

절삭가공에서 세라믹 공구의 칩형상에 관한 연구

노상래 · 안상욱

인하대학교 기계공학과

(1994년 7월 14일 접수)

Chip Formation of Ceramic Tools in Metal Cutting

S. L. Noh and S. O. An

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

(Received July 14, 1994)

요약

Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 세라믹 절삭공구로 경화처리된 합금공구강을 절삭조건에 따라 선삭하여 이때 배출되는 칩의 형상을 관찰하였다. 배출된 칩의 형상은 conical-herical 또는 arc형이었으며 칩의 양쪽 끝에는 톱니형의 요철이 심하게 나타났는데 이는 절삭시 공구의 tip 전방의 피삭재로부터 분리되는 칩의 자유표면에 주기적인 전단파단이 발생하여 일어난 것으로 생각된다. 칩 배출에 관하여 세라믹 공구는 칩을 절단하기 위한 물리적인 chip breaker가 불필요하며 Al_2O_3 세라믹 공구가 칩 처리에서 가장 우수하게 나타났다. 또 절삭조건 변화에 대한 가공면의 표면 거칠기는 절삭속도와 이송이 증가할수록 더 악화되었다.

ABSTRACT

With the availability of ceramics (Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$), it is possible to machine very hard steel at different cutting conditions. When hardened steel STD 11 is turned using ceramic tools, chip formation is observed conical-herical and arc chips with a cyclic saw toothed type. The main cause of saw toothed chip formation is found to be periodic gross shear fracture extending from the free surface of the chip toward the tool tip. In regard to chip control, ceramic Al_2O_3 is superior to the other cutting tools. The roughness of machined surface was getting worse with increasing of cutting speed and feed.

1. 서 론

정밀가공 부품에 대한 인식이 높아지는 가운데 기존의 절삭공구와 가공기술로는 절삭이 불가능한 난삭재(difficult-to-machine material)의 가공이 날로 증가되고 있다. 절삭과정에서, 칩(chip)은 소재를 필요한 형상과 치수로 만드는 과정에서 얻어지는 불필요한 부산물이지만 칩의 형태와 처리상태를 규명함으로서 절삭과정에서 발생될 수 있는 여러가지 문제점을 해결할 수 있는 매우 중요한 역할을 한다.

최근 절삭공구재는 고능률과 고정밀도를 목적으로 높은 절삭속도에서 절삭이 가능하도록 개발되고 있으나 CNC기계의 사용이 확대되고 무인가공 시스템을 지향하고 있는 산업현장에서는 아직도 공구의 파괴와 칩 처리가 생산성에 중요한 문제로 제기되고 있다. 열처리된 고

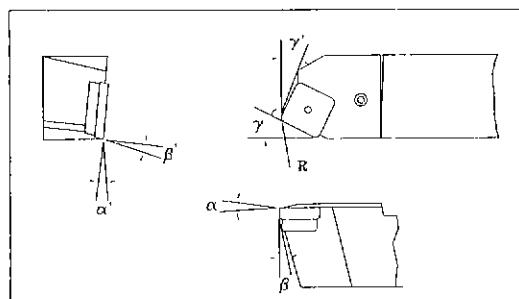
경도재의 절삭가공에는 공구재료, 절삭조건, 공구형상 등에 따라 많은 영향을 받으며 특히 공구재에 있어서는 세라믹과 같이 고경도 및 내마멸성이 요구된다. 절삭공구로서 세라믹의 위치가 확고히 자리를 잡고 있으며¹⁾ 세라믹 공구를 이용한 절삭현상에 관한 연구도 근래에 활발히 진행되고 있다. T. Ohtani는 세라믹공구를 이용하여 냉간 금형용 합금공구강 SKD11에 대하여 절삭력 변화에 따른 공구의 마멸에 대하여 연구했으며²⁾, Porat는 세라믹공구를 이용하여 여러가지 파삭재를 절삭하여 그에 대한 수명을 실험했다³⁾. 세라믹공구를 이용한 밀링(milling) 가공에서 칩의 형상에 관해서 Show가 연구했으며⁴⁾ 고경도강에 대한 세라믹공구의 초기파손⁵⁾과 Inconel 718에 대한 세라믹공구의 고속절삭⁶⁾ 등에 관하여 연구가 이루어지고 있으나 지금까지의 연구는 주로 공구의 수명에 관하여 행하여지고 있다. 따라서 본 연구에서는 세라믹

