

〈論 文〉

# 천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al 합금의 경면절삭에 관한 연구

김 정 두\*

(1990년 7월 27일 접수)

## Study on Mirror-Like Surface Machining of Al Alloy with Edge Form of Single Crystal Diamond Tools

Jeong-Du Kim

**Key Words:** Ultra Precision Cutting(초정밀가공), Mirror Like Cutting(경면가공), Surface Roughness(표면거칠기), Edge Form of Single Crystal Diamond Tool(단결정 다이아몬드공구의 인선형태), Chip Formation(칩형태)

### Abstract

Ultra precision cutting should be satisfied with two conditions of Mirror Like and shape grade, and especially Mirror Like depends on surface roughness. In this study, in order to develop Mirror Cutting for Al alloy, this was done with edge form of single crystal diamond tool divided into R type and S type. Surface roughness machined by S type tool is more satisfactory than by R type tool, being the lowest value of 13.8nm. In addition, Mirror surface can reach above 90% of reflection rate by both R type and S type tool, but machined surface by R type tool has much more fine fracture portions rather than by S type tool. Even though feed rate decreases from 5 $\mu$ m to 1 $\mu$ m, surface roughness doesn't show improvement.

### 1. 서 론

최근 반도체, 컴퓨터, 레이저, 영상정보등에 관한 기술 수요에 동반하여 nanotechnology를 목표로 한 초정밀 절삭의 관심이 높아지고 있다<sup>(1-3)</sup>.

경면절삭은 초정밀절삭 가공의 일부로 가공물의 경면성과 형상정도의 2가지 조건을 만족하여야 하며, 특히 경면성은 표면거칠기와 밀접한 관계가 있다. 단결정 천연다이아몬드 공구를 사용하여 알루미늄합금을 초정밀 경면절삭하는 기술<sup>(4)</sup>이 발표된 것은 1966년이 최초라고 알려져있으며, 그 후 고정

도화, 고강성화 된 가공기계가 개발되고, 아울러 재료, 공구 및 주변기술등의 진보에 따라 초정밀 절삭가공기술은 등, 알루미늄 합금 등의 연질금속과 플라스틱재료등을 중심으로, 수요의 증가와 함께 급속히 보급되고 있다<sup>(4)</sup>. 최근 국내에서도 이에 대한 연구가 일부 이루어지고 있으나<sup>(5,6)</sup> 아직 초기 단계이며, 이에 대한 기초연구와 함께 응용기술의 적용이 시급한 문제로 대두되고 있다.

특히 경면생성에는 천연 다이아몬드공구의 이방성과 형상을 여하히 설정하느냐 하는 것이 가장 중요한 내용이며, 이에 대한 몇몇의 연구보고<sup>(7,8)</sup>들이 있으나 아직 정성적으로 명확하지는 않다.

따라서 본 연구에서는 천연다이아몬드의 인선 형상을 R형과 S형으로 구분하여 제작하고 미세이

\*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

송과 절삭속도 변화를 주어 이에 얻어지는 표면거칠기, 칩 생성기구 및 경면성을 검토하였다.

2. 이론적 경면거칠기

Fig. 1은 S형 공구와, R형 공구의 형상을 나타낸 것이다. R형 공구의 경우 절삭폭  $C_R$ 의 대부분은 다음으로 이송되는 인선에 의한 절삭으로 제거되고 이송량  $f$ 에 해당하는  $M_r$ 의 운호부분만이 경면으로 남는다. 여기에서  $h$ 는 공구와 피삭재와의 간섭부분이 모두 제거된다고하는 이상적인 절삭이 행하여졌을때 삼각 파형형상의 높이이고, 기하학적 표면거칠기이다. 여기에서 인선이 예리한 공구로 절삭하면 기하학적 표면거칠기에 가까운 절삭면을 얻을 수 있다. 여기에서 절삭폭  $C_R$ 은

$$C_R = \frac{f}{2} + \sqrt{2dR - d^2} \tag{1}$$

로 된다.

경면 창성부분  $M_r$  중양부의 절삭단면 길이는

$$R_a = R - \sqrt{R^2 - f^2} = \frac{f^2}{2R} = 4h \tag{2}$$

로 된다.

S형 공구의 경우 선단반지름이 0인 경우에 이송 마아크에 의한 표면거칠기  $S_a$ 는 다음과 같다.

