

단속 하드터닝에 관한 연구 (I) : 절삭성과 CBN공구의 마모특성

전준용*, 고테조**, 김희술**

Research on the Intermittent Hard Turning (I) : Machinability and Characteristic of CBN Tools

Jun Yong Jeon*, Tae Jo Ko**, Hee Sool Kim**

ABSTRACT

Hard turning offers many possible benefits over grinding such as lower equipment costs, shorter setup time, reduced process steps and better surface integrity. Despite the amount of research in this area, there exists no data on the intermittent hard turning.

The objective of this paper is to investigate the effect of CBN tool materials and machinability to an intermittent hard turning. To this end, different CBN materials were tested to evaluate the tool wear and surface roughness in an intermittent hard turning. It is found that low-CBN-content tool is better than high-CBN-content tool. Then, we discussed a cutting force, vibration, and CBN tool wear mechanism from the hard turning.

Key Words : Hard Turning(경화선삭), CBN Tool(입방질화붕소 절삭공구), Tool wear(공구마모), Surface roughness(표면조도), Cutting force(절삭력)

1. 서론

최근 꾸준한 공구재료의 개발과 자동화 동작기계의 발전으로 절삭가공 분야에 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있다. 이러한 요구에 따라서 최근에 하드터닝에 대한 요구가 증대되고 있는데, 하드터닝은 재료의 경도가 H_RC 60정도로 경화된 강을 CBN이나 PCD공구를 이용하여 선삭공정으로 다듬질가공을 하는 경제적인 가공법이다.^[1]

부시, 베어링, 기어, 샤프트, 커넥팅로드 등과 같은 고경도강으로된 정밀부품을 가공하기 위해 종래

에는 경화 열처리를 하기 전에 선삭을 하고, 열처리 후 연삭과정을 거쳐 다듬질 가공이 이루어졌다. 따라서 이 가공법은 각 공정마다 다른 동작기계를 이용하므로서 가공 순서가 복잡하고 제조원가 측면에서 경쟁력이 없다. 그러나 연삭공정을 하드터닝으로 대체함으로써 다음과 같은 장점을 가질 수 있다. 첫째는 비용적인 측면에서 공정의 단축으로 셋업시간을 줄이고 연삭에 비해 소재 제거율을 60% 정도 향상시켜 생산성 향상과 생산비용을 절감할 수 있다.^{[1][2]} 둘째는 복잡한 형상의 부품이라도 CNC 프로그래밍으로 보다 쉽고 유연성 있게 제품

* 한국OSG(주) 기술연구소

** 영남대학교 기계공학부

을 생산하므로 총형 연삭이 필요 없이 요구되는 형상 정밀도를 맞출 수 있다.^{[2][3]} 셋째는 표면품질 측면에서도 칩으로 대부분 열을 발산하여 연삭시와 같이 표면이 타는 현상이 없고, 공구인선이 가하는 소성력에 의해 가공 변질층에 잔류응력의 분포가 연삭에 비해 큰 압축응력을 받는 상태로 존재하기 때문에 부품의 피로수명을 향상시킨다.^{[4][5][6][7]} 상기와 같은 점을 고려할 때 고경도강의 다듬질 가공에 있어서 연삭가공을 건식 하드터닝으로 대체하려는 노력이 시도되고 있다.

이러한 노력중에서 Tonshoff와 Gue, Chou, König 등의 연구자에 의해 CBN 공구의 마모특성과 표면품질 고찰을 통해 연속 하드터닝의 실현 가능성이 제시되었다.^{[1][5][8][9]} 그러나 볼 부시처럼 내경에 단이 있는 고경도강의 단속 하드터닝에서는 아직 기술적 데이터가 미미한 상태이며, 연속 하드터닝과는 다른 관점에서 가공기술의 연구가 요구된다. 왜냐하면, 단속 하드터닝은 높은 절삭온도 뿐만 아니라 주기적인 단속 절삭력으로 인하여 공구의 수명과 절삭성이 현저히 감소된다. 이러한 이유 때문에 단속 하드터닝에서 충분히 견딜 수 있는 CBN 함유량을 가진 공구를 선정하고 이 선정된 공구로 가공 피삭재의 절삭성 즉, 공구마모, 절삭력 및 진동을 고찰하여 단속 하드터닝 기술의 가능성을 파악하고자 한다.

