

## 고에너지 볼밀법으로 제조된 Al-78Zn Powder 를 이용한 스퍼기어의 압출

김진우\* · 이상진\* · 이정민\*\* · 김병민†

(2008년 12월 24일 접수, 2009년 1월 28일 수정, 2009년 2월 5일 심사완료)

### Extrusion of Spur Gear Using High-Energy Ball Milled Al-78Zn Powder

Jinwoo Kim, Sangjin Lee, Jungmin Lee and Byungmin Kim

**Key Words :** Powder Extrusion(분말 압출), Mechanical Alloying(기계적 합금), Al-Zn Composite Powder(Al-Zn 혼합분말), Miniature Spur Gear(소형스퍼기어)

#### Abstract

This paper was designed to fabricate the miniature spur gear with pitch circle of 2.25mm using extrusion process of a mechanically alloyed Al-78wt%Zn powder. The mechanical alloying of the powder particles were performed for ball milled times of 4h, 8h, 16 and 32h by the planetary ball milling. The mechanical properties of these alloyed powders, which were compacted and sintered-cylindrical preforms, were estimated using compression test. The results showed that the alloyed powder with average particle size of 10  $\mu\text{m}$  milled for 32h has the highest compressive(fractured) strength(288MPa). Extrusions of the miniature spur gear using the alloyed powder were carried out at different extrusion temperatures. Extrusion temperature of 300°C provided the spur gear with the highest relative density and Vickers hardness and without any surface defects.

#### 1. 서 론

Al-Mg와 Al-Zn합금은 결정립 크기가 아주 미세할 때(대략 1  $\mu\text{m}$  전후) 우수한 기계적 특성과 상온에서 초소성거동을 나타냄에 따라 최근 마이크로 크기의 기능부품에 대한 재료로서 많은 각광을 받고 있다.<sup>(1~11)</sup> 이러한 초미세 결정립 크기의 Al-Zn 합금은 가공열처리공정(thermo mechanical controling process)에 의한 벌크(bulk)재료와 Al, Zn분말의 기계적 합금화(mechanical alloying, MA) 방법에 의한 합금분말(alloyed powder)형태로 제조되고 있다.<sup>(3,8~11)</sup> 특히 MA는 볼밀처리(ball milling)를 이용하여 합금화가 되기 어려운 분말재료에 기계적 에너지를 가하여 합금분말을 제조하는 공정이다. 이

러한 공정은 액상반응 없이 고상반응으로만 이루어지기 때문에 급속응고기술이나 급속기저 복합상(metal matrix composite)방법보다 우수한 조직특성을 얻을 수 있다. 또한 기존의 Al-Zn계 합금 이외에 다양한 형태의 합금분말을 제조할 수 있다는 장점이 있다.<sup>(3,12~15)</sup>

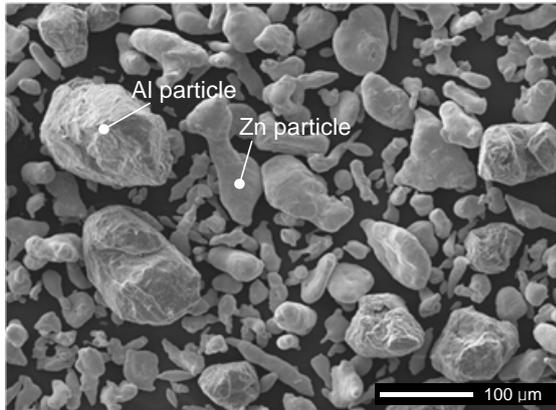
이러한 Al계 합금분말 제품은 일반적인 주조 Al합금에 비해 높은 강도와 마모 저항성, 열저항성, 저열팽창 특성을 가지고 있다. 또한 다른 금속이나 세라믹분말에 비해 성형압력이 낮고 분말의 유동성, 성형성이 매우 우수하기 때문에 압출공정의 적용이 가능하다는 장점이 있다.<sup>(1~3)</sup> 일반적으로 분말압출공정은 단조나 등압 또는 정수압성형과 같은 기타 성형공정에 비해 높은 생산성과 경제성을 가진다. 전형적인 분말압출은 세부공정에 따라 자유분말(loose powder)압출과 캔(compact powder in a can)압출, 소결체(sintered preform)압출로 구분할 수 있다. 이들은 모두 직접압출법으로 단면감소율이 매우 크기 때문에 성형 동안 조직의 미세화, 편석의 최소화가 가능하며 또한 비교적