Table 1. Chemical Compositions of Specimen (wt.%)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
STD11	1.4	0.35	0.55	0.025	0.025	12.0	1.0	0.3

Table 2. Physical and Mechanical Properties of Cutting Tool Materials

Properties	Cutting tool materials	WC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -TiC	CBN
Hardness (Hv)		2080	2600	3200	4500
Modulus of elasticity (Kg/mm ²)		53000	38000	32000	71000
Transverse rupture strength (Kg/mm ²)		150	80	90	80
Thermal conductivity (Cal/Cm°C Sec)		0.07	0.002	0.04	3.1
Thermal expansion coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		6.5	7.6	7.4	4.7
Density (g/cm ³)		15.7	4.23	4.92	3.48



Insert	α (°)	β (°)	α' (°)	β' (°)	γ (°)	γ' (°)	R (mm)
SNMA120408	-6	-6	6	6	15	15	0.8

Fig. 1. Geometry and specification of cutting tools.

공구(Al₂O₃, Al₂O₃-TiC)로 난삭재를 절삭 실험하여 이때 배출되는 침의 형상과 가공성을 고찰하고 WC, CBN(Cubic Boron Nitride) 공구에 의한 것과 비교 검토하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시험편 및 절삭공구

본 연구에 사용된 피삭재는 경화성동이 우수한 합금공구강 STD11을 $\phi 50 \times 200$ mm로 선삭하여 열처리하였다. salt bath와 vacuum furnace를 사용하여 열처리한 조건은 1030°C로 가열하여 2시간 유지시킨 후 유냉시켜서 quenching한 다음 다시 2회에 걸쳐 180°C로 가열하여 2시간

Table 3. Cutting Condition

Cutting speed V (m/min)	Feed f (mm/rev)	Depth of cut d (mm)	coolant
40	0.06		
60	0.08		
80	0.10	0.2	none
120	0.12		
180	0.14		

유지후 공냉시켜 tempering하였다. 이때 시험편의 경도는 H_RC 60이었으며 spectrometer를 이용하여 분석한 시험편의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

절삭공구는 ISO규격에 의한 SNMA 120408형의 throw-away insert로 Al₂O₃세라믹, Al₂O₃-TiC세라믹, WC(P20), CBN의 제종을 사용하였다. Fig. 1은 절삭시험에 사용한 공구의 형상과 제원을 나타내며 공구제종의 물리적, 기계적 성질은 Table 2와 같다. Fig. 2는 사용된 절삭공구재의 미세조직을 보여주고 있다.

2.2. 절삭실험 및 측정

본 실험에서는 CNC선반(Daewoo, Pro-6, 300×550)의 jaw에 피삭재를 물린 후 센터로 견고히 고정하고 Table 3의 절삭조건을 적용하여 매절삭시마다 공구소재별로 insert를 교환해 가며 절삭실험을 행하였다. 배출된 침의 자료화는 절삭시편이 고경도 난삭재이기 때문에 공구가 피삭재에 접촉하는 시점에 공구의 초기마멸이 심하게 발생하므로 절삭개시의 급격한 공구마멸이 이루어진 후 절