2. CBN 절삭공구의 특성

연속 하드터닝에서는 Al_2O_3 , TiC 공구로도 충분히 가공이 가능하나 단속 하드터닝의 경우는 파괴강도가 크며 화학적으로 안정된 CBN 공구는 필수적인 요소이다.^[6] 소결 CBN 공구는 1972년 미국의 GE사에서 개발되어 초기에는 초내열 합금 절삭용 공구로 주로 사용되어 왔으며, 점차 열처리된 고경도강의 절삭용으로 다양하게 쓰이면서 새로운 공구로서 중요한 위치를 차지하게 되었다. CBN은 붕소와 질소의 화합물을 초고압, 고온(2000 °C, 7만 기압)으로 소결한 공구로서 다이아몬드 다음의 경도를 지닌다.^[12] Fig.1에서와 같이 다이아몬드 공구는 철계재료의 가공시에 탄소의 확산(Diffusion)과 흑연화현상(Graphitization) 때문에 적합하지 않다. 그러나 CBN 공구는 고경도, 고열전도율, 저열팽창률의 장점을 갖고 있으며 철계재료와 화학반응이 없을 뿐만 아니라 열적 안정성도 매우 뛰어나서 고경

도로 열처리된 고탄소강, 금형강, 합금강의 가공에 우수한 성능을 발휘한다.

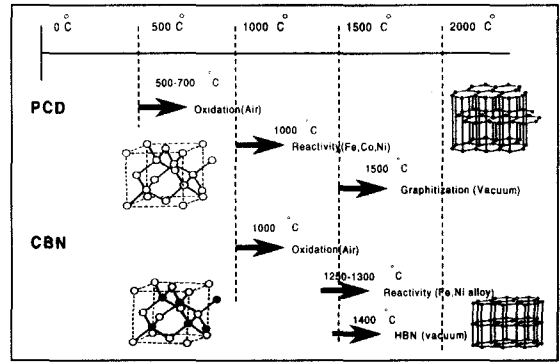


Fig. 1 Chemical reaction of PCD and CBN

Gue는 내치핑성 향상을 위한 공구 형상에 관한 실험적 연구에서 연속 하드터닝의 경우에 Chamfered CBN 공구는 노치 마모를 증가시켜 공구 수명을 상당히 감소시킴과 동시에 Sharp CBN 공구에 비하여 표면거칠기가 불리하다고 보고했다.^[5] 그러나 Masahiko는 단속 하드터닝에서 챔퍼각이 클수록 플랭크 마모는 작아지지만 표면거칠기는 나빠지는 경향을 나타낸다고 했다. 그리고 챔퍼폭을 0.04mm부터 0.15mm까지 변화 시켜도 공구마모에는 거의 영향을 미치지 않는다고 하였으며, 이때 내치핑성 향상을 위한 공구의 챔퍼 치수는 챔퍼각 30°와 폭 0.05-0.1mm가 가장 양호하다고 했다.^[10] 이상과 같은 연구 결과를 토대로 본 연구에서는 챔퍼각 30°, 챔퍼폭 0.1mm의 공구를 선택한 후, CBN의 함량에 따라서 단속절삭에 적합한 공구를 선정한다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 소재는 Fig.2와 같이 내경에 단이 있는 ball-bush로서 내부 홈을 인발가공으로 성형한 후 $H_R C60$ 으로 열처리된 SUJ2강이다. 열처리과정은 820 °C로 30분간 가열한 후 80 °C 오일에서 퀘칭을 하고 190 °C로 2시간 동안 템퍼링을 하였다. 이 소재의 원래 공정은 내부를 절삭가공한 후 담금열처리를 하고, 최종적으로 연삭가공을 한다. 이러한 공정의 부품을 단속 하드터닝을 함으로써 연삭공정 없이 열처리된 부품을 선삭하고

자 한다.

