한국정밀공학회지 제17권 제7호 (2000년 7월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 7, July 2000.

◆특집◆Micro Machining

소성가공에 의한 미세부품 성형기술

나경환*, 박훈재*, 조남선*

Processing of Micro-Parts by Metal Forming

Kyoung Hoan Na*, Hoon Jae Park*, and Nam Seon Cho*

Key Words : Milli-Structure(미세구조물), Micro Bulk Metal Forming (미세체적성형), Micro Sheet Metal Forming (미세박판성형)

1. 서론

현재 자본재산업의 기술낙후는 상품의 수출경쟁력 약화의 근원적인 원인이 되어 결국 지속적으로 선진국의 기술종속을 심화시키고 있다. 이러한 자본재 산업의 문제는 현재의 주력 수출상품의 핵심요소부품생산기술의 미비가 큰 원인이며(거의 주요핵심부품 도는 관련기술은 거의 대부분 수입에 의존하고 있음), 같은 논리로 차세대 산기술의 개발을 통한 첨단 상품의 개발도 이에 필요한 핵심요소부품의 생산기술이 뒤를 바쳐 주지 못한다면 결국 10년 후에도 현재와 같은 현상이 되풀이될 것은 분명하다.

이러한 핵심요소부품 중에서 구동 특성을 갖는 mm단위의 미소 기구물(Kinematic Milli Structure)은 제품의 경박· 소형화의 핵심기술이라 판단되며, 이 분야의 기술력이 궁극적으로 차세대 상품의 경쟁력을 좌우할 것으로 예상된다. 이러한 측면에서 국내는 물론 선진국에서도 오래 전부터 초소형부품의 생산기술에 관련한 연구가 진행되어 왔다. 이 기술분야 중 하나인 MEMS에 대한 집중적인 연구 및 가시적인 결과가 실제 산업적으로 일부 응용되고 있으나(Micro-Pump, Micro-Reactor, Micro-Motor 등) 현재의 MEMS 기술만으로 Kinematic-Milli-Structure가 요구되는 분야의 일부에 극히 제한적으로 응용되고 있으며(주로 LIGA 공정을 이용함), 다양한 삼차원 형상의 기구물에 적용을 위해서는 앞으로도 상당한 시간이 요구되고 있는 실정이다.

따라서 최근 일본을 비롯한 일부 선진국에서는 전통적인 가공방식에 의한 기술개발에 대해 관심이 크게 증가하고 있으며, 일부 Micro-Machining의 경우 많은 기술개발결과가 제품의 경박· 소형화에 응용되고 있다. (결국 일본의 Camcorder 등 가전, 통신 관련제품 가격경쟁력의 핵심이라 볼 수 있음)

그러나 KMS(Kinematic-Milli-Structure)부품의 경제성 있는 생산기술 즉 기계가공 방식이 아닌 소성가공 분야는 많은 기술적인 어려움으로 인해 선진국에서조차 거의 연구가 진행되지 않은 미개척 기술개발분야로서, 일본의 경우도 최근에서야 관련연구가 시작되고 있다. 그 한 예로 아직 상용화되지는 않았지만 내시경용 Jaw의 경우, 현재의 기계가공방식에 의해 1개의 생산시간이 수 십분 정도 요구되고 있으나 Micro-Forming방식으로 생산공정을 대체할 경우 생산시간은 약 1/10정도, 생산원가는 약1/100정도로 낮출 수 있다는 연구결과가 1996년 일본에서 보고되고 있다.

* 한국생산기술연구원 생산공정기술연구팀
Tel. 0417-5608-611, Fax. 0417-5608-610
Email khna@kitech.re.kr
소성가공 공정 특히, 초고압 응용 분야, 점진성형 분야, 금형 및 공정 설계 분야 및 미세 체적 성형에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

2. 미세소성가공 기술

2.1 미세소성가공 기술의 정의

미세소성가공 기술이란 크기가 몇 ㎜ 에서 몇 ㎛ 정도에 이르는 미세하고 작은 초소형의 기계요소를 소성변형을 이용하여 만드는 성형기술로 정의한다. 미세소성가공 기술은 소형이면서 정밀도가 높은 메카트로닉스 기술을 필요로 하는 각종 정보통신기기나 정밀기기, 미세수술, 인공장기, 진단과 치료에 따른 고통을 줄일 수 있는 고도의 의료 시스템, 소형기구 등에 사용되는 미세부품 제작을 위한 기술이다.

