

열처리한 합금공구강의 절삭에서 공구파손의 특성

노삼래* · 안상욱**

*인하대학교 대학원 기계공학과

**인하대학교 공과대학 기계공학과

Fracture Characteristics of Cutting Tools in Machining of Hardened Alloy Steel.

S. L. NOH* · S. O. AN**

*Graduate school, In Ha University

**Dep't of Mechanical Engineering, In Ha Uni.

ABSTRACT

The fracture characteristics and tool life of ceramics and WC, CBN cutting tool when turning heat treated steel STD11(H_RC 60) were investigated experimentally to clarify the machinability and optimum tool materials in cutting of difficult-to-cut material with high hardness. Furthermore, the behaviors of the tool wear and failure were examined with regard to cutting force. The hardened steel wore the cutting tool edge rapidly and increased the cutting forces, especially radial force. The tool was worn by the abrasive action. Flank Wear of Al₂O₃-TiC ceramic and WC tool become relatively large and CBN & Al₂O₃ ceramic tool had a long life among the tool materials tested. The tool fracture patterns were just like minor cutting wear, flank wear, crater wear, notch wear, chipping. Flank wear rate was accelerated by occurrence of chipping. During the proceeding of machining, it was possible to foresee the catastrophic fracture of tool by abrupt increase of radial force.

1. 서 론

기계산업에서 용력을 많이 받는 부품들은 강도와 내마모성을 향상시킬 목적으로 열처리하여 절삭가공을 해야만 하는 경우가 날로 증가하고 있다. 피삭재의 경도가 H_RC 50 이상이 되면 일반적인 절삭 공구와 가공기술로써는 고정밀가공이 불가능한 난삭재(Difficult-to-cut material)로 분류되며 고경도강 절삭에서 절삭 중에 공구의 파손에 대한 현상 파악은 매우 중요하게

여겨지고 있다. 특히 프레스 금형에서 극심한 마모저항을 받는 펀치(Punch)와 다이(Die)는 경화성능이 우수한 냉간금형용 합금공구강을 열처리한 후 절삭가공으로 부품이 완성 가공되고 있으며, 이에 대한 적절한 공구수명의 확립은 고능률, 고정도가공에 필수적 과제이다.

최근 CNC기계의 사용이 날로 증가되고 있고 무인 가공시스템 설치에 대한 관심이 고조되는 가운데 가공 중 공구의 파괴가 생산성에 중요한 문제로 제기되고

있기 때문에 이를 극복하기 위한 노력이 각 분야에서 진행되고 있다.

지금까지 이에 대한 연구는 1960년대부터 시작되어 Tanaka가 mild steel을 절삭할 때에 발생하는 공구 마모에 대한 연구¹⁾를 했으며 열처리된 고경도강에 대하여는 Narudaki가 SK3, SKH9를 CBN공구로 절삭 실험하여 마모를 관찰²⁾하였다. 또 Ohtani는 고경도강을 세라믹 공구로 절삭할 때 절삭 저항의 특성을 실험³⁾했으며, 난삭재에 대해서는 Masuda⁴⁾, Enomoto⁵⁾ 등이 세라믹과 CBN 공구를 이용하여 공구 수명과 절삭 특성에 관하여 연구하였다. Inconel 718에 대해서도 최근에 부분적으로 실험이 이루어지고 있으나^{6, 7)} 아직 현실에 적용하기에는 미진한 부분이 적지않다.