여기서  $S_a$ 는

$$S_a = \frac{|\text{area abc}| + |\text{area cde}|}{f}$$

가 되므로

$$S_a = \frac{f}{2} (\text{area abc}) = \frac{h}{4} \tag{3}$$

여기서

$$\frac{f}{2} = \frac{h}{2} \cdot \cot \eta + \frac{h}{2} \cdot \cot \eta'$$

가 되므로 평형공구의  $S_a$  값은 다음과 같다.

$$S_a = \frac{f}{4(\cot \eta + \cot \eta')} \tag{4}$$

이상에서 살펴본 바와 같이 가공표면거칠기  $S_a$  값은 이론적인 경면 창성부분  $M_r$  및  $C_s$  값에 비하여 적게 나타나고, S형 공구의 설치각이 0°이면  $\cot \eta'$ 는 ∞로 되어 이론적인 표면거칠기는 R형 바이트에 비하여 대단히 미소한 표면거칠기 결과를 얻게 되므로, 따라서 S형 공구의 경우 바이트의 설정각에 따라 절삭 표면거칠기에 미치는 영향이 지대하다.

3. 실험장치와 방법

실험에 사용된 초정밀선반은 Fig. 2(KUP-B2)와 같다. 본기의 절삭방식은 단면가공으로 주축회전 0~2500rpm, 테이블속도 1mm/min~10mm/min 범위, 절삭깊이 10μm 범위를 사용하였으며, 최소 이송속도는 테이블속도/주축회전수이므로 주축회전수의 변화에 따라 그 조절이 가능하였다. 주축은 정압 에어베어링으로 자체적으로 제작하였으며, 공기의 공급압력은 6kg/cm<sup>2</sup> 절삭속도 V 100m/min, 이송속도  $f$  10μm/rev, 절삭깊이  $t$  10μm일 경우 진원도 값은 0.5μm 정도를 유지하고 있다. 또한 X-Y테이블은 반복위치 결정정도 ±3μm/100mm, 진직도 5μm/100mm이다.

정압압축공기는 가동시 6kgf/cm<sup>2</sup>G로 제어되고 미세필터를 3단계로 구분 사용하여 0.01μm이상의 고형입자가 혼입되지 않도록 주의하였다. 공기 건조제는 Hankinson Airdryer 8010를 사용 공기중의 증기와 결합하여 액체가 되어 실외로 배출된다. 이와 같이 압축공기는 가압하에서 상대습도 70%이하로 유지된다. 초정밀 선반은 화강암의 석정반(Granite surface plate, 서은정기)으로 경도 85HS; 열전도율 1.36Kcal m.h.°C이며, 정반아래 고무 진동방지대를 설치하였다. 석정반과 기계의 접합은 석정반에 T홈을 가공하고, 스텐레스로 보강재를 끼운 후 감쇄성이 높은 에폭시를 사용하여 접착시켰다. 공구는 단결정 천연 다이아몬드를 직선형 날

