

## 온도 유지시간 제어를 적용한 하이브리드 분말 압출 공정을 통한 요구 특성의 스퍼기어 제조

이경훈\* · 황대원\* · 김병민\*\*†

\* 부산대학교 정밀가공시스템, \*\* 부산대학교 기계공학부

### Hybrid Powder-Extrusion Process Involving the Control of Temperature Dwelling Time for Fabricating Spur Gears with Required Properties

Kyung Hun Lee\*, Dae Won Hwang\* and Byung Min Kim\*\*†

\* Precision Manufacturing System Division, Pusan Nat'l Univ.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received August 9, 2010 ; Revised June 24, 2011 ; Accepted June 28, 2011)

**Key Words** : Mechanical Alloying(기계적 합금), Zn-22Al Powder(Zn-22Al 분말), Hybrid Powder Extrusion(하이브리드 분말 압출), Temperature Dwelling Time(온도 유지시간), Spur Gear(스퍼기어)

**초록**: 본 연구는 압출 시 성형온도를 유지하여 Zn-22Al 합금분말의 성형성을 향상시키는 하이브리드 분말 압출 공정의 개발 및 온도 유지시간이 압출된 스퍼기어의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 수행되었다. 피치원 지름 1.8mm 의 소형 스퍼기어는 압출온도 290, 300, 310°C에서 성형되었다. 볼밀시간 32h 의 Zn-22Al 합금분말을 압출온도 310°C에서 압출 시 표면 결함이 없는 소형 기어가 제조되었다. 경도분포는 기어 중심부와 치형부에서 불균일하였고 소결공정 후 내부 변형에너지의 차이로 인해 내부균열이 발생하였다. 위와 같은 문제를 해결하기 위해 온도 유지시간 제어를 이용한 하이브리드 압출 연구를 수행하였다. 압출된 스퍼기어의 평가는 압출하중, 비커스 경도 및 치수정밀도 측정을 통해 이루어졌다. 온도 유지시간 15min 에서 압출된 스퍼기어의 기계적 성질이 가장 우수하였다.

**Abstract**: In this study, a hybrid powder-extrusion process involving the control of temperature dwelling time for improving the formability of Zn-22Al powder was developed and the effect of dwelling time on the mechanical properties of a spur gear with a pitch circle having a diameter of 1.8 mm was investigated. General extrusion experiments were carried out at different temperatures such as 290, 300, and 310°C. Spur gears with good qualities and without any surface defects were obtained in the case of extrusion temperature of 310°C and ball-milling duration of 32 h. The Vickers hardness distribution was non-uniform, and after the sintering process, an internal crack was generated because of the different deformation energy between gear central part and teeth. To overcome the abovementioned problems, research on controlling the dwelling time of the extrusion temperature in the powder-extrusion process was carried out. Good-quality spur gears were obtained when the dwelling time was 15 min.

### 1. 서 론

최근 생산되는 전자제품 및 통신기기 등에 내장되는 부품은 휴대성을 높이면서 대용량, 고기능화를 실현하기 위해 경박단소(輕薄短小)화 되어가고 있다. 이러한 미소단위의 부품 중 구동 특성을 갖는 밀리미터 단위의 미소기구물(KMS: Kinematic

Milli Structure)은 제품의 경량화 및 소형화의 핵심 부품으로써, 이 분야의 기술력이 궁극적으로 차세대 상품의 경쟁력을 좌우할 것으로 예상된다.<sup>(1)</sup>

국내는 물론 선진국에서도 오래 전부터 초소형 부품의 생산 기술에 관한 연구가 진행되어왔다. MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)에 대한 연구와 그에 따라 개발된 부품이 실제 산업 현장에 일부 응용되고 있다.<sup>(2,3)</sup> 그러나 기존의 초소형 기계기술은 기계 요소와 같은 3 차원 형상의 복잡한 구조물을 생산하기는 어려운 실정이며 이를 위해서는 앞으로 상당한 시간이 요구될 것이다. 따라

† Corresponding Author, bmkim@pusan.ac.kr  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

