement and punching force.

**Key Words** : Micro punching system(마이크로펀칭시스템), Hybrid system(융합시스템), Piezo electric actuator(PZT)(압전세라믹), Cymbal mechanism(심벌메커니즘), Displacement amplification device(변위확대기구), Finite element method(FEM) (유한요소해석)

## 1. 서론

최근 각종 제품이나 부품들이 점차 소형화를 넘어 미세화

되어가고 있으며, 이를 바탕으로 마이크로/나노 기술의 일부로서 각종 미세부품 제작 기술에 대한 연구의 필요성이 점차 증가하고 있다<sup>(1)</sup>. 마이크로 부품 제작 공정 중 마이크로 펀

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 대학원  
+ 한국생산기술연구원 디지털 성형공정팀 연구원  
++ 스페이스솔루션(주)  
+++ 교신저자, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 (kbh@kangwon.ac.kr)  
주소: 강원도 춘천시 효자2동 강원대학교길1 192-1

칭을 이용한 홀 가공과 딥 드로잉 공정은 여러 분야에서 활용되고 있다. 이러한 마이크로 홀을 가공하는 방법으로는 마이크로 펀칭 공정 이외에도 마이크로 드릴가공, 레이저 가공, 마이크로 방전가공 그리고 마이크로 초음파 가공 등 여러 가공법이 있으나, 생산성과 비용 절감 그리고 가공 홀의 형상 반복 정밀도의 관점에서 볼 때 마이크로 펀칭 기술이 큰 이점을 가지고 있다.

펀칭공정의 효율성은 펀치 스트로크의 횟수에 따른 펀칭 속도에 의존하게 된다. 기존 크랭크를 이용한 펀칭공정 및 압축 공기, 중력 드랍 해머의 경우 수 Hz의 낮은 펀칭속도로 구동되어진다. 그러나 PZT는 전기적 에너지를 다른 변환장치 없이 바로 기계적인 운동으로 바꿔주기 때문에 고 정밀, 고 하중, 고 응답성 등의 특성을 지니고 있으므로 펀칭 공정에 적용하였을 경우, 매우 높은 펀칭 속도 및 효율성을 기대할 수 있다. 또한 PZT는 전압의 공급 유무에 의해 초기위치에서 최대 변위로의 변형을 반복하기 때문에 움직임이 부드럽고 연속적이며, 시스템의 소형화가 가능하다는 장점을 지니고 있다<sup>(2-4)</sup>.

본 논문에서는 이러한 PZT를 이용한 마이크로펀칭 시스템 개발을 위해 펀칭에 필요한 PZT 변위를 확보하기 위하여 심벌 변위확대기구를 도입하였으며, 마이크로 스텝모터와의 연계를 통해 고속 마이크로펀칭 시스템을 구현하고자 한다.

## 2. 마이크로 펀칭 시스템의 구성

### 2.1 매크로 이송모듈

매크로 이송부는 30mm 이상의 행정을 위해 볼스크류와 0.5 $\mu$ m의 분해능을 가지는 마이크로 스텝 모터 및 피드백을 위한 리니어 스케일로 구성되어진다.

매크로 이송부는 마이크로 스텝모터를 이용하여 마이크로 펀칭을 위한 펀치와 다이간의 간격 조절과 재료의 로딩 및 언 로딩을 위한 대변위 이송을 수행한다. 이러한 정밀한

위치 제어는 리니어스케일을 통해 이루어진다. Table 1은 마이크로 스텝모터와 볼스크류가 장착된 매크로 이송모듈의 사양을 보여주고 있다.

### 2.2 마이크로 펀칭모듈

마이크로 펀칭모듈은 PZT와 PZT의 제한된 변위를 증폭시키는 변위확대기구로 구성되어진다. PZT의 가장 큰 특징은 압전효과로, 재료의 결정판에 일정한 방향에서 압력을 가하면 결정판에 작용하는 압력에 비례하여 전압이 발생하게 된다. 이러한 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 현상을 압전 직접효과(Piezoelectric direct effect)라 한다. 이와는 반대로, 재료에 전압을 인가하면 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 재료의 변형을 일으키는 현상을 압전 역효과(Piezoelectric converse effect)라 한다<sup>(5)</sup>. 따라서 전기적인 에너지를 다른 변환장치 없이 바로 기계적인 운동으로 바꾸어 줌으로 위치제어에 효과적이며, 큰 힘과 고 분해능, 고 응답 특성을 지니고 있다. Table 2는 본 연구에 사용된 독일 PI사의 P-007.20의 사양을 보여주고 있다. 그러나 이러한 특징에도 불구하고 PZT는 수~수십  $\mu$ m의 변형 한계를 지니고 있다. 따라서 마이크로 펀칭 시스템의 펀칭을 위한 충분한 스트로크를 얻을 수 없게 된다.