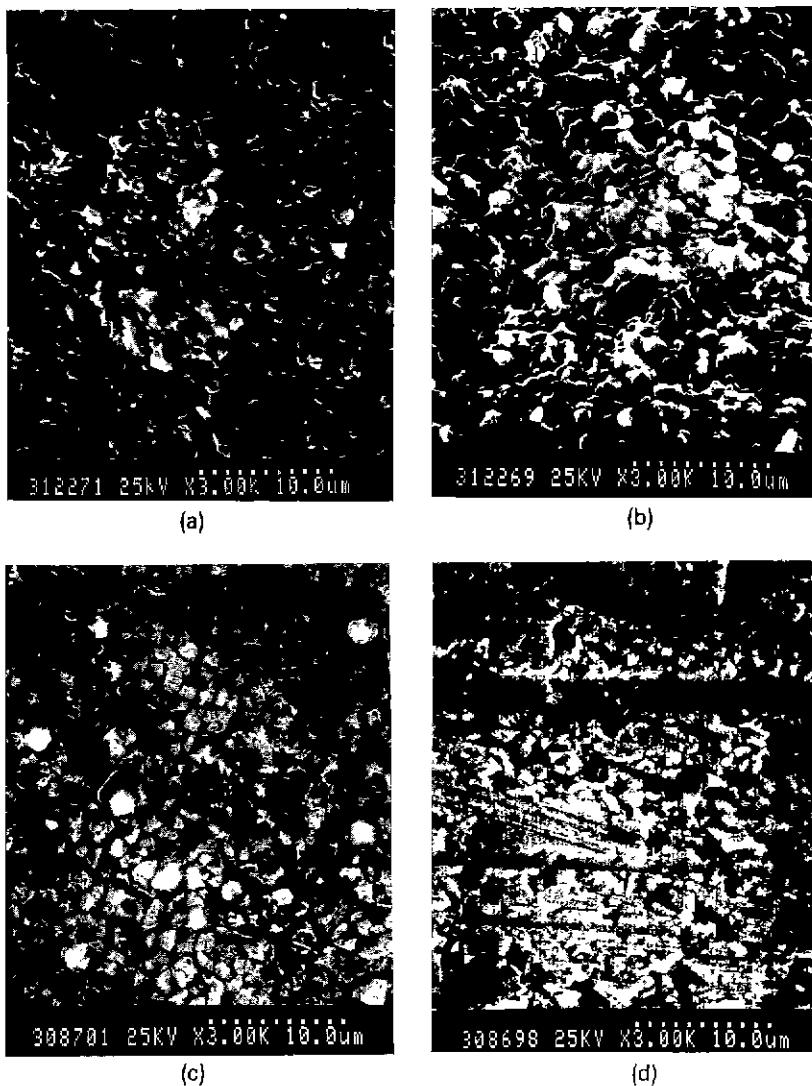


Fig. 2. SEM micrographs of the cutting tool materials. (a) Al_2O_3 (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ (c) WC (d) CBN

삭 단면적이 일정하게 유지되는 안정된 상태에서 배출되는 칩을 채취하여 육안 및 금속 현미경(Serwa optical co.)으로 관찰하며 측정하였다. 또 배출된 칩과 공구마멸(Flank & crater wear)과의 관계를 고찰하기 위하여 가공이 끝난 insert를 공구 현미경(Titan optical co., TM-10)으로 관찰하였다. 칩에 대한 분석은 ISO 3685에서 규정한 standard Annex G(Fig. 3)를 기준으로 칩의 길이가 10~50 mm 범위내에 있는 것을 양호한 것으로 10 mm 이하 또는 50 mm 이상의 것은 불량한 것으로 해석하였다.

가공면의 표면 거칠기 측정은 surface roughness tes-

ter(Kosaka Laboratory Ltd., Model SE-30H)를 이용하여 cutt-off값을 0.8 mm로 설정하고 피삭재의 축방향으로 측정한 평균높이 거칠기(Ra)가 recorder에 기록되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 절삭조건과 칩 형상

Fig. 4~Fig. 7은 절삭깊이를 일정하게 유지하고 절삭 속도와 이송을 변화시키며 공구 재종별로 절삭할 때에 배출된 칩의 형상을 보인 것이다. Al_2O_3 세라믹 공구로 절