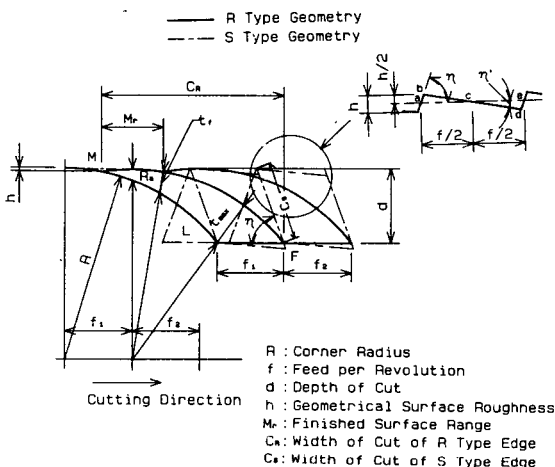


Fig. 1 Geometry for section of R type tool and straight type tool

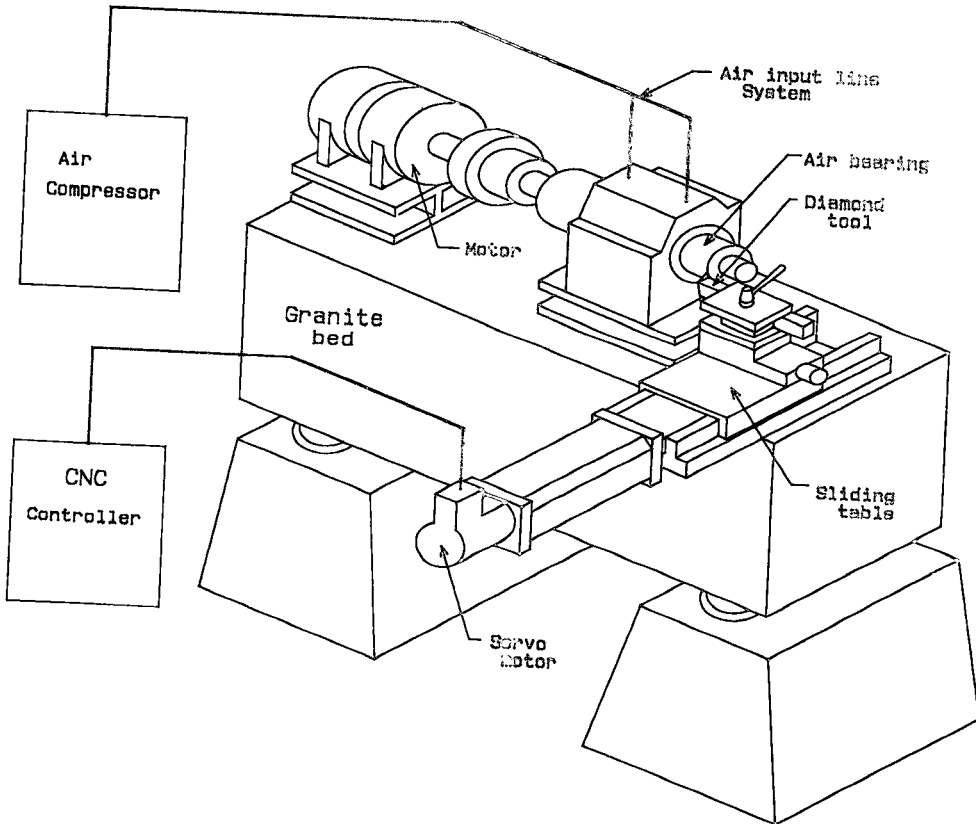
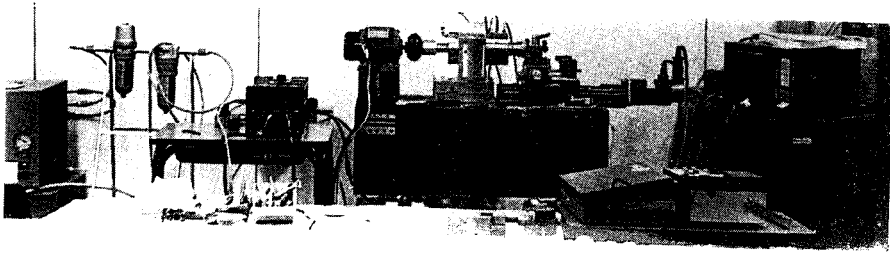


Fig. 2 Ultraprecision machine

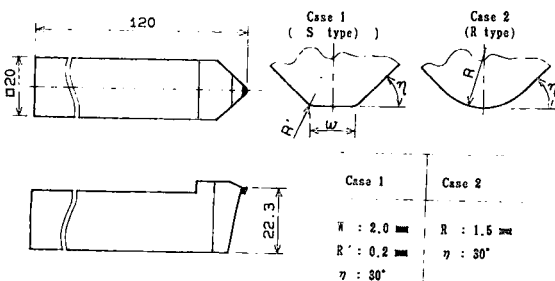


Fig. 3 Tool geometry

공구(이하 S형 공구라한다) 및 노오즈 R을 갖는 공구(이하 R형 공구라한다)로 주문제작하여 사용하였으며, 공구상면의 결정방위를 [110]으로 제작하여 실험하였다. Fig. 3은 공구형상을 나타낸 것으로 품질의 보증도는 제작메이커에 의존하였다. 본 경면가공기는 축에 대하여 편심량  $1\mu\text{m}$ 이내, 에어베어링의 간극(clearance)은  $15\mu\text{m}$ 이 되도록 제작하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 피삭재의 Al 합금의 화학성분이다.

Table 1 Chemical composition of workpieces

wt %

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5086 (Al-Mg4)	0.40	0.50	0.10	0.40	3.8	0.05	0.25	0.15	Re

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공면의 현미경 관찰

Fig. 4는 경면가공 결과의 일예를 나타낸 것이다. Al합금을 S형 공구로  $V=200\text{m/min}$ ,  $f=10\mu\text{m/rev}$ ,  $d=10\mu\text{m}$ 에서 절삭하였을 때의 경면을 나타낸다. 이 표면은 반사율 95.9% 다듬질면 거칠기  $R_a=17.0\text{nm}$ 이다.