서 최근에는 일본을 비롯한 일부 선진국에서 전통적인 가공방식을 이용한 미소부품 제작에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 특히 소성변형을 이용하여 수 밀리미터(mm)에서 수 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ) 크기의 초소형 기계부품을 제작하는 소성가공기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

특히 미세소성가공기술 중 하나인 분말 압출을 이용하여 소형 스퍼기어를 제작하는 연구가 진행되고 있다.<sup>(4-6)</sup> 분말 압출 공정에서 분말 성형체의 밀도 변화는 분말의 성형성을 나타내는 중요한 척도일 뿐만 아니라 최종 제품의 기계적 성질을 결정하는 중요한 변수이다. 성형체의 내부 상대밀도(Relative density)의 분포는 제품 단면의 경도를 측정함으로써 간접적으로 확인할 수 있다.<sup>(7-9)</sup> 성형 밀도차이가 큰 경우, 소결 시 수축량의 차이로 인해 제품의 정밀도 저하 및 표면 크랙, 내부균열 등이 발생하게 된다.

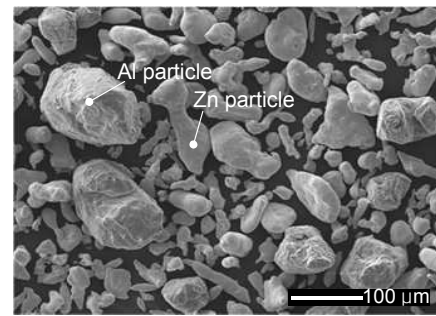
본 연구에서는 압출 후 소결을 통해 스퍼기어를 제작하는 일반적인 분말성형 시 발생하는 성형체의 내부 밀도차이에 의한 결함을 최소화하기 위해 하이브리드 분말 압출 공정을 개발하였다. 여기서, 하이브리드 공정이란 소결 시 발생하는 분말의 치밀화 과정을 압출 시 온도 유지시간(Dwelling time)의 제어를 통해 유도하여 압출 후 소결의 2 단계로 이루어진 제조 공정을 압출 공정으로 일원화시키는 공정을 의미한다. 압출 실험에 사용된 Zn-22wt%Al 합금분말은 다양한 볼밀(ball mill) 시간에 대해 기계적 합금법(Mechanical alloying)으로 제조되었다.<sup>(4)</sup> 합금분말의 성형성을 향상 시킬 수 있는 공정을 개발하기 위해 압출 온도, 볼밀 시간, 온도 유지시간 등 다양한 압출 조건에서 성형되었다. 압출된 시편은 표면관찰, SEM 관찰, 압출 하중 및 비커스(Vickers)경도 측정을 통해 평가되었다.

## 2. 기계적 합금화에 의한 Zn-22wt%Al 분말 제조

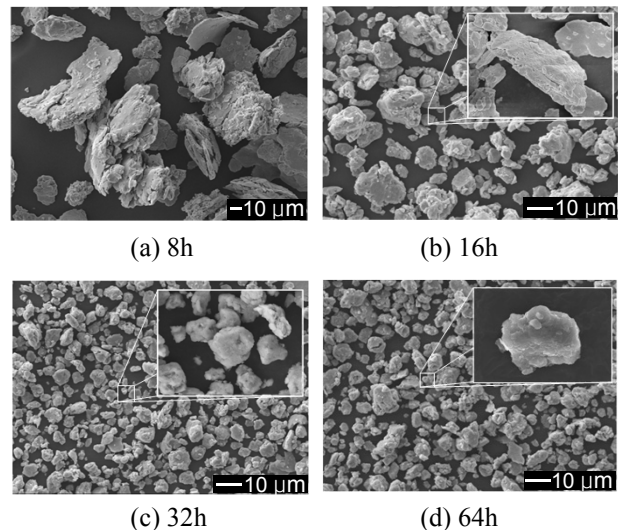
본 연구에서 사용된 Zinc(99.9%)과 Aluminum(99.8%) 분말 입자의 혼합상태에 대한 SEM 사진을 Fig. 1에 나타내었다. Zn-22wt%Al 합금분말의 제조를 위한 기계적 합금화 공정에는 Fritsch Pulverisette 사의 고에너지 유성형 볼밀장치가 이용되었다. 볼밀 시간은 8, 16, 32, 64 h로 하였으며 회전속도는 150 rpm으로 일정하게 하였다. Zn, Al 분말의 무게비(wt%)는 78:22이며 분말의 산화방지를 위해 아르곤(Ar) 가스 분위기에서 기계적 합금화 공정을 수행하였다. 세부적인 볼밀 조건은 Table 1과 같다. 볼밀 시간에 따른 합금분말의 형

