

〈論 文〉

Al-Si합금의 Si석출 경면가공에 관한 연구

이은상* · 김정두**

(1992년 6월 23일 접수)

A Study on the Mirror Like Machining of Al-Si Alloy for Extraction of Si Particle

Eun-Sang Lee and Jeong-Du Kim

Key Words : Hypereutectic Al-Si Alloy(過共晶 Al-Si 合金), Silicon Extraction(실리콘 석출), Single Crystal Diamond(단결정 다이아몬드), Poly Crystal Diamond(다결정 다이아몬드), CBN(Cubic Boron Nitride), Scanning Electron Microscope(전자주사현미경), Surface Roughness(표면거칠기)

Abstract

A hypereutectic Aluminum-Silicon Alloy is widely used in the parts of automobile because of high-resistance and good strength. In this study, the cutting of a hypereutectic Al-Si alloy (A390) for extraction of Si particle was experimentally investigated. By proper selection of cutting tool materials and optimization of cutting conditions, economical machining of this alloy is achieved. The surface roughness relates closely with the feed rate and cutting speed.

1. 서 론

최근에 와서 자동차산업의 발전으로 인하여, 자동차의 부품 재질로 과공정 Al-Si합금(hypereutectic Al-Si alloy)의 사용이 급증하고 있다. 과공정 Al-Si 합금은 무게가 가볍고, 내마멸성이 매우 뛰어나 날 뿐만 아니라, 고온에서 그 강도가 우수하기⁽¹⁾ 때문에 자동차의 엔진 블록(engine block), 에어 컴프레서 실린더(air compressor cylinder), VTR의 실린더 헤드(cylinder head) 등에 사용되고 있다. 일반적으로 과공정 Al-Si합금은 실리콘이 12% 함유된 반면, 과공정합금에는 16~18% 실리콘이 함유되어 있어, 합금의 내마멸성을 35%정도 증진시키게 된다. 그리고, 실리콘은 용융된 알루미늄합금의 유동

성을 18~20%정도 향상시키나, 경질의 실리콘입자가 가공시 절삭공구의 마멸을 증진⁽²⁾시켜서, 과공정 Al-Si합금의 사용이 제한되는 등 기계가공성이 매우 어려운 난삭재이다. Miller⁽³⁾는 초경공구(tungsten carbide)와 다결정 다이아몬드 공구로 과공정 Al-Si합금을 가공하여 공구의 마멸현상 등을 관찰하였고, Hanasaki⁽⁴⁾는 전자주사현미경 내에서 과공정 Al-Si합금의 미소절삭 실험을 하여, 공구 측면이 실리콘입자에 의해서 굽힘 현상이 생김을 알아내었다. Sugaho⁽⁵⁾는 단결정 다이아몬드 공구의 Al-Mg합금 경면가공에서 표면거칠기는 이송량과 공구의 노우즈(nose)반경에 따라서 변화된다고 설명하고, 최적의 가공조건을 얻기위해서 적절한 공구를 선택해야 된다고 언급하였다. 과공정 Al-Si 합금에서 실리콘입자가 절삭가공후 표면에서 깨지지 않은 상태로 석출됨으로써 Al-Si합금 소재에 의한 제품의 수명개선과 소음, 진동을 최소화 할

*한국과학기술원 정밀공학과 대학원

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

수 있는바, 현재의 산업현장에서 사용되는 가공법은 실리콘석출을 위하여 연삭 또는 초다듬질(superfinishing) 등에 의하여 가공되고 있으나, 이 방법은 1차 황삭가공, 2차 정삭가공을 거쳐 3차 가공으로 초다듬질을 행하여 완성 가공함으로써 생산성의 능률이 떨어지는 등 많은 문제점을 안고 있다. 따라서, 본 연구에서는 절삭가공만으로 실리콘석출을 위한 경면가공을 얻기위한 최적의 조건을 찾고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 재질은 과공정 Al-Si합금인 A390이며, 화학적인 조성(ASTM STD E716)과 기계적인 특성은 Table 1과 같다. Table 2는 적용된 모든 실험조건을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 실험에 사용된 공구이며, 공구형상에

Table 2 Experimental cutting conditons

Tool (material)	Single crystal diamond Poly crystal diamond Cubic boron nitride
(Type)	1, 2, 3
Workpiece	A390 forged aluminum
Coutting speed	100~600 m/min
Feed rate	0.005~0.1 mm/rev
Depth of cut	0.01~0.30 mm
Cutting fluid	Neat oil (mixed) Neat oil (inactivity, 2/13) Neat oil (inactivity, 2/15) Emulsion type (20 : 1) Soluble type (20 : 1) Solution type (50 : 1)