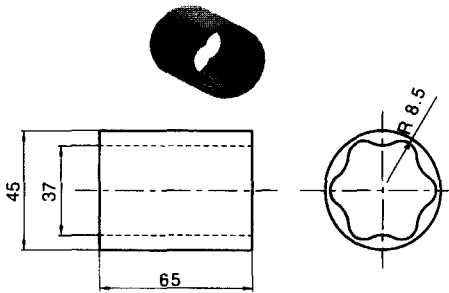


Fig. 2 Schematic diagram of ball-bush

사용된 공구 재종은 CBN 함유량이 다른 BN250(60% CBN+TiN), BNX4(70% CBN+TiN), BN100(80% CBN+TiN)인 스미토토사의 CBN공구를 사용하였으며, 이 공구의 노즈 반경은 0.8mm, 칩퍼 폭은 0.1mm, 칩퍼각은 30° 이다.

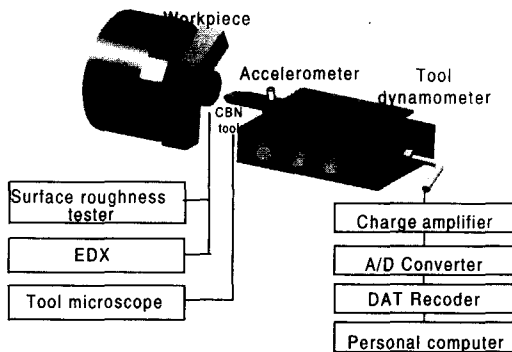


Fig. 3 Experimental setup

절삭실험은 CNC선반(대우중공업 Pro-6)에서 Fig.3과 같이 절삭실험을 하였으며, 절삭조건과 공구마모에 따른 절삭력의 변화는 내경 공구홀더(PCNLR2525)를 공구 동력계(KISTLER, 9257 type) 위에 장착하여 진하중폭기(KISTLER, 5019A type)에서 중폭 된 후 DAT 레코드(TEAC, RD-135T)에 저장하였다. 이 아날로그 데이터는 A/D변환기(DT2833 board)를 통해 IBM-PC에서 분석하였다.

공구수명은 칩핑이 인선의 결손을 가속시키고 공작물의 정밀도를 떨어지게 하기 때문에 칩핑이 발생하는 순간을 공구수명이 다한 것으로 간주하였다. 또한, 플랭크 마모는 공구 현미경(Mitutoyo TM301)을 통하여 ISO규정에 따라 인서트의 노우즈 반경부와 절입경계부의 1/4를 제외한 절입부의 플

랭크 마모 평균폭(VB)을 측정하였다. 동시에 표면조도 측정기(Mitutoyo, Surftest 301)를 이용하여 cutoff 길이 0.25mm로 임의 세 지점을 R_a 값으로 측정하였다. 그리고 CBN공구로 장시간 절삭할 경우 공구 마모의 메카니즘을 파악하기 위해 EDX분석을 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 단속 하트터닝에서 CBN함유량에 따른 공구 마모, 표면거칠기

Fig.4와 Fig.5는 CBN 함유량이 다른 3가지 공구에 대해 이송속도 0.1mm/rev, 절삭깊이 0.1mm로 일정하게 유지하고 절삭속도의 변화에 따른 공구마모와 표면거칠기의 변화를 나타낸 것이다.

