

미세 체적 성형 기술

- 나 경 환 ■ 한국생산기술연구원, 선임연구본부장 e-mail : khna@kitech.re.kr
- 홍 순 형 ■ 한국과학기술원 재료공학과, 교수 e-mail : shhong@sorak.kaist.ac.kr
- 한 창 수 ■ 한양대학교 기계정보경영학부, 교수 e-mail : cshan@hanyang.ac.kr
- 이 용 신 ■ 국민대학교 기계자동차공학부, 교수 e-mail : yslee@kmu.kookmin.ac.kr

초소형 정밀 부품의 효율적 생산 방안으로 대두되고 있는 미세 체적 성형 기술에 관하여, 극세선 압출, 미세 복합 성형 기술과 핵심요소 기술인 정밀 위치 결정 기술, 미세 성형 재료 기계적 특성 평가 기술과 이론 해석 기술을 중심으로 국내 연구 현황과 전망을 소개한다.

미세 성형 기술이란?

최 근에 생산되는 전자제품 및 통신기기들은 간편한 휴대를 위해 소형화되는 추세에 있으며, 동시에 경량화, 슬림(slim)화 및 대용량 고기능화의 요구로 인해 전자기기의 내부에 장착되는 제반 전자부품들도 초소형화, 초정밀화 되어가고 있다. 이에 초소형 부품들의 경제적 생산에 유리한 미세 성형가공 기술에 대한 관심도 높아지고 있다.

미세 성형가공 기술이란 크기가 몇 mm에서 몇 μm 정도에 이르는 미세하고 작은 초소형의 기계요소를 소성변형을 이용하여 만드는 기술로 정의할 수 있다. 미세 성형가공 기술은 크기가 작으면서 높은 정밀도를 필

요로 하는 각종 정보통신기기나 정밀기기, 미세수술 기구, 인공장기 같은 의료 시스템 등에 사용되는 부품 제작에 알맞은 기술이다.

미세 성형가공 기술은 미세 박판 성형과 미세 체적 성형으로 구분할 수 있다. 미세 체적 성형은 미세 스탬핑 성형, 미세 압출 성형, 미세 단조 성형 등으로 나뉠 수 있으며, 이와 같은 미세 체적 성형 기술들은 단독으로 이루어지는 경우도 있으나, 박판 성형과 결합되어 이루어지는 경우도 많다. 예를 들어 박판을 초기 소재로 이용하는 코이닝 성형 등의 경우에는 체적성형의 양상을 동시에 띄게 되므로 그 공정이 매우 까다롭게 된다.

초소형 제품들은 치수가 작아

성형 후 치수 정밀도를 위한 후처리 비용이 많이 들게 된다. 또한 미세 소성가공에서는 정밀 금형 및 고가의 성형 장비를 필요로 하므로, 제품생산을 위한 투자비용이 많이 든다는 특성을 가지고 있다. 그러므로 다단계의 복합성형에 의해 정형가공에 도달할 수 있는 장비나 시스템의 구축이 요구되며, 사전에 전산 시뮬레이션이나 예비실험 등 충분한 연구가 이루어져야 한다.

미세 체적 성형기술은 제품설계, 공정설계, 소재, 윤활, 프레스 기계 등의 요소기술이 조합된 종합기술이며, 이러한 기술들이 고도로 균형 있게 조화가 이루어지지 않고서는 초정밀 및 고정도 제품의 안정적 생산이 불가능하다. 따라서 미세 체적

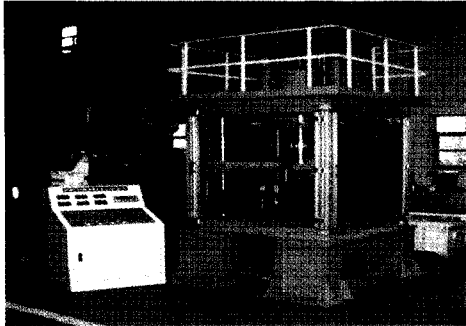


그림 1 극세선 정수압 압출기(한국생산기술연구원)

성형 기술의 확립을 위해서는 소재기술, 장치기술, 제품설계를 포함한 공정기술 및 자동화·지능화가 요구되는 주변기술 등이 함께 개발되어야 한다.