따라서 본 연구에서는 프레스 금형용 재료로 많이 이용되고 있는 합금공구강 STD11을 경화처리(H_RC 60)하여 WC(Tungsten carbide), Ceramics, CBN(Cubic boron nitride) 공구로 절삭 실험하여 공구의 파손 특성에 대하여 규명하고 절삭조건에 따른 공구 수명을 찾고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치와 시험편

본 실험에서는 시험편을 열처리하기 위하여 Salt bath(England, wild barfield)와 Vacuum furnace를 이용하였으며 절삭가공을 위해서는 CNC선반(Dae-woo, pro6, 300×500)을 사용하였고 절삭력 측정에는 Tool dynamometer(Kyowa electronic instruments co. Ltd., F_T500kgf, F_T300kgf, F_R200kgf)와 Dynamic strain amplifier, Multi oscillograph 등을 이용하였다. 또 공구 마멸과 파손에 대한 관찰은 Tool maker microscope(Titan optical co., TM-10), Optical profile projector(Rank precision, 14"), 금속현미경(Seiwa optical co.) 등을 사용하였다. 그 외에 Digital dial gauge(1/1000), micrometer 등의 측정기기를 사용하였다.

시험편은 프레스 금형재 중에서 경화성능이 우수한 합금 공구강 STD11을 $\phi 50 \times 200\text{mm}$ 로 예비 선삭가공하여 열처리하였다. 열처리 조건은 Fig.1에서 보는 바와 같이 Salt bath에서 1030°C로 가열하여 2시간 유지한 후 유냉시켜서 Quenching한 다음 다시 Vacuum fur-

nace 속에서 180°C로 가열하여 2시간 유지한 후 공냉처리를 2회 반복하여 Tempering하였다. 열처리한 시험편의 경도는 H_RC60이었으며 Spectrometer를 이용하여 분석한 시험편의 화학적 성분은 Table.1과 같다.

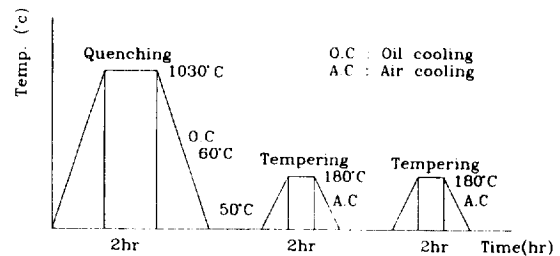


Fig. 1 Cycle for heat treatment of STD11 steel

Table 1. Chemical compositions of specimen(wt.%)

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

2.2 절삭 실험 및 측정

절삭 실험은 시험편을 선반의 척(Chuck)에 견고히 물리고 ISO규격에 의한 PSBNR 2525 M12의 홀더에 SNMA 120408형의 WC(P20), CBN, Ceramics(Al₂O₃ Al₂O₃-TiC)의 Throw-away insert를 매 절삭시마다 교환하여 가며 Table.2의 절삭 조건을 적용하며 절삭을 행하였다. 절삭시에는 Tool dynamometer에 연결된 Amplifier를 통해 Oscillogram에 절삭력을 기록하여 주분력, 이송분력, 배분력을 측정하였으며, 매 실험시마다 사용된 Insert는 Tool maker microscope

Table 2. Cutting conditions

Cutting speed V(m/min)	Feed f(mm/rev)	Depth of cut d(mm)	coolant
40	0.06	0.1	none
60	0.08	0.2	
80	0.10	0.3	
120	0.12	0.4	
180	0.14	0.5	
		0.6	

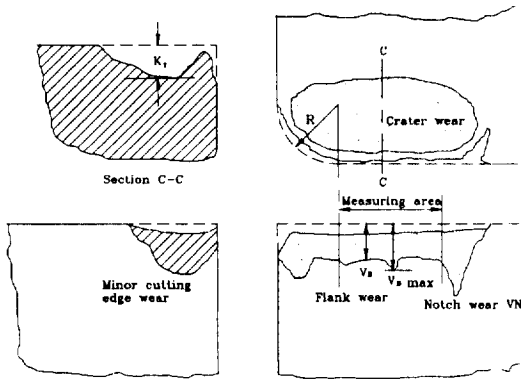


Fig. 2 Schematic diagram of cutting tool wear.