따라서 본 논문에서는 PZT 변형의 한계를 극복하기 위하여 힌지구조물을 이용한 변위확대기구의 설계 및 제작을 수행하였으며, 이러한 변위확대 메커니즘이 적용된 마이크로 펀칭 시스템의 구현 가능성을 평가하였다.

## 3. 심벌변위확대기구의 설계

변위확대기구는 지렛대(lever-type flexure hinge) 메커니즘, 브릿지(bridge-type flexure hinge) 메커니즘 그리고 무니(moonie-type flexure hinge) 메커니즘 등 크게 3개로 구분 지을 수 있다<sup>(6-8)</sup>. 지렛대 타입은 고전적인 유연 힌지 메커니즘으로 그 증폭 비율은 피벗들 사이의 거리 비율에 의존

Table 1 Specifications of the guide module

Specification	Description
Stroke	30mm
Resolution	0.5 $\mu$ m
Repeatability	$\pm 0.1\mu$ m
Pitching	2.5"
Yawing	2.0"

Table 2 Specifications of the PZT

Specification	Description
Displacement	30 $\mu$ m
Length	29mm
Blocking force	1000N
Capacitance	64nF

하게 된다. 또한 낮은 강성을 지니고 있어 고속 펀칭에는 적용이 어렵다는 단점을 지니고 있다. 지렛대 타입은 인가된 힘과 평행한 방향으로 변위가 증폭된다. 이에 반해, 무니 메커니즘은 인가된 힘과 수직되는 방향으로 변위가 증폭되며 소형 시스템의 변위확대용 기구로 많이 사용되어진다. 이러한 무니 메커니즘은 기구 설계가 용이하며 대 변위 증폭 구현과 고 응답성 등의 특징을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는, 무니 메커니즘의 한 형태인 심벌 타입을 이용하여 PZT 변위확대기구를 구현하였으며, 이를 마이크로 펀칭 시스템에 활용하였다.

Fig. 1에 심벌 변위확대기구의 기본 형상과 변위 증폭을 위한 각 파라미터들을 보여주고 있다. PZT의 양쪽 끝단에서 발생된 변위는 심벌 형태의 변위확대기구를 수평방향으로 팽창시킨다. 이때, 심벌 구조물의 수직방향으로는 증폭된 변위가 줄어들게 되고, PZT에 인가된 전압 차단 시 심벌 구조물의 증가된 변위가 원상복귀되며 전체 변위를 증가시키며, 구조물의 탄성에 비례하는 복원력 및 펀칭력을 가지게 된다.

심벌 구조물의 최대 변위 증폭률은 각 파라미터 값들에 따라 변화가 생기게 되며, 이러한 최대 증폭률을 얻기 위하여 Fig. 1의 파라미터들을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였으며, Fig. 2는 그 결과를 보여주고 있다. 30N의 반력은 30 $\mu$ m의 박판을 펀칭하기 위한 최소한의 전단력으로 실제 반력이 작용되어질 때의 변위 해석도 동시에 수행하였다. 그 결과  $t_1$ 은 4mm,  $t_2$ 는 3mm 그리고  $\theta$ 는 6 $^\circ$ 의 값을 가질 때 최대 변위가 발생됨을 확인하였다. 또한 펀칭에 필요한 변위를 확보하기 위하여 심벌구조물의 병렬 조합을 통하여 전체 변위를 증가 시켰으며, 총 3개의 심벌변위확대기구 조합을 통하여 150 $\mu$ m의 변위를 얻을 수 있었다.