현재 저자들이 수행하고 있는 극세선 압출, 미세 복합 성형 기술과 미세 체적 성형의 핵심요소기술인 정밀위치결정장치기술, 미세 성형 재료 기계적 특성평가 기술, 이론 해석 기술을 중심으로 소개한다.

극세선 성형

세선 제작에는 인발법이 이용되어 왔다. 인발공정은 인발비의 한계로 인해 수백 단계에 걸쳐 성형해야 하며, 중간에 풀립처리 공정까지 포함하게 된다. 이에 반해 압출공정은 일회 가공으로 큰 단면감소와 균일한 품질을 얻을 수 있어 유리하나 기존의 직접/간접 압출법으로는 세선의 압출은 불가능하였다. 압출법 중에서 정수압 압출 공정은 컨테이너 안에서 유체로 둘러 쌓인 소재가 유체의 압력이 임계점에 도달했을 때, 금형의 형상에 따라 성형되는 공정

으로 봉재, 형재, 관재, 극세선 및 복합재 등의 정상상태 압출과 고속 압출을 가능하게 한다. 기존의 압출 공법과 비교한 정수압 압출 공정의 큰 특징은 압력전달 매체로 인해 소재와 용기내벽, 소재와 금형 사이의 마찰이 최소화되어 압출압력은 소재의 길이와 무관하며, 따라서 비교적 긴 소재의 압출이 가능하다는 것이다. 그리고 소재는 정수압 상태에서 압출되므로 금형 내의 성형영역 외에는 좌굴이나 변형이 일어나지 않으며, 비직선 또는 코일(coil)형의 소재도 직선 압출이 가능하다.(그림 1, 2 참조)

미세 복합 성형

고정밀·고품질의 요소 부품의 수요가 증가함에 따라, 성형 가공기의 정밀도 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 미세 부품의 대부분이 일체형이며, 복합 구조물의 형태를 가지므로 여러 단계의 성형 단계를 거쳐서 만들어진다.

미세 정밀 복합프레스 장치는 다단계의 복합 성형 공정을 통해서 일체의 미세 부품을 성형하는 장치로서 관재성형과 벌크재 성형이 복합적으로 가능하다. 이는 소성가공의 일반적인 특징인 박판 성형 모드와 체적 성형모드가 복합화되어 있다는 점을 고려한 것이다.

기존에 대부분의 미세 부품은 절삭가공으로 생산되어 왔다.

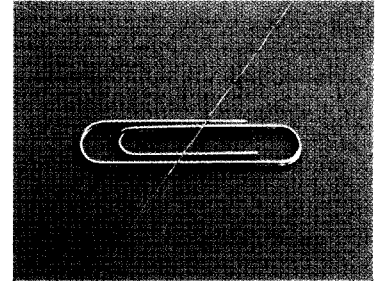


그림 2 병간에서 압출된직경 200 μ m 세선, 초기 소재의 직경은 1mm

그러나 절삭가공은 가공시간이 길고, 소재의 손실이 크다. 생산수량이 늘어나게 되면 기계가공은 경제성을 상실하게 된다. 이에 비해 단조성형으로 성형할 경우 절삭가공제품에 비해 단가, 생산량 및 기계적 성질이 월등히 앞서게 된다.(그림 3, 4 참조).

미세 체적 성형을 위한 정밀 위치 결정장치

복합 구조의 미소 기구물을 대량생산할 경우 이를 각 공정별로 재료를 이동시키고 위치와 자세를 유지할 수 있는 장치가 필요하게 된다. 미세 요소를 성형할 경우 그 크기가 작아 정밀한 성형 위치 제어가 필요하다. 미소요소 가공용 프레스에 사용되는 이송시스템의 파지기구는 가공물의 효율적인 가공을 위해 가공물의 다양한 자세를 구현할 수 있어야 하며, 높은 위치 정밀도와 반복 정밀도가 구현되어야 한다. 다양한 자세구현과 높은 정밀도를 동시에 이루기 위해서는 매우 많은 비용의 부수장비가 필요하게 된다.

