

LIGA 공정을 이용한 초소형 스퍼기어 금형 제작 및 하이브리드 분말 압출성형

이경훈¹ · 황대원¹ · 김종현² · 장석상² · 김병민[#]

Fabrication of a Micro Die by LIGA Process and Hybrid Powder Extrusion Process of Micro-spur Gear

K. H. Lee, D. W. Hwang, J. H. Kim, S. S. Jang, B. M. Kim

(Received August 3, 2010 / Revised September 13, 2010 / Accepted September 16, 2010)

Abstract

This paper was designed to fabricate the micro-spur gear by the LIGA and hybrid powder extrusion process. It is important to manufacture a micro-die with a high aspect ratio and determine appropriate extrusion conditions for a micro-forming. Ni has been used to fabricate micro-dies. LIGA process was capable to produce micro-extrusion dies with close tolerance, longer bearing length and adequate surface quality. Superplastic Al-78Zn powders have the great advantage in achieving deformation under low stresses and exhibiting good micro-formability with average strain rate ranging from 10^{-3} to 10^{-2} s^{-1} and constant temperature ranging from 503 to 563K. Al-78Zn powders were compacted into a cylindrical shape ($\Phi 3 \times h10\text{mm}$) under compressive force of 10kN and, subsequently, the compacted powders were extruded by the hybrid powder extrusion process controlling of the temperature holding time for a improvement on formability of Al-22Zn powder. Micro-extrusion has succeeded in forming micro-gear shafts.

Key Words : LIGA Process, Micro Die, Hybrid Powder Extrusion, Al-78Zn Powder, Micro Spur Gear

1. 서론

핸드폰, PDA, 마이크로 하드디스크 시스템 등 각종 전자부품 및 캡슐형 무선 카메라와 같은 의료부품의 소형화가 빠르게 진행되고 있다. 이런 소형화된 기기들은 미니어처 스크류(Miniature screws), 마이크로 채널(Micro channels), 마이크로 기어(Micro gears) 등 기계적 강도가 요구되는 극미세 형상 부품들을 포함하고 있다.

이런 초소형 부품의 제조는 리소그래피(Lithography technology)에 기초한 기술들에 의해 개발되고 있다. 하지만 리소그래피를 통해 제조할 수 있는 재료는 주로 순금속 및 2원계 합금 수준으

로 제한되어 있다[1]. 따라서 재료의 종류에 제한을 받지 않으면서 정형가공(Near net shape) 및 대량생산이 가능한 일반적인 금속 성형 기술을 적용하여 초소형 부품을 제조하기 위한 연구가 최근 관심을 끌고 있다.

Saotome와 Iwazaki는 리소그래피로 제작된 초소형 금형을 이용한 벌크 비정질 합금의 열간압출 성형을 통해 초소형 기어 샤프트를 제작하였다[2]. Lee와 Kim은 폴리머 열간압출성형을 통해 마이크로 기어 샤프트 성형에 대해 연구하였다[3]. Kim과 Lee는 기계적 합금화된 Al-78Zn 분말의 열간압출에서 성형온도에 따른 압출된 스퍼기어의 기계적 특성에 관해 연구하였다[4].

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템

2. 포항가속기 연구소, POSTECH

교신저자: 부산대학교 기계공학부, bmkim@pusan.ac.kr

본 연구는 가스분무법(Gas atomization)으로 제조된 Al-78Zn의 하이브리드 분말압출 공정을 이용하여 초소형 기어 샤프트를 제조하기 위해 수행되었다. 실험에 사용된 초소형 금형은 LIGA 공정을 통해 제작되었으며 열간압출 실험은 Al-78Zn 금속이 초소성 변형을 보이는 압출온도 및 변형률 속도 범위 내에서 수행되었다. 압출된 시편은 SEM, 압출하중, 비커스 경도(Hv) 등을 통해 평가되었다.

2. 실험

2.1 LIGA 공정에 의한 Ni 다이 제작 공정

LIGA 공정에 의한 Ni 다이 제작 공정은 리소그래피(Lithography), 도금(Galvanforming)의 공정으로 구성된다[5]. LIGA 공정에서 가장 널리 사용되는 감광 물질인 판재 PMMA(Polymethylmethacrylate)를 금속 기관 위에 부착하여 X-선 노광에 이용하였다. 금속 기관은 Ti, Cu 또는 Au 등이 주로 사용되며, 본 실험에서는 2mm 두께의 Ti 기관을 이용하였다.