**Table 1** Conditions of ball-milling process

Ball-milling		Value
Equipment		Planetary ball mill (Fritsch GmbH)
Pot	Material	AISI-H13
	Size	$\text{Ø}130 \times \text{h}120 \text{ mm}$
Ball	Material	SUS 304
	Size	$\phi 5 \text{ mm}$
Powder	Al (100mesh, 99.8%)	Zn (100mesh, 99.9%)
	Ball - Powder ratio	20:1 (wt%)
Revolution speed		150 (rpm)
Milling Time		8, 16, 32, 64 h
Pot atmosphere		Ultra high purity argon(99.99%)



**Fig. 1** SEM image of Zn-22wt%Al mixed powders before ball milling



**Fig. 2** SEM images of Zn-22wt%Al alloyed powder particles for the different ball-milling times

태와 입도 변화는 SEM(Hitachi) 관찰을 통해 평가되었다. 또한, 분말의 합금화 경향은 XRD(Philips 사의 X-ray diffractometer) 분석을 통해 조사되었다.

사용된 X-선은 Cu K $\alpha$  방사선이며 스캐닝 속도는 0.03°/s, 각도(2 $\theta$ )는 15°에서 120° 범위로 하였다.<sup>(10)</sup>

Fig. 2 는 볼밀 시간에 따른 Zn-22wt%Al 합금분말 입자의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 전반적으로 기계적 합금화 시간이 증가할수록 합금분말의 입도는 감소되었으며 분말 형태는 판상에서 층상을 거쳐 구형화되었다. Fig. 3 은 볼밀 시간에 따른 합금분말의 평균입자크기를 나타낸 것이다. 볼밀 시간 8h 의 경우, 분말은 볼 사이의 높은 압축변형에 의해 약 40 $\mu$ m 의 판상형태로 나타났다. 이후 분말입자가 20 $\mu$ m 로 감소되었으며 32h 이후에서는 더욱 미세화되어 평균입도 10 $\mu$ m 의 구형으로

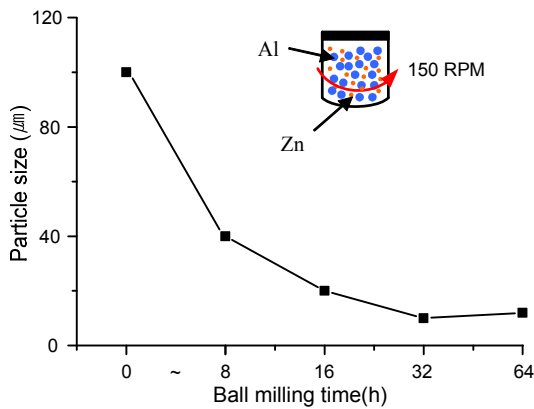


Fig. 3 Average particle size of alloyed powders for different ball milling times

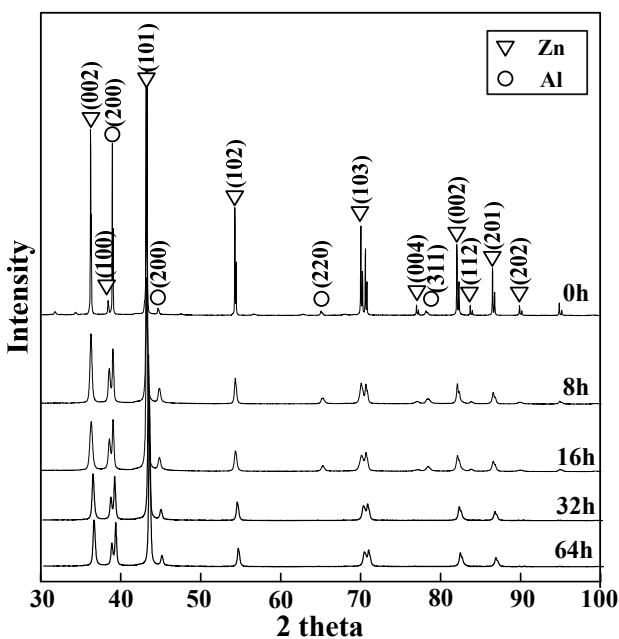


Fig. 4 XRD analysis of Zn-22wt%Al alloyed powder for the different ball milling times

변하였다.