Fig. 3은 심벌변위확대기구 3단 적층 형태의 유한요소 해석 결과를 보여주고 있다. Al-6061을 사용하였으며, 30 $\mu$ m의 변위를 가지는 PZT 3개를 이용하여 약 140 $\mu$ m의 최대 증폭

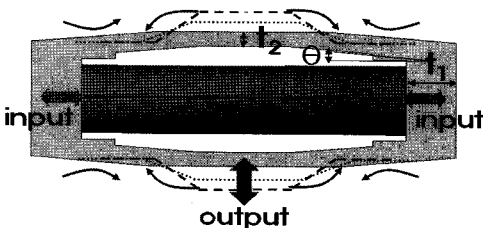
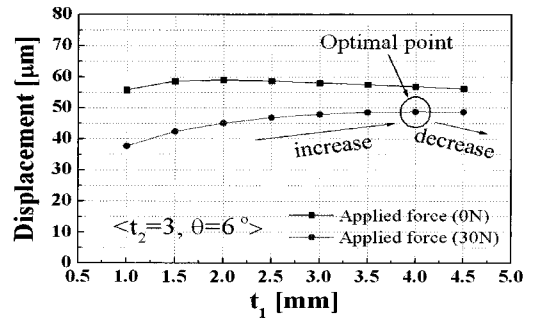


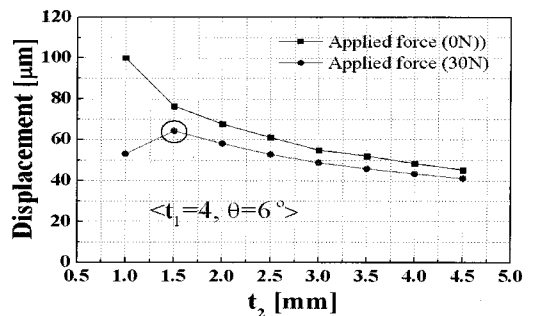
Fig. 1 Schematic of cymbal displacement amplification device

변위를 얻을 수 있었다. 이때 변위확대기구의 최대응력이 Al-6061의 최대 항복응력점인  $2.75 \times 10^8 \text{N/m}^2$  아래에서 거동함을 확인하였다.

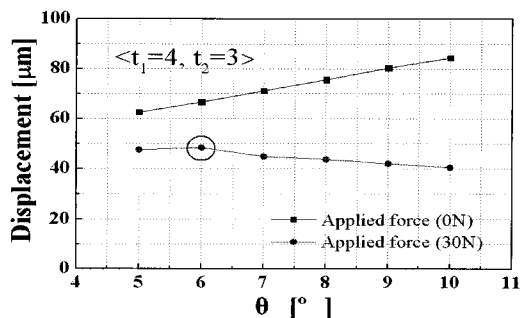
펀칭 공정은 PZT를 이용하여 고속으로 진행되는 작업이기 때문에 변위확대기구의 동적 거동 특성 또한 중요한 설계 요인으로 작용되어진다. 따라서 유한요소 해석을 통해 구조물의 진동모드 해석을 수행하였다. 심벌변위확대기구의 모



(a) Parameter  $t_1$



(b) Parameter  $t_2$



(c) Parameter  $\theta$

Fig. 2 FEM results of output displacement with respect to design parameters

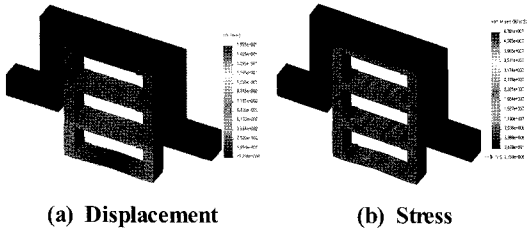


Fig. 3 Static analysis of 3 cymbal displacement amplification device

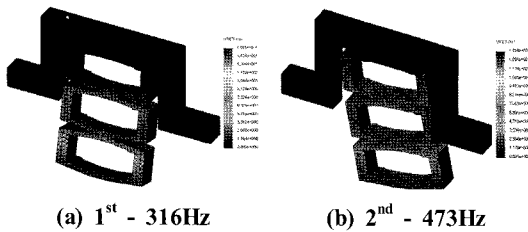


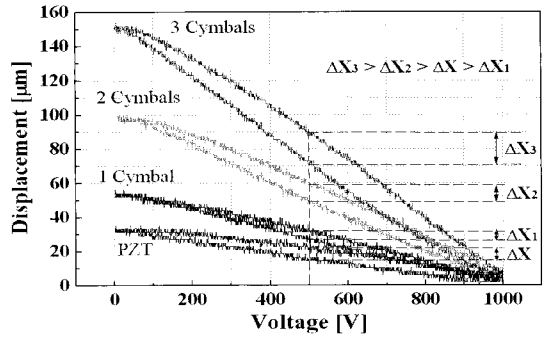
Fig. 4 Dynamic analysis of 3 cymbal displacement amplification device

드 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 해석 결과로 3단 적층형 변위확대기구의 1차 모드는 316Hz로 마이크로 펀칭 시스템에서 요구되어지는 10Hz 이상의 연속 펀칭공정 수행이 가능함을 확인하였다.