1970년대부터 초소형의 기계요소를 만드는 연구가 시작되었으나 별로 관심을 끌어오지 못하다가 최근 반도체 제조기술을 이용한 실리콘 기판상에 복잡한 구조체를 형성할 수 있게 되면서 마이크로머신 관련기술의 발전이 눈에 띄게 나타났으며, 또한 최근에 생산되는 전자제품 및 통신기기들은 개인 휴대를 간편히 하기 위해 초소형화 되어가는 추세에 있으며 동시에 경량화, 슬림(slim)화 및 대용량 고기능화의 요구로 인해 전자기기의 내부에 장착되는 제반 전자부품들도 초소형화, 초정밀화 되어가고 있다. 이에 경제적 측면에서 유리한 미세소성가공 기술에 대한 관심도 높아지게 되었다.

이러한 추세에 부응하여 세계적으로도 최근에 와서 미세소성가공에 대한 연구가 연구소와 학교를 중심으로 시도되고 있다. 일반적으로 미세박판 성형제품의 성형에는 수㎛에서 수백㎛ 두께의 박판이 요구되는데 이 두께는 전형적인 금속의 Grain size에 해당하며 두께방향으로 몇 개의 Grain이 존재하고, 극단적으로 하나의 Grain이 존재하는 경우도 있다. 이와 같은 조건에서의 성형은 기존의 전통적인 연속체 역학을 적용하기 곤란하며, 표면에서의 미세 거동 현상이 매우 중요한 요소로 작용할 수도 있다. 또한 요철을 갖는 형상을 얻기 위한 미세 체적성형에서도 Grain size는 성형에 제한을 가하게 되는데, 얻고자하는 제품의 곡률이 Grain의 곡률보다 작을 경우에는(대개 수㎛이하) 원하는 제품의 형상 정밀도를 얻기가 어렵게 된다. 따라서 가공소재의 재료학적인 측면이 고려되어야 하며 미세 다결정재료 또는 비정질 재료의 Bulk화 문제도 동반자적인 입장에서 해결해야할 분야이며, 현재 세계적으로도 이러한 분야와 함께 미세 소성가공연구가 시도되고 있다.

2.2 미세소성가공 기술의 종류

금속 성형은 크게 체적성형과 박판성형으로 크게 나누어지는데 전자부품이나 정밀기기 부품에 사용되어지는 초정밀부품의 생산은 주로 박판가공에 속하는 미세프레스 가공에 의해 제작되는 경우가 많다. 그것은 소성가공에 의해 만들어지는 대부분의 전자부품들이 판재 성형품들로 이루어져 있기 때문이다. 미세프레스 가공은 프레스 램의 압축행정을 이용하여 정밀 형공구에 의해 소재의 인장, 압축, 굽힘 등의 응력상태를 유발하여, 원하는 형상치수로 소성변형을 부여하여 성형하는 가공법이다. 미세 박판성형가공의 종류들로는 미세굽힘, 미세전단가공, 미세딥드로잉가공, 미세스트레칭가공 등이 있다.

미세체적성형(Bulk Forming)에는 미세스탬핑성형, 미세압출성형, 미세압연성형 등이 있으며, 이와 같은 성형기술들이 단독으로 이루어지는 경우도 있으나 박판성형과 결합되어 성형되는 것도 많다. 박판을 사용하여 박판성형과 함께 일어나는 코이닝 성형 등의 경우는 박판의 체적성형으로 미세소성가공에서 일어나는 전형적인 성형으로 그 공정설계가 까다롭다.

Table 1 Area of Micro-Forming Technologies

Micro-Forming	Micro-Sheet Metal Forming	Micro-Bending
		Micro-Deep Drawing
		Micro-Stretching
		Micro-Punching
		Micro-Stamping
	Micro-Bulk Forming	Micro-Extrusion
		Micro-Rolling