(X40)와 Optical profile projector를 이용하여 공구 마멸과 공구 파손을 관찰하며 촬영하였고 이때 배출되는 칩(Chip)은 금속 현미경으로 관찰하였다. 공구의 프랭크 마모(Flank wear)는 마멸폭 V_B 가 ISO의 공구 수명 판정기준 0.3mm에 이르렀을 때를 수명의 한계로 하여 반복 실험하였다. 열응력에 의한 질삭날에 칩핑(Chipping)과 인선의 노화에 의한 갑작스런 파손 등은 질삭력과 가공면의 거칠기 등이 급변할 때 가공을 중지하고 이에 대한 변동특성 등을 고찰하였다.

매 질삭이 끝난 다음에는 피삭재 가공면의 가공경화층과 편심을 제거하기 위하여 0.05mm 질삭 깊이로 CBN공구를 사용하여 전 질삭을 수행하였다. 실험값에 대한 자료화는 내마모성 실험을 3회 반복하여 평균값을 채택하였다. 내칩핑성은 3회 행하여 중간값을 채택했지만 3회값의 편차가 심할 때에는 5회 행하여 중간값을 기준하였다. 공구 마모에 대한 형태는 Fig. 2와 같이 프랭크 마모 V_B , 측면 노치 마모(Notch wear) VN, 선단 마모(Minor cutting edge wear) 등을 조사하였고, 경사면의 크레이터 마모(Crater wear) K_r 는 정량적인 측정을 하여 사진으로부터 정성적인 관찰을 행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1 질삭 저항

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 각각 질삭 속도와 이송 및 질삭 깊이의 변화에 대한 배분력의 관계를 나타낸 것

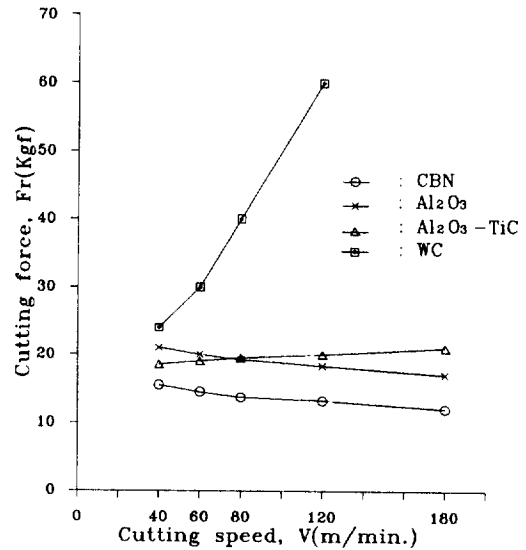


Fig. 3 Relation between Radial cutting force and cutting speed
($f=0.1\text{mm/rev}$, $d=0.2\text{mm}$)

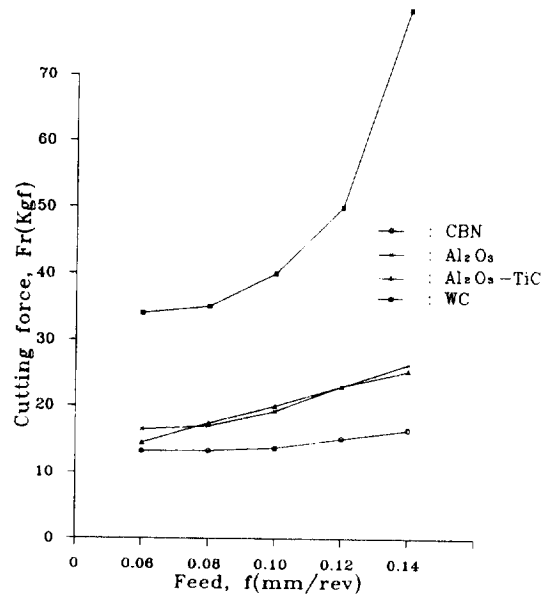


Fig. 4 Relation between Radial cutting force and feed.
($V=80\text{m/min}$, $d=0.2\text{mm}$)