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3074 FAX : (051)581-3075

\* 부산대학교 대학원 정밀가공시스템

\*\* 한국국제대학교 기계자동차공학부



**Fig. 1** SEM image of Al-Zn mixed powders before ball malling (100×)

높은 밀도의 제품을 얻을 수 있다.<sup>(1~3,15~17)</sup>

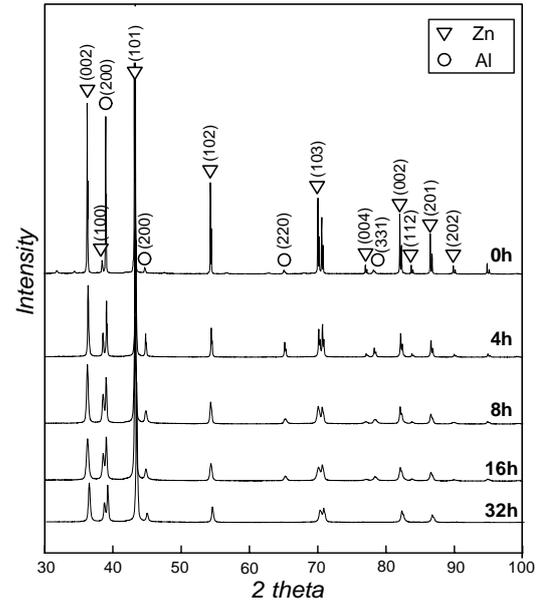
본 연구는 기계적 합금화된 Al-78wt% Zn 합금분말의 압출공정을 이용하여 소형 스퍼기어를 제조하기 위해 수행되었다. 이러한 합금분말은 다양한 볼밀 시간에 대해 제조되었으며 그것의 미세구조와 기계적 특성은 볼밀 후 SEM 관찰과 XRD 분석, 분말 소결체의 압축시험을 통해 평가되었다. 또한 최적의 압출온도를 결정하기 위해 합금분말은 다양한 온도범위에서 압출되었다. 최종적으로 압출된 스퍼기어의 평가는 압출하중과 이론밀도, 비커스(Vickers)경도 측정을 통해 이루어졌다.

## 2. MA 에 의한 Al-78wt%Zn 분말의 제조

### 2.1 MA 공정조건 및 시험

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 Al(99.8%)과 Zn(99.9%) 분말입자의 혼합상태에 대한 SEM사진을 나타낸 것이다. Al과 Zn 분말의 평균입도는 각각 100 과 36 μm이다. 합금분말 제조를 위한 MA공정은 고에너지형인 유성형 볼밀장치(Fritsch사)를 이용하였으며 사용된 용기(φ130 × h120mm)와 볼(φ5mm)은 스테인리스강으로 제조되었다.<sup>(12~15)</sup>

합금분말 제조를 위해 사용된 Al과 Zn분말의 무게비는 22:78wt%이며 총 혼합분말과 볼의 무게비는 20:1wt%로 하였다. MA공정은 볼밀 동안 분말의 산화방지를 위해 아르곤(Ar) 가스 분위기에서 수행되었으며 또한 분말의 과잉압착과 응착을 방지하기 위해 공정제어 첨가제로 스테아린산(Stearic acid, 2wt%)을 사용하였다.<sup>(12,15)</sup> 볼밀 시간은 4h, 8h, 16h, 32h로 하였으며 모든 시험에 대해 용기의 회전속도는 150rpm으로 일정하게 하였다. 볼밀 시간에 따른 합금분말의 형태와 입도 변화는 SEM (Hitachi사)관찰을 통해 평가되었으며 또한 분말의



**Fig. 2** XRD analysis of Al-78wt%Zn alloyed powders for the different ball milling times

합금화 경향은 XRD (Philips사의 X-ray diffractometer) 분석을 통해 조사되었다. 사용된 X-선은 Cu Kα 방사선이며 스캐닝 속도는 0.03°/s, 각도(2θ)는 15°에서 120° 범위로 하였다.<sup>(15)</sup>

이후 합금분말은 20kN 가압력하에서 실린더형상의 압분체(φ5 × about 10mm)로 제조되었으며 제조된 압분체는 다시 350℃에서 15 시간 동안 진공로에서 소결되었다. 소결된 시편의 기계적 특성은 압축시험 (MTS 사)을 통해 평가되었으며 시편과 금형 사이의 마찰을 최소화시키기 위해 테프론 시트(Teflon sheet)를 사용하였다.