Fig. 5는 천연 다이아몬드 공구로 Al합금을 절삭할 때 R형과 S형 바이트에 의하여 접촉부위에 따라 형성된 가공표면과 절삭과정의 다듬질면을 조사

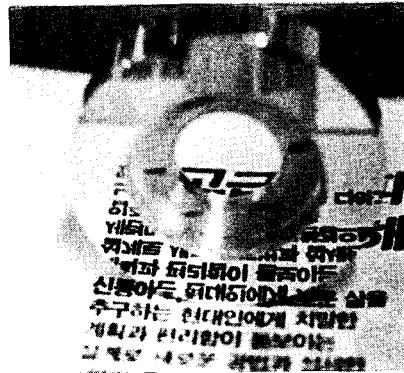


Fig. 4 Actual machined sample

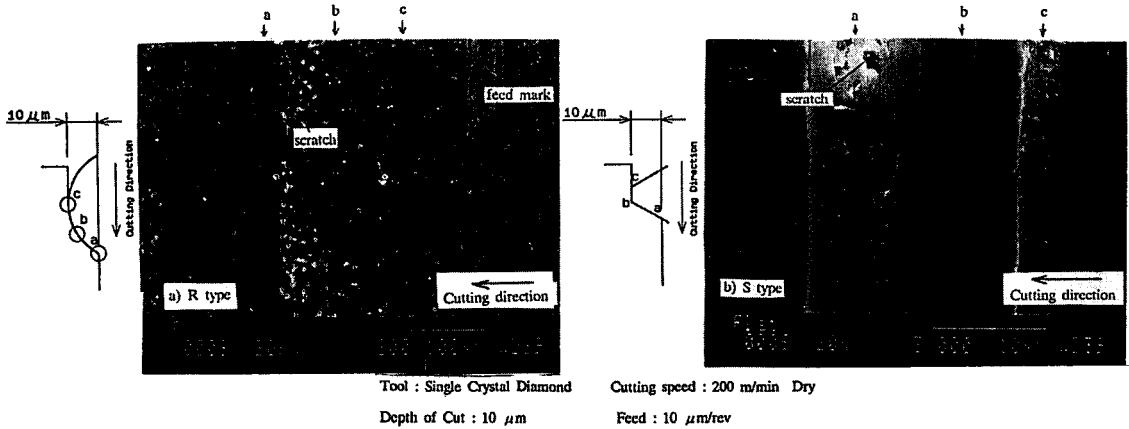


Fig. 5 SEM photographs of machined material by various tool geometry

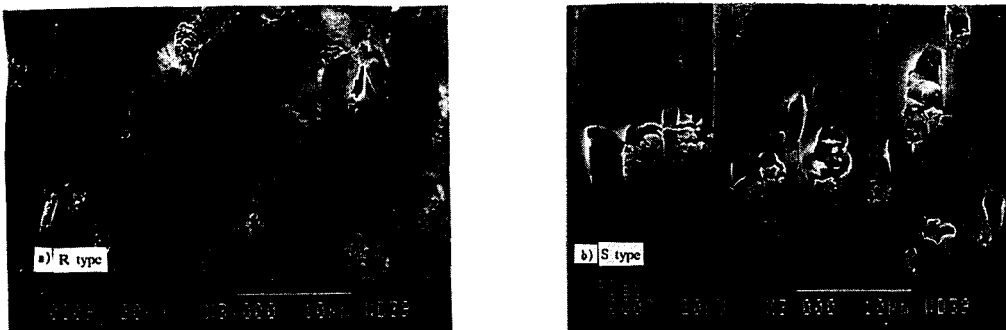


Fig. 6 Highly magnified SEM photo

하기 위하여 가공중단 상태에서 피삭재의 각 단면을 SEM으로 찍은 사진이다. a는 R형 바이트에 의한 가공면으로 초기접촉(a) 중간접촉(b) 및 접촉종료(c)의 부위로 각각 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편 가공면의 표면에는 소위 구상형의 많은 미세파단들을 확인할 수 있으며, 특히 (a) 영역에서 그 현상은 두드러진 현상이 있음을 확인할 수 있다. 그 반면에 (b)는 R형 바이트에 의한 가공면으로 바이트의 인선면은 이송 방향과 평행하고, 피삭재와의 접촉부위는 R형 바이트에 비하여 표면의 외관이 매끄러운 것 같이 나타나고 있다. 그러나 부분적으로 상처가 있는 것이 발견되었다. Fig. 6은 가공면의 상처부위만을 3000배로 확대하여 나타낸 것으로서 R형 바이트에 의한 가공면은 원주 전체에서 골고루 분포되어 있으며, S형 바이트에 의한 가공면은 몇몇 파단부위중의 일부를 나타낸 것이다. 특히 S형 바이트에 의한 가공면의 상처는 대부분이 본래의 위치에서 이탈, 또는 밀려난 상태로 존재하는 것이 많다. 이것은 S형 바이트에 있어서는 가공면이 C영역에서 버어니싱(burnishing) 작용시 동반하는 현상으로 제안되고 있다.