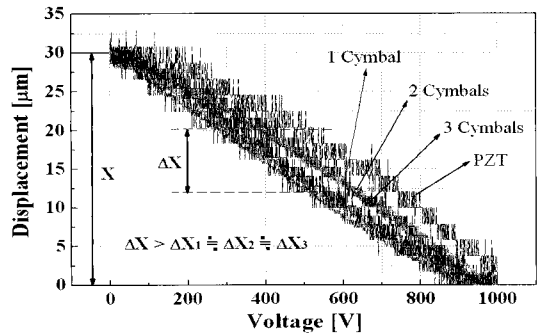
#### 4. 실험결과 및 고찰

PZT 및 제작된 변위확대기구의 구동 특성 분석을 위하여 NI사의 Labview 프로그램을 사용하였다. DAQ Board에서 인가되는 5V의 입력신호는 고전압 증폭기를 거쳐 0~1000V로 증폭되며, 이 증폭된 전압은 각각의 PZT로 인가되어진다. 이러한 3개의 PZT 구동을 통해 3단 적층형 심벌변위확대기구의 구동 실험이 수행되어지며, 이를 Portable Laser Vibrometer(Polytec Co.)를 이용하여 변위 측정을 수행하였다.

압전소자의 경우 그 자체가 가지고 있는 비선형성으로 인해 반복 정밀도 저하를 수반하게 된다. 히스테리시스 특성은 입력전압과 출력변위 사이의 비선형성으로, 인가전압에 대응되는 출력변위가 다르게 나타나는 현상이다. 이러한 압전소자의 히스테리시스 곡선은 인가전압을 증가시킬 때의 상승 곡선과 감소시킬 때의 하강 곡선으로 이루어지는 하나의 루프를 특징한 기하학적 형상을 가지고 있다. Fig. 5(a)에



(a) Hysteresis according to the number of cymbals



(b) Normalized hysteresis

Fig. 5 Hysteresis of cymbal displacement amplification device

PZT 및 제작된 심벌변위확대기구 개수에 따른 히스테리시스 곡선과 Fig. 5(b)는 이러한 결과를 하나의 PZT에 대해 정상화(normalization) 시킨 곡선을 보여주고 있다. 심벌변위확대기구에 의해 예압을 받은 PZT는 20.5%에서 7.7%까지 히스테리시스가 감소하게 된다. 따라서 PZT의 응답특성 및 변위 정밀도를 증가시키는 요인으로 작용하게 된다. 또한 심벌구조물의 개수가 증가함에 따라 전체 히스테리시스는 누적되기 때문에 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 유한요소 해석을 이용해 계산된 변위와 실제 측정된 변위의 비교 결과를 보여주고 있다. 두 값의 비교를 통해 10% 내의 범위에서 오차가 발생함을 확인할 수 있으며, 심벌 구조물의 개수가 증가 할수록 전체 변위는 선형적으로 증가한다. 이러한 결과로부터, 펀칭에 필요한 변위를 확보하기 위한 심벌변위확대기구의 개수를 결정할 수 있다.

Fig. 7은 입력 파형과 주파수 변화에 따른 3단 적층형 심벌변위확대기구의 응답특성을 보여주고 있다. 사각파형이

PZT에 인가되었을 때 가장 큰 변위가 발생되며, 이는 최대 입력전압이 PZT에 인가되어지는 시간이 사각파형에서 가장 길기 때문에 추정된다. 또한 주파수가 증가함에 따라 출력 변위가 점차적으로 감소함을 확인할 수 있는데, 이는 PZT가 가지고 있는 정전용량(capacitance)으로 인한 동적 거동 특성의 저하라 할 수 있다. 특히 이러한 정전용량은 전압 증폭기의 출력특성에 가장 큰 영향을 받게 된다.

