

초소형 기어 제조를 위한 초소성 재료의 미세압출

김재연⁺, 주세민⁺⁺, 김호경^{*}

(논문접수일 2007. 7. 9, 심사완료일 2008. 7. 1)

Superplastic Microextrusion for Microgears

Jae-Yeon Kim⁺, Se-Min Joo⁺⁺, Ho-Kyung Kim^{*}

Abstract

Fine grained superplastic Zn-22%Al alloy was extruded using a laser machined micro-die to produce a micro-gear shaft. Extrusion process was conducted under a constant pressure at constant temperatures ranging from 503 to 563K. Laser machining was capable to machine a micro-die with close tolerances and adequate surface quality. The extrusion rate increased with extrusion load under constant extrusion temperature. The rate reached a steady state and became constant after a certain period. There was a small instantaneous stroke on application of the load and then a very brief primary stage which preceded steady-state flow. The micro-extrusion process was proven to produce a micro-gear shaft successfully using a fine grained superplastic Zn-22%Al alloy.

Key Words : Micro-extrusion(미세압출), Micro-forming(미세성형), Laser machining(레이저 가공), Micro-gear(미세기어), Superplastic alloy(초소성 합금)

1. 서론

마이크로 부품산업 분야는 최근 급속한 발전이 예상되는 분야이다^(1,2). 마이크로 부품산업의 대표적인 주요 구성품인 기어시스템은 마이크로 모터, 위치제어 장치, 제어밸브, 광학 조정장치, 의료용 기구 등에 응용되고 있다⁽³⁾. 그러나 기존의 마이크로 기어(micro-gear) 제조는 대부분 X선 혹은 전자빔에 의한 노광법을 적용하여 실리콘을 가공한 것⁽⁴⁾으

로 정밀도는 높으나 생산성이 매우 저조하여 가공비가 고가이며, 3차원 가공이 어려운 단점이 있다.

다결정 초소성(superplastic) 재료의 경우 변형되는 동안 결정립 형상이 바뀌지 않으므로 재료의 결정립 크기가 제품의 형상 정밀도를 결정하게 된다. 따라서 결정립 크기가 작을수록 보다 예리한 끝단의 반경(edge radius)을 갖는 부위를 형상화 할 수 있다. 통상적인 결정립 크기를 갖는 재료로 제조할 경우 결정립 크기가 예리한 끝단의 폭과 거의 같은

⁺ 전 서울산업대학교 자동차공학과 대학원, 현 경기기계공고 공동실습소
⁺⁺ 서울산업대학교 NID 융합기술대학원
^{*} 교신저자, 서울산업대학교 자동차공학과 (kimhk@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

경우 홈 끝단의 반경값 이하의 모서리를 형상화 하는 것이 어렵게 된다. 따라서 마이크로급 결정립 크기를 갖는 초소성 재료를 이용하면 초소성 재료의 결정립 크기를 고려할 때 최저 2 μ m 정도의 굴곡 반지름을 갖는 보다 정교한 초소형 부품의 제조가 가능하다. 또한 생산 속도를 높일 수 있으므로 저가의 마이크로 기어 시스템의 제조가 가능하다. 초소성 재료는 기존의 소성변형에 비해 매우 낮은 응력에서 변형이 가능한데, 이러한 장점은 제조 단가가 높고 시간이 많이 걸리는 노광법으로 제조된 실리콘 다이의 수명을 연장할 수 있다. 그리고 결정립의 미끄러짐에 의해 변형이 일어나므로 제품의 표면 거칠기가 좋아 표면의 품질(surface quality)이 높은 우수한 미세 가공성의 장점이 있다⁽⁵⁻⁸⁾. 따라서 초소성 특성을 적용한 소성가공에 의한 마이크로 기어의 가공은 기존의 사출에 의한 플라스틱 기어나 노광법을 이용한 실리콘 기어의 가공 방법보다 생산성과 강도, 내마모성과 같은 기계적 물성치 측면에서 장점을 지닌 기어제조 공법으로 판단된다.