Table 1 Chemical composition of hypereutectic Al-Si alloy (A390 : ASTM STD. E716)

Contents	Compositions (%)
Silicon	16.0~18.0
Copper	4.0~5.0
Magnesium	0.45~0.65
Manganese	0.1 Max
Iron	0.5 Max
Zinc	0.1 Max
Titanium	0.2 Max
Others	0.2 Max
Aluminum	Remainder

Mechanical properties of A390

Young's modulus (psi)		11.9×10^6
Thermal conductivity (BTU/hr · ft · oF)		73
Thermal expansion (per °F)		10.0×10^{-6}
Hardness-10 mm		100
BHIN	500 kg	125
Density	(lb/in ³)	0.10

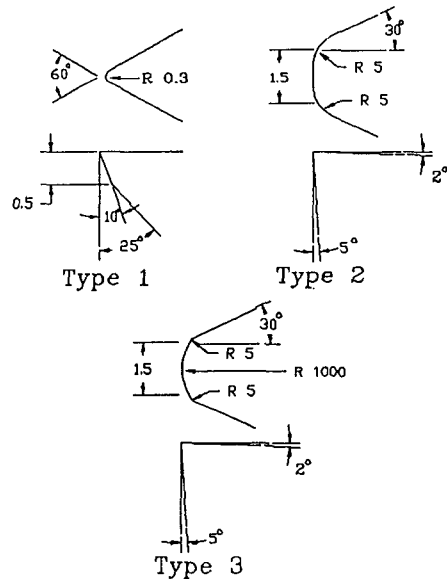


Fig. 1 Geometry of tools (Tg)

다른 최적의 석출경면을 얻기 위하여 현재까지 알루미늄가공에서 얻어진 문헌⁽⁶⁾등을 참고하여 공구의 형태를 각각 R. 0.3, 직선형 및 R 1000의 3가지 형태로 제작하였으며, 공구재질은 단결정·다결정 다이아몬드 및 CBN으로 제작하였다. Fig. 2는 실험원재료인 단조된 SWASHPLATE이며 실리콘석출도가 60% 이상이 요구되고 있다. 본 재료는 선반

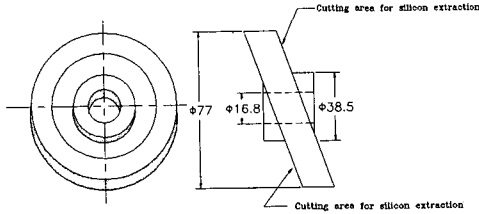


Fig. 2 Experimental workpiece of forged swashplate (A390)

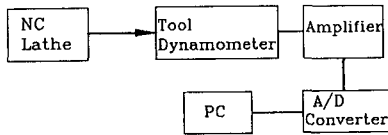


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

작업이 가능하도록 재제작하여 사용하였다. 사용공작기체는 CNC선반(금단 Model KD-6)을 사용하였다. 본 실험은 습식을 선택하였으며, 최적 절삭유제 실험을 선결조건으로 하므로서 연구결과가 산업현장에 직접 응용되도록 하였다. 절삭유제의 사용은 수용성 1종, 2종, 3종과 비수용 1종, 2종 13호, 2종 15호로 구분하여 실험하였다. 절삭력은 공구동력계로 측정하였으며 A/D Converter를 이용하여 컴퓨터로 신호를 받아서 분석처리하였으며, 실험장치는 Fig. 3과 같다. 또한 경면 및 실리콘석출 분석을 위하여 표면조도계(hommel werke) 및 전자주사현미경(scanning electron microscope)으로 관찰함으로써 공구면, 가공면 및 칩 생성면의 표면과 실리콘석출 분포도를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭유제의 영향

Fig. 4는 절삭유제에 따른 Al-Si 합금가공 표면의 상태를 다이아몬드 공구에 대하여 실험결과를 나타낸 것이다. Al-Si합금 가공면의 표면거칠기는 다결정 다이아몬드 공구가 단결정 다이아몬드 공구보다 더 큰 절삭유제의 영향을 받고 있으며, 어느 재질이나 수용성 1종을 사용하였을때 보다 양호한 표면거칠기를 얻었다. 본 실험조건에서의 표면거칠기는 Ra 0.25 μm 와 Ra 0.5 μm 범위내에 분포되지만 절삭유제의 적절한 선정에 의하여 0.25 μm 범위로 가공가능성을 보이고 있다. 다만 단결정 다

이아몬드는 절삭유제 재종 1-4번 범위에서는 큰 변화가 없으나, soluble과 solution 재종의 사용시는 표면거칠기가 적합치 않은것으로 분석된다. 총체적으로 다이아몬드공구에 의한 습식가공에서 emulsion 재종이 선택가능 재종으로 판단된다.