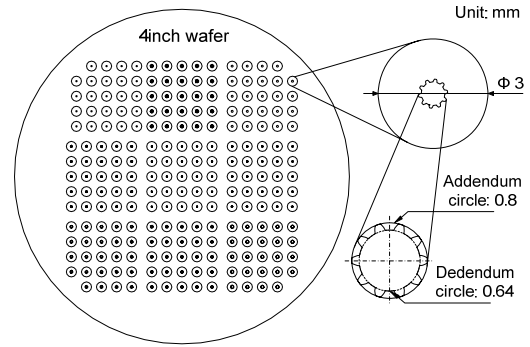
Fig. 1은 LIGA 공정의 순서를 나타낸다. 325 μ m 두께의 Kapton(Polyimide) 필름 위에 일반적인 UV-lithography를 이용하여 Fig. 1(a)의 기어 형상으로 PR을 패터닝하였다. 이후 패터닝된 PR에 Au를 도금한 후 잔여 PR을 제거하여 X-선 마스크를 제작하였다.

Fig. 1(b)는 PMMA 기관 제작 공정을 나타낸다. S1805와 Acetone을 1:10으로 섞은 접착 용액을 Ti 기관에 스핀 코팅에 의해 도포한 후, 100 $^{\circ}$ C에서 20분간 경화시켰다. 그 위해 액상 PMMA를 다시 도포한 후 승온속도 3 $^{\circ}$ C/min으로 180 $^{\circ}$ C에서 1시간 경화시켰다. 2mm 두께의 상용 PMMA 판재를 준비된 기관 위에 놓고 액상 MMA(Methylmethacrylate)를 그 사이에 주입하여 1시간 동안 압착시켰다. 압착된 시편은 승온속도 1 $^{\circ}$ C/min으로 80 $^{\circ}$ C 4시간 동안 경화시켰다.

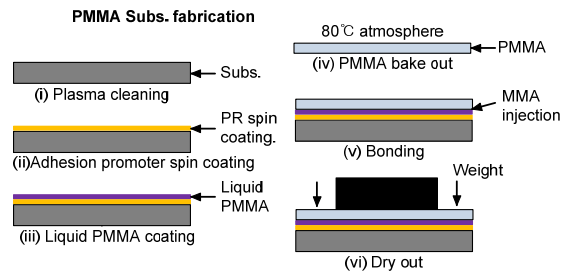
포항가속기연구소의 9C1 마이크로머시닝/백색빔 라인을 이용하여 Fig. 1(c)와 같이 PMMA 노광 실험을 수행하였다. 2.5GeV의 전자 에너지에서 방사되는 X-선의 빔 크기는 (h)180mm x (v)15mm이고, horizontal beam span은 12mrad 이다. 노광시간은 총 90min이었으며, 실험 중 Initial beam current는 191 mA, Final beam current는 181mA 였다. 기관 바닥면에 노광되는 X-선 조사량이 3.5kJ/cm² 이상이 되

도록 노광 시간을 조절하였다. X선 스캔거리는 상하로 ± 50 mm 이며, 스캔속도는 15mm/sec이다.

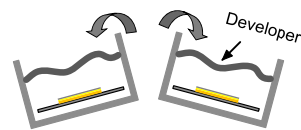
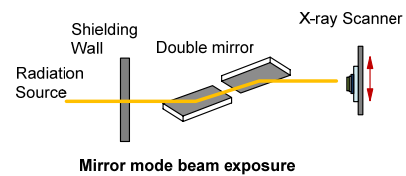
60%의 Diethylene glycol mono buthylether (CH₂)₃OCH₂CH₂OCH₂-CH₂OH), 20vol%의 Morpholine(C₄H₉NO), 15vol%의 DI water와 5vol%의 Ethanolamine(2-aminoethanol) (H₂NCH₂CH₂OH)로 혼합된 현상액을 사용하여 35 $^{\circ}$ C에서 교반(Agitation)하여 현상하였다.



(a) photomask design



(b) fabrication of PMMA substrate

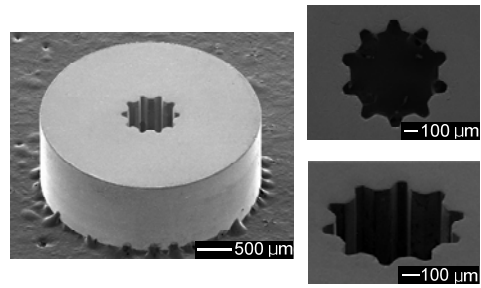


Development with mild agitation

(c) X-ray exposure and development

Fig. 1 Introduction of LIGA process (a) photomask design (b) fabrication of PMMA substrate, (c) X-ray exposure and development