본 연구에서는 압출기법을 마이크로 성형(micro-forming)에 적용하여 피치원 지름이 수백 미크론 정도인 미세 압출 다이를 가공하고, 여기에 가공성이 매우 우수한 초소성 재료를 이용하여 압출하는 저가의 마이크로 기어 제조 방법을 시도하고자 한다. 이를 위하여 미세 압출 다이를 레이저 가공법으로 제작하였으며, 가공된 다이에 초소성 재료인 Zn-22%Al 합금을 사용하여 압출함으로써 미크론 단위의 정밀도를 갖는 3차원 마이크로 기어의 제조를 시도하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 압출 실험 장치

미세 압출 가공을 위해서는 초소형 압출 장치의 제작이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 미세 압출 장치를 구성하였으며 각 구성 요소의 상세한 규격은 Table 1과 같다. 사용된 미세 압출 장치는 스텝핑 모터에 마이크로미터를 연결하여 모터의 회전에 의해 압출이 가능하도록 하였다. 분해능 각도가 1.8°인 스텝핑 모터를 360° 회전 시 0.1mm 이동하는 마이크로미터와 유니버설 조인트로 연결하여 LabVIEW 프로그램으로 하중 및 압출속도를 제어하였다. 일정한 압출속도로 실험시에는 압출속도는 0.001~0.1mm/sec까지 가능하도록 하였으며, 하중 및 평균 응력을 모니터링하기 위하여 1960N 용량의 소형 로드 셀(load cell)을 사용하였다.

한편 온도를 제어하기 위해서는 상용화된 PID(proportional integral derivative) 컨트롤 유닛과 릴레이를 조합한 전형적

인 전기로 컨트롤러를 사용하였다. 또한 열선은 니크롬선을 사용하여 박스 형태의 초소형 전기로를 제작하였다. Fig. 2는 실제 제작된 압출기의 형상 사진이다.

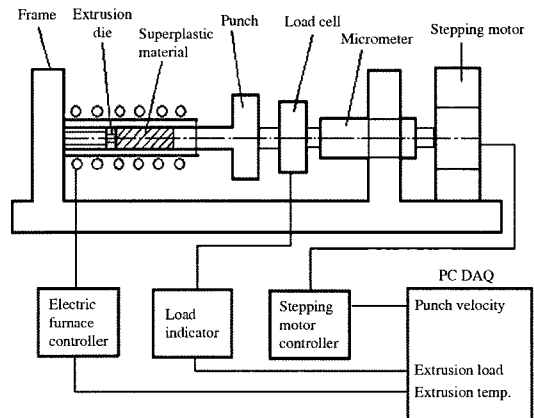


Fig. 1 Micro-extrusion system

Table 1 Specifications of the micro-extrusion system

| Components of the micro-extrusion system | Specification |
|------------------------------------------|---------------|
| S/W for controlling extrusion | LabVIEW |
| Load cell capacity | 1960N |
| Max. torque of stepping motor | 16N·m |
| Punch diameter | 2mm |
| Container diameter | 2.1mm |
| Extrusion die outside diameter | 2.0mm |