2.3 미세소성가공을 위한 해석기술

미세소성가공에서 박판성형은 여러 면에서 미세체적성형(bulk forming)과 차이점을 내포하고 있다. 최적성형에서는 재료가 받는 변위는 크지 않지만 변형률은 큰 소변형 대변형률 공정으로 특성 지워지며, 성형과정에서 부피에 대한 표면적의 비가 대체로 크게 증가하는 반면 미세프레스 성형은 큰 형상 변화를 수반하지만 재료가 받는 변형률은 크지 않은 대변형 소변형률 공정으로 특성 지워지고 성형과정에서 소재의 두께와 표면적의 변화는 크지 않는 차이점이 있다. 그러므로 체적성형과는 달리 탄성변형에 기인하는 탄성복원이 중요하게 취급되

어지며 이것은 정밀도를 요하는 미세소성가공 기술의 어려운 점의 하나이다. 또한 Milli-Structure의 제품들은 치수가 작아 성형 후 치수 정밀도를 위한 후처리 비용이 많이 들며, 미세소성가공에서는 정밀 금형 및 기기 사용에 의한 고가의 장비를 필요로 함으로 최종 제품생산을 위한 투자비용이 많이 든다는 특성을 가지고 있다. 그러므로 다단계의 복합성형에 의해 정형가공에 도달할 수 있는 장비나 시스템의 구축이 요청되며, 제품 생산라인을 고정하기 이전에 컴퓨터나 시험을 통한 충분한 예비연구가 이루어져야 한다.

미세소성가공은 제품설계, 공정설계, 소재, 윤활, 프레스 기계 등의 요소기술이 조합된 총체적 기술이며, 이러한 기술들이 고도로 균형 있게 조화가 이루어질 때 비로소 초정밀 및 고정도 제품의 안정적 생산이 가능하게 된다. 이중 공정 설계에는 공정결정, 금형설계, 예비성형체 등과 같은 많은 영역이 포함되며 여러 가지 공정이 조합된 다단계의 공정으로 이루어진 복잡한 형상의 부품개발에서는 이러한 공정설계의 효율적인 수행은 매우 중요한 요소가 되기도 한다.

최근 미세소성가공 기술에서는 실제 금형을 제작하여 시험에 들어가기 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 소재의 변형양상과 결함생성의 여부 등을 예측하는 방법들이 사용되어지고 있다. 그 중 유한요소법은 금형하중, 변형률, 응력분포, 성형 형상 및 두께분포 등 성형 중 많은 유용한 정보들 제공함으로 가장 많이 사용되어 지고 있는 컴퓨터 수치기법이다. 그리고 편리한 사용자 인터페이스를 제공하는 많은 상용프로그램이 사용되어지고 있다.

미세소성가공의 기술에서는 가공조건을 항상 최적상태에서 컴퓨터로 제어하는 지능형 가공시스템의 개발을 시도하고 있으며, 성형품의 품질 안정화와 정밀도 검사를 위해 3차원 비접촉 측정기를 활용하여 면의 비뚤어짐 등을 측량 해석하고 있다. 또한 복잡한 형상의 부품성형, 고정도의 원형에 가까운 형상을 성형하기 위한 Net-Shape 또는 Near Net-Shape 개념을 도입하고 있다. 이 밖에도 공정자동화, 여타 공법과의 기술조합 등에 대한 활발한 연구를 통하여 저 코스트(cost), 고 부가가치의 달성을 위해 매진하고 있다. 이와 병행하여 유한요소법을 활용하여 공정설계 및 해석을 하는 연구가 최근에 급속히 발달하고 있는 추세이며, 이미 필수 불가결한 기술로 자리잡고 있다. 해석 범위의 다양성 및 편리성, 정확한 해를 얻기 위한 시뮬레이션의 수단의 개발과 더불어 재료 특성, 마찰상태에 대한 정확한 데이터 구축도 시도되고 있다.

3. 기술개발 동향

3.1 해외 기술개발 동향

미세소성가공 기술은 생산기술이 뛰어난 일본, 미국 등을 중심으로 개발되고 있다. Milli-Structure 부품이나 시스템은 3차원 구동 특성을 갖는 수 ㎜의 구조물이며, 이러한 구조물을 제작하기 위한 방법 중에서 경제적인 측면을 고려하여 접근하면 미세소성가공 기술이 매우 중요시된다.