Fig. 4 는 볼밀 시간에 따른 합금분말의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 볼밀시간 0h 의 경우 2 $\theta$  =70° 부근에서 Zn(103)의 피크(peak)가 분명하게 관찰되었다. 전반적으로 볼밀 시간이 증가함에 따라 피크의 위치는 더 높은 각도로 약간씩 이동하였고 피크의 강도(intensity)는 감소하였다. 32h 에서는 Al(220)과 Al(311) 피크가 더 이상 관찰되지 않았다. 이것은 Al 격자와 결정립계에서 Zn 의 부분적인 용해 때문이거나 Zn 이 매우 작은 고립형 입자로서 Al 내로 분산되었기 때문이다. 실질적으로 볼밀 동안 과포화된 Al(Zn)을 형성시킨 Al 내부로 더 작은 Zn 원자가 용해되고 이로 인해 Al 피크는 더 높은 각도로 이동한다.<sup>(4,10)</sup>

### 3. 스퍼기어의 분말 압출

#### 3.1 압출 실험 조건

스퍼기어 압출에는 기계적 합금법으로 제조된 Zn-22wt%Al 분말이 사용되었다. Fig. 5 에 분말 압출 공정을 이용한 소형 스퍼기어 제조 순서를 나타내었다. 합금분말은 MTS 사의 만능재료시험기 (10ton)를 이용하여 20kN 의 가압력 하에서 실린더형상의 압분체(φ 5 x h10mm)로 제조되었다.

Process I 은 압출 후 소결을 통해 스퍼기어를 치밀화시키는 일반적인 분말 압출 공정을 나타내고 Process II 는 압출 후 소결의 이원화된 제조공정에서 소결공정을 생략하고 압출 공정으로 일원화된 하이브리드 분말 압출 공정을 나타낸다. 먼저, Zn-22wt%Al 합금분말의 적정 압출 온도를 결정하기 위해 290, 300, 310°C에서 압출 실험을 수행

Table 2 Conditions of general and hybrid extrusion process (Process I and II)

Extrusion conditions		Value
Material of billet		Zn-22wt%Al powder
Lubricant		Graphite(Klüber)
Material of tools		AISI H13
Extrusion speed		15 mm/min
Billet size		Ø5 x h10mm
Extruder		MTS (10ton)
Process I	Ball milling time	8, 16, 32, 64h
	Extrusion Temp.	290, 300, 310°C
	Sintering condition	350°C, 2h
Process II	Ball milling time	32h
	Extrusion Temp.	310°C
	Temperature Dwelling time	5, 15, 30, 60 min