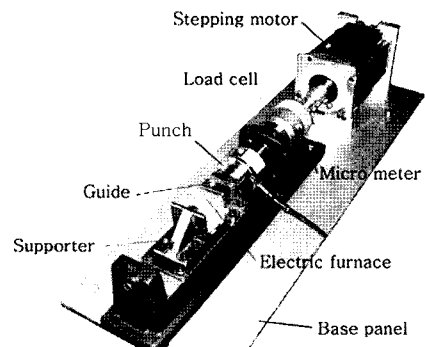


Fig. 2 Micro-extrusion system built for extruding a micro-gear shaft

2.2 압출 다이의 제작

마이크로 기어 형상의 압출을 위한 다이의 가공을 위하여 고정밀 와이어 방전가공기를 사용하여 가공하였다. LASERTEC 사의 레이저 가공기(DML40S)는 1회 레이저 노출 시 재료가 약 5 μ m 정도가 가공되며, 레이저 빔의 직경은 약 80 μ m이다. 따라서 기어의 이끝 폭도 80 μ m 이상으로 설계되어야 한다. 이끝 폭의 치수가 너무 작은 관계로 레이저 빔을 수직으로 조사하여 가공면에 구배가 발생하였다. 한편 기어의 치형은 인벌류트 치형 곡선을 적용하였으며, 그 주요 치수는 Table 2와 같다. Fig. 3은 레이저 가공기를 이용하여 가공한 인벌류트 치형의 형상 및 치수이다. SUS 304재료로 고정밀의 레이저 가공기에 의해 제작된 마이크로 다이는 Fig. 4에서 보듯이 잇수 8개의 기어 형상과 유사하게 가공되었으며

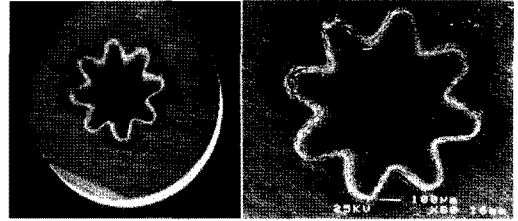


Fig. 4 Laser machined extrusion micro-die with pitch circle diameter of 800 μ m

다이 표면은 산화물과 같은 물질이 표면에 존재하여 거칠기가 약 10~20 μ m 정도임을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

Table 2 Tooth proportions for the micro spur gear

| Item | Value |
|-------------------------------|---------|
| Z (number of teeth) | 8 |
| Phi (pressure angle) | 14.5° |
| M (module) | 0.1 |
| A (addendum) | 0.09mm |
| B (dedendum) | 0.22mm |
| F (face width) | 2mm |
| Da (addendum circle diameter) | ∅0.96mm |
| Dd (dedendum circle diameter) | ∅0.59mm |
| Dp (pitch circle diameter) | ∅0.80mm |
| Db (base circle diameter) | ∅0.62mm |
| Die diameter | 2mm |
| Die height | 2mm |

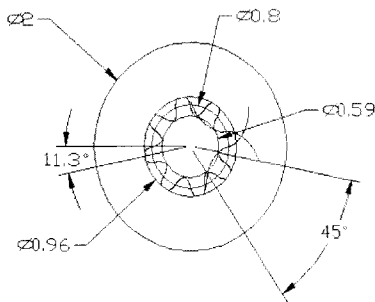


Fig. 3 Dimensions of the involute-toothed spur gear to be laser machined

3.1 마이크로 기어 압출 실험

레이저로 가공된 미세 압출 다이에 재료를 압출하기 위해서는 재료의 결정립이 기어의 이의 크기보다 작아야 하며, 압출이 되더라도 압출 다이에 무리한 하중이 가해질 경우 압출 다이가 파손되는 문제가 있으므로 재료의 결정립이 매우 작고, 압출 시 응력이 작게 작용하며, 변형이 잘되는 초소성 재료를 이용하여 압출하였다. 초소성 재료의 대표적인 합금인 Zn-22%Al 합금의 경우 초소성 가공을 위한 온도는 문헌에 의하면 약 523K로 나타났으며, 최적의 변형률 속도는 $1 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서 응력이 약 10MPa로 매우 낮다⁽⁸⁾. 그러나 변형률 속도 $1 \times 10^{-2}/\text{sec}$ 는 인장 크리프 시험편에 대한 변형률이므로 실제 압출 시 압출 속도로 환산하는데 어려움이 있다. 따라서 가공된 다이에 초소성 Zn-22%Al 합금을 이용하여 503~563K의 온도 범위에서 압출 속도 제어가 아닌 압출 하중을 일정하게 제어하여 압출을 시도하였다. 윤활제는 MoS₂를 사용하였으며 로드 셀의 용량인 1960N을 고려하여 1862~1176N의 일정 하중 하에서 압출을 실시하였다.