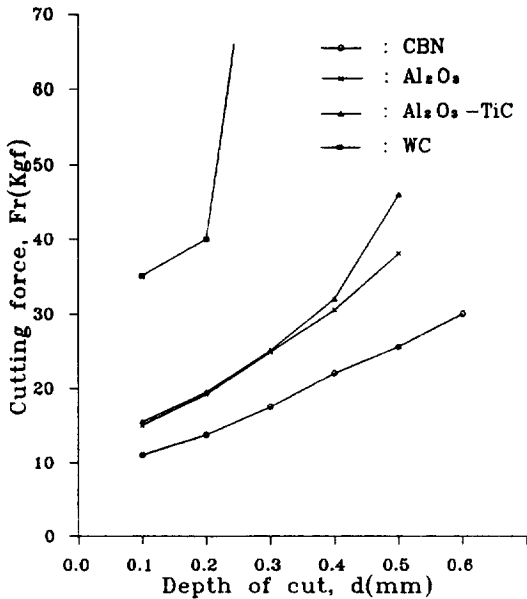


Fig. 5 Relation between radial cutting force and depth of cut.
($V=80\text{m/min}$, $f=0.1\text{mm/rev}$)

이다. 일반적으로 mild steel의 절삭에서는 절삭 저항 중에서 주분력이 가장 크고 이송분력, 배분력의 순으로 작게 나타나는 것이 지금까지의 연구결과이지만 본 고경도강 절삭 실험에서의 절삭 저항은 주분력보다 배분력이 더 크게 나타났다. 배분력은 공구의 프랭크 마모의 진행과 더불어 증가하며, 이는 전면 경사면에 브레이킹(Breaking) 손상이 배분력의 증대에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 3에서 절삭 속도의 증가에 따라 CBN, Al₂O₃ 세라믹 공구 사용시의 절삭력은 약간 감소하는 경향이 있지만 Al₂O₃-TiC 세라믹과 WC 공구에 의한 절삭력은 반대로 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 WC 공구에 의한 절삭력이 급증하여 절삭 속도 120m/min 이상의 영역에서는 절삭이 불가능하였다. Fig. 4에서 절삭력은 이송의 증가에 따라 증가하지만 공구 소재별 영향은 CBN과 세라믹 공구가 서서히 증가하는 반면 WC 공구는 급격히 증가되어 이송의 변화에 대단히 민감한 것으로 나타났다. Fig. 5에서는 절삭 깊이의 증대에 따라 절삭력이 크게 증가하며 WC 공구가 0.2mm 이상의 절삭 깊이 이상에서는 공구의 파손이 심하여 절삭이 불가능한 것으로 나타났다. WC 공구는

프랭크 마모 외에도 공구의 경사면에 크레이터 마모 (Crater wear)가 발생되어 어느정도 마모가 진행되면 갑작스런 전파손이 일어나 단시간에 공구를 절삭 불가능의 상태로 만들기 때문이다. 이상과 같이 절삭 조건의 변화에 대한 절삭력에 미치는 공구재의 영향은 CBN, Al₂O₃ 세라믹, Al₂O₃-TiC 세라믹, WC의 공구 순으로 민감하게 나타났는데 고경도강 절삭에서 절삭 속도보다는 이송이, 이송보다는 절삭 깊이의 증가가 절삭 저항의 증가에 미치는 영향이 크게 나타나므로 고경도 절삭은 이송과 절삭 깊이를 먼저 선정한 다음 절삭속도를 변화시켜서 고능률 절삭을 위한 최적조건을 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.2 공구 마모