3.2 공구재질 및 형태의 영향

Fig. 5는 공구의 재질과 형태에 따라 Al-Si합금을 절삭하여 표면거칠기 결과를 나타낸 것이다. 표면거칠기는 공구재종과 공구형태에 따라 큰 변화를 나타내고 있으며, 공구재종으로는 단결정 다이아몬드가, 공구형태로는 인선반경이 R 1000이 가장 양호한 것으로 나타났다. 직선형이 가장 양호한 상태

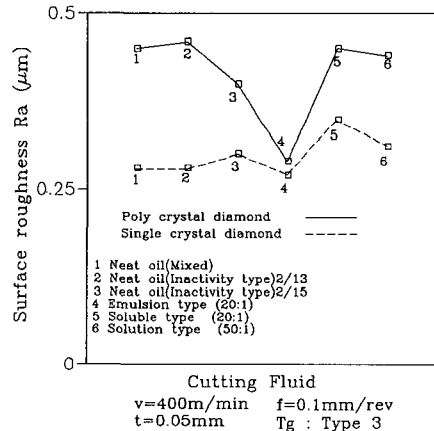


Fig. 4 Effect of Cutting fluid on surface roughness

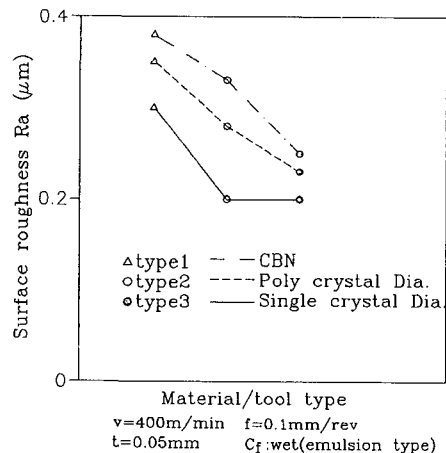


Fig. 5 Effect of tool type and material on surface roughness

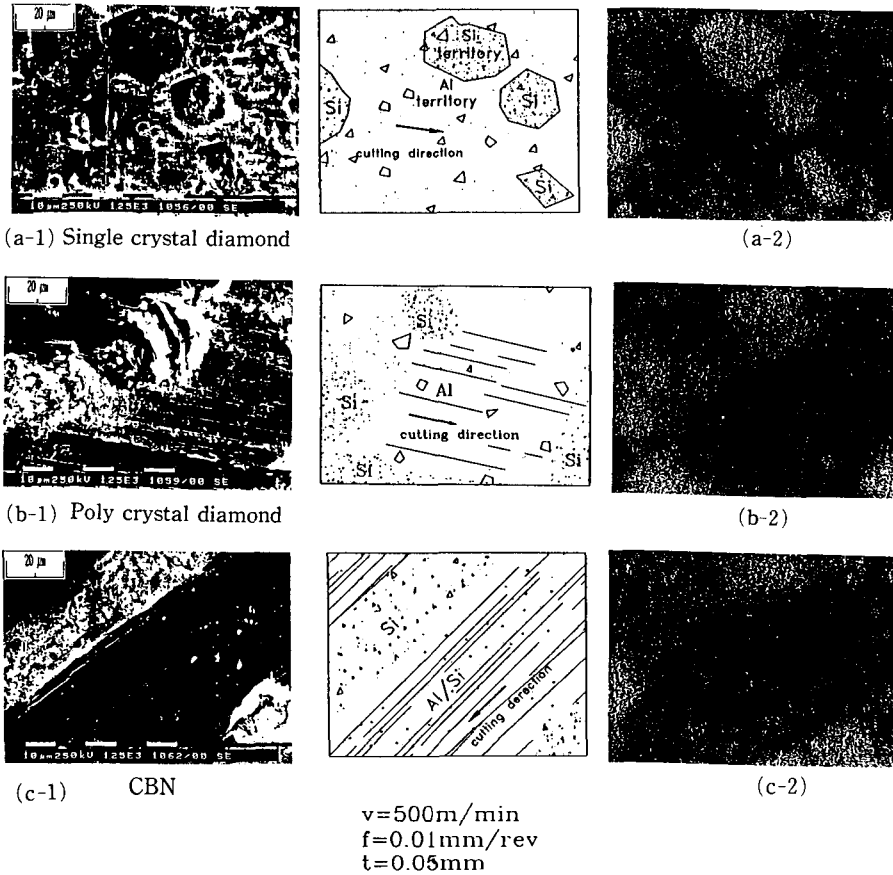


Fig. 6 SEM photographs of cutting surface by using tool materials

를 유지할 것으로 기대되었으나, 공구의 설치상 정확성의 문제로 공구흔적(tool mark)이 발생하여 표면거칠기에 나쁜 영향을 미친 것으로 사료된다. Fig. 6은 절삭조건 $v : 500 \text{ m/min}$, $f : 0.01 \text{ mm/rev}$ 에서의 가공표면을 SEM 사진으로 분석한 것이다. Fig. 6의 (a-1)은 단결정 다이아몬드공구로 가공한 것으로서 실리콘 입자가 그대로 보존되는 상태라는 것을 알 수 있으며, 이에 대한 Al-Si 분포도를 나타낸 것이 (a-2)의 사진이다. 여기에서 검은바탕은 알루미늄이고, 흰바탕은 실리콘입자분포를 나타낸 것이다. (a-1)과 (a-2)를 분석할 때 실리콘의 석출이 원형으로 보존되어 있을 뿐만 아니라 알루미늄재료와의 상호관계에서 위치경계를 유지하고 있는 것으로 분석된다. (b-1) 사진은 다결정 다이아몬드 공구로 절삭한 가공면을 나타내고 있으며, 실리콘입자가 가공시 파손되었음을 보여주고 있다. 실리콘입자는 파손시 절삭방향으로 알루미늄영역을

잠식하게 되며, 실리콘의 일부가 알루미늄에 분산되어 확산된다는 것이 (b-2)의 사진으로 분석된다. (c-1)은 CBN공구로 가공한 표면을 나타낸 것이며, 실리콘의 전량이 파손되면서 절삭방향으로 가공면에 잔량의 작은 실리콘입자들이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 실리콘입자의 석출정도는 실리콘의 경도가 알루미늄의 경도에 비하여 높기 때문에 가공흔적(cutting mark)에 지대한 영향을 미치게 하고 이것이 가공경면 생성에 지대한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이것은 절삭조건이 미소량 제거 가공인 것이 비하여 다결정체는 Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 정도의 소결분말 크기에 의한 공구의 미시적 윤곽⁽⁷⁾에 의한 영향임을 알 수 있다. Fig. 8은 SEM으로 공작물 가공후 공구표면의 Al-Si조성을 분석한 결과이다. 다결정 다이아몬드와 CBN공구에서는 많은량의 실리콘이 잔류된 것으로서 가공시에 실리콘의 손상·탈락 현상이

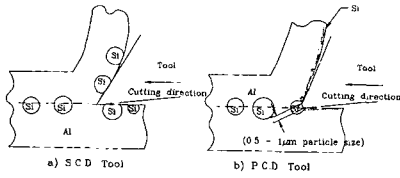
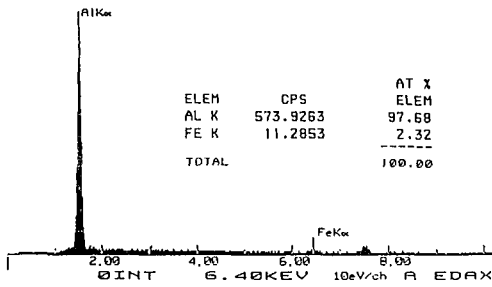


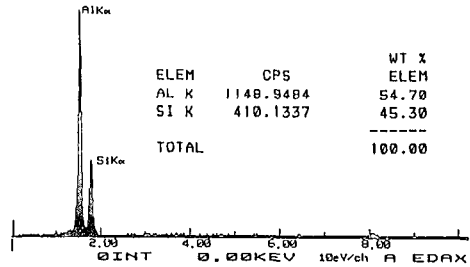
Fig. 7 Phenomenon of Si extraction by S.C.D. and P.C.D.