Fig. 5는 563K에서의 압출 하중별로 시간에 따른 압출 펀치의 변위를 나타낸 그래프로 압출 하중이 증가할수록 압출 펀치의 속도가 증가함을 알 수 있으며 일정한 시간에 이르면 정상 상태에 이르러 그 속도가 매우 일정함을 알 수 있다. 즉 초소성 변형 혹은 크리프 변형 거동과 유사하다. Fig. 6은 각각의 압출 온도에서 압출 하중에 대한 정상 상태의 펀치 속도를 나타낸 것으로 펀치 하중이 증가할수록 펀치 속도가 증가하였으며, 또한 압출 온도가 증가할수록 펀치 속도도 증가함을 알 수 있었다. 특히 563K에서는 압출 펀치 속도와

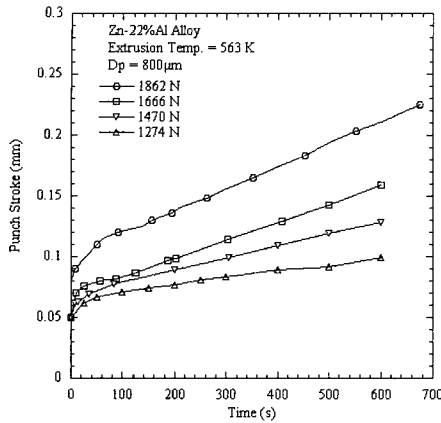


Fig. 5 Punch stroke against time for the micro-gear die at 563K

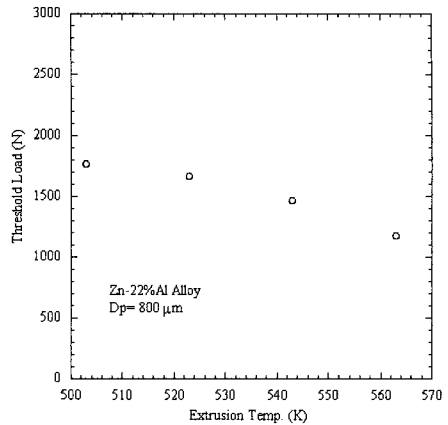


Fig. 7 Threshold punch load against extrusion temperature for the micro-gear die

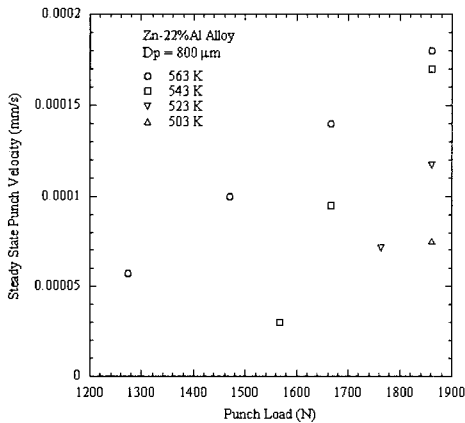


Fig. 6 Punch load against steady state punch velocity for the micro-gear die

압출 하중과 거의 선형으로 비례하였다.

한편 563K에서 펀치 하중이 1274N이하 하중인 1176N에서는 압출 펀치의 속도가 거의 0에 접근하였다. 즉 압출 하중의 하한계(threshold load)에 도달하였다. 이 하한계 하중은 압출 재료 고유의 크리프 변형과 압출 재료와 압출 다이 표면 및 압출 컨테이너 사이의 마찰 등으로 발생한다고 판단된다. 일반적인 압출 공정에 비하여 다이의 크기가 감소할수록 이와 같은 마찰력의 크기 효과가 증가하여 다이 표면의 거칠기나 윤활 등이 압출 거동에 영향을 줄 수 있다^(9,10). Fig. 4에서 보인 바와 같이 레이저 가공으로 가공한 다이의 경우에는 그 표면에 10~20 μ m 내외의 덩어리들이 있음을 알

수 있다. Fig. 7은 각 압출온도에서의 하한계 압출하중을 나타낸 그래프로 다이에서 압출 온도가 증가할수록 하한계 하중이 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 압출 재료와 압출 다이 표면 및 압출 컨테이너 사이의 마찰이 온도가 변화하여도 일정하다고 판단될 경우 나머지 원인인 온도가 증가하면서 압출재료 고유의 크리프 변형 저항의 감소로 판단된다.