Fig. 6은 절삭 깊이와 이송을 일정하게 유지시키고 절삭 시간이 15분에 달할 때까지 절삭 속도를 변화시키며 각 공구별로 절삭한 절삭날의 마멸형태를 나타낸 것이다. 절삭 속도가 낮은 60m/min에서는 공구의 마모가 크지 않아 절삭날이 비교적 예리하게 보존되었다. 80m/min의 절삭속도에서는 WC와 Al₂O₃-TiC 공구의 마모 및 Chipping이 두드러지게 나타났는데 이는 절삭 초기부터 절삭날에 Flank wear가 진행되고 곧이어 Chip이 공구에 용착됨으로써 Chipping이 발생되어 절삭날에 큰 파손이 수반되며, Built-up edge 현상은 모든 공구에 다 발생되지만 특히 WC 공구에는 심하고 Al₂O₃-TiC 공구는 취성이 높아 쉽게 Chipping이 발생되기 때문이라 생각된다. 절삭속도 120m/min 영역에서 WC와 Al₂O₃-TiC 세라믹 공구는 프랭크면에 마멸이 극심하여 절삭이 불가능한 시점에 이르렀고 Al₂O₃ 공구도 마모가 상당히 진전되어 있다. Al₂O₃ 공구의 경도가 Al₂O₃-TiC 공구보다도 낮지만 고속 영역에서의 내마모성은 더 우수하게 나타났는데 TiC의 첨가는 경도를 높이지만 결합체의 결합성 및 Abrasive 등에 의한 첨가물의 노화와 탈락이 심하여 마모가 빠른 것으로 생각된다.

절삭 속도 180m/min의 영역에서는 CBN 공구를 제외한 WC와 세라믹 공구의 프랭크 마모와 절삭날의 결손이 공구의 수명 한계를 넘어섰으며 CBN 공구도 프랭크 마멸이 상당히 진전되었다. 내파손성은 공구의 인장강도, 항절력 및 파괴인성 등에 의존하는 것으로

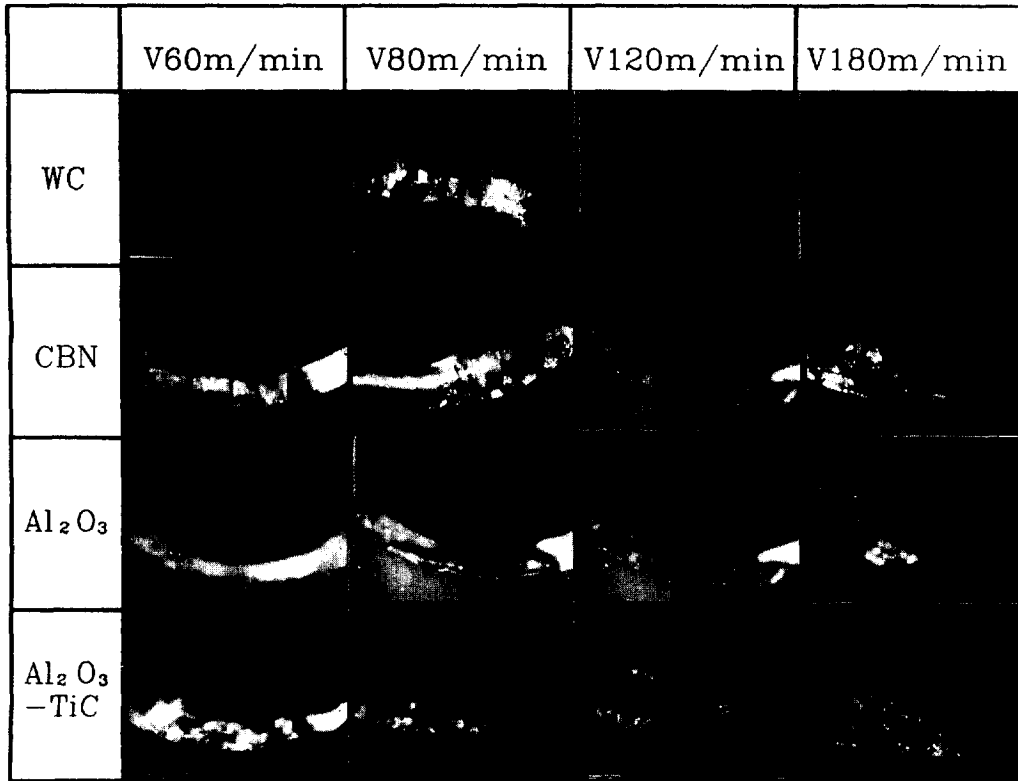


Fig. 6 Microphotographs for wear pattern of tested cutting tools in various cutting speed
($d=0.2\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/rev}$, $T=15\text{min}$)

생각되지만 WC 공구는 세라믹과 CBN에 비하여 절삭 속도가 증가하면 절삭 저항이 크게 증가하고 마모가 극심한 이유는 WC의 항절력이 기타 공구보다 대단히 크기 때문이라 추측된다.