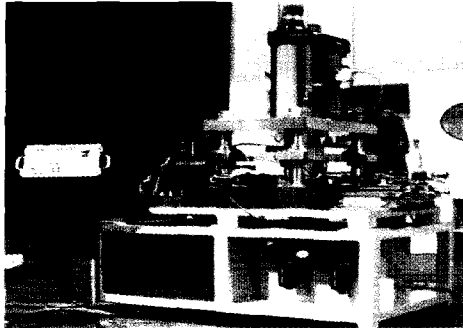


그림 3 미세 복합 성형 프레스(한국생산기술연구원)

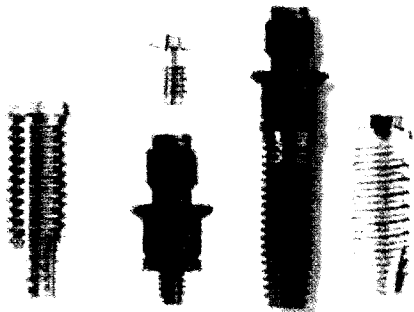


그림 4 미세 복합 성형 프레스를 적용 가능한 제품
예- 인공치아용 임플란트

보통 정밀 위치 결정 장치라 함은 'Pick and Place' 시스템을 의미한다. 대상물을 잡는 동작과 위치 이동동작을 말하는 것이다. 그러나 일반적인 경우에 있어서는 특별히 고려해야할 문제가 없으나 가공형상물이 소형인 경우에는 파지기구의 위치오차/형상오차에 의해 정밀한 작업을 수행하지 못하며, 위치 도달 후 파지기구에서 가공물이 탈피되지 않는 경우가 발생한다.

가공물의 탈피가 수월하지 않은 경우에는 정밀한 위치 결정이 어렵다. 정전기나 가공유에 의해 가공물이 파지기구에 부착되어 탈피가 안될 경우에 대비한 여러가지 방안들이 연구되고 있다.

가공물이 소형 정밀 가

공물인 경우에는 파지기구와 위치 결정 장치는 이러한 환경에 적합한 설계 관점을 가지고 설계되어야 하며 현대의 소량 다품종 생산의 생산방식에 적응하기 위해 각각의 부분은 모듈화되어야 한다. 모듈화된 부분들은 작업 내용과 환경의 변화에 따라 유연하게 대처할 수 있으며, 경우에 있어서 불필요한 모듈을 제거함으로써 가공 원가의 절감을 가져온다. 모듈화를 위해서는 ① 접합부의 규격 ② 동력원의 규격 ③ 제어 규격이 적합해야 한다.

이러한 모듈화 노력과 파지기구 설계는 정밀 위치 결정장치의 설계의 한 방향이 되고 있다.(그림 5 참조)

미세성형 재료의 기계적 특성 평가

재료의 기계적 특성은 재료의 크기에 연관이 되어 있다. 재료의 크기가 커지면 강도가 떨어지는 것으로 알려져 있고, 이것은 재료에 결함이 있기 때문이다. 재료가 10 μ m 정도로 크기가 작아지는 경우에는 재료의 기계적 특성은 어떻게 변하게 될까. 이 경우에는 통상적인 시험방법으로 측정된 기계적 특성보다 강도가 증가하고 연신율이 떨어지는 것이 관찰되고 있다. 하지만 현재 기계적 특성시험방법의 표준으로는 10 μ m 정도로 재료의 크기가 작아지는 경우 기계적 특성을 정확하게 측정하기