일정한 압출 하중은 평균 압출 응력으로 환산이 가능하며 압출 다이를 통과하는 압출 속도는 다이의 단면적과 컨테이너의 단면적비로 환산이 가능하다. 압출 컨테이너의 단면적은 $\pi(2.1\text{mm})^2/4 = 3.462\text{mm}^2$ 로 온도 563K에서의 하한계 하중 1176N에 해당하는 펀치의 평균 응력은 340MPa로 본 압출재의 초소성 변형응력을 고려하면 대단히 높은 응력이다. 따라서 압출 시 펀치의 평균 압력이 340MPa 이상에서 압출이 발생하므로 실제 압출시 재료에 가해지는 유효 응력은 가해지는 압출응력에서 하한계 하중에 해당하는 응력을 제거한 것으로 가정할 수 있다. 따라서 온도 563K에서의 펀치 하중이 1862N, 1666N, 1470N, 1274N일 때 응력은 각각 538MPa, 481MPa, 425MPa, 368MPa이며, 여기에 하한계 응력 340MPa을 고려하면 실제 유효응력은 각각 198MPa, 141MPa, 85MPa, 28MPa에 해당된다. 이와 같은 실험결과에 대하여 타당성을 검증하기 위하여 실제 실험과 시뮬레이션을 통한 결과와 비교하였다. 시뮬레이션을 위하여 본 압출 실험에서 사용한 것과 동일한 재질의 직경 2.0mm, 길이 5.0mm의 빌렛에 대하여 온도 563K에서 1mm/분의 속도로 압축실험을 통하여 Fig. 8과 같은 진응력-진변형률 선도를 결

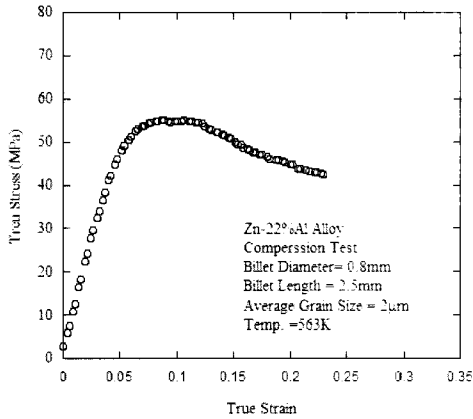


Fig. 8 True stress versus true strain curve for Zn-22%Al alloy at 563K

정하였다.

본 연구에서 수행한 유한 요소해석은 기어가 3차원 형상이기 때문에 소성 가공 전문 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하였다. 유한요소해석 모델링에 사용된 전처리기로는 HyperMesh를 사용하였으며, 실제 모델의 1/8 모델만 구성하여 해석 시간을 최소화하였다. 또한 다이의 곡률부를 표현하기 위하여, 곡률부는 실제 메쉬 크기인 0.05mm 보다 더 조밀하게 메쉬를 구성을 하였다. 유한요소 해석에 사용된 요소의 수는 Fig. 9와 같이 펀치부위의 경우 1,134개, 빌렛은 30,000개, 다이는 11,416개이며, 압출 소재의 길이와 직경은 압축 시험에 사용된 시편과 동일하게 길이 5.0mm, 직경 2.0mm로 구성하였다. 또한 펀치와 다이는 변형을 수반하지

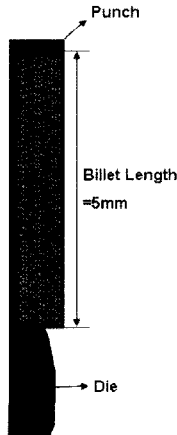


Fig. 9 FEM model for the micro-extrusion

않는 강체로 설정하였다. 해석 조건은 펀치의 이동 속도 $v = 0.00006\text{mm/s}$ 조건에서 각각의 속도에 대한 마찰 계수 $\mu = 0.1, 0.2, 0.3$ 인 조건에서 수행하였다. 해석은 전방 압출 방식으로 수행하였으며, 해석 시간은 펀치가 3.0mm 이동하였을 때 멈추도록 설정하였다.