3.3 공구 파손 형태

Fig. 7은 고경도강 절삭에서 발생된 대표적인 공구의 파손을 나타낸 것이다. 파손의 형태는 선단 마모(Minor cutting edge wear), 프랭크 마모(Flank wear), 크레이터 마모(Crater wear), 노치 마모(Notch wear), 칩핑(Chipping) 등 다양하게 나타났다.

절삭 초기에는 Flank wear가 발생되고 절삭시간의 경과에 따라 절삭날의 선단부는 기계적, 화학적, 열적인 요인 때문에 점진적으로 손실되고 피로가 누적되어 절삭날의 정상손상이 이루어졌으며, 프랭크 마모 발생에는 절삭열이 관여되지만 공구 프랭크면과 피가공면

의 마찰현상이 마모의 주원인이라 생각된다. Crater wear는 WC 공구에서만 발생됐는데 절삭 속도가 높아지면 절삭 온도가 상승하고 전 절삭날의 산화 마모와 공구 경사면의 확산 마모가 발달되어 발생한다. 절삭 깊이와 이송이 클 때는 절삭날의 선단에서 절삭 깊이 만큼 떨어진 경계부위에 노치 마모가 심하게 나타났다으며 CBN 공구에서 쉽게 볼 수 있고 원인은 피삭재의 표면에 가공 경화가 발생되어 내부보다 더 경도가 높아져 피삭재의 표면에 접하는 공구의 경계부위에 마모가 이루어지는 것으로 사료된다.

주목되는 파손시의 현상은 파손은 절삭 개시 때와 절삭 도중에도 일어나지만 발생빈도가 작고 공구가 피삭재로부터 이탈되는 순간에 더 크게 발생한다. 특히 세라믹 공구가 피삭재로부터 격리되는 순간에 큰 파손이 일어났는데 세라믹 공구는 높은 압축강도를 받고 절삭 도중에는 높은 압축응력에도 견디지만 피삭재로

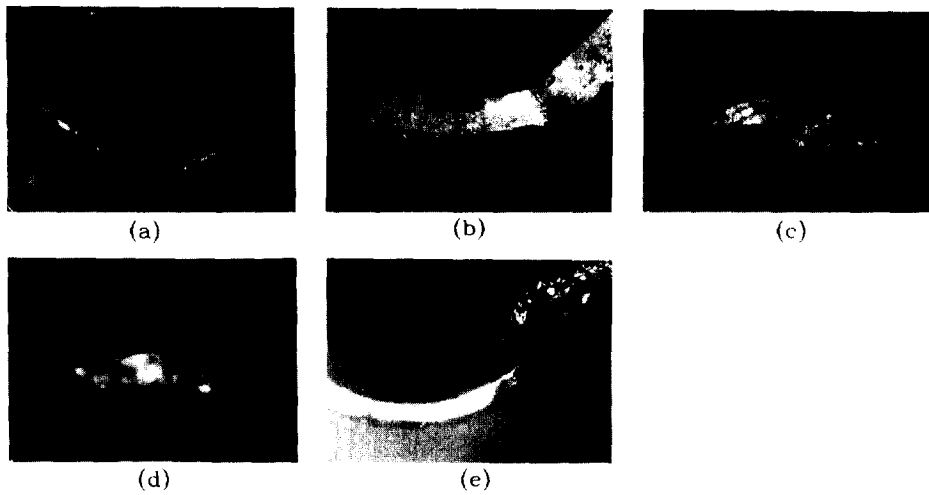


Fig. 7 Typical fracture patterns of cutting tool occurred in machining hardened steel STd11.
 (a) Minor cutting edge wear(WC) (b) Flank wear(Al_2O_3) (c) Chipping (Al_2O_3 -TiC)
 (d) Crater wear(WC) (e) Notch wear(CBN)