### 2.2 시험결과

Fig. 2 는 볼밀 시간에 따른 Al-78wt%Zn 합금분말의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 볼밀 시간 0h의 경우 2θ = 42° 부근에서 Al(103)의 피크(peak)가 분명하게 관찰되었다. 전반적으로 볼밀 시간이 증가함에 따라 Al피크의 위치는 더 높은 각도로 약간씩 이동하였고 피크의 강도(intensity)는 감소하였다. 4h의 경우 피크의 크기는 0h와 비교하여 현저하게 감소되었으며 16h에서는 Al(220)과 Al(331) 피크가 관찰되지 않았다. 이것은 Al격자와 결정립계에서 Zn의 부분적인 용해 때문이거나 Zn이 매우 작은 고립형입자로서 Al내로 분산되었기 때문이다. 실질적으로 볼밀 동안 과포화된 Al(Zn)을 형성시킨 Al내부로 더 작은 Zn원자가 용해되고 이로 인해 Al피크는 더 높은 각도로 이동한다.<sup>(3,12~15)</sup>

Fig. 3 은 볼밀 시간에 따른 합금분말입자의 SEM

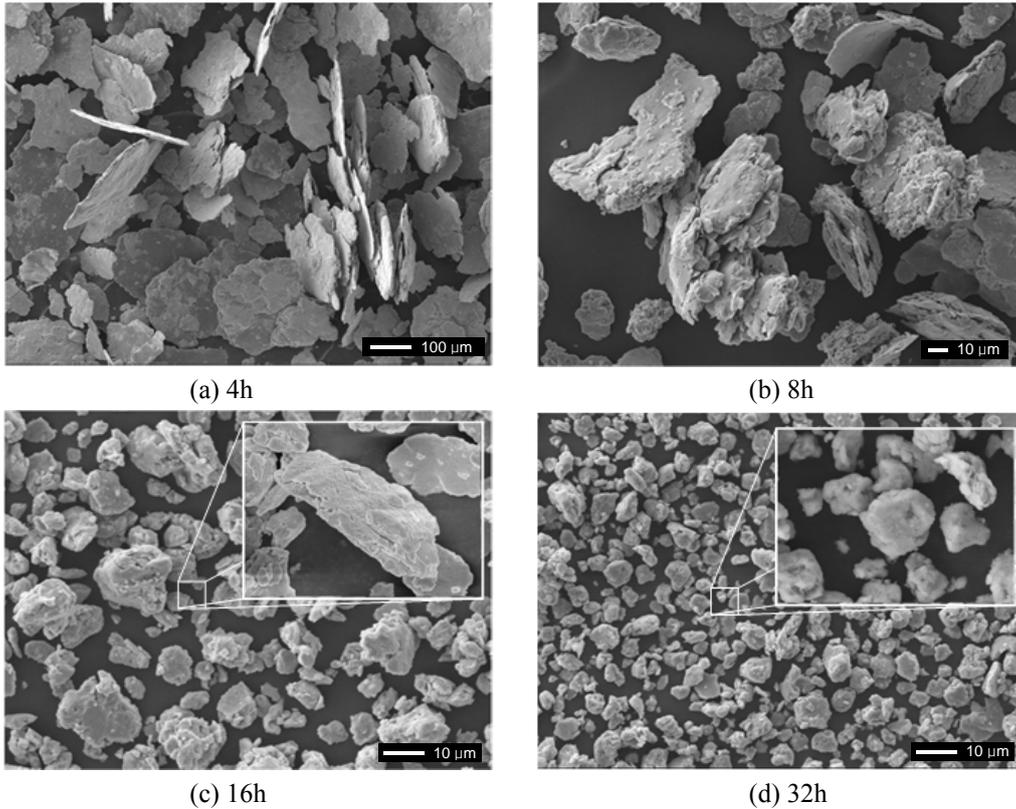


Fig. 3 SEM image of Al-78wt%Zn alloyed powder particles for the different ball milling times

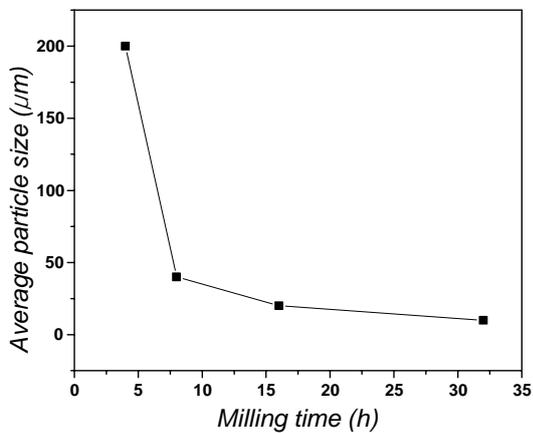


Fig. 4 Average particle size of alloyed powders for different milling times

사진을 나타낸 것이다. 전반적으로 볼밀 시간이 증가할수록 합금분말의 입도는 감소되었으며 분말형태 또한 판형에서 구형으로 변화하였다.<sup>(3,15)</sup> Fig. 4는 볼밀 시간에 따른 합금분말의 평균입자크기를 나타낸 것이다. 볼밀 시간 4h의 경우, 분말은 볼 사이의 높은 압축변형에 의해 약 200  $\mu\text{m}$ 크기의 판상형태로 나타났다. 이후 8h과 16h에서는 분말입자가 각각 40과 20  $\mu\text{m}$ 의 크기로 감소되었으며 36h에서는 더욱 미세화되어 최종적으로 평균입도 10  $\mu\text{m}$ 의 구형으로 변화하였다.