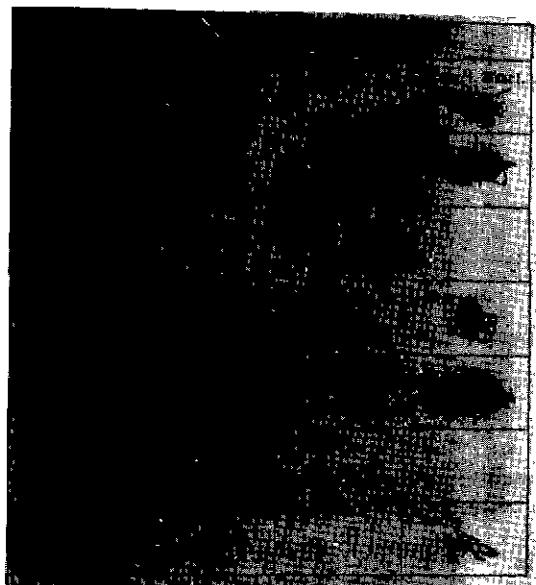
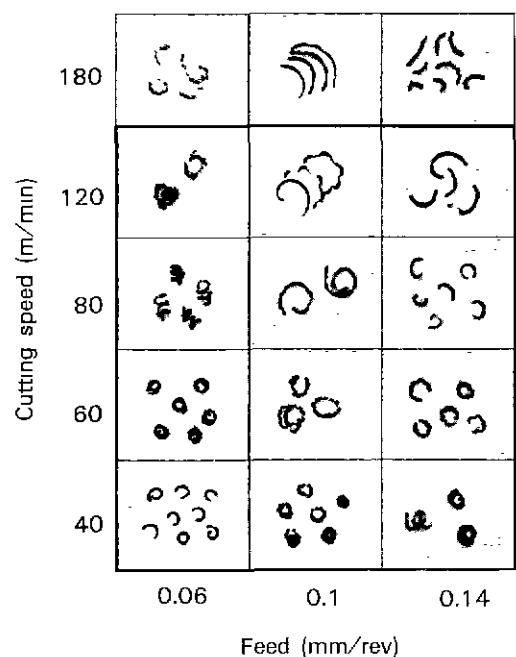
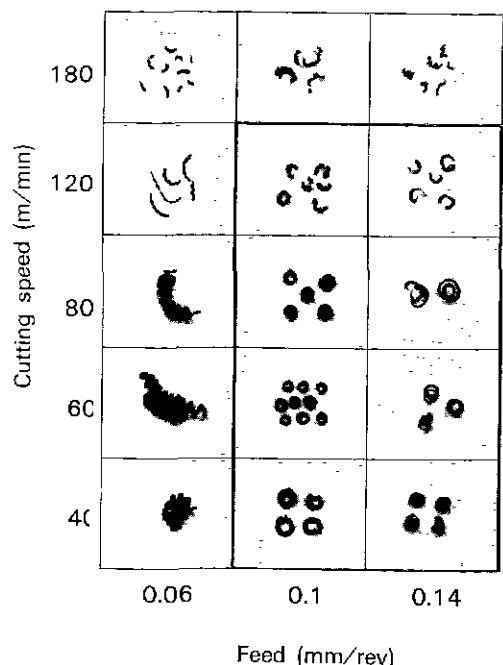


Fig. 3. Standard chip formation by ISO.

Fig. 4. Chip forms obtained in machining by ceramic (Al_2O_3) (Depth of cut, $d=0.2 \text{ mm}$).

삭시에 배출된 Fig. 4를 보면 conical-herical 도는 arc형의 침으로 침의 curl도 3권 이하로 일정하였다. 절삭속도 120 m/min 이하의 영역에서는 이송의 영향이 크게 나타

Fig. 5. Chip forms obtained in machining by ceramic ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) (Depth of cut, $d=0.2 \text{ mm}$).

나지 않았으며 물리적인 chip breaking이 불필요한 비교적 양호한 침(굵은 선으로 표시한 내부영역은 침이 양호하게 배출되는 범위이다)이 배출되었다. 그러나 절삭속도 180 m/min에서는 침의 길이도 길어지며 침의 폭방향의 양쪽 끝에는 심한 침상형의 균열이 나타났으며 침의 curl도 커지는 경향이 있었다. 낮은 절삭속도에서는 절삭날에 발생하는 flank wear가 균일하게 이루어져 절삭이 안정된 반면 높은 절삭속도에서는 높은 마찰열에 의하여 flank wear가 불규칙하게 급증하여 공구와 피삭재의 접촉 면적이 커지고 이에 따라 절삭저항이 크게 증가하여 절삭이 불안정하여지기 때문이다.