나타났음을 알수 있다. 공구상면에 나타난 조성비를 100%로 기준할때 단결정 다이아몬드공구 Si 0 cps, 다결정 다이아몬드공구 Si 119 cps, CBN 115

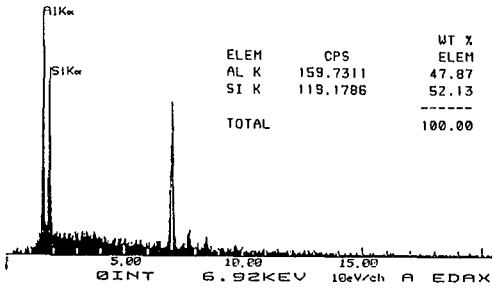
cps로 각각 나타남으로서 단결정 다이아몬드공구 이외의 다결정과 CBN공구에 있어서는 많은 실리콘 파손잔량이 있음을 알수 있다. Fig. 9는 각공구로 가공한 피삭재 가공표면의 Si화산분포를 나타낸 것이다. 가공면 단일면적에 대한 실리콘의 분포는 공구면과는 달리 유사한 경향을 나타내고 있으며 이는 가공중 실리콘이 파손된다 하여도 실리콘은 알루미늄내에 파고들어 잔류하고 있음을 볼 수 있으며, 이것이 가공면의 손상을 촉진하고 있는 것으로 분석된다. Fig. 10은 공구상면과 가공면에 잔류되어 있는 다이아몬드 가공면의 실리콘성분양을 1로 기준하였을때 각 재종에 따른 잔류량을 Fig. 8과