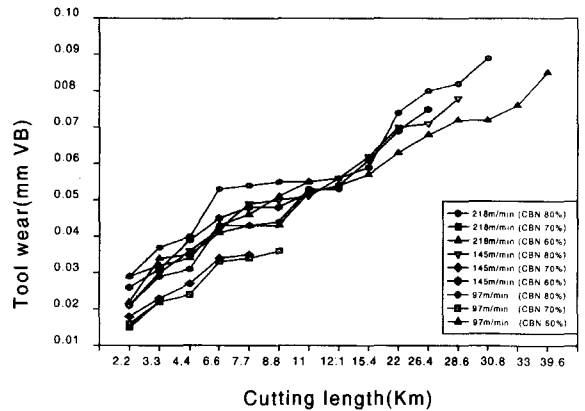


Fig. 4 Tool wear according to different CBN content

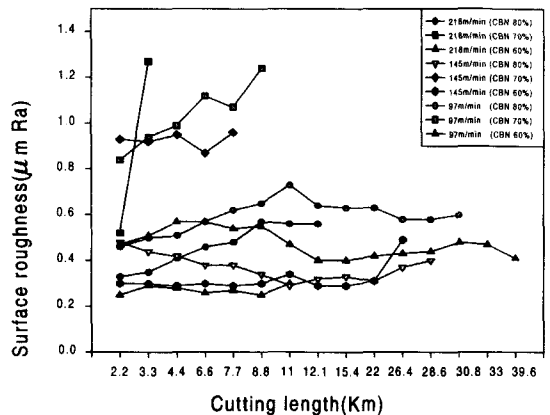


Fig. 5 Surface roughness according to different CBN content

본 실험에서 사용한 3가지 공구재종 모두 절삭 속도 218m/min에서는 초기 플랭크 마모의 진전은 별 차이가 없었으나 치핑이 두드러지게 빨리 나타났는데, 이는 고속절삭에 의한 절삭열의 증가와 단속 하드터닝에 의한 공작기계의 강성 부족으로 인한 진동이 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 특히, BN250(CBN60%)공구는 낮은 절삭속도에서 BN100(CBN80%)보다 우수하였으나 높은 절삭속도에서는 공구수명이 조금 짧았다. 이는 Chou의 연구 결과와 일치하였고, CBN이 고함유량인 경우 열전도율이 커서 열충격에 강하기 때문인 것으로 사료된다.^[8] 그러나 BNX4(CBN70%)는 다른 재종에 비해 공구수명과 표면거칠기가 현저히 떨어졌다. 80% CBN 공구는 60% CBN 공구보다 같은 절삭조건에서 표면거칠기가 크게 나타났다. 이는 CBN 공구재종이 고함유량일수록 플랭크 마모면이 Abrasive 작용에 의해 CBN입자의 탈락으로 거친 plowing 형태를 나타내고 있기 때문이라고 생각된다.

상기와 같은 CBN함유량에 따른 공구수명과 표

면거칠기 실험을 통하여 단속 하드터닝에 가장 양호한 공구는 60% CBN 공구였다. 이 공구에 대하여 절삭속도를 97m/min로 유지하고 이송속도와 절삭 깊이를 변화시키며 좀더 다양한 절삭조건 하에서 실험을 수행하였다.

Fig.6에서 공구수명은 이송속도의 증가에 따라 크게 감소하였으며, Fig.7에서는 표면거칠기는 일반적인 이론과 같이 이송속도에 민감하게 나타났다. 이때 표면조도는 0.2-0.6 μ m Ra정도로 전 범위에서 정밀 연삭과 대등한 상태를 보였다. Fig.8, Fig.9에서 보는 바와 같이 절삭깊이의 변화에 따라서는 공구수명과 표면거칠기가 크게 영향을 보이지 않았으며, 초기에는 공구마모의 증가와 함께 표면거칠기가 증가 추세를 보이다가 공구마모가 0.05mm에 도달하면서부터는 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다.

상기의 결과로부터 단속 하드터닝에서는 저 함유량의 CBN 공구가 유리함을 확인할 수 있었다.

