

원심 분무법으로 제조된 P/M 2011 Al합금 압출재의 절삭성

전 창 배 · 김 중 찬

연무대기계공업고등학교 금속과

The Machinability of 2011 P/M Al Alloys Extruded Rapidly Solidified by Rotating Disc Atomization

C.B. Jeon and J.C. Kim

Depy. of Met. Eng. of Yeunmudae Mech. Tech. High School, Nonsan 320-830

(1998년 4월 13일 받음, 1998년 5월 19일 최종수정본 받음)

초 록 원심 분무법으로 제조된 P/M 2011 Al 합금 압출재의 절삭성을 조사하였다. 압출재 내에 분포된 Pb-Bi 입자들은 매우 균일하고 미세하게 분포된다. 절삭속도가 증가할수록 미세한 칩이 생성되며 이송량이 0.1mm/rev 이하에서부터는 연속칩이 생성된다. 표면의 상태는 이송량에 크게 의존하며 절삭깊이와 절삭속도에는 크게 의존하지 않는다. 불연속칩은 분산된 Al₂O₃ 입자와 고정 Pb-Bi 개재물의 존재로 인해서 생성된다.

Abstract The machinability properties of P/M 2011 Al alloys extruded rapidly solidified by rotating disc atomization were investigated in this study. The Pb-Bi particles were very uniformly and finely dispersed in the P/M 2011 Al alloys extruded rapidly solidified. According to the increase of cutting speed, the short discontinuous chips were produced and continuous chips were formed from the lower feed values of 0.1mm/rev. The surface roughness is depend on the feed values, not cutting depth and cutting speed. The short discontinuous chips were formed due to dispersed Al₂O₃ particles and Pb-Bi inclusion.

1. 서 론

최근 들어 마멸성이 좋은 공구의 개발과 수치제어에 의한 자동화 동작기계의 발달에 의해서 정밀가공과 고속생산 특히 무인 대량 생산성이 요구되어지고 있다. 또한 근래 전자, 기계, 항공제품들의 경량화 추세에 따라서 비강도가 크고 내식성이 우수한 Al합금의 수요와 중요성이 높아지고 있다.

순수한 Al합금은 내식성과 전기전도도가 우수하고, 절삭 저항이 크지 않으나 연질재료이기 때문에 절삭가공시 길고 연속적인 칩이 생성되어 공구와 피삭재를 잡고 회전하면서 가공면을 손상시키거나 공구파손이 발생하여 작업자에게 위험을 줄 뿐만 아니라 가공중단으로 생산성을 감소시키게 된다. 따라서 Al합금에 Cu, Mg, Si, Zn, In, Pb, Bi 등의 합금 원소를 첨가시켜 절삭성을 향상시킨 쾌삭 Al합금이 절삭재료로 사용된다.

쾌삭 Al합금 재료는 크게 Al-Cu계, Al-Mg계열로 나눌 수 있다.^{1,2)} Al-Mg계 합금은 Al-Cu계 합금보다 내식성, 표면처리 특성이 우수하나, 칩 처리성이 나쁘고 Si의 영향으로 금속간 화합물 Mg₂Si을 형성하여 절삭력이 증가함으로써 공구의 마멸이 커져 수명이 단축된다.³⁾

Al-Cu계의 대표적인 쾌삭 합금은 2011합금으로 일상용품, 나사, 절삭기 제품 등에 많이 쓰이고 있으며, Al-Cu 합금에 절삭성을 개선하기 위해 Pb, Bi를 0.3~0.6% 정도의 양을 첨가하면 공정 조성에 밀접하게 되어 Pb-Bi 개재

물의 용융점이 125℃로 낮아진다. 따라서 Pb-Bi 개재물은 용융온도 이상에서 칩 breaker로 작용하여 Pb와 같은 한 가지 원소만을 첨가하 것보다 폭넓은 가공 조건을 갖고 짧은 불연속 칩을 형성한다.⁴⁾