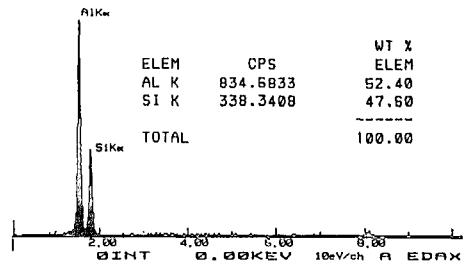
(a) Single crystal diamond



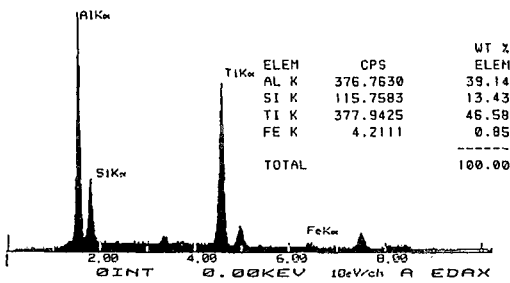
(a) Single crystal diamond



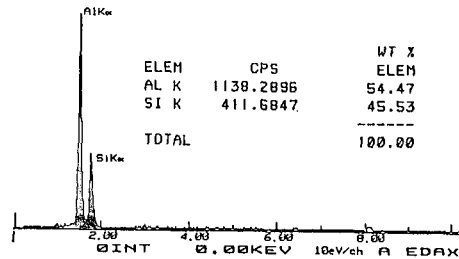
(b) Poly crystal diamond



(b) Poly crystal diamond



(c) CBN



(c) CBN

v=500m/min, f=0.01mm/rev, t=0.05mm

Fig. 8 Residual chemical composition of cutting tool surface

Fig. 9 Chemical composition of surface of workpiece

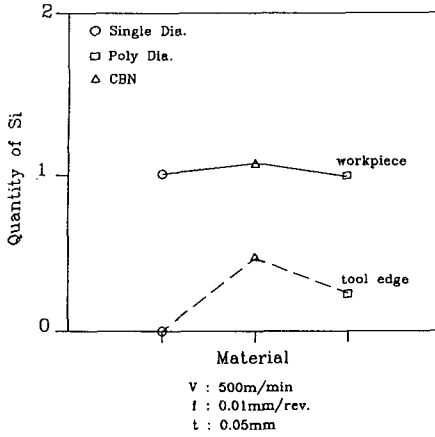


Fig. 10 Comparison of Si residual

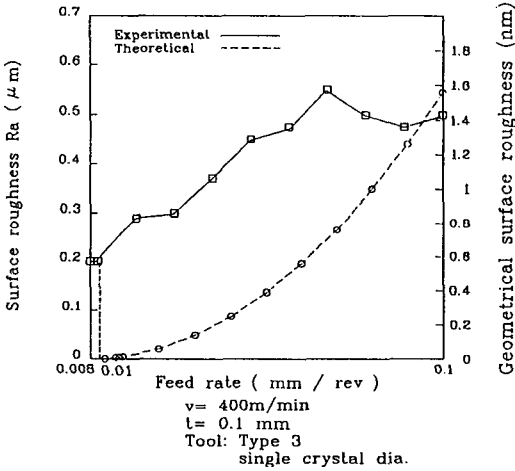


Fig. 11 Effect of feed rate on surface roughness

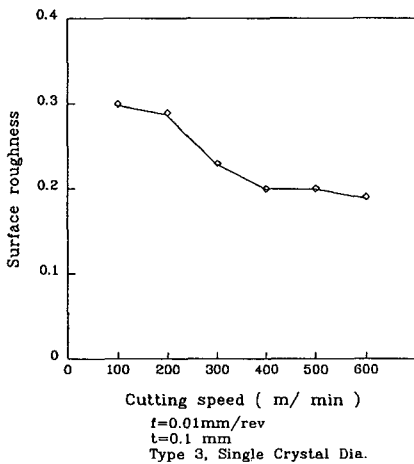
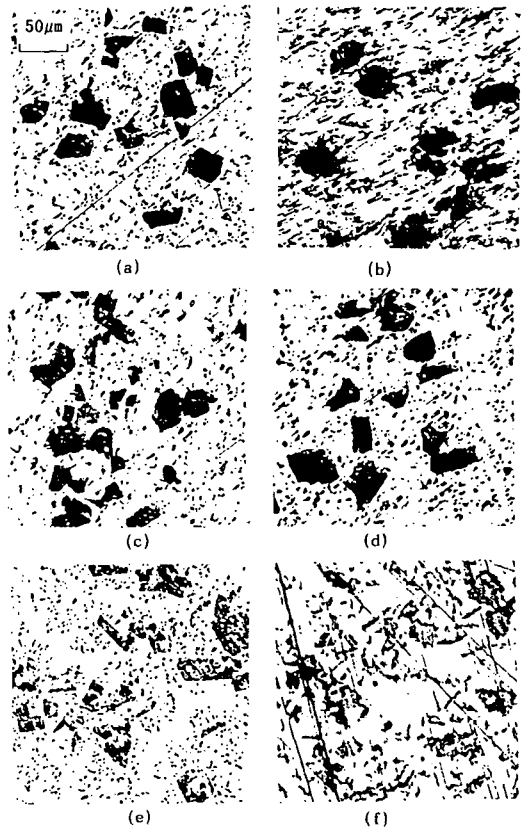


Fig. 12 Effect of cutting speed on surface roughness

Fig. 9를 기준으로 나타낸 것이다. 단결정 다이아몬드 공구상면의 실리콘 잔량이 0일때 피삭재는 1로 나타나고 있으며, 이는 절삭시 공구인선의 간섭 없이 실리콘 절삭되고 있다는 근거이며, 그외의 절삭공구 즉, 다결정 다이아몬드공구 및 CBN공구에서는 절삭시 실리콘이 파손되면서 미세분말이 공구상면에 상당량이 잔류됨으로서, 이것이 실리콘의 석출경면가공성에 유해한 영향을 미치는 것으로 분석된다.



< cutting condition >

	speed(m/min)	feed(mm/rev)	d.o.c. (mm)