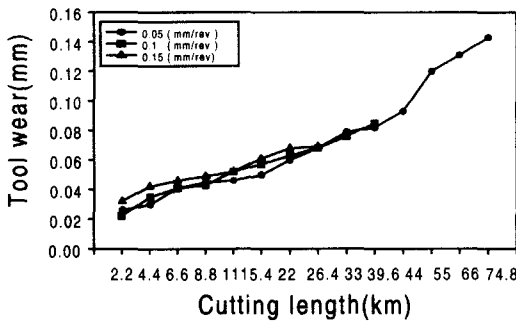


Fig. 6 Tool wear according to different feed rate

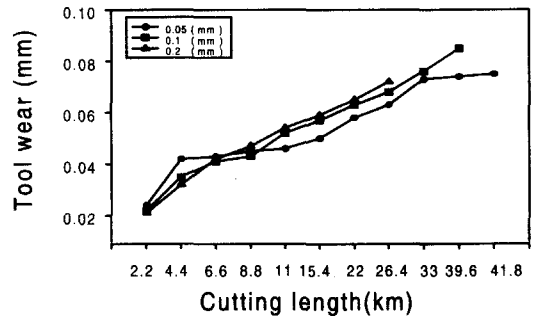


Fig. 8 Tool wear according to different depth of cut

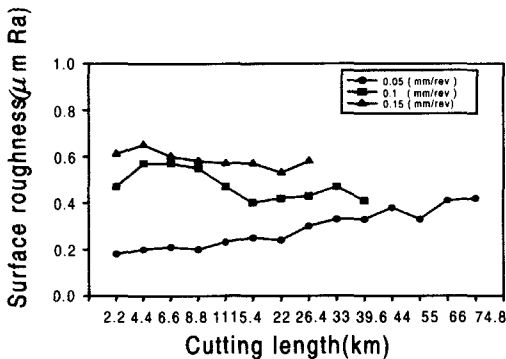


Fig. 7 Surface roughness according to different feed rate

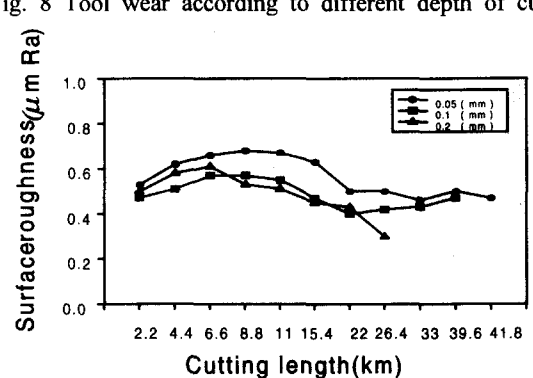


Fig. 9 Surface roughness according to different depth of cut

4.2 절삭조건과 공구마모에 따른 절삭저항 및 FFT 분석

Fig.10은 단속 하드터닝에서 다양한 절삭조건에 따른 절삭력의 데이터를 보여주고 있다. 일반적으로 보통강의 선삭과는 달리 단속 하드터닝에서는 배분력이 주분력보다 더 컸으며 각 성분의 힘의 비는 10:5:2(배분력:주분력:이송분력)정도로 나타났다. 절삭력은 절삭속도의 증가와 함께 근소하게 감소하는 경향을 나타내었고, 하드터닝에서는 절삭속도보다는 이송이, 이송속도보다는 절삭깊이가 절삭저항에 미치는 영향이 크게 나타났다.

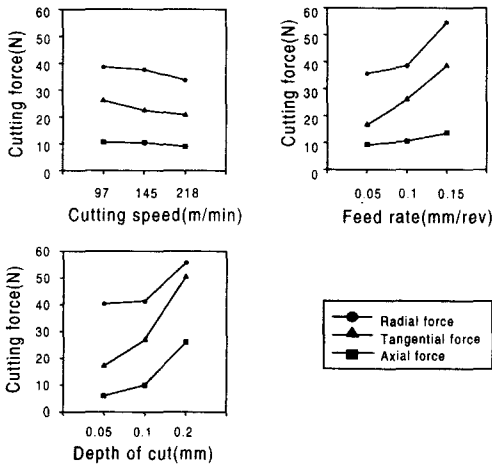


Fig. 10 Comparison of cutting force according to cutting condition

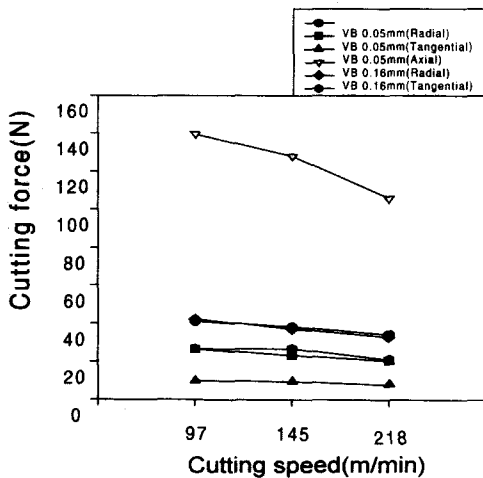


Fig. 11 Relation between cutting force and tool wear

Fig.11은 플랭크 마모의 증가에 따라 배분력 성분의 경향을 나타내는 것으로, 플랭크 마모의 증가에 따라서 배분력 성분이 현저히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 공구마모의 증가에 따라 피삭재와 여유면의 접촉면적이 넓어지고 소재가 고경도이기 때문에 상대적으로 배분력이 크게 증가하는 것으로 사료된다.