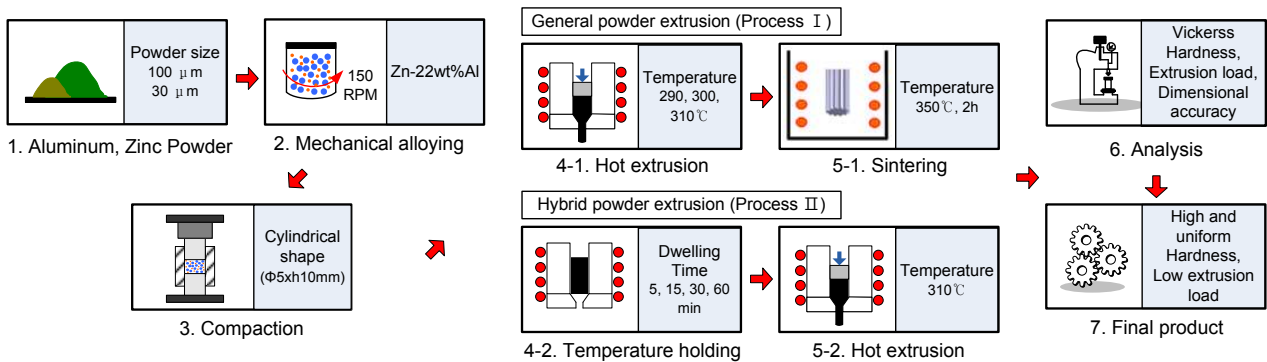
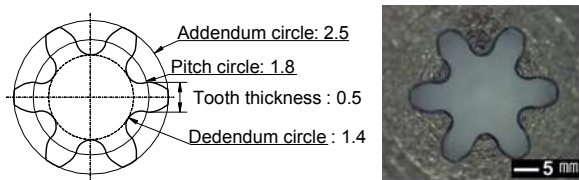
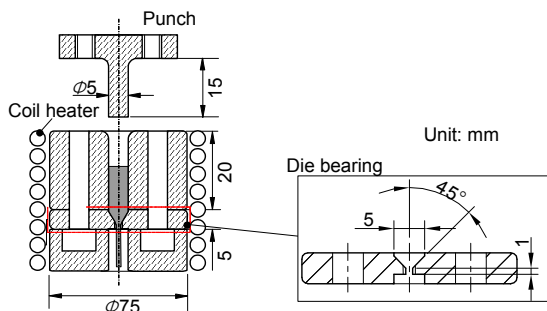


Fig. 5 Powder extrusion process of Zn-22wt%Al powder



(a) Cross section of spur gear



(b) Extrusion equipment

Fig. 6 Shape and dimension of the spur gear and extrusion equipment

하였다. 압출 속도는 15mm/min 이고 빌렛의 온도는 컨테이너에 빌렛을 투입한 후 접촉식 열전대를 이용하여 측정되었으며, 압출된 기어는 350°C에서 2h 동안 소결되었다.<sup>(4)</sup> 하이브리드 압출 실험 시 컨테이너에 불밀 시간 32h의 분말로 압분된 빌렛을 장입하고 성형온도 310°C에서 5, 15, 30, 60min 동안 온도 유지 후 Process I 과 동일한 실험 조건에서 압출하였다. 전반적인 실험 조건은 Table 2 에 나타내었다. 각 공정에 의해 제조된 스퍼기어는 압출 하중, 비커스 경도 측정, 저배율 현미경 표면관찰 및 기어부 단면의 SEM 관찰을 통해 평가되었다. 압출 동안 금형과 합금분말의 소착을 방지하기 위해 빌렛과 컨테이너 벽면에 고온 흑연윤활제(Klüber Press DC5-01KR)를 도포하였다. Fig. 6 은 본 연구에서 사용된 스퍼기어와

압출 금형의 형상을 나타낸 것이다. 스퍼기어의 피치원 지름은 1.8mm 이고 잇수는 6 개이며 단면감소율은 89%이다.

3.2 압출 실험 결과

Fig. 7 은 일반적인 분말 압출 공정 시 다양한 불밀 시간 및 압출 온도에서 성형된 스퍼기어의 표면을 나타낸 것이다. 각각의 시편은 초기 압출부 10mm 를 제거한 후 저배율 현미경을 이용해 관찰되었다. 압출온도 290°C의 경우 낮은 압출온도로 인해 금형내부 분말의 유동성과 분말입자간 응집력이 저하되어 기어 치형부 표면 크랙에 의한 파단이 발생하였다. 또한 불밀 시간 8h의 경우 분말의 미합금화로 인해 용점이 낮은 Zn 이 부분적으로 용융되어 모든 압출온도에서 파단 되었다. 불밀 시간 16, 32, 64h의 경우 300°C 이상의 온도에서 압출 시 표면결함은 발생하지 않았다.