그러나 Pb-Bi 개재물 입자는 Al-Cu보다 비중이 4배 더 무거우므로 응고 중에 중력 편석을 일으켜 입자의 크기와 형상 그리고 균일한 분포에 나쁜 영향을 주어 절삭 특성이 떨어진다.⁵⁾ 또한 저융점 개재물의 첨가에 의해서 고온가공 시 고온 취성이 발생하게 된다.⁶⁾ 따라서 이와 같은 성질은 개재물의 파괴분율을 감소시키거나,⁷⁾ 높은 압출비를 이용하여 입자를 미세화시키거나, 초음파 전자교반에⁸⁾ 의해서 또는 냉각 방법에 의해서 입자를 미세화시키고 균일한 분포를 얻음으로서 고온 취성을 방지할 수 있다.

최근에는 빠른 냉각속도를 이용한 급냉응고법이 많이 사용되고 있다. 이 급냉 응고법의 특징은 용탕을 고온에서 10³°C/sec 이상으로 급냉함으로써 응고하는 수지상을 미세하게 하고 고용 한계를 증가시켜 과포화 고용체를 생성하거나 비평형 결정, 비정질 생성, 준안정상 생성, 고온상의 잔류, 초미세 결정립 조직 생성과 macro 및 micro 편석의 억제 등을 가능하게 한다. 또한 평형상태에서 불용성인 제2상을 균일하고 미세하게 분산시킬 수 있어 불용성 합금에도 유용하게 사용된다. A. Kumar 등은 넓은 응고 범위를 갖는 합금 주조시에 열간 가공에서 문제를 일으키는 편석의 영향이 고온의 분말 압출에 의해서 극복되며 다른 많은 장점을 제공한다고 하였다.^{9,10)}

Table 1. Chemical composition of 2011 Al alloy(wt%).

Alloy element	Cu	Pb	Bi	Fe	Si	Al
%	4.98	0.28	0.29	0.215	0.127	Bal.

따라서 본 연구에서는 원심 분무법을 이용한 급속 응고법으로 제조된 P/M (Powder Metallurgy) 2011 Al 합금의 절삭성을 조사하였다.

2. 실험 방법

사용된 재료는 풍한 알루미늄에서 구입한 표 1과 같은 조성을 갖는 I/M (Ingot Metallurgy) 2011 Al 합금을 재용

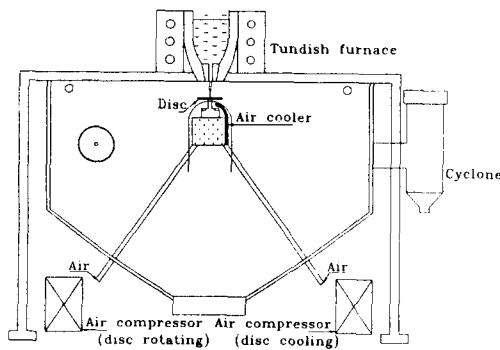


Fig. 1. Schematic diagram of the rotating disc atomizer.

Table 2. Operating parameters during rotating disc atomization.

Disc Diameter(mm)	39
Angular Velocity(rad/sec)	3500
Pouring Rate(g/sec)	14
Pouring Temp.(°C)	680
Atmosphere	Air
Nozzle Diameter(mm)	3

Table 3. Operating parameters of extrusion.

Extrusion Ratio	Ram Speed(m/min)	Billet Preheating Temp.(°C)	
99.6	13.4	390	φ 15.8 Rod
99.6	23	365	φ 15.8 Rod

Table 4. Tool angle and material.