다듬질 절삭에서 채터가 발생하면 그 작업 자체가 무의미하게 되기 때문에 채터의 발생원인과 이를 피할 수 있는 절삭조건 선정이 필요하다. 특히 내경 단속 하드터닝에서는 일반가공의 경우와는 달리 채터가 쉽게 발생할 가능성이 있기 때문에 반드시 고려해야 할 부분이다.

채터의 발생원인은 크게 나누면 강제진동 (forced chatter), 자려진동 (self induced chatter), 그리고 재생진동 (regenerative chatter)으로 분류할 수 있다. 일반적으로 강제진동은 주로 안내면의 정밀도 저하나 직선안내기구 (LM guide system)에서 볼의 편마모 등이 주원인이 된다. 자려진동은 공구와 공작물간에 외부로부터 명확한 주기 변동력이 작용하지 않아도 절삭과정의 불안정 상태가 생기는 공진적인 진동으로서 고유진동수 또는 그 근방에서 일어난다. 자려진동은 강제 진동에 비해 진동상태가 더 격심하고 표면에 발생한 요철은 다시 재생진동을 일으키는 원인이 된다. 따라서 적절한 절삭조건을 선정하여 자려진동을 막을 필요가 있다.

본 연구에서는 다양한 절삭조건에서의 절삭실험을 통해 가속도 신호를 각 조건별로 비교 분석하였다.

Fig.12에서 단속 하드터닝시의 절삭속도의 변화에 따른 가속도 신호 값을 FFT 분석하였다. 이 경우 절삭속도가 145m/min으로 증가하였을 때 2100Hz 성분의 주파수가 크게 증가 하였다. 반면, 218m/min의 절삭속도에서는 2100Hz 성분의 크기가 조금 줄어들었지만 대역폭이 크게 늘어났다. 이는 공작기계의 강성과 관련이 있으며, 단속절삭에 따른 주기적인 힘의 변화가 미친 강제진동의 영향으로 사료된다. Fig.13에서는 이송속도가 증가할 수록 점진적인 진동의 증가를 볼 수 있다. 이것은 미변형 칩 두께의 변화에 따라서 단속 절삭력이 증가하고 공작기계와 공정의 고유진동수가 일치하기 때문인 것으로 생각된다. 이송속도가 0.05mm/rev에서는 매우 안정적인 절삭상태를 나타내었고, 표면거칠기의 측정 결과도 가장 양호한 것으로 나타났다.

Fig.14는 절삭깊이의 변화에 따른 가속도 신호의 값이다. 절삭깊이가 작은 0.05mm에서 진동이 두드러지지 않은 것을 볼 수 있는데 이것은 CBN 공구의 절삭성이 우수하여 절삭상태가 매우 안정되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 단속 하드터닝에서 CBN 공구를 사용하여 다양한 절삭조건하에서 진동 상태를 고찰한 결과 절삭속도, 이송, 절삭깊이의 증가에 따라 진동의 크기는 커졌으나 자려진동에 의한 채터의 발생 없이 안정적인 절삭 상태를 나타내었다.

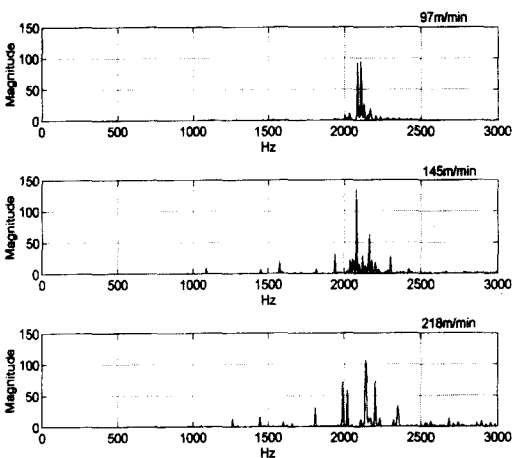


Fig. 12 Accelerometer signal according to different cutting speed
(Feed rate : 0.1mm/rev, Depth of cut : 0.1mm)