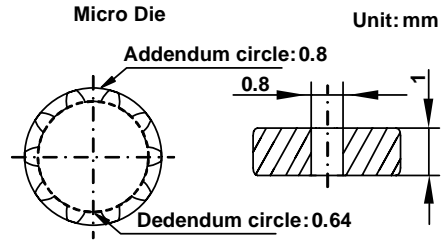
현상된 기판은 Ni 도금 후 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 통해 두께 1mm로 가공되었다. Fig. 2는 LIGA 공정을 통해 제작된 초소형 금형의 제원 및 SEM 사진을 나타낸다. 스퍼기어의 잇수는 10개, 피치원 지름 720 μm 이고 단면감소율은 약 94%이다. LIGA 공정을 이용해 제작된 PMMA 몰드에 니켈을 전주도금한 후 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 통해 표면을 연마하여 제작되었다.



(a) Micro die

2.2 초소형 스퍼 기어의 분말 압출 공정

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 Al-78Zn 분말 입자의 SEM 사진을 나타낸다. 분말은 가스분무법에 의해 제조되었으며 평균입도는 15 μm 이고 분말 형상은 구형(Spheroidal)이다. 분말은 일축 압축 금형을 이용하여 최대 10kN 가압력 하에서 실린더 형상의 압분체($\phi 3 \times h 10\text{mm}$)로 제조되었다. 제조된 압분체는 초소형 스퍼 기어의 압출 시 초기 빌렛으로 사용되었다.



(b) Cross section of spur gear

Fig. 2 SEM images of a micro die fabricated by LIGA process and dimension of the spur gear

Fig. 4는 분말압출 공정을 이용한 초소형 스퍼 기어 제작 순서도이다. Process 1은 압분체(Green compact)를 350 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 동안 소결하여 압출 시 초기 빌렛으로 사용하는 일반적인 분말 압출 공정을 나타낸다[6]. 열간압출 시 압출온도 및 압출속도는 분말의 변형거동에 영향을 미치는 주요 공정 변수이다. 본 연구에서는 Al-78Zn 금속이 초소성 변형을 나타내는 성형조건인 온도 250 $^{\circ}\text{C}$ 와 변형률 속도 10 $^{-3}\text{s}^{-1}$ 에서 압출을 수행하였다[7]. Process 2는 소결 공정을 생략하고 압출 전 온도유지시간 제어를 통해 분말의 성형성을 향상시키는 하이브리드 분말 압출 공정을 나타낸다[8]. 하이브리드 분말 압출은 소결공정을 생략하고 압출 전 일정시간 동안 성형온도를 유지하여 분말간의 유동성을 향상시켜 성형밀도를 최대한 균일하게 하는 공정이다. 실험 시 컨테이너에 압분체를 장입하고 성형온도 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 15min간 유지한 후 Process 1과 동일한 성형온도 및 변형률속도 하에서 압출하였다. 이후 압출된 스퍼기어는 압출하중, SEM 관찰을 통해 평가되었다. 압출동안 금형과 합금분말의 소착을 방지하기 위해 빌렛과 컨테이너 벽면에 흑연윤활제(KLUEBR PRESS DC5-01KR)를 도포하였으며 전반적인 압출조건은 Table 1에 나타내었다.

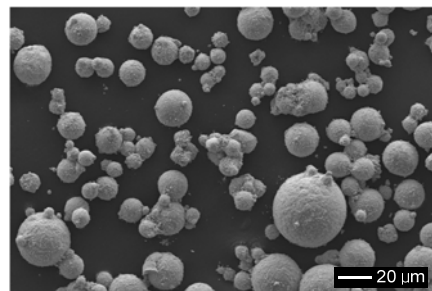


Fig. 3 SEM image of gas atomized Al-78Zn powders

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 압출장치의 형상을 나타낸 것이다. 빌렛의 온도는 컨테이너에 빌렛을 투입한 후 접촉식 열전대를 이용하여 측정하였다.