Tool material	Sintered hard metal insert tip
back rake angle	0°
side rake angle	0°
end relief angle	15°
side relief angle	5°
end cutting angle	10°
side cutting edge angle	5°
nose radius	0°

를 바꾸어 절삭속도, 이송량 및 절삭 깊이를 변화시켜 실험하였으며 칩의 양상과 개수 그리고 절삭면의 거칠기를 측정하였다. 가공면의 거칠기는 기준 길이 2.5mm, 수평확대 배

해한 후 그림 1과 같은 원심 분무장치를 이용하여 제조된 분말을 사용하여 압출하였다. 용해로는 흑연도가니를 사용하고 턴디시로는 전기 저항로를 사용하였다. 디스크의 재료는 내열성과 반응성을 고려하여 Si₃N₄ 소결품을 사용하였고 디스크의 회전과 냉각속도를 높이기 위해 압축 공기를 사용하였다. 디스크와 노즐 사이의 간격은 67mm, 공기압은 9.5~8.0kg/cm² 이었다. 용기의 직경은 1.8m로 하였다. 분말의 제조 조건은 표 2와 같다. 압출은 풍한에서 100톤 압출기를 이용하여 제조된 분말을 분급하지 않고 180kg/cm² kg의 압력을 가해 이론밀도의 약 60% 정도로 냉간 압분을 하여 155mm의 green billet으로 제조한 후 정제된 액화 질소가스를 6 l/min의 유속으로 흘러 보내면서 490°C에서 1시간 30분 열처리를 한 후 노냉시켰고, 즉시 알루미늄 호일로 감싸서 대기 중의 수분과 차단하고 콘테이너에 넣고, 압출 온도에서 1시간 유지하여 압분 성형체의 온도를 균일하게 하여 압출하였다. 압출시 조업 조건은 표 3과 같다.

열간 압출된 압출재의 조직을 균질화하고 압출시 생성되는 석출물을 분해하여 알루미늄 기지내에 과포화 고용시키고 압출 방향에 따른 조직의 특성을 균질화하기 위해 520°C에서 5시간 시효처리한 후에 상온 수냉하였다.

압출재의 미세조직을 금속 현미경으로 관찰하였다. 압출재 내부에 존재하는 Pb 및 Bi의 분포상태를 EDAX로 조사하였다.

절삭성 실험은 지름 15.8mm, 길이 200mm로 가공한 재료를 건식 선삭 가공으로 행하였다. 절삭공구는 황삭 초경공구 insert tip bite (대한 초경산업사 P20, 33-3)를 사용하였다. 선반은 만능선반을 사용하였다. 공구의 구성 인선은 표 4과 같다. 재료의 표면을 제거한 후 조건에 따라 바이트

율 20, 수직확대 배율 200배로 하고 표면 거칠기 측정기는 R.T.H (Talysurf 5M-120, S/M:112/1604)를 사용하였으며 평균 거칠기값을 측정하였다. 칩 채취는 각각의 조건에서 일정한 칩을 0.2g 취하여 개수를 나타내었다. 칩과 절삭면의 상태는 금속 현미경 및 주사전자 현미경을 이용하여 미세조직과 칩의 파단면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

사진 1은 원심 분무법에 의해 제조된 분말을 분급하지 않고, 동일한 압출비에서 압출 온도를 변화시켜 열간 압출한 P/M 2011 Al 합금 시편의 종단면과 횡단면의 미세 조직 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 Al₂O₃ 분산 입자들이