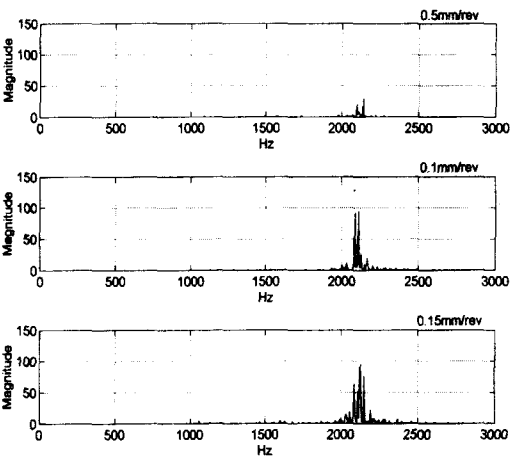


Fig. 13 Accelerometer signal according to different feed rate
(Cutting speed : 97m/min, Depth of cut : 0.1mm)

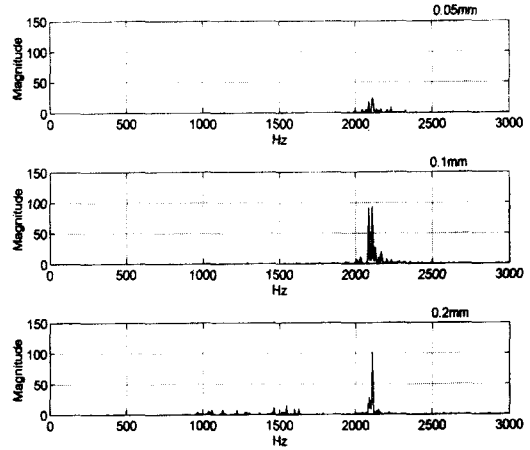


Fig. 14 Accelerometer signal according to different depth of cut
(Cutting speed : 97m/min, Feed rate : 0.1mm/rev)

4.3 CBN 공구의 마모 메카니즘

본 실험에서는 단속 하드터닝에서 CBN 공구를 사용하여 고경도강을 장시간 절삭할 경우에 공구마모에 미치는 영향과 원인을 규명하고자 하였다.

CBN 공구마모의 메카니즘은 많은 연구자들의 오랜 노력에도 불구하고 아직도 완전히 이해되지 못하고 있는 분야 중의 하나이다. 최근까지 밝혀진 CBN 공구마모의 원인은 연마마모(abrasion wear), 응착마모(adhension wear), 확산(diffusion), 및 산화(oxidation) 등이며 이러한 마멸의 작용은 복합적으로 작용한다고 했다.^[11] Fig.4의 결과에서 공구수명은 절삭속도의 증가에 비례하여 감소하였다. 만약, 절삭온도가 절삭속도에 비례한다면 공구마모는 절삭온도의 함수에 선형적이다. 따라서 CBN 공구의 마모의 메카니즘은 절삭열에 의한 화학적인 작용으로 볼 수 있다.

한편, Fig.15에서 연마마모의 흔적인 세로 방향의 그루브(groove)를 볼 수 있다. 이는 피삭재중의 단단한 입자가 플랭크면에서 연마작용을 일으켜 CBN입자가 탈락하는 현상으로 추론할 수 있다. Fig.16은 피삭재의 조직과 CBN 입자와의 확산과 응착마모 관계를 규명하기 위하여 EDX 분석한 것이다. 분석 결과를 보면 피삭재의 표면층에는 미소량의 B, N원소가 미량 검출되었는데, 이는 Cr과 Fe

의 탄화물($(CrFe)_7C_3$)들과의 연마마모에 의한 고열의 발생으로 Tribochemical에 의한 응착마모 현상이 발생한 것으로 사료된다. 이것은 Chou의 연구 결과와 일치하는 것이다.^{[11][13]}