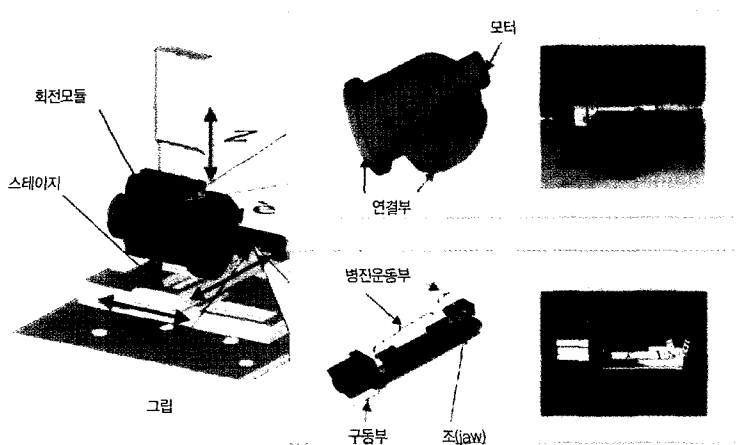


그림 5 정밀위치 결정기구의 구성

어렵다. 따라서 재료의 크기가 작은 경우 기계적 특성을 측정하기 위한 새로운 시험방법과 시험장비가 개발되고 있다.

현재 미세 성형 소재의 기계적 특성을 측정하는 방법으로는 미세인장시험(micro-tensile test), 나노인덴테이션시험(nanoindentation test), cantilever beam test, bulge test 등의 재료에 응력을 가해서 변형률을 측정하는 시험이 있다. 이외에 MEMS 와 같이 제조후 높은 잔류응력이 남게 되는 경우는 잔류응력을 측정할 수 있는 bridge, cantilever, rotating, spirals, T structure와 같은 구조를 만들어서 응력을 측정하는 시험도 있다. 이외에 X-ray diffraction, Raman spectroscopy, neutron diffraction 등을 이용하여 재료의 응력을 실시간

으로 직접 관찰하는 시험도 있다.

미세인장시험

재료의 인장시험은 재료의 기계적 물성을 측정하는 가장 쉬운 방법 중의 하나이다. 인장시험에서는 하중-변형량 결과로부터 어려운 변환없이 재료의 기계적 물성인 인장강도, 항복강도, 연신율을 얻을 수 있다. 미세인장시험은 표준인장시험에 비해서 시편의 크기가 작아진 인장시험을 의미한다. 미세인장시험을 하기 위해서는 표준인장시험의 하중에 비해서 1/1,000 수준인 1~100g 정도의 힘을 정확하게 측정해야 하며, 표준인장시험에 비해서 1/10 수준인 10nm 정밀도의 구동기술이 필요하다. 시편이 작아지는 경우 하중 제어방식의 시험은 시편에 가해지는 힘을 정확하게 제어

하기 힘들고 시편에 necking이 일어나는 경우 제어가 힘들어서 사용하기가 어려우며, 변위 제어 방식으로 시험이 수행된다.(그림 6 참조)

나노인덴테이션 시험

나노인덴테이션 시험은 시편의 준비가 어려운 박막의 시험을 위하여 개발되었다. 기존의 경도시험보다 개발된 시험방법으로 인덴테이션을 통해서 경도 이외에 탄성계수와 강도 등 여러 값을 추가적으로 얻을 수 있다. 경도 이외에 다른 값은 인덴테이션시 하중에 따른 압입 깊이의 변화와 하중 제거시 반발력을 측정하여 구하게 된다. 시험에는 보통 0.1~30g 정도의 미세한 하중이 사용되며, 10pm 정도의 정밀한 변위가 측정된다. 나노인덴테이션 시험에는 하중 및 변위 제어 이외에 온도의 유지가 꼭 필요한데, 온도가 변하는 경우 시편 및 장비의 열팽창으로 인하여 정확한 측정값을 구할 수 없기 때문이다.

미세 성형 해석 기술

마이크로 부품과 매크로 부품의 중간 크기인 밀리 단위의 미세구조 부품은 마이크로 부품간의 기능을 이어주는 역할을 하거나 외부 시스템과의 기능을 이어주는 역할을 하는데 상대적으로 연구가 많이 이루어지지 않은 실정이다.