(a)	500	0.06	0.2
(b)	500	0.06	0.1
(c)	500	0.06	0.07
(d)	500	0.06	0.04
(e)	500	0.01	0.04
(f)	Surface by superfinishing		

Fig. 13 Microphotograph of surface

3.3 이송, 절삭깊이 및 절삭속도의 영향

Fig. 11은 이송량에 따른 실험을 수행한 결과와 이론적인 값을 나타낸 것이다. 이송량을 0.1 mm/rev부터 0.008 mm/rev까지 0.01 mm/rev씩 줄여 가면서 실험을 하였다. 여기서 사용한 공구는 인선반경 R 1000 mm (Type3)인 단결정 다이아몬드공구이다. 이송량을 감소시킬수록 표면의 거칠기는 0.5 μm에서 0.2 μm로 향상되었다. 이송량이 0.01 mm/rev부터 0.008 mm/rev까지 0.2 μm의 표면거칠기가 얻어졌으며, 그 이하의 조건범위 0.005 mm/rev로 감소시켜 절삭하였으나 표면거칠기 추이에는 변화가 없었다. 따라서 이송량 0.01 mm/rev가 최적이송량의 임계점임을 알 수 있다. 이론적인 기하학적 표면거칠기(h)⁽⁸⁾는 $4h=f^2/2R$ 이고, R:노우즈(nose)반경, f:이송량, h:기하학적 표면거칠기이다. 기하학적 표면거칠기를 실험값과 비교할때 이송량이 줄어감에 따라 표면거칠기 값이 좋아지는 경향은 유사하다. 이론값이 본 실험에서 사용한 특수한 목적의 과공정 Al-Si 합금의 상태가 아닌 경우로 실제 실험시 공작기계와 공작물의 상태 등 여러요인(실리콘입자에 의한 진동, 단속력발생 등)을 고려하지 않으므로 실험과 이론값의 차이가 발생한다 하겠다. Fig. 12는 임계 이송량을 기준으로 절삭속도에 따라서 실험을 한 것이다. 절삭속도를 100 m/min 부터 600 m/min까지 주속을 일정 제어 하여 실험함으로써 절삭속도의 영향에 따른 표면 거칠기가 0.3 μm에서 0.19 μm까지 향상되었다. 절삭속도가 400 m/min 이상으로 증가한다하여

