

고경도 선삭에서의 표면품위에 관한 연구

이한교*, 신형곤+, 유승현++, 김태영+++

(Manuscript received: Jul, 23, 2012 / Revised: Sep, 14, 2012 / Accepted: Sep, 17, 2012)

A Study on Surface Integrity in Hard Turning

Han Gyo Lee*, Hyung Gon Shin+, Seung Hyeon Yoo++, Tae Young Kim+++

Abstract

New materials widely used for automobile related industry, aircraft, space development area are mostly high hardness materials. The hardness value of some hardened materials is over HRC45 and machining of this hardened materials is called as hard turning. Hard turning has its advantage on processing flexibility, cycle time and tool cost reduction.

Also this process obtains high efficiency in processing and precise surface roughness through application of the CBN tools. In hard turning process with CBN tool, surface integrity is the important factor for considering the design of machine part and component under high stress and load conditions.

A purpose of this study is to analyze optimal condition in hard turning process of AISI 52100 steel (HRC62) with high CBN and low CBN on turning characteristics, tool wear mechanism comparison and surface integrity.

Key Words : Tool wear(공구마모), Hard turning(고경도강 선삭), CBN tool(CBN 입방격자 소결공구), Surface integrity(표면품위)

1. 서론

최근 자동차·항공기·원자력·우주개발 관련 산업 등에 폭넓게 활용되고 있는 신소재의 대부분은 난삭재로 분류되고 있다. 난삭재에는 알루미늄 등과 같이 연성이 큰 재료와 고경도강 같은 HRC 45 이상의 강들이 존재한다. 고경도강 가공 시 절삭력과 마모의 변화를 관찰해 보면, 절삭공구의 점진적인 마모와 급작스런 파손 등은 고정밀도를 요구하는 가공재료의 표면 거칠기를 나쁘게 만들뿐만 아니라 공작기계의 강성에도 나쁜 영향을 주게 되므로 경제적인 손실을 입게 된다.

그러나 최근 들어 공작기계와 절삭공구가 개발되어 이러한

문제점을 해결하고 있으며 특히 절삭기술이 다변화 되면서 초정밀 부품가공에서 연삭작업을 생략한 절삭공정으로 마무리하는 하드터닝(hard turning)에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다^(1~4).

하드터닝은 가공 유연성의 증가, 가공시간과 가공공구 비용의 감소 등 장점들이 있으며, 가공능률의 향상과 표면 정밀도를 얻을 수 있는 CBN(cubic boron nitride) 절삭공구의 개발로 인해 절삭 문제를 해결할 수 있게 되었다.

현재 CBN공구로는 CBN 함유량이 90%이상을 차지하는 high CBN과 CBN의 함유량이 70%이하인 low CBN으로 구분되어 있다. CBN 공구는 결합재 속에 CBN이 분리되어 있는 다결정

* 한국폴리텍대학 김제캠퍼스 컴퓨터응용기계과
+ 전북대학교 기계시스템 공학부
++ 전북대학교 대학원 기계시스템공학과
+++ 교신저자, 전북대학교 기계시스템 공학부
주소: 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

✉ Corresponding Author E-mail: kimty@jbnu.ac.kr

형태가 대부분이며, 결합재는 주로 내열성이 높은 세라믹 재료 (TiN, TiC, Al₂O₃ 등)가 사용되고 있는 추세이다. 하지만 CBN 공구 적용범위가 넓지 못한데 그 이유는 매우 부서지기 쉬우며 단단함 때문에 취급이 어려운 소재이기 때문이다. 그리고 가공 후의 표면품질에 대한 데이터 부족과 CBN 공구의 파손 및 마모에 대한 이해의 부족이 원인으로 지적되고 있다.

따라서 부품 가공면에 남아 있는 이러한 물리적 특성 즉 표면 품위(surface integrity)는 높은 응력이나 하중을 받는 부품의 설계 시 매우 중요하게 고려되어야 할 요소들이다. 기계 가공면에 생성된 소성 변형역의 크기, 가공 경화층 깊이 등을 정확히 평가하는 것은 표면품위의 이해가 필수 요소로 절삭기구 해석을 위한 하나의 중요한 과제로 남아 있다. 그러나 실질적으로 가공면의 소성스트레인을 측정하는 것은 매우 어렵다. 이유는 소성 변형층은 기계 가공 면으로부터 매우 얇게 형성되어 있으며, 표면으로부터 깊이에 따라 급격한 변화를 보이기 때문에 그 결과치가 일정하지 않기 때문이다.^(5,6) 표면품질의 우수성을 알기 위해서는 미세한 잔류응력의 변화를 감지하여 구체적으로 데이터화하면 하드터닝의 활용성을 극대화할 수 있다고 본다.