미세 부품은 치수가 작아 성형 후에 치수정밀도를 높이기 위해서는 다단계의 미세 복합성형 공정 시스템을 요하게 되므로 제품

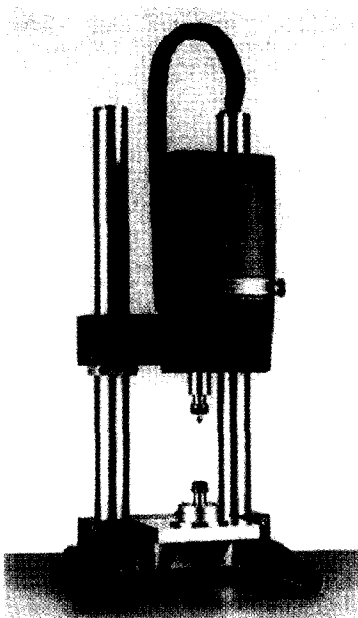


그림 6 미세인장시험기(instron 8848)

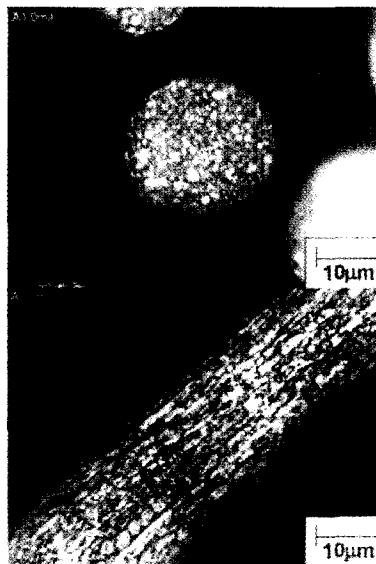


그림 7 Gold bonding wire 직경 24 μ m, 결정립 크기 0.3 μ m

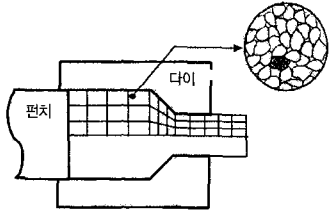


그림 8(a) 다결정 해석

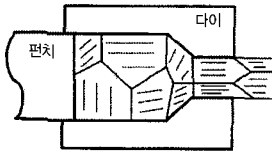


그림 8(b) 메조 스코픽 해석

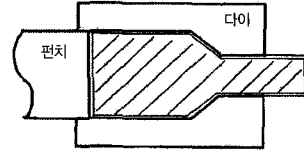


그림 8(c) 단결정 해석

생산라인의 설계에는 컴퓨터나 시험을 통한 예비 연구가 필수적이다. 이에 미세 인발/압출, 미세 단조, 미세압연 등의 미세체적성형과 미세굽힘, 미세드로잉과 같은 미세박판성형을 해석할 수 있는 기술개발에 관한 연구가 최근에 급속히 발달하고 있는 추세이다. 일반적으로 미세박판성형제품의 성형에는 수 μm 에서 수백 μm 두께의 박판이 요구되는데 이 두께는 전형적인 금속의 결정립 크기(수 $\mu\text{m} \sim 1,000\mu\text{m}$)에 해당하며, 두께 방향으로 몇 개의 결정

립이 존재하고, 극단적으로 하나의 결정립이 존재하는 경우도 있다. 이와 같은 조건에서의 성형은 기존의 전통적인 연속체 역학을 적용하기 곤란하며, 표면에서의 미세거동현상이 매우 중요한 요소로 작용할 수도 있다. 또한 요철을 갖는 형상을 얻기 위한 미세체적성형에서도 결정립의 크기는 성형에 제한을 가하게 되는데, 얻고자 하는 제품의 곡률이 결정립의 곡률보다 작을 경우에는(대개 수 μm 이하) 원하는 제품의 형상 정밀도를 얻기가 어렵게 된다.

미세 부품을 생산하는 미세 성형 가공에서는 결정립의 크기나 우선방위에 따라 성형 특성이 달라지게 되고, 결정립 경계나 내부에 존재하는 미세기공의 성장에 따라 기계적 성질의 열성화가 성형의 성공 여부를 좌우하는 중요한 요인으로 대두하게 된다. 그러므로 다양한 구조의 밀리부품 소성가공을 결정립 우선방위와 미세결합의 성장을 반영하여 해석하는 기술이 필요하다.