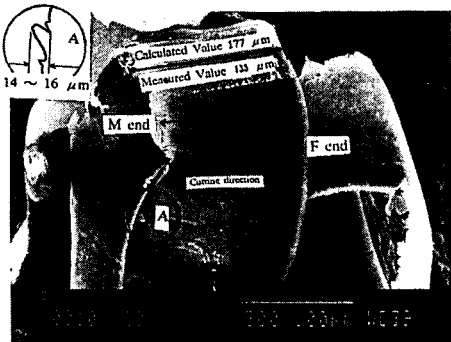
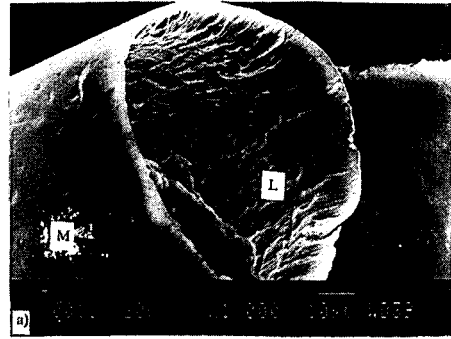


Fig. 7 SEM photo of chip with R type tool

4.2 공구형상에 의한 칩의 형태

천연 다이아몬드공구에 의한 알루미늄합금의 칩은 공구의 형상에 관계없이 유동형 연속칩으로 나타나고 있다. Fig. 7은 R형 바이트로 알루미늄합금을 절삭하였을 때 얻어진 칩을 저배율(300배) SEM으로 관찰한 일예이다. M면은 공구와 마찰하여 생긴 면이기 때문에 윤이나고 광택이 있는 면이다. 그 때문에 촛점을 맞추기 어렵고 SEM에 의한 관찰이 곤란하였다. 이에 대하여 L면은 칩의 자유면이어서 육안으로는 광택이 없고, SEM으로는 라멜라(lamella) 모양이 있기 때문에 M면과는 용이하게 식별할 수 있고 또 이것에 의하여 촛점을 맞추기가 쉬우며 고배율 관찰이 가능하였다. 그림(a)에서 알 수 있듯이 R공구를 이용한 초정밀 절삭가공에 의하여 얻어진 칩은 Fig. 1의 경면창성부분 M단을 외측으로하여 원호상으로 말리고, 또 L면은 내측으로 존재한다. (b)는 칩의 M면 측에서 본 SEM 사진으로 절삭단면 형상에서 구한 칩폭의 계산값보다 다소 작은 값을 나타내고 있다. 절삭깊이와 이송속도가  $\mu\text{m}$ 단위의 미소절삭이기 때문에 M단에서의 칩 두께는 대단히 얇게 생성되기 때문에 그 부분에서의 칩의 탈락은 불가피해진다.

여기에서 실제값은  $133\mu\text{m}$ 으로 측정되었다. R형 공구에 의한 M단에서의 burr현상이 극심하게 나타난 점으로 보아 약  $40\mu\text{m}$ 정도 이상에 해당하는 칩폭이 생성은 되었으나 소멸되어 날아간 것으로 추정된다.

이러한 현상은 R형 공구로 절삭할 때 일반적으로 볼 수 있는 현상이며, 한편 라멜라(Lamella) 모양이 위치에 따라 다른 것을 알 수 있다.