Fig. 10은 1/8 모델에 대한 펀치 이동속도 $v = 0.00006\text{mm/s}$ 에서 수행한 다양한 마찰계수 조건에서의 하중-변위 선도이다. 본 시뮬레이션 결과를 통하여 전체 모델의 작용하중은 132N(= 16.5N x 8)정도로 최대 하중이 작용한 후 압출이 진행되면서 약간 낮아지며 일정한 저항으로 압출되는 것으로 나타났다. 최대 하중 132N은 Fig. 6의 본 실험의 실제 작용하중 1862N과 비교하여 약 7% 정도에 해당하는 대단히 낮은 수치이다. 또한 그래프를 통하여 마찰계수에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 실제 마이크로 압출에서는 결정립의 크기, 방향, 시험편에서의 결정립의 위치와 같은 요소의 복합적인 상호작용으로 특히 결정립 크기와 시험대상물의 치수비표면 거칠기 등이 매우 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 앞서 서술한 영향들을 고려하지 않고 통상적인 압출작업으로 수행한 결과로 많은 오차를 유발한 것으로 판단된다.

마이크로 성형에서 치수효과는 서로 다른 두 가지의 요소로 인하여 유발되며 동시에 이들 요소가 상호작용하여 인하여 유발된다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 하나는 결정립 크기 효과로 결정립의 크기가 감소하면서 유동응력이 증가하는 Hall-Petch 효과와 유사한 개념으로 이 효과에서는 시험편의 크기나 형상의 치수는 포함하지 않는다. 압출공정에서 압출재는 압축과 전단변형을 수반한다. 압축변형은 단면이 감소함

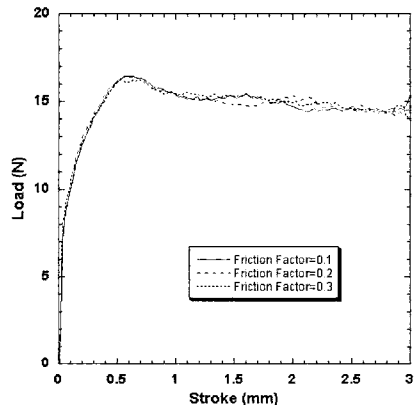


Fig. 10 Load-stroke curves of micro-extrusion under the punching speed of 0.00006mm/s at 563K

으로 발생하며 전단변형은 부수적으로 다이의 형상에 따라 재료가 유동하는 과정에서 발생한다. 또한 마찰은 재료와 다이 표면과의 상호접촉으로 발생한다. 좀 더 많은 부수적인 변형과 마찰이 적용되는 표면에는 많은 전단변형이 발생하며 이와 같은 전단 변형은 표면에서 심각하며 압출재의 중앙으로 위치할수록 감소한다. 결정립이 미세할 경우 결정립은 변형에 필요한 슬립과 회전이 좀 더 균일하나 조대 결정립 재료의 경우 불균일하여 결과적으로 불균일 변형과 많은 가공경화를 유발한다. 따라서 조대 결정립의 경우 압출된 압출재의 내부와 표면간의 많은 경도 차이를 유발한다, 또 다른 요소는 형상 혹은 시험편 크기 효과로 시험편이나 다이의 기하학적 치수에 의하여 유발하는 효과이다.