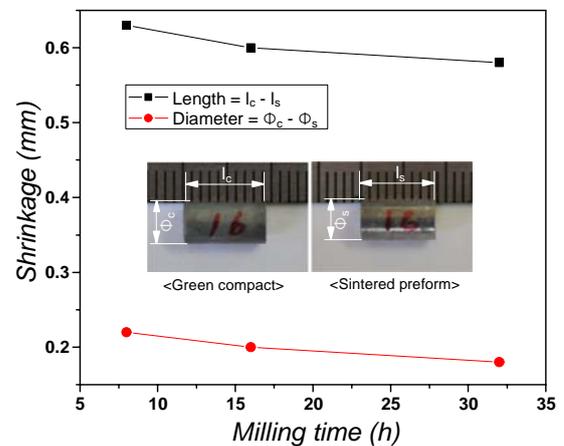


Fig. 5 Change in dimensions of powdered samples after and before sintering

Fig. 5는 소결전후 볼밀 시간에 따른 압분체의 치수 변화를 나타낸 것이다. 모든 압분체에 대해 소결 동안 내부밀도가 치밀해짐에 따라 소결 후 압분체의 높이는 약 0.5mm, 직경은 약 0.2mm 정도 축소되었다. 볼밀 시간 4h 혼합분말의 경우 소결과정에서 압분체 형상을 유지하지 못하고 분해되었다. 따라서 압축시험은 8h, 16h, 32h에 대해서만 수행되었다. Fig. 6은 대표적으로 볼밀 시간 16h의 합금분말에 대한 압축시험 동안 변형거동을 나타낸 것이다. 모든 합

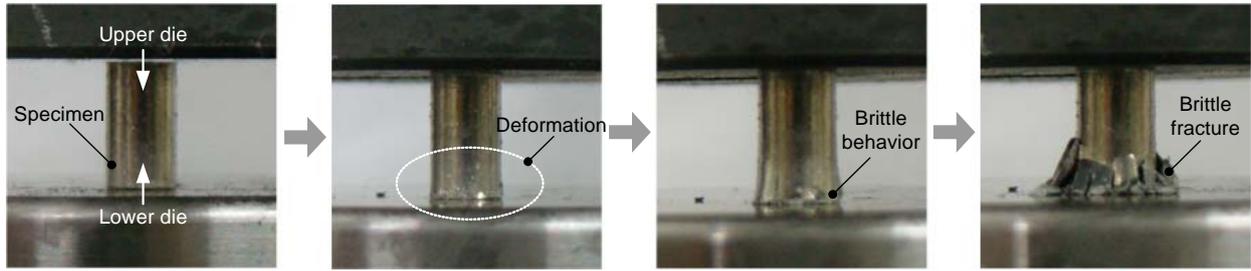


Fig. 6 Deformation behaviors of the cylindrical sintered powder for 16h during compression test

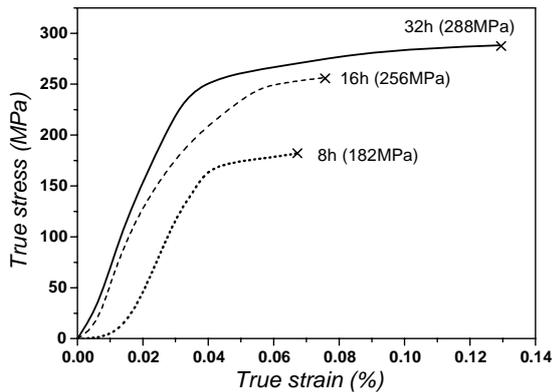


Fig. 7 True stress-true strain curves of the sintered powders for different milling times

금분말 압축시편은 취성거동을 나타내었으며 금형과 시편의 계면에서 파괴가 일어나고 그것이 시편내부로 전파되는 양상을 보였다.<sup>(1-3)</sup>

Fig. 7 은 볼밀 시간에 따른 합금분말의 압축시험 결과로써 각각의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 최대압축(파단)강도와 최대압축변형률은 시험 동안 성형하중이 최초 5%이상 감소되는 지점으로 정의되었다. 결과는 볼밀 시간이 증가할수록 합금분말의 압축강도와 압축변형률은 증가하였다. 이것은 볼밀 시간의 증가와 함께 혼합분말 입자가 미세해 짐에 따라 소결 과정에서 분말내부 밀도가 더욱 치밀해지고 응집력이 향상되었기 때문이다.<sup>(1-3)</sup> 압축강도는 각각 8h 이 182MPa, 16h이 256MPa, 32h이 288MPa로 나타났다. 일반적으로 Al-Zn합금에서 Al이 증가할수록 경도와 파단강도는 증가하고 연신율은 감소한다.