Fig. 8 은 다양한 불밀 시간 및 성형온도 300, 310°C 에서 압출된 스퍼기어의 최대 압출하중과 비커스 경도값(Hv: 100gf)을 나타낸 것이다. 비커스 경도는 100gf 하중으로 스퍼기어 단면의 치형부와 중앙부에 대해 측정되었다. 압출온도 310°C 인 경우 압출하중은 각 불밀 시간에 대해 최소값을 나타내었다. 분말압출에서 높은 성형온도는 금형 내부 분말의 유동성과 분말입자간 응집력을 향상시켜 전반적인 압출하중 및 기공률을 감소시킨다. 기어 단면의 부위별 비커스 경도 분포는 부위별로 대략 Hv. 10 의 편차를 보인다. 금형벽과 분말(압분체)간의 마찰은 성형체 내의 충전밀도를 불균일하게 하며 성형체 표면 근처의 충전밀도를 감소시킨다. 결과적으로 이 끝(A)부분이 상대적으로 비커스 경도값이 감소하였다.

압출된 시편은 치밀화와 입자성장을 통해 내부 성형밀도를 높이기 위해 350°C에서 2h 동안 소결하였다. 그 결과 소결된 시편은 압출 조건에 관계

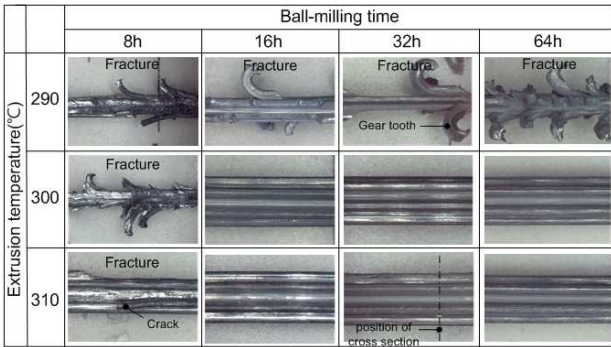


Fig. 7 Surfaces of the spur gear extruded under different ball milling times and extrusion temperatures

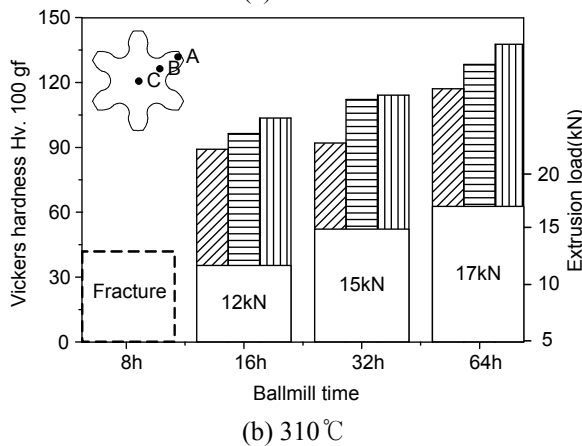
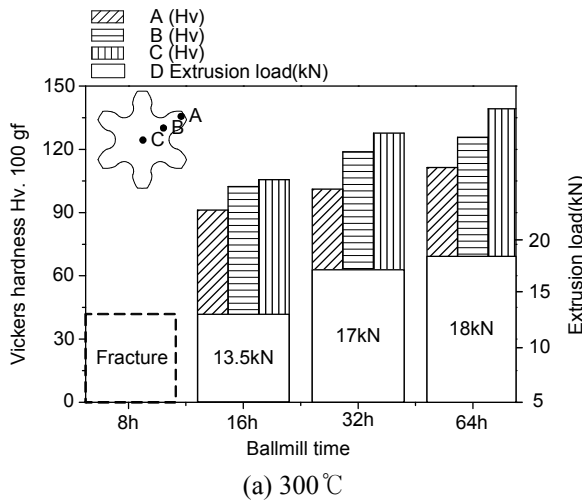


Fig. 8 Extrusion load and Vickers hardness of spur gear under different ball-milling times and extrusion temperatures (a) 300°C, (b) 310°C

없이 모두 내부에서 균열이 발생하였다. 불밀 시간 32h, 압출온도 310°C에서 압출 후 소결된 시편의 단면 SEM 사진을 Fig. 9에 나타내었다. 기어 치형부는 중앙부에 비해 상대적으로 높은 변형에너지를 요구한다. 이로 인해 압출 동안 기어 치형