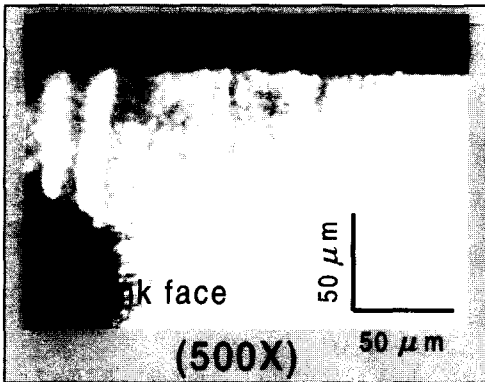


Fig. 15 Micrograph of CBN tool wear

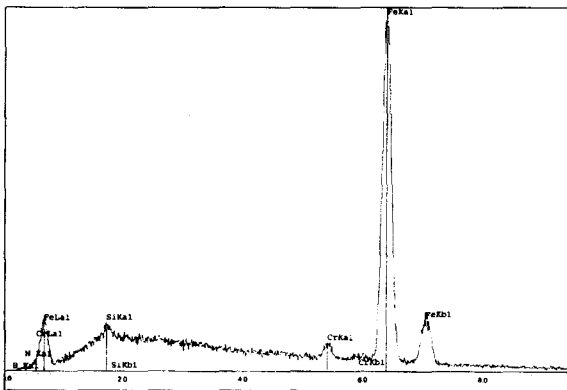


Fig. 16 EDX analysis of damaged layer in the workpiece

5. 결론

단속 하드터닝에서 CBN 공구의 절삭성과 마모 메카니즘에 관한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단속 하드터닝을 위해서는 공구수명과 표면거칠기측면에서 저 함유량의 CBN공구 (60% CBN + TiN)가 우수한 절삭성을 나타내었다.

2. 절삭속도의 증가에 따라 절삭력이 감소하는 경향을 나타내었으며, 공구마모의 증가에 따라 배분력이 현저히 증가하였는데, 이는 피삭재와 여유면의 접촉면적이 넓어지고 소재가 고경도이기 때문에 상대적으로 배분력이 크게 증가하는 것으로 사료된다. 또한, 단속 하드터닝에서 각 힘의 성분비는 10:5:2(배분력:주분력:이송분력) 정도로 나타났다.

3. 절삭속도의 증가에 따라 공작기계의 강성과 관련된 강제진동의 영향으로 진동의 크기가 커지고 대역폭이 증가하였으나 chatter의 발생 없이 안정적인 절삭상태를 볼 수 있었다.

4. CBN 공구의 마모 메카니즘은 연마마모에 의한 고열의 발생으로 Tribochemical에 의한 응착마모가 복합적으로 작용하는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. H. K. Tonshoff, "Hard turning influences on the workpiece properties," Transactions of NAMRI/SM E, Vol. 23, pp.215-220, 1995.
2. D. H. Meadows, "Boring of laser hardened bushings," 2nd International Machining & Grinding conference, pp.511-520, 1997.
3. T. Fukaya, "High efficiency machining with new CBN cutting tools," 2nd International Maching & Gridding Coferece, pp.361-371, 1997.
4. F. Klocke, "High precision turning of hardened steel parts" Fraunhofer-Institute of Production Technology D-52074 Aachen, germany, pp.314-318
5. C. Gue, "Experimental investigation of hard turning," 2nd International Machining & Gridding Coferece, pp.523-539, 1997.
6. A. M. Abrao, "The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel," Wear, pp279-284, 1996.
7. K. Nakayama, "Machining characteristics of hard materials," Annals of the CIRP, Vol. 37/1, pp.89-92, 1988.
8. Y. K. Chou and C. J. Evans, "Finish hard turning of power metallurgy M50 steel," Transactions of

- NAMRI/SME, Vol. 25, pp.81-86, 1997.
9. W. K'önig, "Turning versus grinding a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp.39-43, 1993.
 10. N. Masahiko, "Research on CBN finishing Hob," *Japan society of mechanical engineering*, Vol. 53/493, pp.2000-2003, 1987.
 11. Y. K. Chou, "Wear mechanisms of cubic boron nitride tools in precision turning of hardened steels," *UMI dissertation services* 1994.
 12. 김 동열, *절삭이론과 실제*, 기전 연구사 1994.
 13. 최상우, 이기우, 이종찬, "CBN 볼랜드밀의 마모 메카니즘에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제 14권, 제12호, pp121-126, 1997.