일본의 경우 이러한 기술이 차세대 생산기반 기술임을 인식하고 1990년대 초반부터 연구개발에 매진하고 있다. 즉 매크로 소성가공 기술은 선진국, 개발도상국 등이 모두 개발할 수 있으나 이러한 미세 정밀 소성가공 기술은 특별히 투자하여 개발하면 부가가치가 월등하고 파급효과가 뛰어남을 인지하였던 것이다. 개발된 예로는 전자총의 Aperture, 둥근 와이어를 사용하는 미세 프레스가공, Cellular Phone의 초소형 진동자, 1.2 mm 의 지름을 갖는 Rolled Wire 생산, Lead Frame 생산과 같은 미세스템핑 기술 등 많은 연구를 수행하고 있다. 이러한 기술들은 소형의 전자기기, 초소형 특수 비행체 등을 개발하는데 필수적이다. 미세성형기술을 발전시키기 위해서는 정밀금형 가공기술이 필수적으로 요구되며, 일본이 20세기 생산기술을 기반으로 경제를 발전시켰듯이 21세기에도 역시 정밀 생산기술을 가장 중요시하는 정책을 쓰고 있다. 그 일례로 1998년 8월 일본 이화학연구소 내의 벤처기업인 차세대가공시스템(주)에 Micro 가공기술교류회를 두고 Micro 가공기술 연구개발체제 및 관련 인프라의 정비에 힘쓰고 있다. 또한 미국의 Milli-Structure 생산기술에서는 컴퓨터로 제어하는 지능형 가공시스템의 개발, 비접촉 측정 장치 개발, 성형한계 극복을 위한 연구, 여타공법을 조합하는 복합성형 기술개발 등 활발한 연구가 정부의 지원아래 체계적으로 진행되어지고 있다.

아래에서 해외의 미세소성가공기술의 개발사례를 소개하였다.

(1) 미세단조성형에 의한 정밀 의료 핀셋

의학 정밀 도구의 전형적인 예인 의료 핀셋은

지금까지 정밀 기계가공과 후가공처리로 만들어 졌다. 따라서 가공시간이 길어질 뿐만 아니라 단가가 높아지는 단점이 있다. 미세단조성형에 의한 생산은 가공시간 단축, 비용 절감의 효과가 있다. Fig. 1은 일본에서 개발된 장치로 Turret-Type의 펀치프레스로 구성되어 있다. 둥근 와이어를 재료로 하여 정밀의 의료핀셋이 만들어진다.

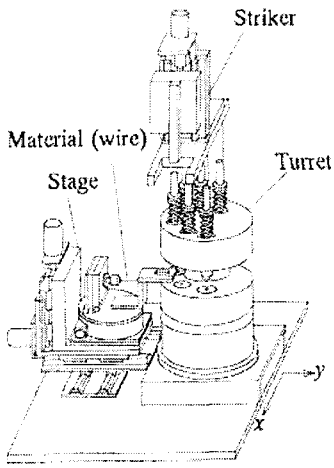

Fig. 1 Micro-Forging Press

(2) 다단계 미세스템핑 공정에 의한 Aperture

전자총 부품의 하나인 아퍼추어는 브라운관(CRT)에 장착되어 전자선을 방출하는 부품으로 자기성을 띄지 않는 금속판재로 성형된다. 이 부품은 트랜스퍼 프레스(transfer press)에 의한 14개의 연속성형공정을 거쳐 생산되어 진다. 먼저 스트립으로부터 블랭킹 공정을 통해 초기소재를 성형한다. 1·2차 드로잉공정, 성형드로잉 공정을 거쳐 아퍼추어 컵형상을 결정하며 이후 트리밍(trimming), 플랜지(flange) 성형공정을 거쳐 여분의 플랜지를 잘라낸 후 엠보싱과 스웨이징 공정을 거쳐 스웨이징부의 두께를 충분히 얇게 하여 이 스웨이징 부에 피어싱(piercing)을 가하고 아이들(idle), 반전, 측면 피어싱 공정을 거친 후 제품이 완성된다. Fig.2는 성형드로잉 공정을 거친 시편과 최종 제품의 사진이다.

Fig. 2 Processed Aperture by Deep drawing

(3) 미세압연공정에 의한 미세 와이어 제작

Super Micro Mill은 4개의 Roll Mill Housing으로 구성되어 있으며 최소 직경 1.2 ㎜의 와이어 생산이 가능하다. 직경오차는 ± 20㎛로 매우 작으며 롤스탠드 사이에 가이드가 없어 가이드와의 마찰에 의한 표면결함이 나타나지 않는다.