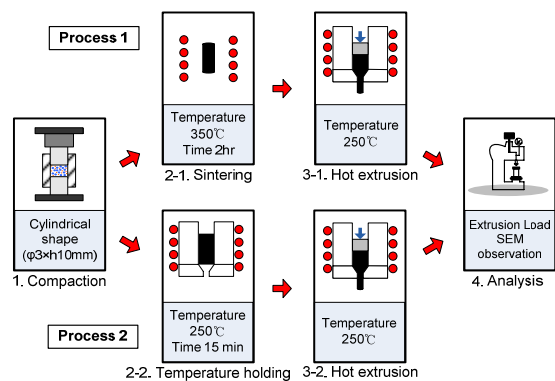


Fig. 4 Powder extrusion process of Al-78Zn powder

Table 1 Conditions of extrusion process

Extrusion conditions	Value
Material of billet	Al-78Zn powder
Billet size	About $\phi 3 \times 10$ mm
Material of container	AISI H13
Material of micro-die	Ni
Extrusion temperature	250°C
Strain rate	10^{-3} s^{-1}
Temperature holding time	15 min
Extruder	MTS(10ton)

3 실험 결과 및 고찰

일반적인 분말 압출 공정(Process 1)으로 압출실험을 수행한 경우, 고상소결 공정으로 인해 압분체의 성형밀도가 증가할수록 기공-입계 분리가 억제되고 분말간의 응집력이 높아지기 때문에 최대 압출하중은 6.65kN으로 나타났다. 과도한 성형하중으로 인해 LIGA 공정으로 제조된 니켈(Ni) 기반의 초소형 압출 금형의 과도한 변형 또는 파손이 발생하여 초소형 기어 샤프트가 압출되지 않았다.

이에 온도유지시간을 제어하여 분말의 성형성을 향상시키는 하이브리드 분말압출 공정(Process 2)을 통해 초소형 기어 샤프트를 압출하였다. Fig. 6은 가스분무법으로 제조된 Al-78Zn 분말을 LIGA 공정을 통해 제작한 초소형 금형을 이용해 압출한 초소형 기어 샤프트의 형상을 나타내는 SEM 사진이다. 모듈(m) 0.072, 잇수(Z) 10, 치외경(D_A) 800 μm 의 초소형 기어 샤프트가 표면결함 없이 성공적으로 제조되었음을 볼 수 있다.

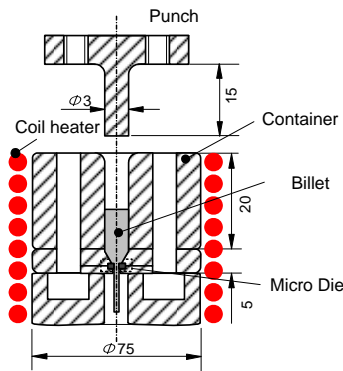


Fig. 5 Shape and dimensions of extrusion equipment

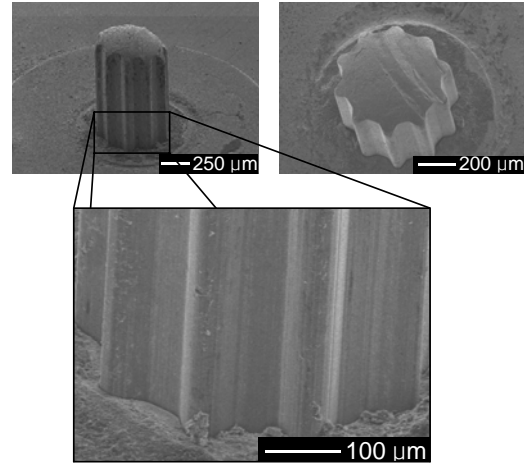


Fig. 6 SEM images of extruded micro gear shafts of Al-78Zn: M=0.072, Z=10, D_A=800 μm , P=4.2kN, T_W=250°C. M: module, Z: number of teeth, D_A: Addendum circle diameter, P: extruding load, T_W: working temperature

Fig. 7은 소재가 초소성 변형을 보이는 압출온도 250°C, 변형률속도 10^{-3} s^{-1} 의 압출 조건하에서 스퍼기어를 압출할 때 압출하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 펀치 이송량이 증가함에 따라 처음 단계에서는 하중이 증가하다가 일정 하중범위에서 짧은 변위 동안, 즉 압분체(green compact)가 분쇄되어 컨테이너를 채우는 과정으로 판단되는 하중에서 일정한 하중으로 유지된다. 컨테이너 내부가 충전된 후 다시 하중이 증가하면서 분말의 치밀화(densification)가 이루어진다. 각 입자간의 접촉면적은 커지고 Process 1과 2의 경우 압출하중이 각각 6.65kN 및 4.45kN 이상이 되면 실제적인 압출이 진행된다.