Fig. 11은 마찰계수 $\mu = 0.3$ 에서의 압출결과를 나타낸 것으로 최대 응력인 35.4MPa이 작용함을 알 수 있다. 이는 앞서 산출한 전반적인 시험편과 다이 및 컨테이너와의 마찰, 시험기의 하중전달 시스템을 포함한 하중 저항인 하한계 하중을 고려하여 추정된 유효압축 응력 198MPa의 18%에 해당하는 낮은 수치이다. 따라서 통상적인 소성가공에 관한 유효요소해석방식으로 마이크로 치수의 대상물을 단순히 적용하는 것은 불가능하며 치수효과를 고려해야 한다고 판단된다. 예를 들어 표면층 모델(surface layer model)⁽⁹⁾과 같은 압출재를 표면에 가까운 지역과 내부로 구분하여 각각의 위치는 표면 면적의 두께에 따라 다른 유동 선도를 가지는 것으로 해석하는 방법을 시도할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 방법을 추후 시도할 예정이다.

Fig. 12는 압출이 약 3mm 이상 진행된 후 중단하고 압출 재료를 추출하여 압출재의 형상 및 표면을 주사형 전자현미

경으로 관찰한 사진이다. 단면이 비교적 매끄러우며 압출부의 길이가 3.2mm 정도로 매우 정교한 기어 형상이 압출되었음을 알 수 있다. 한편 압출 후의 미세립 초소성 재료의 결정립 성장 여부를 확인하기 위하여 광학현미경으로 그 미세조직을 관찰하였다. Fig. 13은 압출된 기어 단면의 미세조직을 관찰한 사진으로 결정립 크기가 약 2.5 μ m 정도로 매우 미세하며 초기 결정립 크기(=2 μ m)를 거의 그대로 유지

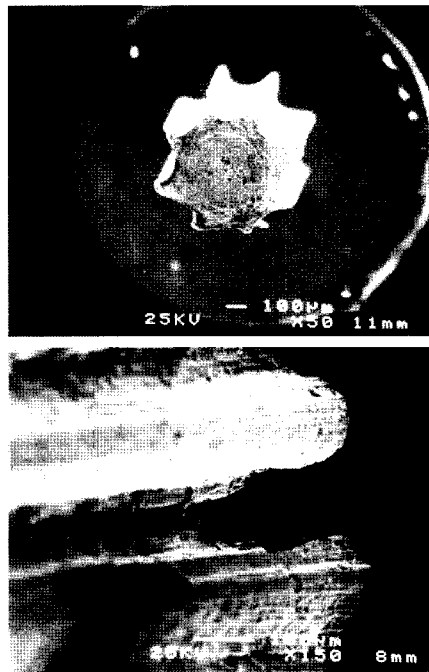


Fig. 12 SEM micrograph of an extruded micro-gear shaft with a length of about 3.2mm

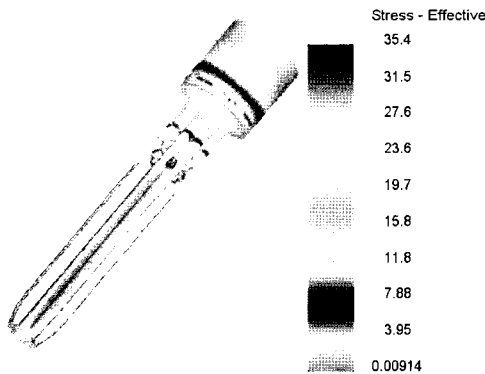


Fig. 11 Stress distribution of the extruded billet under the punching speed $v = 0.00006$ mm/s, $\mu = 0.3$ and $T = 563K$

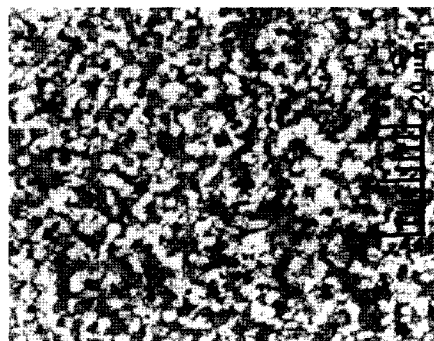


Fig. 13 Micro-structures of central area of the gear (X800)

하고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 시도한 마이크로 압출 방식이 초정밀 마이크로 기어의 압출에 효과적임을 확인하였으며, 추후 압출된 기어 압출봉을 정밀하게 절단하여 기어 형상으로 가공하는 방법과 가공된 기어에 축을 삽입하는 방법이 해결되면 초정밀 감속기의 제작에 유용할 것으로 판단된다. 또한 마이크로 압출에 관한 유한요소해석을 위하여 표면층 모델과 같은 치수효과를 고려한 해석이 요구된다.