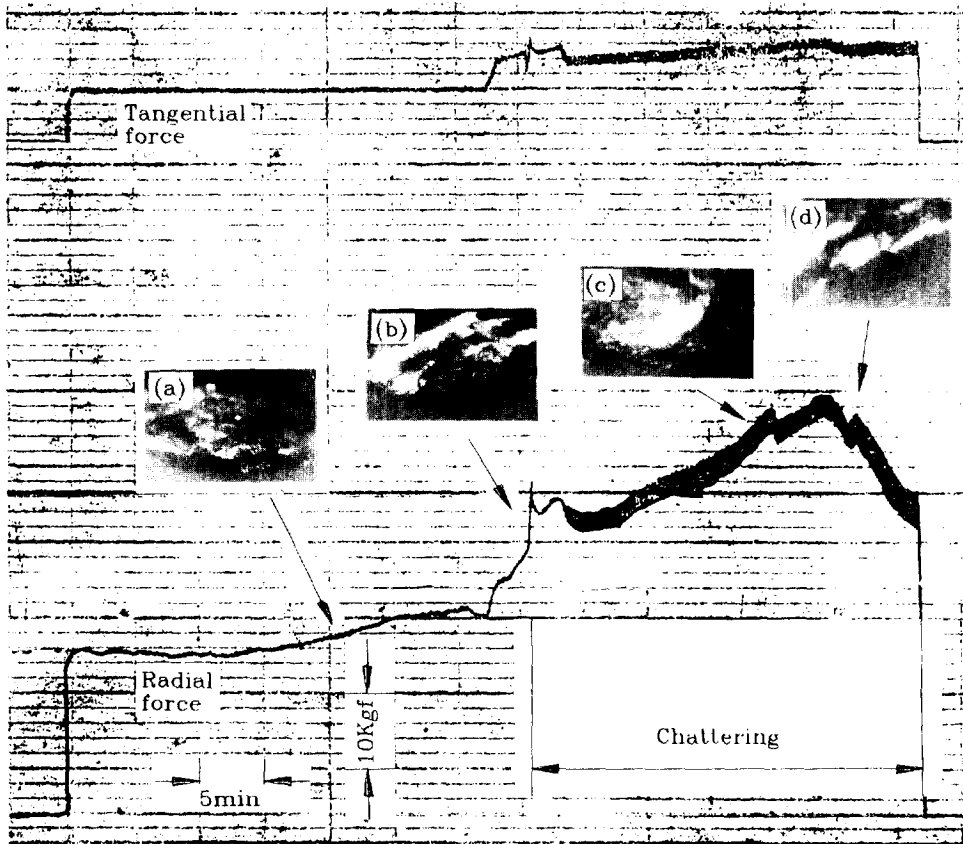


Fig. 8 Patterns of cutting tool fracture in accordance with variation of cutting force.
 ($V=80m/min$, $d=0.2mm$, $f=0.12mm/rev$, Tool= Al_2O_3)
 (a) Flank wear, (b) Chipping, (c) Chipping & Notch wear (d) Catastrophic fracture

부터 격리되는 순간에 압축응력이 제거되고 그로 말미암아 발생하는 인장응력과 동시에 공구 표면이 급냉되며 새로 발생하는 열응력이 상승되어 파손이 일어나는 것으로 생각된다.