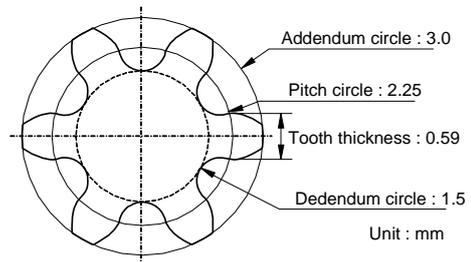
### 3. 스퍼기어의 압출

#### 3.1 압출조건

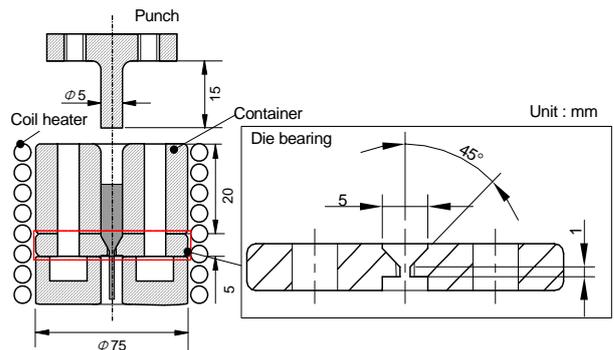
스퍼기어 압출에는 압축강도와 변형률이 가장 높은 32h의 합금분말을 채택하였다. 앞선 압축시험에 사용된 합금분말의 압축시편은 스퍼기어 압출에서 초기 빌렛(billet)으로 사용되었으며 그것은  $\phi 4.8 \times 8.5$  mm 사이즈로 폴리싱(polishing)되었다. Fig. 8 은 본 연구에서 사용된 스퍼기어와 압출금형의 형상을 나타낸 것이다.

Table 1 Conditions of extrusion test

Extrusion conditions	Value
Material of billet	Al-78wt%Zn powder
Material of tools	AISI H13
Punch speed	30 mm/min
Initial Temperature of tools	260, 280, 300, 320 °C
Billet size	About $\phi 4.8 \times 8.5$ mm
Container size	$\phi 5.0 \times 20.0$ mm
Extrusion speed	30mm/min
Extruder	MTS (30ton)



(a) Cross section of spur gear



(b) Extrusion die

Fig. 8 Shapes and dimensions of the spur gear and extrusion die used in this study

스퍼기어의 피치원지름은 2.25mm 이고 잇수는 6 개이며 단면감소율은 약 78%이다.

열간압출 시 압출온도는 분말의 변형거동에 영향을 미치는 가장 중요한 공정변수이다.<sup>(1-3,15-17)</sup> 본 연구에서는 Al-78wt%Zn 합금분말의 적정 압출온도를 결정

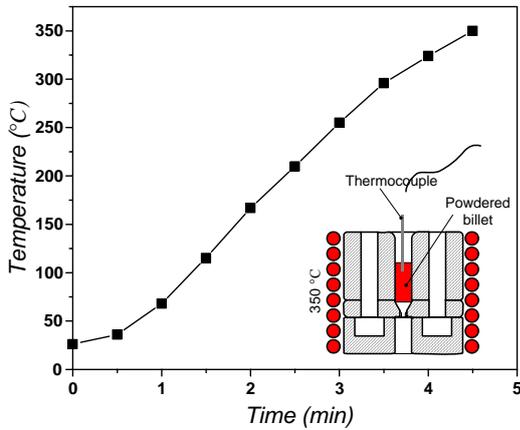


Fig. 9 Change in temperature of the powdered billet with time in the container heated to 350°C