도 표면거칠기는 크게 향상되지 않으며, 최적의 절삭속도는 400 m/min범위이다. Fig. 13은 절삭가공 후 표면에 실리콘입자 상태를 광학현미경(400배율)으로 본 것 나타낸 것이다. 인선반경 R 1000 mm인 단결정 다이아몬드공구를 사용하여, 절삭깊이를 감소시켜면서(a~d) 실험한 것의 표면상태는 실리콘입자가 거의 전부 파손되어 있다. 이송량이 0.06 mm/rev로 최적이송량(0.01 mm/rev)보다 크기 때

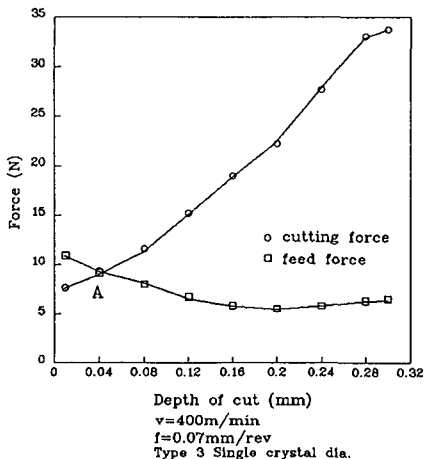


Fig. 14 Change in the cutting feed force with increase in depth of cut

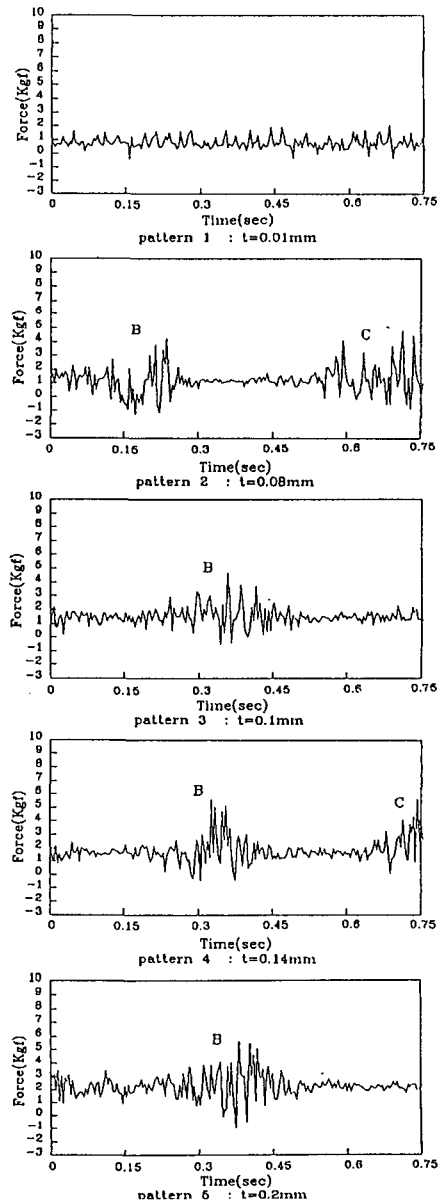


Fig. 15 Cutting force pattern

문에 나타나는 현상이다. (e)는 이송량을 0.01 mm/rev로 줄임으로써 보다 좋은 표면($Ra=0.19 \mu\text{m}$)을 얻었고, Al-Si합금상의 실리콘입자가 80% 이상 석출된 상태로 유지되었다. (f)는 현재 생산 현장에서 생산되고 있는 절삭가공후 CBN 슛돌로 초다듬질 작업을 한 표면이다. (e)와 (f)를 비교하여 볼때 거의 같은표면을 가짐으로써, 최적의 이송량과 절삭속도를 유지한다면 절삭가공만으로도 실리콘석출경면 가능성을 얻는데 효과가 있어 초다듬질의 후가공을 대체할 가능성이 있다. 특히 초다듬질 가공면은 가공흔적이 극심하게 나타나는 현상을 보이고 있으며, 이는 가공시 파손된 실리콘의 일부가 가공면을 긁어감에 따라 나타나는 현상이라고 볼수 있다. Fig. 14는 절삭깊이를 증가시킴에 따른 주절삭력과 이송분력에 대한 실험을 수행한 것이다. 절삭깊이가 증가될때 마다 주절삭은 비례적으로 증가되고, 이송분력은 조금씩 감소되는 추세로 유지하다가 절삭깊이가 0.2 mm 이상부터는 증가추세를 유지하고 있다. 절삭깊이를 0.05 mm 이하로 절삭가공을 하였을때의 표면을 광학현미경으로 관찰하였을 경우 실리콘입자의 파손이 매우 적음이 관찰되어졌고, 절삭깊이를 증가할때마다 실리콘입자의 파손량이 조금씩 증가됨을 관찰 할수 있었다. 따라서, 절삭깊이가 0.05 mm이하일때 이송분력이 주절삭력과 같아지는 점(A)보다 작은 절삭깊이일 경우 실리콘입자의 파손이 적게 된다. Fig. 15는 절삭시간(0.75초)에 따른 절삭력(Kgf)의 변화량 형태를 나타낸것으로 단속절삭과 같은 절삭력의 추이는 나타내고 있으며, 절삭깊이 변화에 따라 그 정도의 차가 있다. 여기에서 B와 C의 부분에 절삭력의 진동폭이 큰것은 실리콘입자와 공구면이 충돌하여, 입자가 파손되는 상태인 것으로 위 전술에서 설명된 바와 같이 절삭깊이의 증가는 단속력의 증가를 유발하고, 실리콘입자는 파손된다. 따라서 Al-Si합금재료의 석출경면 만족조건은 최소한 Pattern 1의 형태의 절삭력 추이를 갖는것이 요망되고 있다.

4. 결 론