3. 4 절삭력과 공구 파손

Fig. 8은 절삭력의 변화와 이에 따른 공구 파손과의 관계를 나타낸 것이다. 절삭 개시후 초기에 공구의 Flank wear가 서서히 진행되면서 절삭력은 안정되지만 어느 정도 시간이 경과되어 마멸량도 커지고 절삭력이 급증하게 된다. 이후 절삭날에 칩의 응착과 탈락으로 1차 결손(Chipping)이 발생하며 이 때 절삭력은 급격한 수직 상승을 나타냈다. 배분력의 크기는 공구의 마모면적에 비례하여 증가하지만 Chipping이 발생되면 프랭크면의 마모면적은 절삭날이 탈락한 만큼 감소되므로 일시적으로 배분력은 감소한 후 정상 마모와 이상 마모인 Chipping과 Notch wear가 발생되면서 배분력은 다시 증가되며 절삭중에 Chattering 현상이 발생되어 가공면의 표면 거칠기에도 악영향을 미치어 가공이 어렵게 되었다. 곧 이어 2차 브레이킹 손상이 발생되면서 순식간에 공구는 절삭이 불가능한 상태로 되며 배분력은 급강하하였다. 이상과 같이 공구의 결손 직전에는 절삭력이 급변하게 되므로 절삭중에 정상 마모 구간에서 배분력 변화의 급증을 절삭 동력계에서 검출하는 경우에 공구 파손 발생의 예측이 가능하였다.

4. 결 론

합금 공구강 STD 11을 열처리하여 경도를 $H_{RC}60$ 으로 한 후 WC, 세라믹, CBN의 절삭 공구로 선삭하여 이때 발생하는 공구의 파손과 공구 수명을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고경도강 절삭 실험에서 절삭 저항은 배분력이 가장 크게 작용하였으며, 절삭 조건중 절삭력에 미치는 영향은 절삭 깊이가 가장 컸고 이송과 절삭 속도순으로 작게 미쳤다.

2) 공구 마모는 Abrasive 작용에 의해 주로 발생되고 WC 공구와 Al_2O_3 -TiC 세라믹 공구가 CBN 및 Al_2O_3 세라믹 공구에 비하여 마모가 극심했다.

3) 절삭중에 공구 파손의 형태는 선단 마모, 프랭크

마모, 크레이터 마모, 노치 마모, 칩핑 등 복합적으로 나타났다.

4) 절삭력 변화에 의한 공구 파손은 정상마모 진행중에 배분력이 급증하면서 발생되기 때문에 배분력 변화의 급증을 절삭 동력계에서 검출한다면 공구 파손 발생의 예측이 가능하다.

5) 절삭 속도의 변화가 공구 수명에 미치는 영향은 WC 공구가 세라믹 공구보다 민감하고, 세라믹 공구는 CBN 공구보다 더 민감하게 나타났다.

후 기

본 연구는 현대연구비 지원에 의하여 이루어진 것이다.

참 고 문 헌

1. Y. Tanaka, H. Tsuwa, M. Kitano, "Study on High Speed Cutting-Tool wear in mild steel cutting-," Bull Japan, Soc. of Precision Engineering, Vol.32/4, pp.34-40 (1966)
2. N. Narudaki, Y. Yamane, M. Takeuchi, "Wear of CBN Cutting Tools," Bull Japan, Soc. of Precision Engineering, Vol.45/2, pp.81-87 (1979)
3. T. Ohtani, K. Fujise, H. Yokogawa, "Cutting Force Characteristics in Finish Machining of Hardened Steel," JSPE-54-10, pp.141-146 (1988)
4. M. Masuda, Y. Kuroshima, S. Manabe, "Machinability of Sintered Carbon," JSPE-53-12, pp.114-120(1987)
5. S. Enomoto, M. Kato, "Cutting Characteristics of CBN Cutting Tools in Turning," JSPE-55-06, pp.119-124 (1989)
6. K. Shintani, H. Kato, T. Maeda, Y. Fujimara, A. Yamamoto, "Cutting Performance of CBN Tool in Machining of Nickel Based Superalloy," JSPE-58-10, pp.63-68 (1992)
7. Y. Yamane, N. Amano, K. Hayashi, N. Naudaki, "High Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools," JSPE-59-11, pp.65-70 (1993)