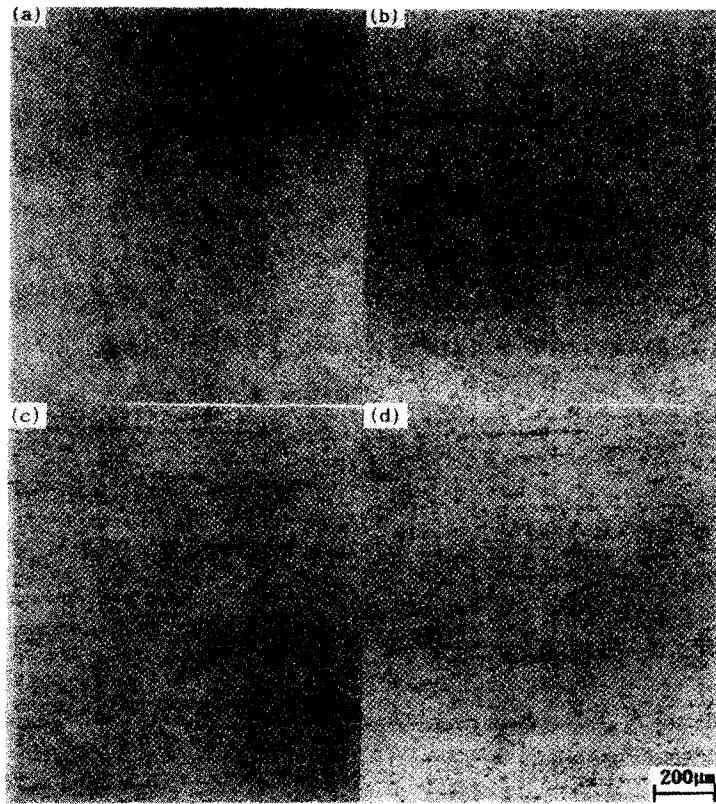


Photo. 1. Optical microstructure of extruded P/M 2011 Al alloys.
(a) Cross-section of P/M extruded at 390°C (b) Cross-section of P/M extruded at 365°C
(c) Longitudinal section of 390°C (d) Longitudinal section of 365°C

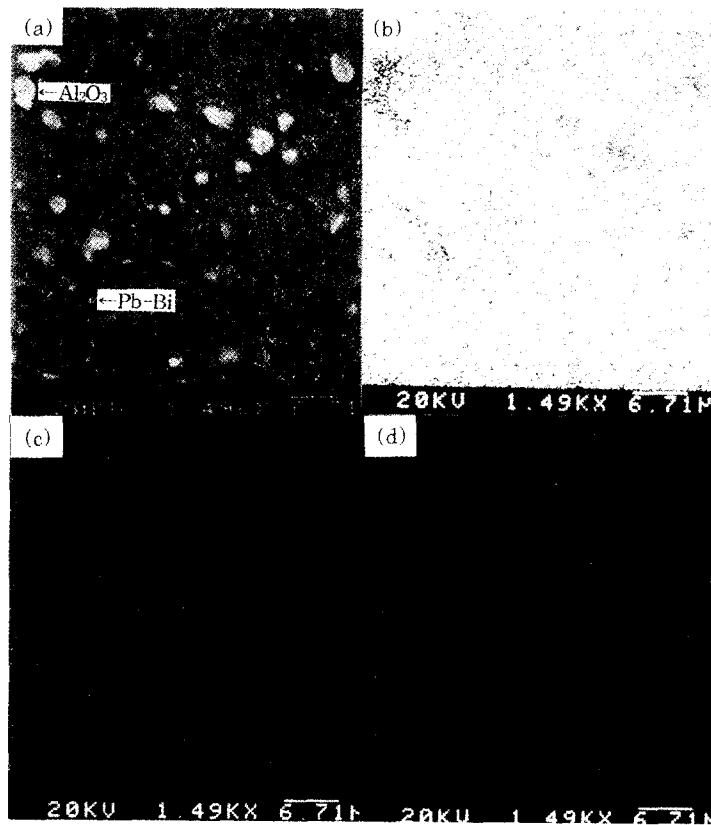


Photo. 2. Identification of alloying elements in extruded P/M 2011 Al alloys by EPMA.
(a) SEM microstructure (b) Al mapping (c) Pb mapping (d) Bi mapping

매우 미세하고 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 압출 온도를 변화시켰을 때 Al_2O_3 분산 입자의 분포 차이는 보이지 않았다. 이와 같이 Al_2O_3 분산 입자가 존재하는 이유는, Al 합금을 대기중에서 원심 분무하면 분무 직후 분말 표면이 Al 산화물(Al_2O_3) 층으로 덮이게 되며, 이러한 분말을 성형하기 위해 큰 소성변형을 가하면 Al_2O_3 층은 파열되어 입내 및 입계로 불규칙하게 분산되기 때문¹¹⁾으로 사료된다. 한편 압출 온도의 차이가 25°C로 크게 나지 않기 때문에 조직상의 차이는 보이지 않는다. 사진 1의 c), d)는 횡단면 조직으로 압출 방향을 보이기는 하지만 미세한 조직을 보인다.