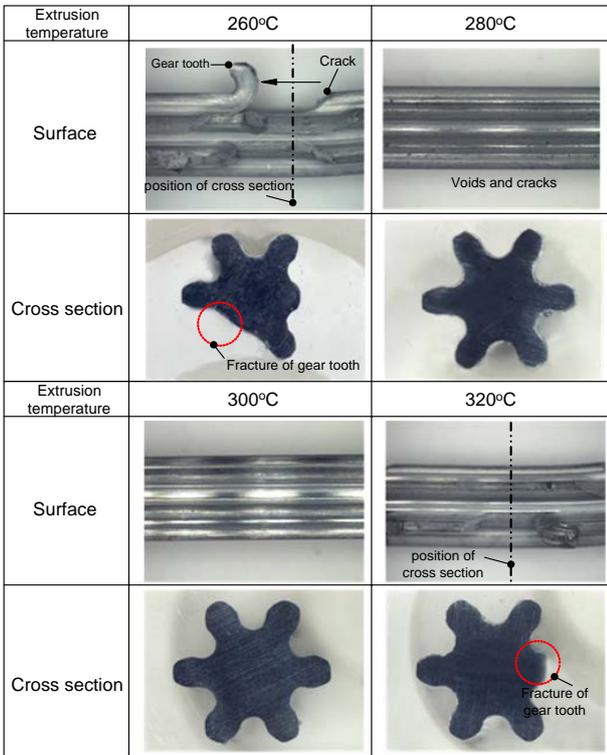
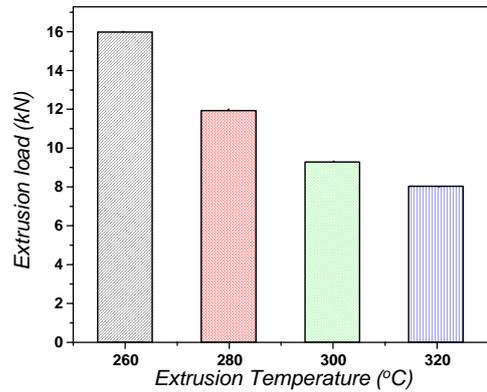


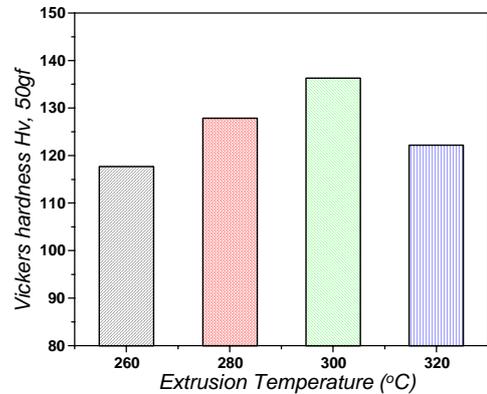
Fig. 10 Surfaces and cross sections of the spur gear extruded under different temperatures

하기 위해 260, 280, 300, 320°C 에서 압출을 수행하였다. 이후 압출된 스퍼기어는 압출하중, 상대밀도, 경도측정을 통해 평가되었다. 압출 동안 금형과 합금분말의 소착을 방지하기 위해 컨테이너 벽면에 이형재(BN-spray)를 도포하였으며 전반적인 압출조건은 Table 1 에 나타내었다.

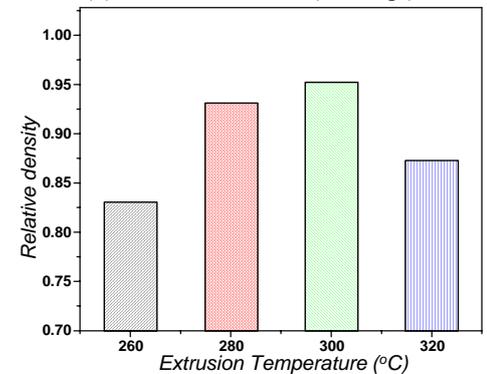
Fig. 9 는 컨테이너를 350°C 로 가열하였을 때 시간변화에 따른 컨테이너 내부에서 분말 빌렛의 온도변화를 나타낸 것이다. 빌렛의 온도는 컨테이너로 빌렛을 투입한 후 접촉식 열전대를 이용하여



(a) Extrusion load



(b) Vickers hardness (Hv:50gf)



(c) Relative density

Fig. 11 Extrusion load, hardness and relative density of the spur gear extruded for different extrusion temperatures

측정하였다. 분말 빌렛은 대략적으로 5 분 후 컨테이너 온도와 일치하였다. 따라서 다양한 온도범위에 대한 스퍼기어의 압출은 초기 빌렛을 컨테이너에 투입하여 5분간 유지한 후 수행되었다.

### 3.2 스퍼기어의 압출시험 결과

Fig. 10 은 다양한 압출온도에서 압출된 스퍼기어의 표면과 단면형상을 나타낸 것이다. 압출온도 260°C 와 320°C 의 경우 압출된 기어 치형부 표면 크랙에 의한 치형부 파단이 발생되었으며 280°C 에서는 기어

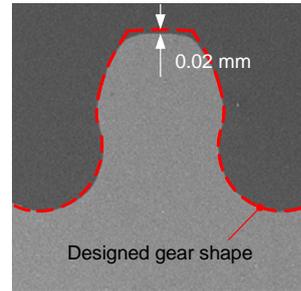
표면에 미세한 크랙(crack)과 기공이 관찰되었다.