F단에서 이송량  $f=10\mu\text{m}$ 로 절삭가공시 공구인선 끝단부의 위치에 절삭단면 깊이가 가장 깊은 곳으로, 칩 두께가 두꺼운 곳으로 칩 두께의 변화 ( $t_{max}/f$ )가 급격한 곳이다. 이것에 대하여 M단은 그림에 나타난 것처럼  $14\sim 16\mu\text{m}$  깊이의 균열이 있어, 이 부분에서는 미소한 절삭단면 깊이의 절삭이 원활히 행하여 졌다고 하기는 어렵다. 그리고 F단에도 M단만큼 현저하지는 않지만 약간의 굴곡 현상이 나타나고 있다. Fig. 8은 S형 절삭공구에 의하여 얻어진 칩의 형태를 M단의 위치로 얻은 SEM 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 S형공구에 의한 칩은 R형 공구에서 얻어진 원형 칩과는 달리 snarled형의 칩이다. 칩의 형태는 R형 칩에

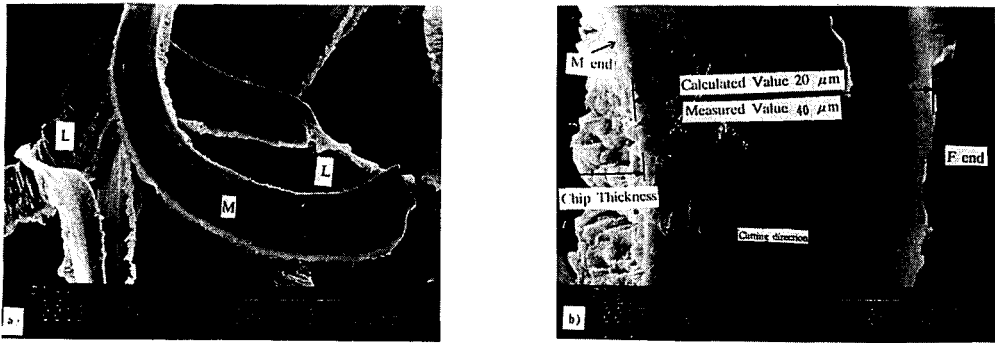


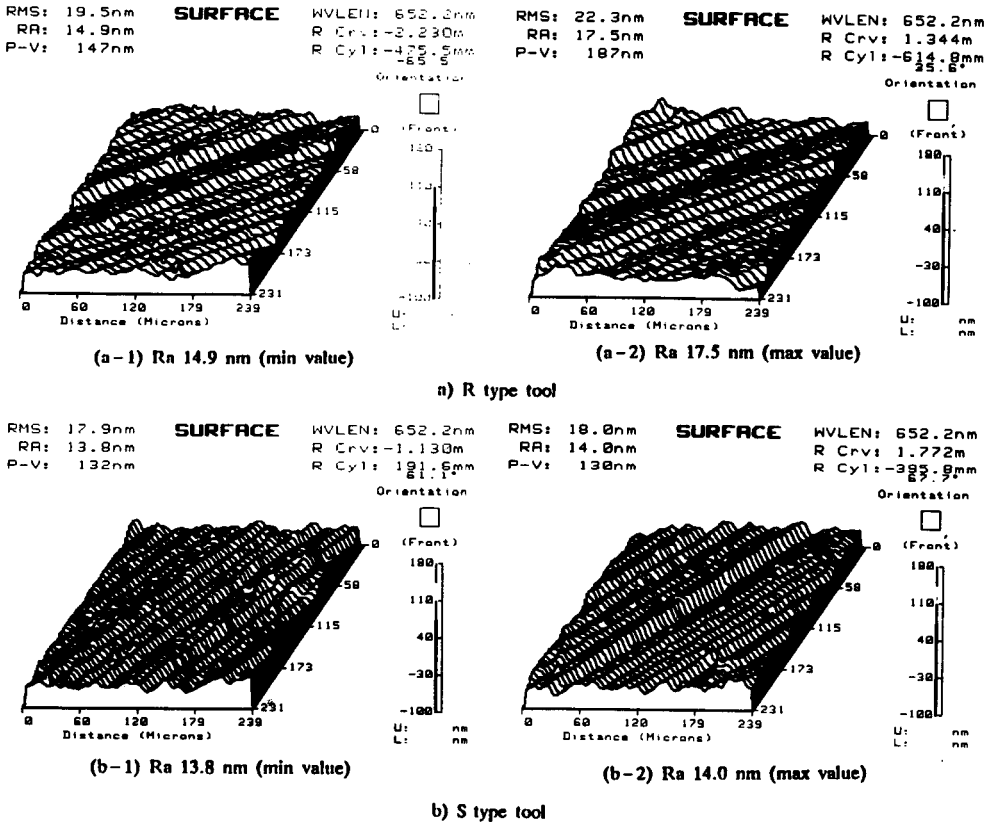
Fig. 8 SEM photo of chip with S type tool