Fig. 5는 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 세라믹 공구로 절삭할 때 배출된 침의 형상으로 spiral과 conical형이 두드러지게 나타났다. 최적의 절삭영역은 Al_2O_3 세라믹 공구의 절삭영역보다도 더 좁게 나타났고 절삭속도 180 m/min의 고속구역에서는 비산성(飛散性)이 강한 얇은 침의 성향이 있으며 0.06 mm/rev의 낮은 이송영역에서는 연속성의 tubular형의 침이 배출되었다. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 세라믹 공구는 낮은 이송 낮은 절삭속도에서 마멸이 심하지 않아 절삭날의 경사각을 원형대로 유지하며 상대적으로 침의 단면비(d/f , d : 절삭 깊이, f : 이송)가 크게 되어 침이 두껍고 연속성의 성향을 가지며 이송이 증가할수록 절삭비는 감소하게 되고

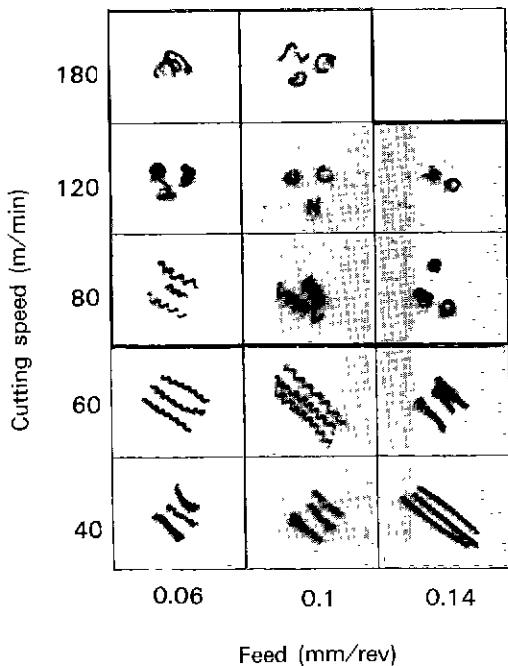


Fig. 6. Chip forms obtained in machining by WC (Depth of cut, $d=0.2$ mm).

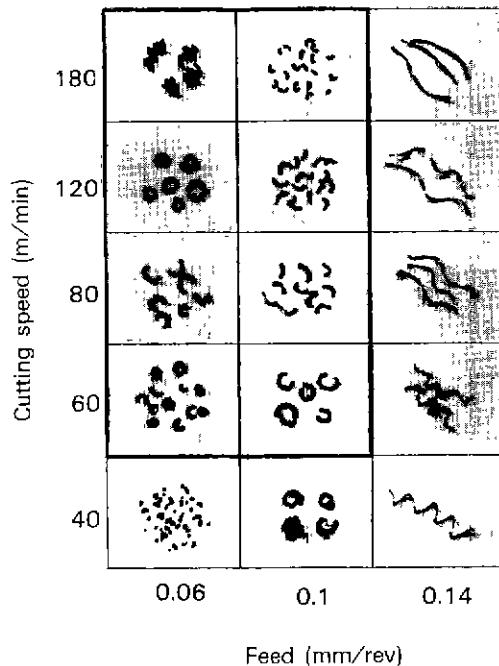


Fig. 7. Chip forms obtained in machining by CBN (Depth of cut, $d=0.2$ mm).

칩의 곡률반경도 작아져서 칩은 불연속적으로 배출된다. 180 m/min의 고속절삭에서는 초기 마모후에 마멸이 급격히 이뤄지고 열충격에 약하여 절삭날의 일부가 탈락되는 침핑(chipping)이 발생되며 이로 인하여 비산성의 칩이 배출되었으리라 판단된다.

Fig. 6은 WC공구로 절삭된 칩의 형상을 보인 것이다. 80 m/min 이하의 낮은 절삭속도 영역에서는 칩의 curl 반경은 매우 작고 길이도 긴 연속성의 washer형이 배출되므로 원활한 칩 처리를 위해서는 insert에 물리적인 chip breaker의 장치가 필요한 것으로 생각된다. 80 m/min 이상의 절삭속도 영역에서는 curl의 원수도 2~5권 정도로 칩의 처리가 쉬워졌으며 고속, 고이송에서는 절삭이 불가능하였다. 이러한 원인은 낮은 절삭속도에서는 주로 절삭날에 flank wear만 발생되고 절삭속도가 점차 증가하면 공구의 경사면에 crater wear가 발생하여 칩의 곡률반경을 증가시키고 crater가 chip breaker 역할을 하여 불연속성의 칩을 생성했으리라 판단된다. 또 경도와 고온 강도가 작아서 180 m/min의 절삭속도와 0.14 mm/rev의 이송에서는 공구의 마멸과 파손이 극심하여 절삭이 불가능하였다.