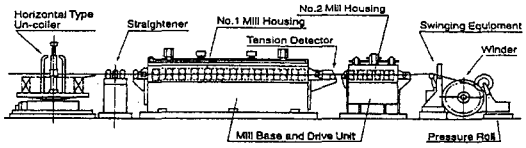

Fig. 3 Schematic of Super Micro Mill

(4) 박판 드로잉과 코이닝의 복합공정에 의한 초소형 진동모터

지금까지 개발된 모터 중 가장 작은 것은 지름 1 ㎜ 크기로 일본 세이코엡슨이 만든 것으로 시계속에서 건전지를 충전시키는 발전기를 사용되어지고 있다. 이러한 초소형 모터의 개발은 최근 전자기기의 소형화, 경량화의 추세에 따라 더욱 박차를 가하고 있다. 특히 개인 휴대폰이나 카메라 등에도 많이 사용되어 지며 로봇제어의 필수적인 부품으로 쓰여진다. 그림은 Cellular Phone의 진동자로 사용되어지는 사각코인형 진동모터의 구성도 및 형상을 보여주고 있으며 그 케이스와 진동 Rotor의 Dynamic Receiver 부품은 Micro-Drawing과 Coining의 복합공정에 의해 만들어진다.

(5) 미세 스피닝을 이용한 Ink-Jet nozzle 개발

1996년 일본에서는 미세 스피닝 공정을 이용하여 Ink-Jet 프린터용 노즐을 개발하였다. 두 개의 스피닝 롤러로 구성된 이 장치는 롤러의 Whirling accuracy는 0.5㎛, X와 Y축의 position accuracy는 1.0㎛ 인 초정밀 CNC 미세 스피닝 장치를 개발하였다. SUS304로 내경 300㎛ 두께 8㎛의 미세 노즐의 제작을 위해 초기 튜브형 시편의 내부에 초경 맨드

렐을 장입하고, Nosing공정과 Tube 스피닝공정을 행하였다. 가공소재의 Softening, Stress relieving 및 Grain size의 제어와 가공속도, 윤활조건 등의 공정변수에 제어를 통해 최적 성형조건을 찾아내어 결함이 없는 Ink-Jet printer용 nozzle을 순수 소성가공 공정으로 개발한 바 있으며, 더욱 미세한 노즐의 개발을 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

(6) 기타 미세 체적성형 연구

최근 일본에서는 비정질 소재와 초소성 소재를 이용하여 미세 체적성형 가공공법으로 현재까지 도달하지 못했던 마이크로 영역의 정밀도를 갖는 부품을 성공적으로 제작한 연구결과가 보고되고 있다. 1997년에 Gunma대학에서는 이러한 신소재로 새로운 개념의 미세단조장치 및 미세압출장치를 제작하고 기존의 방전가공으로 금형을 제작하여 이를 통해 Module 10㎛, 피치원 지름 100㎛의 기어를 미세단조공정으로 제작하였으며, 미세압출공정으로는 길이 500㎛까지 압출에 성공하였다. 이는 미세체적소성가공분야를 통해서도 마이크로 영역 제품의 대량생산이 가능하다는 시금석이 되고 있으며 향후 이 분야는 기존의 MEMS분야에서는 불가능한 많은 삼차원 부품의 제작에 유용하게 쓰일 전망이다.

3.2 국내 기술개발 동향

우리나라의 경우 미세소성가공 기술개발은 초기 단계이다. 미세부품을 성형하기 위한 금형은 거의 일본으로부터의 수입에 의존하고 있어 부품기술 자립에 큰 어려움이 있음은 물론이고 독자적인 제품기술의 개발에도 제한적일 수밖에 없는 실정이다. 현재까지 전자총의 Aperture, 핸드폰에 사용되어지는 초소형 진동자에 필요한 부품, 반도체의 리드 프레임 등 다소간의 개발실적은 있으나 대부분의 설계기술은 외국에서 도입되어지며, 부분적인 기술 또한 컴퓨터나 자동화된 설계시스템을 갖추지 못하고 숙련자의 경험적 지침 및 직관, 실험 등에 의존함으로 다단계의 성형공정을 거쳐 생산되는 복잡한 형상의 제품을 개발하는 경우 시행착오로 인한 시간소비 및 단가상승을 초래하고 있다.