사진 2는 원심 분무법에 의해 제조된 P/M 2011 Al 합금 압출재의 각 원소들의 분포 상태를 EPMA를 통해 mapping한 것이다. 각각 Al, Pb, Bi 원소가 균일한 분포 상태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 사진에서 백색의 커다란 입자는 제조시 생성된 Al_2O_3 입자이며, 미세한 입자는 Pb-Bi 개재물로 약 0.3 μm 크기로 기지내에 미세하게 존재하는데 입계에서 보다는 입내에 많이 존재함을 알 수 있다.

절삭성은 표면거칠기, 칩의 처리성, 공구의 수명, 절삭력 등에 의해서 판단된다. 알루미늄 합금의 절삭에서 공구수명, 절삭력 등은 공구재료에 대한 개발기술의 발달등으로 큰 영향을 미치지 못하고, 표면의 거칠기나 연속생산이 가능한 불연속 칩의 생성이 주로 요구된다. 본 실험에서는 절삭속도와 이송량, 절삭깊이 거칠기 변화를 관찰하였다.

그림 2는 절삭속도를 변화시켰을때의 표면 거칠기 Ra 값과 칩수를 나타낸 것이다. 절삭속도가 증가할수록 칩의 수는 많아지는 것을 알 수 있으며 거칠기는 저속과 고속 절삭속도에서 감소되는 것을 알 수 있는데 이는 build-up age의 생성과 관계있는 것으로 사료된다.

그림 3은 절삭속도 84.7m/min, 절삭깊이는 0.1mm로 고정시키고 이송량을 변화시켜 칩수와 거칠기를 측정하였다. 이송량이 0.014mm/rev일 때 표면 거칠기 Ra 값은 0.151, Rmax 값은 3.409의 값을 나타내었다. 칩의 상태는 미세한 연속칩에서 이송량이 증가함에 따라 그림과 같이 차이

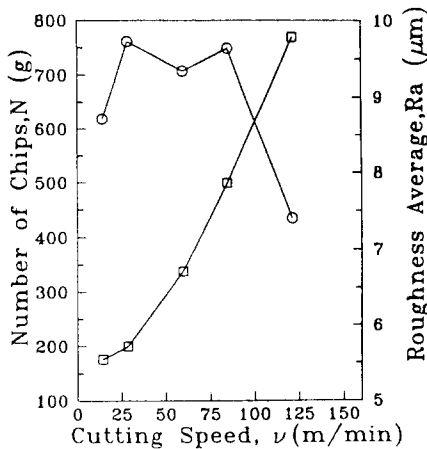


Fig. 2. Variation of surface roughness and number of chips with cutting speed. (○:cutting speed versus roughness, □:cutting speed versus number of chips, feed $f=0.1mm/rev$, cut thickness $d=0.1mm$)

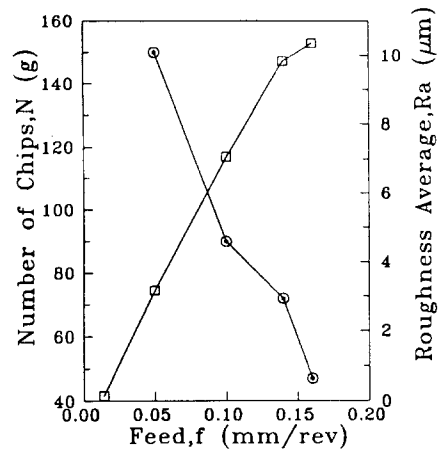


Fig. 3. Variation of surface roughness and number of chips with feed. (○:feed versus number of chips, □:feed versus roughness, roughness cutting speed $v=84.7m/min$, cut thickness $d=0.1mm$)