Fig. 7은 CBN 공구로 절삭된 칩의 형상이다. 이송이 0.14 mm/rev에서는 절삭속도에 관계없이 연속성의 rib-

형으로 배출됐는데 이는 이송이 증가되더라도 CBN 공구는 고온경도가 높아 마멸이 상대적으로 작으므로 절삭비(cutting ratio)가 감소하기 때문이라 생각된다. 한편 40 m/min의 절삭속도와 0.06 mm/rev의 이송에서는 element형의 비산성이 강한 불연속성 칩이 배출되었는데 이는 공구와 피삭재 사이에 상대운동이 너무 느리기 때문에 미찰에 의하여 가공면의 표면에 가공경화가 발생하고 공구가 가공경화층의 표면에서 rubbing현상을 발생시킨 것으로 생각된다.

또 공구재종에 관계없이 배출된 칩의 현미경 관찰에 의하면 칩의 폭방향 양쪽 끝에 Fig. 8에서 보는 것처럼 침상형(針狀形)의 균열 또는 톱니형(saw toothed type) 모양이 현저하게 나타났다. 절삭가공에서 공구의 선단 앞 부분에 있는 피삭재의 자유표면(free surface)은 tool tip이 진행함에 따라 주기적으로 새로운 crack을 형성하며 tool tip부의 shear stress가 높고 normal stress가 매우 낮을 때 전단파괴가 발생하여 칩을 생성하게 되므로 전단면에서 나타나는 microcrack은 tool tip에서 확장되어 높은 압축응력에 의해 파단[Fig. 9(a)]되고 공구 경사면 위에서의 2차형을 가져와 칩의 모양에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 이러한 해석은 Fig. 9(b)에서 보는 것처럼 crack이 A에서 B로 전진함에 따라 공구의 앞쪽에 있는

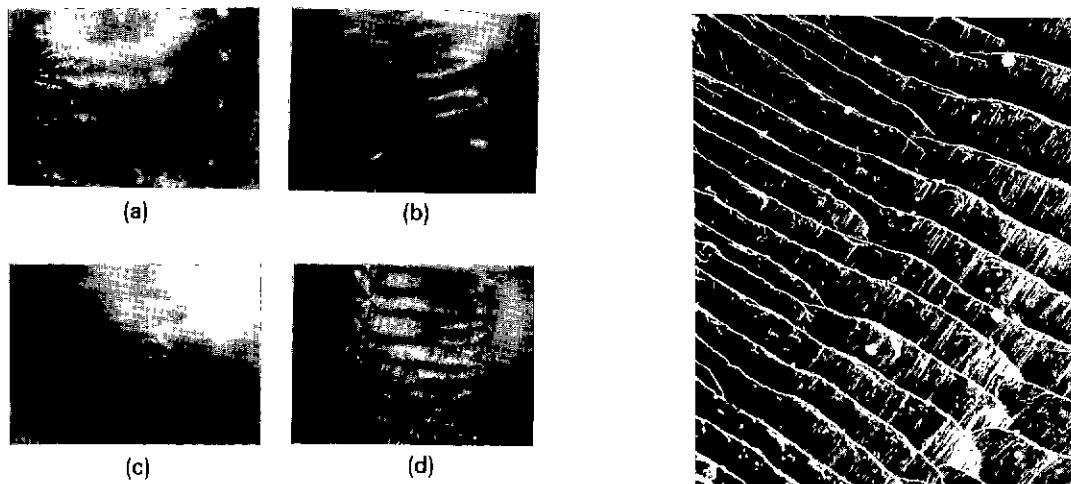


Fig. 8. Microphotographs of saw toothed chip produced when machining STD11 steel by (a) Al_2O_3 and (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, (c) WC, (d) CBN cutting tool ($V = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.14 \text{ mm/rev}$, $d = 0.2 \text{ mm}$).