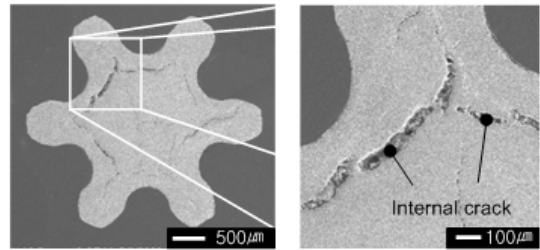


Fig. 9 Internal crack of the spur gear after sintering in Process I

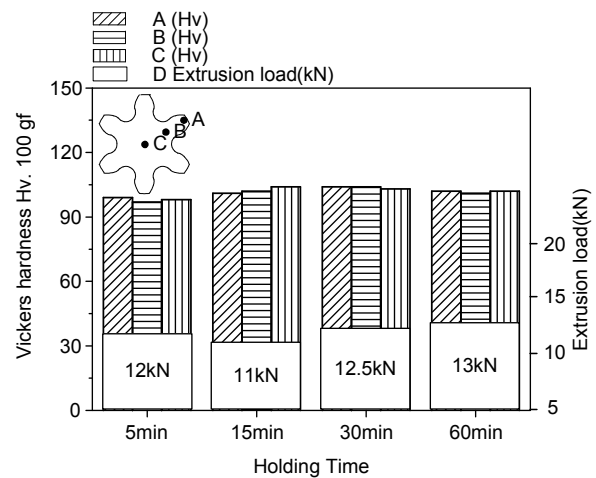


Fig. 10 Extrusion load and Vickers hardness of spur gear under extrusion temperature of 310°C and different dwelling times (Process II)

부와 중앙부에서 분말의 속도차이를 더욱 증가시킨다. 결과적으로 분말 내부의 높아진 변형에너지를 완화하기 위해서 크랙이 발생할 수 있다.<sup>(11,12)</sup>

Fig. 10은 하이브리드 분말 압출 공정을 통해 제작된 스퍼기어의 최대 압출하중과 비커스 경도값 (Hv: 100gf)을 나타낸 것이다. 온도 유지시간을 이용하여 분말의 유동성을 향상시켜 압출된 스퍼기어의 비커스 경도값은 치형부와 중심부에서 대략 Hv. 100으로 균일해졌다. 최대 압출하중은 일반적인 분말 압출공정(Process I)에 비해 2~4kN 정도 감소하였으며 온도 유지시간 15min 일 때 11kN으로 가장 낮게 나타났다. 온도 유지시간이 30min 이상인 경우, 분말간의 유동성은 향상되는 반면에, 윤활제가 표면에 융착(lubricant accretion)되거나 분말 성형체 표면에 경질의 산화물이 생성되어 금형 벽면과 빌렛 사이의 마찰을 증가시킬 수 있다. 이로 인하여 최대압출하중은 상대적으로 증가된다.

Fig. 11은 온도 유지시간에 따른 압출된 기어의 초기 균열길이와 치형의 치수정밀도를 비교한 것이다. 온도 유지시간 15min 일 때 초기 균열길이가

Temperature 310 °C	Dwelling times			
	5min	15min	30min	60min
Crack region at first stage				
Dimensional accuracy of the spur gear				

Fig. 11 Crack region at first stage and dimensional accuracy of extruded spur gear in process II

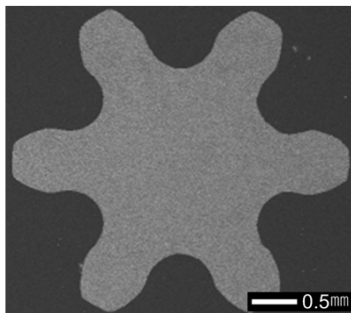


Fig. 12 SEM image of the cross section of the extruded spur gear in process II with temperature dwelling time of 15min

2.5mm 로 가장 짧게 나타났으며 치형부 단면 치수오차 또한 0.002mm 로 가장 낮게 나타났다. 하지만 과도한 온도 유지시간은 윤활제의 응착으로 인하여 오히려 초기 균열길이와 단면 치수오차를 증가시킨다.