비하여 평균두께가 균일한 형상으로 나타난다. 또한 M끝단과 F끝단에서의 균일현상은 R형 공구에 의하여 얻은 칩에 비하면 극히 작은 값이다. 그러나 칩의 폭은 계산상에서 얻은 20 $\mu$ m에 대하여 실제 측정폭은 40 $\mu$ m로 증가하였으며, 공구의 측면

을 따라 많은 소성변형이 형성되었음을 나타내고 있다.

4.3 절삭조건에 의한 표면거칠기

Fig. 9는 절삭속도 400m/min 범위에서의 비접촉



Cutting Speed : 400 m/min      depth of Cut : 10 $\mu$ m  
 feed : 10 $\mu$ m/rev                      Cutting Fluid : Dry  
 Fig. 9 Surface roughness for various cutting speed in R type and S type tool

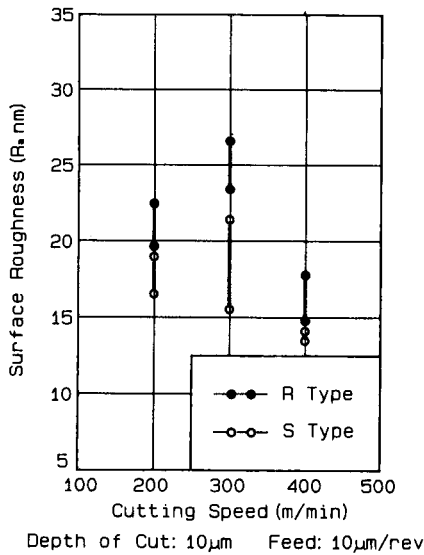


Fig. 10 The surface roughness of mirror cut

3차원 측정(wyko)에 의하여 얻어진 공구형상과 절삭속도 변화에 대한 결과이다. 측정면은 공구의 이송 마아크에 의한 물결침을 나타내고 있다.

Fig. 10은 절삭속도의 변화에 따라 공구의 형상 별로 각각 경면 절삭을 하여 얻은 표면거칠기(Ra nm) 값이다. 측정회수는 시편당 각각 가공 주위를 수회 측정한 후 그중에서 최고값과 최소값을 나타 낸 것이며, 이때 S형 공구의 설치각  $\eta$ '는 30'으로 한 경우이다.

표면 거칠기의 최적값만을 도출하여 고려해볼때 S형 공구로 절삭된 가공면은 절삭속도가 높아질수록 표면거칠기는 17.0nm에서 13.8nm로 향상되었

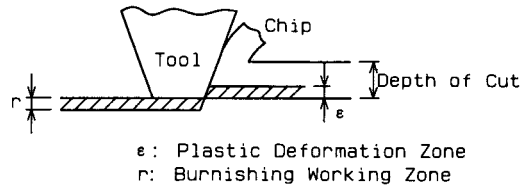


Fig. 11 Burnishing model with straight edge tool

다. 다듬질면 거칠기는 공구의 형태에 따라 0.2nm에서 1.3nm 정도까지 차이를 보이고 있으며 전반적으로 S형 공구에 의한 표면거칠기 값은 R형 공구에 비하여 양호한 결과를 얻는다. S형 공구에 의한 표면거칠기가 R형 공구에 비하여 향상되는 것은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 절삭중에 나타나는 소성변형량  $\epsilon$ (plastic deformation zone) 만큼 피삭재를 소성유동시켜, 마치 로라 버어닝(roller burnishing)과 같은 작용을 하기 때문이라고 생각된다<sup>(4)</sup>.