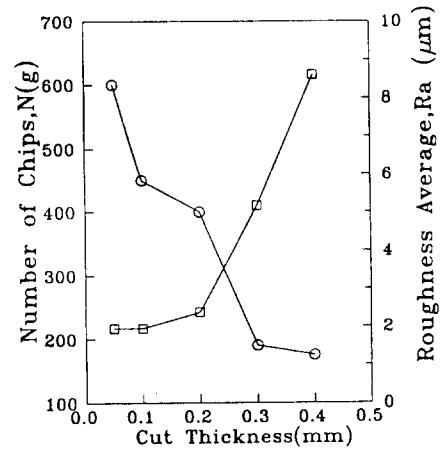


Fig. 4. Variation of surface roughness and number of chips with cut thickness. (○:cut thickness versus number of chips, □:cut thickness versus roughness, feed $f=0.025mm/rev$, cutting speed $v=84.7m/min$)

가 뚜렷해졌다.

그림 4는 이송량을 0.025mm/rev, 절삭속도를 84.7m/min로 일정하게 하고 절삭깊이를 변화시켰을때의 칩수와 거칠기를 측정된 결과이다. 거칠기 값은 0.05에서 0.2까지는 비슷한 값을 나타내며 0.3, 0.4에서 다소 증가한다. 칩의 수도 같은 양상을 나타낸다.

이 결과들로부터 표면 거칠기 값은 이송량에 따라서 큰 영향을 받고 절삭속도나 깊이에는 영향을 크게 받지 않으며 연속칩은 이송량 0.1mm/rev, 깊이는 0.1mm이하일 경우 생성되며 그 이상에서는 불연속칩이 생성되며 거칠기 값이 매우 커진다.

K. Asano¹²⁾ 등은 절삭 중량당 생성되는 칩수를 매개로 하여 절삭성을 나타내는 방법이 매우 적절하다고 하였다. 본 연구에서 P/M 2011 Al 합금에 발생된 칩은 미세하며 많은 칩이 발생되는 것을 알 수 있다. 그러나 거칠기는 평균적으로 큰 값을 나타내었다. 이것은 미세하게 분산된 Al_2O_3 입자가 매우 단단하여 저각시에 균열형 칩을 형성하기

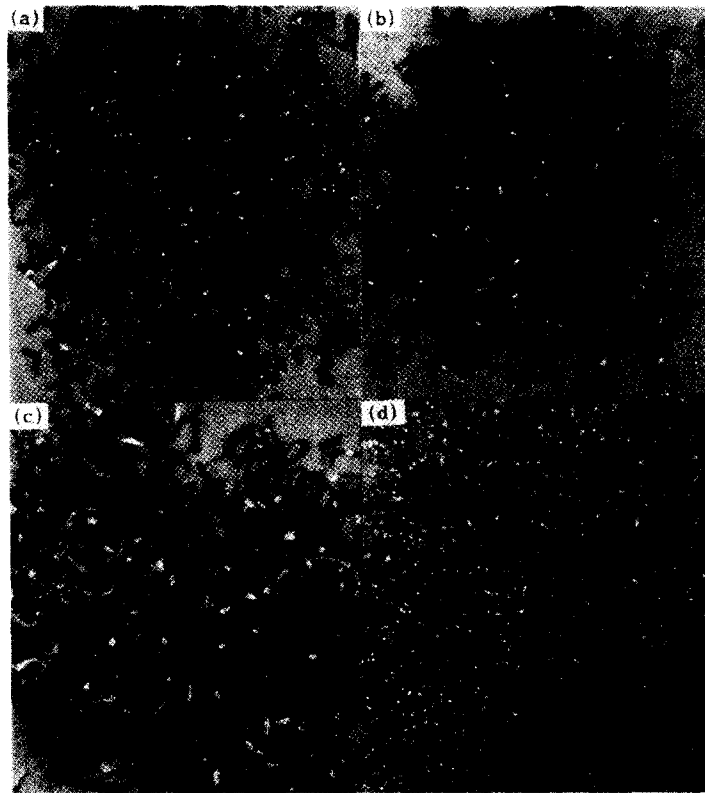


Photo. 3. Typical chips morphologies in the P/M 2011 Al alloys.