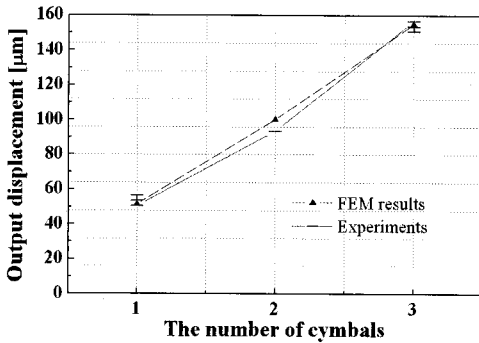


Fig. 6 Comparison of FEM results and experiments

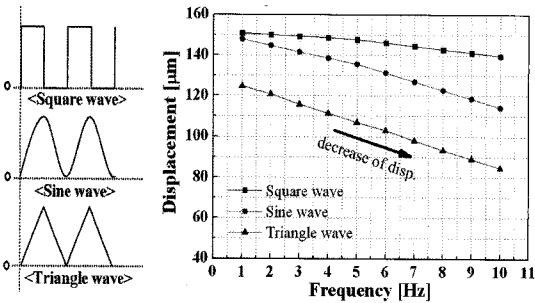


Fig. 7 Displacement of cymbal displacement amplification device according to input wave

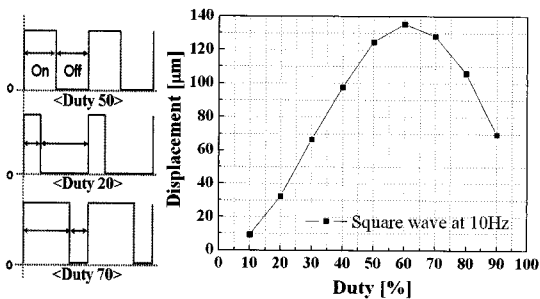


Fig. 8 Displacement of cymbal displacement amplification device according to duty ratio

Fig. 8은 10Hz의 사각파형이 인가되어 질 때 듀티비의 변화에 따른 심벌변위확대기구의 출력변위를 측정 한 그래프로, 듀티비가 60%일 때 135 $\mu$ m의 최대변위가 측정되었다.

## 5. 마이크로 펀칭 시스템 제작

볼스크류, 마이크로 스텝 모터, 리니어 스케일 등을 포함한 매크로 이송모듈과 PZT와 변위확대기구 등을 포함한 마이크로 펀칭모듈로 구성되어진 마이크로 펀칭 시스템과 연속 펀칭을 위한 박판 스트립의 공급시스템을 Fig. 9에서 보여주고 있다. 매크로 이송모듈의 볼스크류와 마이크로 스텝 모터에 의해 마이크로 펀칭모듈의 이송이 수행되어지며, 펀치와 다이 사이에 일정한 간격에 도달하게 된다. 이때 PZT의 구동에 의해 심벌변위확대기구의 변위 증폭에 의한 연속 펀칭공정이 수행되어 진다. Fig. 10은 이러한 마이크로 펀칭

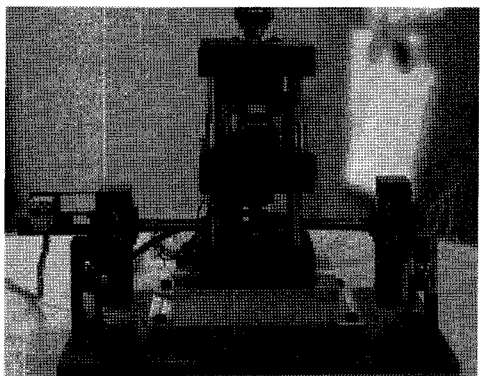
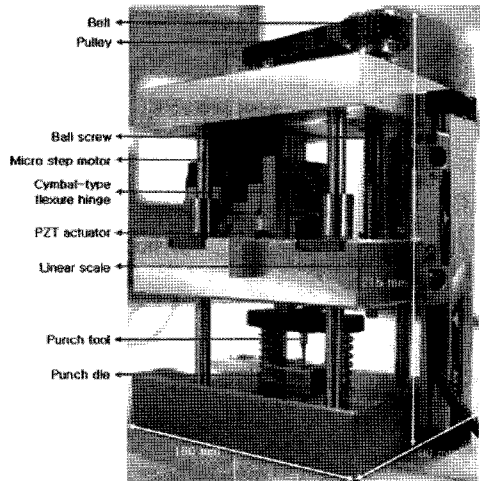