Fig. 12 는 볼밀 시간 32h 의 분말이 온도 유지시간 15min 의 하이브리드 분말압출을 통해 제조된 스퍼기어의 단면 SEM 사진을 나타낸다. 소결 시 내부 성형밀도 차이에 따라 발생했던 내부 균열이 온도 유지시간 제어를 통해 방지되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Zn-22wt%Al 합금분말의 적정 압출온도와 기계적 합금화 시간을 구하기 위해 다양한 온도범위 및 합금화 시간에서 소형 스퍼기어를 압출하였다. 또한 소결 시 발생하는 내부 균열을 방지하고 합금분말의 성형성 향상을 위해 하이브리드 분말압출 공정을 이용하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 기계적 합금화 시간이 증가할수록 합금분말의 형상은 판상에서 구형으로 변화였고 분말의 충전성이 향상되어 비커스 경도값이 증가하였다. 볼밀 시간 32h 이후 분말의 감소된 평균입도는 약 10 $\mu$ m 였고 분말의 유동성이 줄어 압출하중이 증

가하였다.

(2) 스퍼기어의 일반적인 분말 압출(Process I)에서 압출 온도가 증가할수록 분말의 유동성이 향상되기 때문에 전반적인 성형하중이 감소하였다. 310°C의 온도에서 압출된 스퍼기어가 가장 낮은 성형하중을 가졌다.

(3) 하이브리드 분말압출 공정에서 온도 유지시간을 적용함에 따라 분말의 성형성 및 유동성이 향상되기 때문에 스퍼기어의 전반적인 성형하중이 감소하였으며 소결 시 발생했던 내부 균열이 방지되었다.

(4) 압출온도 310°C, 온도 유지시간 15min 에서 압출된 스퍼기어가 가장 낮은 압출하중(11kN), 균일한 경도(Hv(100gf): 100)값 및 우수한 치형 치수정밀도(오차: 0.002mm)를 가지는 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합분야(NCRC) (2010-0008-277) 및 지식경제부와 한국산업기술평화지원사업의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참고문헌

- (1) U.S., 1997, *Micro Electro Mechanical System (MEMS) Markets*, Frost & Sullivan.
- (2) Chung, S. J., 2000, A Micro Cycloid-Gear System Fabricated by Multi-Exposure LIGA Technique, *Microsyst Technol*, Vol. 6, pp. 149~153.
- (3) Ogawa, K. Suzuki, S. Kaneko, Y. Nakano, Y. Ishikawa and T. Kitahara, 1997, Tensile Testing of Micro Fabricated Thin Films, *Microsyst Technol*, Vol. 3, pp. 117~121.
- (4) Kim, J. W., Lee, S. J., Lee, J. M. and Kim, B. M., 2009, "Extrusion of Spur Gear Using High-Energy Ball milled Al-78Zn Powder," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 4, pp. 440~446.
- (5) Lee, K. H., Kim, J. W., Hwang, D. W., Kim, J. H., Chang, S. S. and Kim, B. M., 2009, "Powder Extrusion with Superplastic Al-78Zn Powders for Micro Spur Gears," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 387~390.
- (6) Kim, J. W., Lee, K. H., Hwang, D. W. and Kim, B. M., 2009, "Improvement of Fatigue Resistance of the Miniature Gear by Controlling Holing Time of Temperature in the Hot Powder Extrusion Process," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 449~452.

- (7) Kwon, Y. S., Lee, H. T. and Kim, K. T., 1996, "Analysis for Cold Die Compaction of Metal Powder," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 20, No. 6, pp. 1893~1902.
- (8) Kim, K. T. and Kim, J. S., 1997, "Stage 1 Compaction Behavior of Tool Steel Under Die Pressing," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 21, No. 7, pp. 1073~1080.
- (9) Lee, S. C. and Kim, K. T., 2002, "Densification Behavior of Aluminum Alloy Powder Under Cold Compaction," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 1295~1308.
- (10) Tavoosi, M., Karimzadeh, F., Enayati, M. H. and Heidarpour, A., 2008, "Bulk Al-Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Prepared by Reactive Milling and Hot Pressing Methods,"
- (11) Bauser, M., Sauer, G. and Siegert, K., 2006, *Extrusion*, ASM International, USA.
- (12) Kuhn, H. A. and Ferguson, B. L., 1990, *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, USA.