(a) $f=0.1, d=0.1, \nu=121$ (b) $f=0.1, d=0.1, \nu=85$ (c) $f=0.1, d=0.3, \nu=85$ (d) $f=0.014, d=0.1, \nu=85$



Photo. 4. Typical chips morphologies and fracture surface in the P/M 2011 Al alloys by SEM. ($f=0.014, d=0.1, \nu=84.7$)

(a) Chips morphologies of continuous (b) Chips morphologies of discontinuous
 (c) Fracture surface of continuous (d) Fracture surface of discontinuous

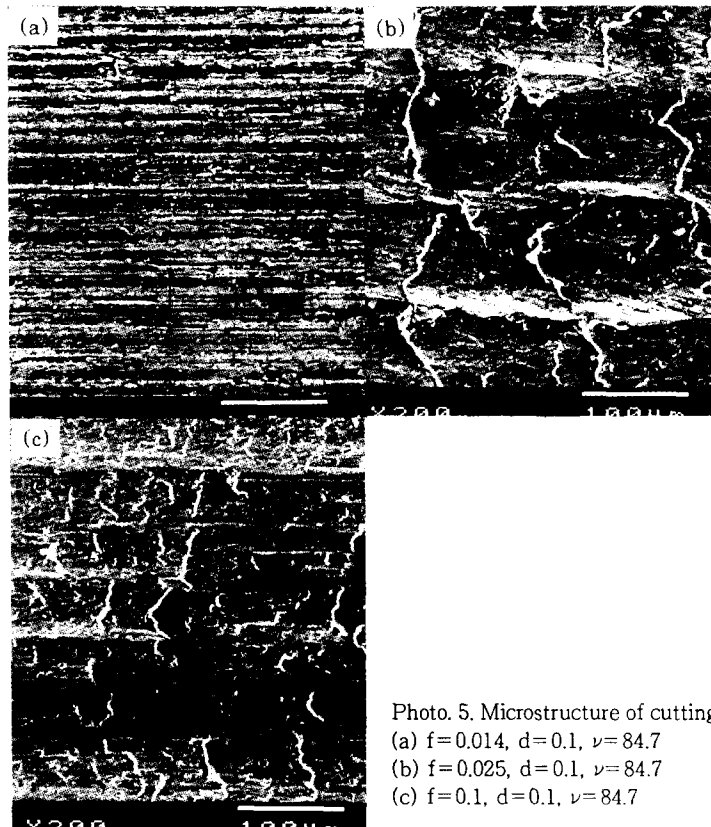


Photo. 5. Microstructure of cutting surface.

(a) $f=0.014$, $d=0.1$, $v=84.7$

(b) $f=0.025$, $d=0.1$, $v=84.7$

(c) $f=0.1$, $d=0.1$, $v=84.7$

때문인 것으로 사료된다. 또한 Pb-Bi의 양이 0.29% 정도 첨가되었는데 이는 다른 주조재의 경우보다는 다소 적은 양이므로 칩이 생성되는 동안에 윤활제 역할이 적어지며 개재물의 영향보다는 분산된 산화물의 영향이 더 크게 작용하여 거칠기가 커진 것으로 사료된다.

사진 3은 절삭속도와 이송량, 절삭깊이에 따른 칩의 형상을 나타낸 것이다. a)는 높은 절삭속도에서 미세하게 분산된 저융점 개재물(Pb-Bi)이 칩 breaker로 작용하여 미세하게 발생된 칩의 형상을 보여주고 있다.