파삭재는 해칭구역 1에서 해칭구역 2로 밀려나며 이것은 파단면 CJ를 바깥쪽 EFGD로 밀어내는데 AB, DG 및 AH를 따라 마찰저항을 받으며 미끄러지지만 변형을 일으키지는 않는다. 파단면에서 전체 미끄럼거리가 자유표면에서 파괴를 가져올 수 있도록 충분히 클 때 새로운 파단면이 발생되며 점선으로 나타낸 자유표면 A'B'는 파삭재가 homogeneous한 경우에 그 다음의 파단면이 될 것이다.

이와같이 고경도강 절삭에서 공구의 절삭능력보다 비교적 높은 절삭속도로 절삭할 때 tool tip에서 주기적으로 일어나는 전단파단면에 의해 saw toothed chip이 발생하는 것으로 생각된다.

3.2. 가공면의 표면 거칠기

Fig. 10과 Fig. 11은 가공면의 표면을 축방향으로 측정한 거칠기를 절삭속도와 이송의 변화에 대하여 각각 도시한 것이다. 일반적인 절삭가공에서는 절삭속도가 증가하고 이송이 작을수록 가공면의 거칠기는 향상되는 것으로 연구⁷⁾됐으나 본 실험에서는 절삭속도와 이송을 증가시키면 표면거칠기는 점차 악화되는 것으로 나타났다. CBN과 Al_2O_3 보다도 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 와 WC공구가 더욱 불량하게 나타났는데 그 이유는 공구재의 파손 특성 때문인 것으로 고경도강 절삭에서는 절삭저항에서 배분력이 크게 작용하여 공구 마멸도 mild steel을 절삭할 때에 비하여 심하게 발생되지만 CBN과 Al_2O_3 세라믹 공구는

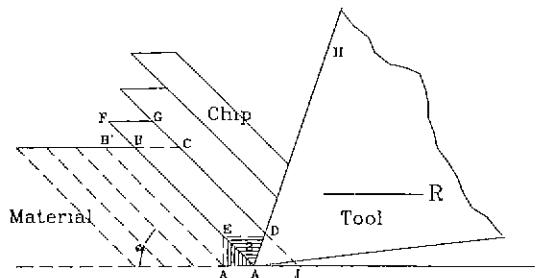


Fig. 9. (a) SEM micrograph of partially formed discontinuous chip.
(b) Diagrammatic representation of (a).

ank wear가 서서히 완만하게 진행되는 반면 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 세라믹과 WC공구는 초기 마멸후 절삭날의 일부가 탈락되는 현상을 가져오고 손상된 절삭날의 형상이 높은 열을 받아 생성되는 침과 가공면의 표면에 그대로 전사되어 표면 거칠기를 악화시키는 것으로 생각된다. 공구 선단의 앞쪽에 균열이 발생되면서 절삭된 파삭재가 공구의 전방 경사면에 접착되어 그면을 따라서 급속히 유동되지 않아 이를 통하여 점점 인선에 접적되어 공구 선단의 경사면 상방향으로 sliding이 잘되지 않아 균열의 방향은 파삭재의 경도가 높기 때문에 인선부보다 전방향으로 향하며 동시에 수평보다도 하부방향으로 향하게 될 것이다. 따라서 공구 선단이 비교적 빠른 속도로 전진방향으로 진행함에 따라 절삭면에는 pluck off의 혼적을 남기어 가공면의 거칠기가 악화되는 것으로 사료된다. 경도가 높은 소재를 보통의 절삭속도 이상에서 가공했을 때

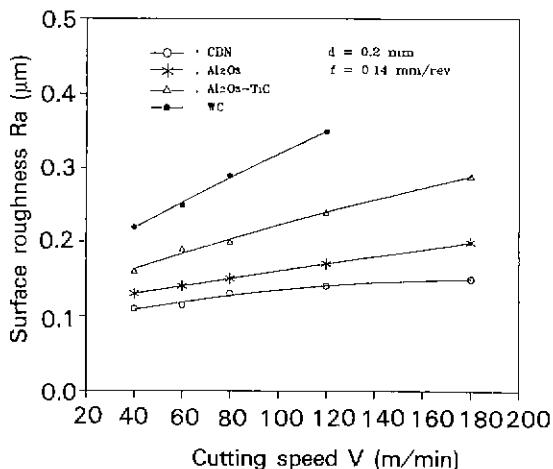


Fig. 10. Relationships between cutting tool materials and cutting speed on surface roughness