일반적으로 분말압출에서 낮은 성형온도는 금형 내부 분말의 유동성과 분말입자간 응집력을 저하 시킨다. 따라서 전반적인 압출하중은 증가하고 상대적으로 많은 기공을 포함하면서 밀도는 낮아진다. 특히 기어 압출의 경우 미세한 치형부를 충전하기 위해서는 중앙부에 비해 상대적으로 높은 변형에너지를 요구 한다. 이러한 특성은 압출 동안 기어 치형부와 중앙부에서 분말의 속도차이를 더욱 증가시킨다. 결과적으로 분말 내부의 높아진 변형에너지를 완화하기 위해 기어 표면에 크랙을 발생시키고 이것은 내부 기공이나 상대적으로 밀도가 낮은 부위(분말입자간 응집력이 낮은 부위)를 따라 전진하며 결국 치형부는 파단된다.<sup>(1,2)</sup>

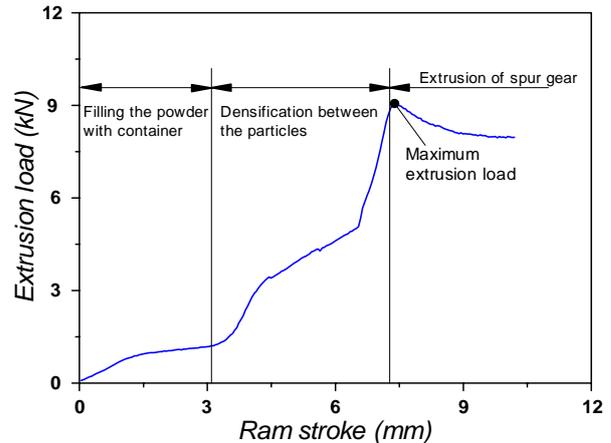
이에 반해 높은 성형온도는 분말 빌렛 표면에 경질의 산화물 생성시켜 금형 벽면과 빌렛 사이의 마찰을 증가시킬 수 있다. 이 경우 압출 동안 기어 중앙부의 분말 유동성은 증가하지만 오히려 빌렛 표면의 유동성은 감소되어 표면크랙과 기어 치형부의 파단을 야기할 수 있다.<sup>(1,2)</sup>

Fig. 11 은 다양한 온도에서 압출된 스퍼기어의 최대 성형하중과 비커스경도, 상대밀도를 나타낸 것이다. 비커스경도는 50gf 하중으로 스퍼기어 단면의 정중앙부에 대해 측정되었다. 압출온도가 증가함에 따라 전반적으로 상대밀도와 경도는 증가하였고 압출하중은 감소하였다. 압출온도의 증가는 압출 동안 분말의 유동성을 향상시켜 압출된 스퍼기어의 밀도를 더욱 치밀하게 만든다. 그러나 320°C 의 경우 성형하중은 가장 낮지만 치형부 파단에 의해 상대밀도, 경도는 오히려 300°C 보다 낮게 나타났다. 본 연구에서 사용된 Al-78wt%Zn 분말의 경우 300°C 에서 표면결함 없이 가장 높은 상대밀도와 경도를 가지는 스퍼기어가 압출되었다.

Fig. 12 는 300°C 에서 압출된 스퍼기어의 치수 정도와 압출하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 전반적인 기어 단면형상은 금형치수와 동일하였지만 치형부에 약간의 미성형(약 0.02mm)이 발생되었다. 이러한 문제는 다이베어링의 길이(die bearing length)의 수정이나 표면사상을 통해 보정할 수 있을 것으로 판단된다.<sup>(1,2)</sup> Fig. 12(b)에서 분말 빌렛은 주조 빌렛과는 약간 다르게 초기 컨테이너를 채우는 구간(Fig. 12 (a), (A))과 분말 입자 사이의 기공과 내부밀도를 치밀화시키는 구간(Fig. 12(a), (B))이 발생한다. 아마도 최종 압출된 스퍼기어의 상대밀도와 경도는 이러한 치밀화 구간의 크기와 기울기에 의존할 것으로 판단되며 이것은 합금분말입자의 크기나, 소결된 분말 빌렛의



(a) Dimensional accuracy of the spur gear



(b) Extrusion load-stroke curve

Fig. 12 Dimensional accuracy and load-stroke curve of the spur gear extruded at temperature of 300°C

초기밀도, 단면감소율, 압출온도 등이 증가할수록 가파르게 상승할 것이다. 이러한 문제는 향후 연구에서 논의될 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기계적 합금화 시간에 따른 Al-78wt%Zn 합금분말의 입자형태와 기계적 특성을 평가하기 위해 볼밀 시험과 압축시험을 수행하였다. 또한 기계적 합금화된 분말의 적정압출온도를 구하기 위해 다양한 온도범위에서 소형 스퍼기어를 압출 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 기계적 합금화 시간이 증가할수록 합금분말의 형상은 판상에서 구형으로 변하였고 입자크기는 또한 감소하였다. 볼밀 시간 32h 에서 합금분말의 평균입도는 약 10 μm였다.
- (2) 기계적 합금화 시간이 증가할수록 합금분말의 압축강도와 압축변형률은 증가하였다. 볼밀 시간 32h 에서 합금분말의 최대압축강도는 약 288MPa 이었다.
- (3) 스퍼기어의 압출에서 압출온도가 증가할수록