이에 우리 나라에서는 미세 부품 기술 개발을 위하여 1999년 12월부터 산업자원부에서 차세대 신기술 개발사업 가운데 Milli-Structure 생산기술개발 사업을 추진하고 있다. 이 과제중 미세 소성 가공 기술과 관련된 연구로 „미세체적성형기술개발 과제와과 „미세박판성형기술개발„ 과제가 있다.

서울대학교 정밀기계설계공동연구소에서 주관하고 있는 미세박판성형기술개발 과제에서는 미세박판재의 정밀소성가공장치와 미세정밀 Stamping 공정기술, 미세정밀 Punching 기구, Burr발생 억제 및 제거기술을 연구하고 있다.

한국생산기술연구원 주관의 미세체적성형기술개발 과제에서는 미세 체적물의 단조/압출 기술, 미세 체적성형공정 해석기술, 미세체적 성형용 재료 이용기술을 연구하고 있다.

이 연구 결과의 기여 및 활용방안을 정리하면 다음과 같다.

- 기존의 정밀 가공 기술과 전통적 반도체공정 기술사이의 틈새 기술 개발을 통한 Milli-Structure 분야의 기술 독자성 확보.
- 초소형 구동품이 사용되는 HDD, DVD, 초소형 Camcorder 의 전자기기 부품의 국산화에 기여.
- 미래 초소형 컴퓨터에 사용되는 Milli-Structure 성형품의 국내 안정적 내수 확보 및 수출 기대.
- 초소형 기계 부품인 Micro-Motor, Micro 열교환기, 초소형 비행체 등의 구동부품으로 뛰어난 기계적 성질을 요하는 부품 생산 가능.
- 선진 외국으로부터의 공정기술 및 정밀기기 수입을 줄이고 독자적 제조기술 확립에 활용.
- 정밀 의료기기 산업, 초소형 기계설비 및 산업 전반에 요구되는 Milli-Structure의 개발 및 제조기술 지원.

4. 결 론

소성가공에 의한 미세부품의 대량생산방식은 기술개발의 위험도가 매우 큼에도 불구하고, 소성가공방식이 지니는 장점인 대량생산의 경제성으로 인해 최근 일본, 독일 등지에서 정부차원에서의 연구개발투자가 크게 증가하고 있다. 이러한 미세부품 관련기술이 선진국조차 초보적인 기술개발단계인 점을 고려할 때 이들 미세소성가공에 대한 기술개발 투자는 매우 시기 적절하다고 판단된다. 지금까지의 국내 거의 대부분의 기술개발이 선진기술의 모방이나 이전에 의한 방식으로 이루어진 것이라고 볼 때 향후 독자적인 기술개발에 의한 기술 선점효과 및 산업으로의 파급효과는 매우 클 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 조남선외, Milli-Structure 생산기술개발, 연구기획사업 최종보고서, 산업자원부, 1999년 6월.
2. Y. KUBOTA, "Trends in Fine Mechanism Products," Toshiba Review, Vol. 51, No. 7, pp. 32-34, 1996.
3. S. YAMAMOTO, N. NARIKAWA and T. FUJINUMA, "Integrated Design Systems for Fine Mechanism Using Product Model," Toshiba Review, Vol. 51, No. 7, pp. 35-38, 1996.
4. Y. YAMAMOTO and J. SHIBUYA, "Forming Technology for Fine Mechanism Products," Toshiba Review, Vol. 51, No. 7, pp. 39-42, 1996.
5. K. NAGATAKE and T. ITOH, "Small Motors for Fine Mechanism Products," Toshiba Review, Vol. 51, No. 7, pp. 43-46, 1996.
6. Toshio SANO, "Trends in Precision Metal Forming," 精密工學會誌, Vol. 62, No. 1, pp. 42-45, 1996.
7. 나경환 외, "Milli-Structure 생산기술개발," 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 pp. 300~304, 2000.
8. Y. Saotome, "New Amorphous Alloys as Micromaterials and the Processing Technologies," Proc. IEEE 13th Annual Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems 2000, pp. 288-292, Miyazaki, Japan Jan. 23-27, 2000.
9. Y. Saotome, "Microforming and Fabrication of Micromachines with Amorphous Alloys," Proc. The 3rd Int. Micromachine Symposium, Tokyo, Japan Oct. 29-3.