밀리부품의 성형해석 모델은 결정립과 밀리부품의 상대적인

표 1 미세 성형 재료의 기계적 특성 시험법 비교

측정방법	측정값	장·단점
미세인장시험	Elastic modulus, Yield strength, Tensile strength, Elongation	장점 : 측정값의 해석이 쉽다. 단점 : 시편의 제작이 어렵다. 시험시 edge effects가 있다.
나노 인텐테이션 시험	Hardness, Elastic modulus, Strain rate sensitivity, Stress relaxation	장점 : In-situ로 측정이 가능하다. 시편을 제작하기 쉽다. 단점 : 측정값의 해석이 어렵다. 시편의 표면효과가 크게 나타난다.
Biaxial Bulge Test	Biaxial elastic and plastic properties	장점 : edge effects가 없다. 단점 : 시편의 제작이 어렵다. 측정값의 해석이 추가로 필요하다.
Micro-bending Test	Elastic modulus, Yield strength, Bending strength	장점 : 측정값의 해석이 간단하다. 단점 : 시편 제작이 아주 어렵다.

크기에 따라 세 가지로 분류된다. 첫 번째는 전형적인 다결정 해석 모델이며, 반경 방향으로 수백 개의 결정립이 존재한다. 두 번째는 하나의 결정립만으로 이루어진 단결정 모델이고 마지막으로 세 번째는 두 모델의 중간적인 몇 개의 결정립만이 존재하는 메조스코픽(mezzoscopic) 모델이다. 결합성장과 방위 변화에 따른 이

방성 발전을 복합 반영하는 해석 모델을 개발하고, 다결정 모델, 단결정 모델, 그리고 메조스코픽 모델에 응용하여 각각의 성형 특성을 이해하는 연구도 이루어지고 있다. [그림 8(a)(b)(c) 참조]

하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 **Milli-Structure** 생산기술개발사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원

▶ 프레팅 손상(Fretting Failure)

프레팅이란 두 접촉물체에 미세한 진폭의 상대운동이 발생하고 있는 경우를 말한다. 이 때 접촉면에는 마멸(프레팅 마멸 : fretting wear)이나 피로균열 성장(프레팅 피로 : fretting fatigue)과 같은 손상이 많이 발생하며, 설계 수명이 현저히 단축되는 예가 많이 보고되고 있다. 이와 같이 프레팅현상이 존재하는 경우의 손상을 프레팅 손상이라 한다.

▶ VIC법(Vortex-In Cell Method)

VIC법이란 유동장 내로 많은 보텍스를 방출해서 그 운동을 추적해 가는 점에 있어서는 이산와법(discrete vortex method)과 같지만 보텍스를 서로 간에 유도되는 속도로 이동시키지 않고, 유동장 내에 격자를 형성하여 격자점에 주어진 와도(vorticity)로부터 유동속도를 구하여 보텍스를 이동시키는 점에서는 차분법과 같다. 즉, VIC법은 이산와법과 차분법을 조합한 수치계산법이라 할 수 있다. 이 방법은 계산 시간이 짧고 특이성이 적다는 점에서 이산와법보다 뛰어나지만 유동장 내에 격자를 형성해야만 하는 결점을 가지고 있다.

▶ 주특성(Key Characteristics)

물품의 변동 혹은 공차에 따르는 품질적 영향이 매우 큰 물품의 특징

▶ 부품 대 부품 인덱싱(Part-to-Part Indexing)

부품자체에 인덱스를 가지고 있어 별도의 조립 치공구를 필요로 하지 않는 인덱싱 방식

▶ 현상학적 연소 모델(Phenomenological Combustion Model)

현상학적 연소 모델은 질량, 운동량 및 에너지 보존과 난류 에너지와 화학종의 상태를 수학적으로 기술해야 하는 다차원 연소모델과 달리 연소현상과 관련된 물리적 현상(예를 들어 연료 분사, 연료의 미립화, 주변 공기와의 혼합, 열전달, 연소)들을 수학적인 지배방정식을 푸는 대신에 경험적인 관계식을 사용하여 기술하는 것을 말한다. 경험적인 관계식들은 물리적 현상에 대한 이론적인 배경과 실험으로부터 얻는다.