Table 2는 경면 반사율 측정계에 의하여 백색광에서 반사율을 측정한 것이다. S형 및 R형 절삭날의 어느 경우에서나 반사율은 경면 기준값 90%를 넘고 있으나, S형 공구에 의한 경면이 R형 공구에 비하여 반사율이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 반사능력이 경면 즉 표면 거칠기값에 의하여 좌우되며, 표면거칠기가 좋다는 것은 반사율 즉 경면이 좋다고 볼 수 있다. Fig. 12는 이송속도 변화에 대한 표면거칠기의 3차원 측정결과이다. 경면을 얻기 위하여서는 이송속도를 낮추는 것이 유리하다고 판단되나, 이송속도를 1 $\mu$ m/rev으로 극히 낮출 경우 표면거칠기는 향상되지 않는다

Table 2 Results of reflection rate

No.	Cutting condition					Reflect rate (%)
	Edge type	V(m/min)	f( $\mu$ m/rev)	d( $\mu$ m)	Cutting fluid	
1	S	200	10	10	Dry	95.9
2	S	300	10	10	Dry	94.0
3	S	400	10	10	Dry	97.5
4	R	200	10	10	Dry	95.3
5	R	300	10	10	Dry	93.5
6	R	400	10	10	Dry	96.5

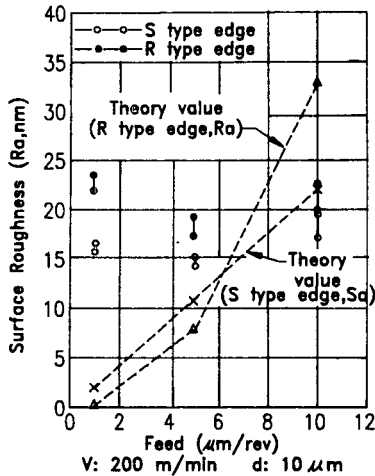


Fig. 12 Relationship of surface roughness and feed

는 것을 알 수 있다. S형 공구에 의한 이론 표면 거칠기는 이송량에 따라 표면거칠기 값이 크게 다르고 이송속도  $5\mu\text{m}/\text{rev}$  범위 이후에서 실제값에 접근되는 경향을 나타내고 있다.

## 5. 결 론

Al 합금의 경면절삭을 위하여 천연 다이아몬드 공구의 인성형태를 R형과 S형으로 구분 실험한 바 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 가공면의 현미경 관찰을 통하여 R형과 S형 공구에 의한 가공면을 관찰한 결과 R형 공구에 의한 가공면은 미세파단 부가 다량 나타나고 있으며 S형 바이트에 의한 가공면은 부분적으로 나타남과 동시에 가공면의 미세파단부는 대부분이 본래의 위치에서 이탈, 또는 밀려난 상태로 존재하고 있다.

이것은 S형 바이트에 의한 가공면의 버어니싱 작용시 동반하는 현상으로 제안되고 있으며, 반사율은 모두 90% 이상되는 경면을 갖는다.

(2) R형 공구에 의한 칩은 창성부분 M단을 외측으로 하여 원호상으로 말리고 손실부분이 많다. S형공구에 의한 칩은 Snarled형으로 형성되며 또한 칩의 형태는 R형 공구에 의한 칩보다 평균 두께가 균일한 형태를 갖는다.

(3) S형 공구에 의하여 얻은 가공면의 거칠기는 R형 공구에 의하여 얻은 값보다 양호한 값을 가지며, 최저  $13.8\text{nm}$  정도까지 얻을 수 있었다.

(4) 표면거칠기 값은 이송속도  $5\mu\text{m}/\text{rev}$ 에서  $1\mu\text{m}/\text{rev}$ 으로 감소한다하여도 향상되지 않는 경향을 나타내고 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Inasaki, I., 1987, "Entwicklung Von Ultrapraezisen Werkzeugmaschinen in Japan", 5th Feinbearbeitung, pp.22, 1.
- (2) Knol, P. H., 1987, "Air Bearing Machined on Ultra Precision", SPIE, Vol. 803, pp.93~99.
- (3) 小林昭, 1986, "超精密ダイヤモンド切削技術", 精密機械, Vol. 52, No. 12, pp.1995~1998.
- (4) Maeda, Y., 1988, "A Study on Diamond Turning of Al-Mg Alloy", JSPE, Vol.54, No.10, pp.1993~1998.
- (5) 유현수 외, 1989, "초정밀가공기 시스템", 초정밀가공기술 심포지움.
- (6) 김정두 외, 1990, "초정밀 가공 공작기계의 개발에 관한 연구(1)", 과기처 특정연구 보고서.
- (7) Eda, H., 1987, "Ultra Precision Cutting of Electroless Nickel Plating Layer", JSPE, Vol. 53, No. 05, pp.814~819.
- (8) Hazawa, K., 1987, "Investigation of Ultra Precise Cutting", JSPE, Vol. 53, No. 4, pp.571~576.