4. 결론

초소성 재료인 Zn-22%Al 합금을 이용하여 미세 압출 다이를 레이저 가공기로 가공하여 압출을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초정밀 레이저로 가공한 다이의 표면이 거칠기 측면에서 양호한 결과를 나타냈으며 다이를 가공한 경우 도면과 거의 동일한 미세 압출 다이의 가공이 가능하였다.
- (2) 일정 압출 온도에서 압출 하중이 증가할수록 압출 펀치의 속도가 증가함을 알 수 있었으며, 일정한 시간에 이르면 정상 상태에 도달하여 그 속도가 매우 일정하였다.
- (3) 본 시뮬레이션 결과를 통하여 최대 하중 132N은 본 실험의 실제 작용하중 1862N과 비교하여 약 7% 정도에 해당하는 대단히 낮은 수치로 통상적인 소성가공에 관한 유한요소 해석방식으로 마이크로 치수의 대상물을 단순히 적용하는 것은 불가능하며 표면층 모델과 같은 치수효과를 고려한 해석이 요구된다.
- (4) 초소성 재료인 Zn-22%Al 합금과 미세 압출 다이를 이용한 압출 방식이 초정밀 마이크로 기어의 압출에 효과적임을 확인하였으며 마이크로 압출 방법을 응용하면 마이크로 기어 외에도 초소형 냉각핀이나 열교환기용 초미세 콘덴서 튜브와 같은 부품의 생산에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Lee, N-K., Choi, T-H., Lee H-J., Choi, S-W., Park, H-J., La, W-K., 2005, "Development of Micro Metal Forming Manufacturing System," *Proc. of KSMTE Spring Conference*, pp. 383~388.
- (2) Park, J. K. and Lee, D. W., 2004, "Micro-factory," *Trans. of KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 18~24.
- (3) Ehrfeld, W., Begemann, B., Berg, U., Lofh, A., Michel, F., and Nienhaus, M., 2001, "Highly Parallel Mass Fabrication and Assembly of Microdevices," *Microsystem Technologies*, Vol. 7, pp. 145~150.
- (4) Fujita, F., 1998, "Microactuators and Micromachines," *Proceedings of IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1721~1732.
- (5) Saotome, Y. and Inoue, A., 1994, "Superplastic Micro-forming of Microstructures," *IEEE*, pp. 343~348.
- (6) Saotome, Y. and Iwazaki, H., 2000, "Superplastic Extrusion of Microgear Shaft of 10 μm in Module," *Microsystem Technologies*, Vol. 6, pp. 126~129.
- (7) Saotome, Y. and Iwazaki, H., 2001, "Superplastic Backward Microextrusion of Microparts for Micro-electro-mechanical systems," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 119, pp. 307~311.
- (8) Mohamed, F. A., Ahmed, M., and Langdon, T. G., 1977, "Factors Influencing Ductility in the Superplastic Zn-22 pct Al Eutectoid," *Metall. Trans.*, Vol. 8A, pp. 933~938.
- (9) Engel, U. and Eckstein, R., 2002, "Microforming-from Basic Research to Its Realization," *J Materials Processing Technology*, Vol. 125, pp. 35~44.
- (10) Messner, A., Engel, U., Kals, R., and Vollertsen, F., 1994, "Size Effect in the FE-simulation of Micro-forming Processes," *J Materials Processing Technology*, Vol. 45, pp. 371~379.