과공정 Al-Si합금에서 실리콘이 파손되지 않는 상태로 표면에 석출되는 절삭가공 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 절삭가공시 이송량이 0.01 mm/rev부터 표면의 정도가 매우 좋아져서, 그 이하부터 표면거칠기

가 일정함을 유지하므로 최적의 이송량은 0.01 mm/rev 이하이다.

(2) 실리콘석출경면을 위한 추천 최소절삭속도는 400 m/min 이며, 400 m/min 이상부터는 큰 변화 없이 실리콘석출경면상태를 유지한다.

(3) 최적의 절삭깊이는 0.05 mm이하이고, 절삭깊이의 증가는 단속력의 증가를 유발하여 실리콘입자에 손상을 주게 될 가능성이 많다.

(4) 표면거칠기(Ra)가 $0.2 \mu\text{m}$ 이상일 경우 실리콘입자의 파손이 광학현미경으로 항상 관찰되어지고, $0.2 \mu\text{m}$ 이하인 경우는 공구의 재질에 따라 실리콘입자의 파손이 관찰 되어진다. 다결정 다이아몬드로 가공한 표면에서는 실리콘입자의 파손이 매우 큰 반면, 단결정 다이아몬드로 가공한 표면은 파손이 거의 없는 경면가능성을 발견하였다.

참고문헌

- (1) Hanasak S.I., Touge. M., Tanokubo E. and Hasegawa, Y., 1989, "In Situobservation of Micro-Cutting of Al-Si Alloy by Using Scanning Electron Microscope," 輕金屬, Vol. 39, No. 10, pp. 705~709.
- (2) Jorstad, J.L., 1984, "Applications of 390 alloy: An Update," AFS Transactions, pp. 573~578.
- (3) John C. Miller, 1981, "Machining high silicon aluminum," Paper NO.G-T81-035, 11th International Die Casting Congress and Exposition.
- (4) Hanasaki, S., Touge. M., Tanokubo E. and Hasegawa, Y. 1990, "Study on Microcutting of Particle Dispersion-Hardened Alloys with SEM Direct Observation Method," JSME, Vol. 56, No. 10, pp. 1877~1882.
- (5) Sugano, T. and Taeauchi, K. 1987, "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror," Annals of the CIRP, Vol. 36, pp. 17~20.
- (6) 精密工業會, 1991, 精密工作便覽, コロナ社, pp. 215~217.
- (7) 砥粒加工研究會, 1984, 超精密加工技術, 工業調査會.
- (8) 김정두, 1990, "천연다이아몬드 인선형태에 의한 Al합금의 경면절삭에 관한 연구," 大韓機械學會論文集, Vol. 14, No. 6, pp. 1515~1522.