분말의 유동성이 향상되기 때문에 압출된 스퍼기어의 전반적인 성형하중과 상대밀도, 경도는 증가하였다. 그러나 260 와 280, 320°C 에서는 표면크랙과 기공, 압출된 기어 치형부의 파단 등이 발생하였다. 본 연구에서는 300°C 의 온도에서 압출된 스퍼기어가 가장 높은 상대밀도(0.95)와 경도(Hv(50gf): 136)값을 가지는 것으로 나타났다.

### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- (1) Bauser, M., Sauer, G. and Siegert, K., 2006, *Extrusion*, ASM International, USA.
- (2) Kuhn, H. A. and Ferguson, B. L., 1990, *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, USA.
- (3) Suryanarayana, C., 2001, "Mechanical Alloying and Milling," *Progress in Materials Science*, 46, pp. 1~148.
- (4) Sheppard, T., Mcshane, H. B., Zanidi, M. A. and Tan, G. H., 1983, "The Extrusion of Atomized Aluminium Alloys Compacts and Composite," *Journal of Mechanical Working Technology*, 8, pp. 43~70.
- (5) Martins, S. R. and Misolek, W. Z., 1996, "Consolidation of Particulate Materials in Extrusion," *Reviews in Particulate Materials*, Vol. 4, pp. 43~70.
- (6) Saotome, Y. and Lwazaki, H., 2000, "Superplastic Extrusion of Microgear Shaft of 10  $\mu$ m in Module," *Microsystem Technologies*, 6, pp. 126~129.
- (7) So, H., Li, W. C. and Hsieh, H. K., 2001, "Assessment of the Powder Extrusion of Silicon-Aluminium Alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, 114, pp. 18~21.
- (8) Tanaka, T., Makii, K., Kushibe, A., Kohzu, M. and Higashi, K., 2003, "Capability of Superplastic Forming in the Seismic Device Using Zn-22Al Eutectoid Alloy," *Scripta Materialia*, 49, pp. 361~366.
- (9) Xun, Y. and Mohamed, F. A., 2004, "Superplastic Behavior of Zn-22%Al Containing Nano-Scale Dispersion Particles," *Acta Materialia*, 52, pp. 4401~4412.
- (10) Xiaojin, XU., Wei, WANG. And Lan., CAI., 2004, "Superplasticity of a SiCw/Zn-22Al Composites," *Journal of materials Science and Technology*, Vol.20. No.20, pp. 172~174.
- (11) Xun, Y., Lavernia, E. J. and Mohamed, F. A., 2004, "Grain Growth in Nanocrystalline Zn-22% Al," *Acta Materialia*, A371, pp. 135~140.
- (12) Fogagnolo, J. B., Robert, M. H., Ruiz-Navas, E. M. and Torralaba, J. M., 2002, "Extrusion of Mechanically Milled Composite Powders," *Journal of Materials Science*, 32, pp. 4603~4607.
- (13) Tavoosi, M., Enayati, M. H. and Karimzadeh, F., 2008, "Softening Behavior of Nanostructured Al-14wt%Zn Alloy During Mechanical Alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, 464, pp. 107~110.
- (14) Flores-Zamora, M. I., Estarada-Guel, I., Gonzalez-Hernandez, J., Miki-Yoshida, M. and Martinez-Sanchez, R., 2007, "Aluminum-Graphite Composite Produced by Mechanical Milling and Hot Extrusion," *Journal of Alloys and Compounds*, 434-435, pp. 518~521.
- (15) 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," *Journal of Alloys and Compounds*, online available.
- (16) Galanty, M., Kaznowski, P., Kansuwan, P. and Misiolek, W. Z., 2002 "Consolidation of Metal Powders During the Extrusion Process," *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, pp. 491~496.
- (17) Galanty, M., Libura, W. and Zasadzinski, J., 1999, "Evaluation of Force Parameters for Aluminium Powder Extrusion," *Advanced Technology of plasticity*, Vol. 3, pp.19~24.
- (18) Abou El-khair, M. T., Daoud, A. and Ismail, A., 2004, "Effect of Different Al Content on the Microstructure, Tensile and Wear Properties of Zn-Based Alloy," *Materials Letters*, 58, pp. 1754~1760.