공구 경사면에 침에 의한 유동층을 형성하며 플랭크마열에 의하여 침과 공구 사이의 접촉면적 이 클수록 높은 온도를 야기시켜서 경사면에 cartor wear의 가능성을 증가시키는데 경도 및 고온 절삭에서 화학적 안정성이 높은 CBN과 세라믹 공구가 고경도강 절삭에 WC공구보다도 거칠기에 미치는 영향이 양호한 것으로 판단된다.

4. 결 론

세라믹 공구(Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$)를 사용하여 합금공구강 STD11($H_{RC} 60$)을 선삭하여 이때 배출된 침의 형상과 가공면의 표면 거칠기를 고찰하고, CBN 및 WC공구에 의하여 배출된 것과 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 세라믹 공구에 의하여 배출된 침은 conical-helical과 arc형이었으며 CBN과 WC공구에 의한 침은 각각 washer와 ribbon형으로 나타났다.
2) 세라믹 공구는 50 mm 이하의 비교적 처리하기 쉬운 불연속성 침을 배출한 반면 CBN, WC공구는 연속성이 강한 침을 배출하므로 침 처리성의 개선을 위해서는 CBN과 WC의 insert에 물리적인 chip breaker의 설치가 필요하다.

3) 고경도강의 절삭에서 배출된 침의 폭방향 양끝에는 침상 또는 톱니형 형상일 현저하게 나타났으며 침 배출

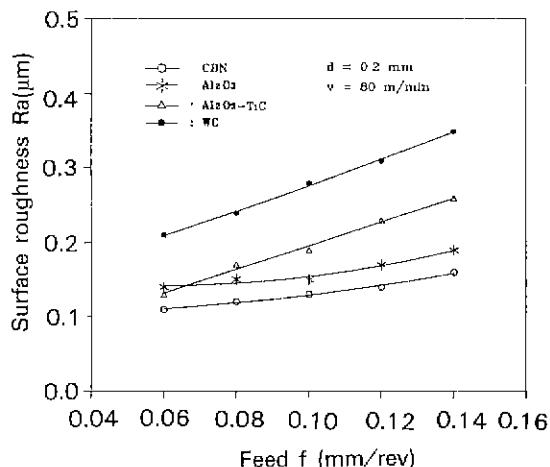


Fig. 11. Relationships between cutting tool materials and feed on surface roughness.

에는 Al_2O_3 세라믹 공구가 가장 우수하게 작용하였다.

4) 가공면의 표면 거칠기에 미치는 절삭조건의 영향은 이송이 절삭속도보다 더 컸으며 이송과 절삭속도를 증가시킬 수록 공구 재생에 관계없이 거칠기를 악화시켰다.

REFERENCES

1. "Engineering Applications of Ceramic Materials," American Society for Metals, Series 21, 147-202 (1985).
2. T. Ohtani, K. Fujise and H. Yokogawa, "Cutting Force Characteristics in Finnish Machining of Hardened Steel," JSPE-54-10, 1969-74 (1988).
3. R. Porat, Y. Bruhis, and D. Moskowitz, "Ceramic Cutting Tool Material for Machining Application," Proceedings of P/M & Particulate Materials, Vol. 8, 141-158 (1992).
4. M.C. Show and A. Vyas, "Chip Formation in the Machining of Hardened Steel," Annals of the CIRP, Vol. 42/1, 29-33 (1993).
5. K. Oishi, "Early Fracture of Ceramic Tools in Turning of Hardened Steel," JSPE-58-02, 295-300 (1992).
6. N. Narutaki and Y. Yamane, "High-Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools," Annals of the CIRP, Vol. 42/1, 103-106 (1993).
7. H. Takeyama, T. Ono and K. Miyasaka, "Study on surface Roughness in Turning," JSPE-30-10, 652-658 (1967).