하이브리드 분말 압출실험 결과, 최대 압출하중은 4.2kN으로 소결된 압분체를 이용한 일반적인 분말 압출실험 결과보다 대략 33% 감소된 최대하중 값을 나타내었다. 소결되지 않는 압분체(Green compact)를 사용하는 경우 소결 금속체에 비하여 분말간의 응집력 낮기 때문에 더 낮은 하중에서 변형을 일으킬 수 있다. 본 연구에서 사용한 초소형 금형의 경우 그 재질이 니켈(Ni)로써 기계적 성질이 일반적인 금형재에 비해 떨어진다. 따라서 금형의 변형 및 마멸을 최소화 하기 위하여 소결되지 않는 압분체를 압출 실험의 초기 빌렛으로 사용해야 한다.

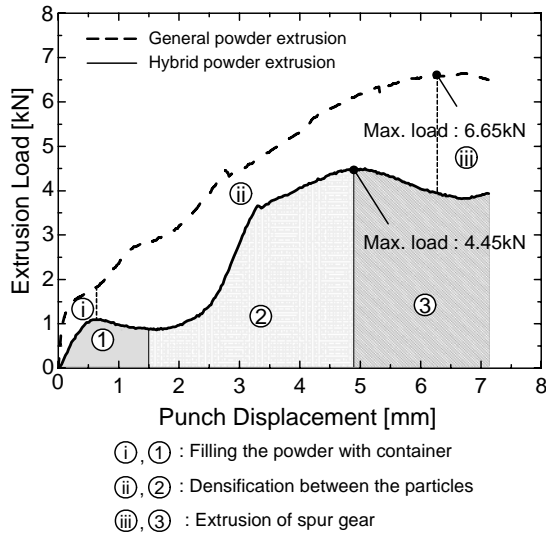


Fig. 7 Load-stroke curve of the micro-spur gear extruded at temperature of 250°C and strain rate of 10⁻³s⁻¹

비커스 경도는 50gf 하중으로 초소형 스퍼기어 단면의 정중앙 부에 대해 측정되었으며 전반적으로 65HV 이상의 값을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 초소형 스퍼기어를 압출하기 위해 LIGA 공정을 이용해 초소형 금형을 제작하였다. 또한 가스분무법으로 제조된 Al-78Zn 분말의 적정 압출공법을 찾기 위해 다양한 압출조건에서 실험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) Mirror Beam을 이용한 LIGA 공정을 통해 모듈(m) 0.072, 기어 잇수(Z) 10, 치외경(D_A) 800μm의 치형을 가지는 초소형 금형을 두께 1mm로 제작하였다.

(2) 하이브리드 분말압출 공정에서 온도유지시간을 적용함에 따라 분말의 유동성이 향상되기 때문에 스퍼기어의 최대 압출하중이 2.2kN 감소하였다.

(3) 압출온도 250°C, 유지시간 15min과 변형률속도 10⁻³s⁻¹에서 압출 시 비커스 경도값(Hv, 50gf)이 65이고 표면 결함이 없는 초소형 기어 샤프트가 제조되었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합분(NCRC)로부터 지원받아 수행되었습니다(2010-0008-277).

포항방사광가속기에서의 실험은 교육과학기술부와 포항제철의 지원을 받았음.

참 고 문 헌

- [1] F. Vollertsen, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Theiler, 2004, State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 151, pp.70~79.
- [2] Yasunori Saotome, Hiroyuki Iwazaki, 2001, Superplastic backward microextrusion of microparts for micro-electro-mechanical systems, J. Mater. Process. Technol., Vol. 119, pp. 307~311.
- [3] K. H. Lee, S. J. Lee, B. M. Kim, 2007, Development of an extruder for fabricating micro parts, IMC24, Vol. 1, pp. 129~134.
- [4] J. W. Kim, K. H. Lee, B. M. Kim, 2009, Extrusion of Spur Gear using High-Energy Ball milled Al-7Zn Powder, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 33, pp. 440~446.
- [5] W. Ehrfeld, H. Lehr, 1995, Deep x-ray lithography for the production of three-dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics, Radiat. Phys. Chem., Vol. 45, pp. 349~365
- [6] Z. Yang, H. Lippmann, 1994, A Study of extrusion of sintered powder metals, Int. J. Mech. Sci., Vol.38, No.1, pp. 79~96.
- [7] D. W. Hwang, K. H. Lee, B. M. Kim, 2010, Manufacturing powder extrusion die and experiment for fabrication of miniature helical-gears, Trans. Mater. Process, Vol. 19, No. 5, pp. 283~289.
- [8] J. W. Kim, K. H. Lee, D. W. Hwang, B. M. Kim, 2009, Improvement of fatigue resistance of the miniature gear by controlling holding time of temperature in the hot powder extrusion process, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Vol. 58, pp. 449~452.