Fig. 9 Picture of micro punching system

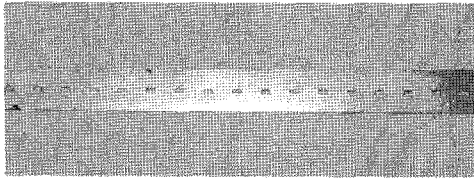


Fig. 10 Punching result of thin metal sheet

시스템을 이용하여 30 $\mu$ m 두께의 STS 박판에 연속 펀칭을 수행한 결과를 보여주고 있다. 현재 약 5Hz 정도의 연속 펀칭 수행이 가능하며, 펀칭 톨과 다이와의 정렬 및 제어가 수행되어진다면 더 빠른 펀칭 공정도 가능할 것으로 추정되어진다. 제작된 마이크로 펀칭 시스템의 크기는 215 × 160 × 90mm<sup>3</sup>이다.

## 6. 결론

본 논문에서는 매크로 이송모듈과 마이크로 펀칭모듈로 구성된 마이크로펀칭 시스템을 개발하였다. 매크로 이송모듈은 마이크로 스텝 모터와 볼스크류 등으로 구성되어지며, 마이크로 펀칭모듈은 PZT와 심벌변위확대기구로 구성되어진다.

PZT의 변위를 확대하기 위하여 심벌변위확대기구를 도입하였다. 심벌변위확대기구의 설계를 위해 유한요소 해석을 사용하였으며, 설계 파라미터의 조절을 통해 최대변위가 발생하는 최적 형상을 도출하였다. 또한 적층 형태의 변위확대기구를 통해 더 큰 변위 증폭을 수행하였으며, 고속 펀칭 특성을 파악하기 위하여 모드 해석을 수행하였다.

제작된 3단 적층 심벌변위확대기구를 통하여 PZT에 인가된 입력파형과 주파수, 듀티비의 변화에 따른 거동 특성을 분석하였다. 그 결과 60% 듀티비의 사각파형에서 135 $\mu$ m의 최대 변위가 발생함을 확인하였으며, 해석 결과와 측정결과와의 비교를 통해 약 10%의 오차 범위 내에 존재함을 확인하였다. 이러한 특성평가를 통하여 심벌변위확대기구가 적용된 마이크로펀칭 시스템 제작 및 펀칭 공정을 수행하였다.

추후 심벌변위확대기구의 강성 확보를 위한 추가설계 과정이 진행될 예정이며, 펀칭 톨과 다이의 정렬을 통한 펀칭 후 발생한 버의 최소화를 위한 연구가 수행될 계획이다.

## 후 기

본 논문은 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 “차세대 마이크로 팩토리 시스템 기술 개발 사업”의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

또한 이 연구에 참여한 연구자는 ‘2단계 BK21 사업’의 지원비를 받습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Park, S. J., Ahn, B. W., and Yoon, J. H., 2003, “Development of Ultraprecision Finishing Technique using Bonded Magnetic Abrasives,” *Transactions of KSMTE*, Vol. 12, pp. 59~66.
- (2) Zhang, B. and Zhu, Z. Q., 1994, “Design of an Inchworm-type Linear Piezo-motor,” *SPIE*, Vol. 21, pp. 228-239.
- (3) Yang, F. and Li, J. C. M., 1995, “Impression creep by an annular punch,” *Mechanics of Materials*, Vol. 12, pp. 89-97.
- (4) Yun, D. W., Ahn, K. H., and Han, C. S., 2007, “Development of Ultra Precision Rotational Stage using Semi-inchworm Driving Mechanism with PZT,” *Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 37-41.
- (5) Lim, J. H., Shon, J. H., Kim, J. J., Park, B. O., and Cho, S. H., 1995, “Variations of Piezoelectric Properties and Compressive Strength of PZT Ceramics with Poling Directions,” *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 32, No. 10, pp. 1131-1138.
- (6) Lobontiu, N., Paine, J., Garcia, E., and Goldfarb, M., 2002, “Design of Symmetric Conic-section Flexure Hinges based on Closed-form Compliance Equations,” *Mech. Mach. Theory*, Vol. 37, pp. 477-498.
- (7) Han, C. S. and Kim, S. H., 2002, “Three-axis Lever Actuator with Flexure Hinges for an Optical Disk System,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 73, pp. 3678-3686.
- (8) Smith, S. T. and Chetwynd, D. G. 1994, *Foundations of Ultra-precision Mechanism Design*, CRC Press, London.