사진 4는 절삭속도 84.7m/min, 절삭깊이 0.1mm, 이송량이 0.014mm/rev에서 생성된 연속칩의 형상과 파단면 및 절삭속도 84.7m/min, 절삭깊이 0.1mm, 이송량이 0.1mm/rev에서 생성된 불연속칩의 형상과 파단면에 대한 SEM사진이다. 사진 4-(a), (c)는 연속칩의 형상과 파단면 사진으로 절삭속도가 증가함에 따라 파단이 일어나기 전까지 소성 유동 흔적이 많이 생기며 표면의 결합은 미세하게 되어 연속칩이 형성된 것을 알 수 있다. 또한 사진에서 구멍(cavities)과 작고 낮은 홈자국(small, shallow grooves)이 미세하게 존재하는 것을 볼 수 있다. 그림 4-(b), (d)는 불연속 칩의 형상과 파단면 사진으로 소성 유동의 흔적은 감소하고 칩의 분열에 의해서 구멍과 조대한 결합들이 발생되며 물결 모양의 표면¹³⁾을 만든 것을 알 수 있다. Al-Cu합금의 기계적 특성들은 가공, 석출경화 등에 따라 변화하게 되며 제2상 입자들은 가공 경화에 기여할 뿐만 아니라 칩이 형성되는 전단 면상에서 직접적인 파단 원인으로 작용하게 되는데 원심 분무법에 의해 제조된 본 재료의 경우 미세하게 분산된

Al₂O₃와 공정 Pb-Bi의 존재로 불연속 칩을 형성한다. Al₂O₃는 인성이 없기 때문에 기조직과의 계면에서 미세한 균열이 도입되며, Pb-Bi 입자는 공정 온도 이상에서 용해되어 미세한 균열을 도입하여 아주 미세한 불연속 칩을 배출¹⁴⁾한다고 사료된다.

사진 5는 절삭속도와 깊이를 일정하게하고 이송량을 변화시켰을 때의 절삭면을 나타낸다. 이송량이 0.014mm/rev 일 때의 절삭면에서는 칩이 분쇄되며 만드는 물결모양의 홈이 존재하지 않는다. 이송량이 0.025mm/rev에서 0.1mm/rev로 커짐에 따라서 홈의 간격이 좁아지고 많아지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

원심 분무법으로 제조된 P/M 2011 Al합금 압출재의 절삭성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 급속 응고된 2011 P/M Al 합금 압출재 내에 분포된 Pb-Bi 입자들은 매우 균일하고 미세하게 분포되었다.
- 2) 절삭성은 절삭속도가 증가할수록 미세한 칩이 생성되었으며 이송량이 0.1mm/rev 이하에서부터는 연속칩이 생성되었다.
- 3) 표면의 상태는 이송량에 크게 의존하며 절삭깊이와 절삭속도에는 크게 의존하지 않는다.
- 4) 불연속칩은 분산된 Al₂O₃ 입자와 공정 Pb-Bi 개재물의 존재로 인해서 생성된다.

참 고 문 헌

1. S. Zaima, M. Ilo, Y.C. Huang, K. Arai, I. Tsukuda ;
輕金屬 **31**, 12 (1981) 787
2. S. Zaima, M. Ilo, Y.C. Huang, K. Arai, I. Tsukuda ;
輕金屬 **32**, 1 (1982) 3
3. Y. Takatsuji, S. Yamada, H. Mizutani, I. Tsukuda ;
輕金屬 **36**, 7 (1986) 409
4. M. Roth, G.C. Weatherly, W.A. Miller ; Can.
Metall. Quart. **18** (1979) 341
5. H. Chadick ; Cast Metals **4**, 1 (1991) 43
6. R. Fborall, M. A. Member, P. Gregory, A. I. M.
Member ; J. Inst. Metals **84** (1955) 88
7. M. Roth, G.C. Weatherly, W.A. Miller ; Can.
Metall. Quart. **18** (1975) 287
8. C. Garcia Cordovilla and E. Louis ; J. Mater. Sci.,
19 (1984) 279
9. A. Kumar, P.J. Jain, M.L. Mehta, P.N. Godbole ;
Int. J. Powder Met. and Powder Tech. **17**, 3 (1981)
237
10. S.J. Savage and F.H. Froes ; J. Metals **36** (1984)
20
11. 이태행 ; 충남대학교 박사학위 논문 (1990)
12. K. Asona, A. Fujiwara, 輕金屬 **36**, 7 (1972) 642
13. A. Inoue, N. Yano, K. Matsuzaki, T. Masunoto ; J.
Mater. Sci. **22** (1987) 123
14. G.G. Garrett and J.F. Knott ; Met. Trans. **9A**
(1978) 1187