CBN 공구로 고경도강을 가공할 때 선삭가공이 연삭공정을 대체할 수 있는지를 알아보기 위하여 공구 재질 분석, 고경도강의 잔류응력의 변화 등 가공 표면품위에 주목하여 연구한 예는 드문 실정이다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 하드터닝에서의 최적 조건과 공구 및 재질의 분석을 위해 고경도강인 AISI 52100 강(HRC 62)을 재료로 하여 high CBN 공구와 low CBN 공구 절삭 시 절삭특성과 공구마모의 변화와 표면의 품질에 대한 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 절삭력 측정

본 실험에 사용한 재료는 고경도강인 AISI 52100이며 직경은 45mm이고 길이는 250mm이다. 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

실험에 상용된 CBN공구는 TaeguTec(주) 제품인 KB90 (high CBN) TB650(low CBN)을 선택하였다. 공구와 가공물에 사이에 생기는 절삭력을 측정하기 위해 공구동력계를 설치하였으며 공구동력계 위에 공구를 장착하기 위해 지그를 설계 제작하여 장착하였다. Fig. 1은 실험장치의 구성을 나타내고

Table 1 Chemical compositions of workpiece(wt. -%)

Composition(%) Material	C	Cr	Fe	Mn	Si	P	S
AISI 52100	0.98~1.1	1.4	97.05	0.35	0.25	<0.25	<0.25

있다.

절삭과정 중에 절삭저항을 측정하였으며 절삭저항이 아주 미세하게 나타나므로 증폭기의 레인지(range)를 민감한 범위로 설정하였고, 절삭조건에 따른 절삭시간이 짧아 데이터의 입력 시간을 증폭시킨 후 A/D컨버터를 통하여 컴퓨터로 입력시켜 저장한 후 최대, 최소, 평균값을 계산하여 모니터 상에 출력하였다. 마모의 영상은 CCD 카메라를 통해 프레임 그레버(frame grabber)에 의해 256 밝기 등급으로 컴퓨터에 저장된 이 영상을 컴퓨터에서 분석하였다.

절삭속도, 이송속도 및 절입 깊이 등의 절삭조건을 각각의 조건별로 실험한 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면 거칠기를 측정식 표면거칠기 측정기를 이용하여 컷오프 0.8 mm의 조건에서 최대 높이 표면거칠기 R_{max}를 측정하였다.

2.2 잔류응력 측정

본 실험에 사용된 잔류응력 측정 실험 장치의 사양은 다음 Table 2와 같다.

잔류응력의 측정을 위하여 Photo. 1과 같이 RS-200 장비를

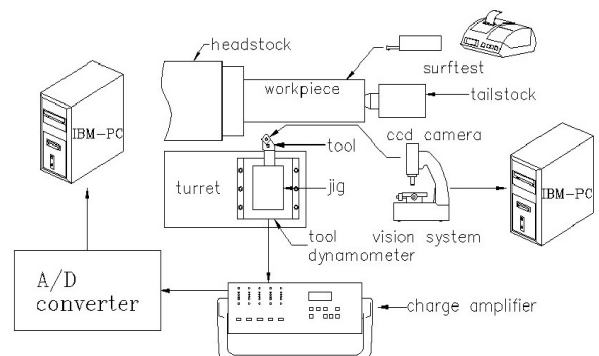


Fig. 1 Experimental device setup

Table 2 Experimental equipments

Strain gage technology	RS-200 Milling Guide
Strain gage	CEA-06-062UL-120
Hole drilling cutter	ORDER NO : H2.31.016#38

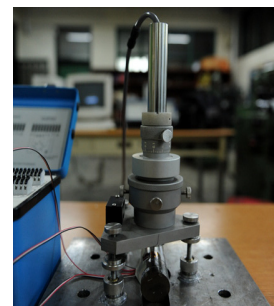


Photo. 1 Measurement system for residual stress

사용하였다. 이 장비를 지그에 설치하고 가공을 마친 공작물에 대하여 스트레인 게이지를 부착하였다. 구멍을 뚫기 위한 드릴의 직경은 1.6mm 크기를 사용하였다. 잔류응력에 대한 측정은 공작물에 3방향 스트레인 게이지를 부착한 후 구멍 뚫기 방법 (hole drilling method)에 의해 이뤄졌다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절삭력 비교

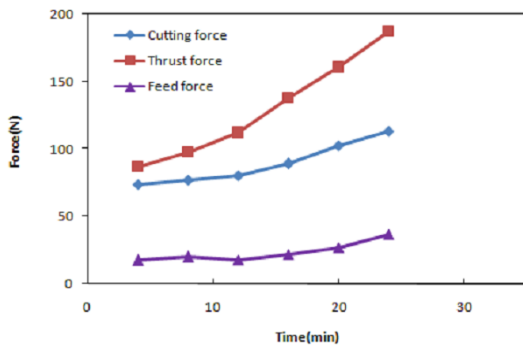
고경도강의 절삭은 공구의 재료에 따라 절삭의 경향이 어떻게 나타나는가를 알아보기 위해, 공구의 재료 성분이 다른 high CBN 공구와 low CBN 공구를 이용하여 절삭을 행한 후 가공면의 표면 거칠기와 공구마모 및 절삭력 변동 특성을 살펴보았다.

Fig. 2는 절삭공구 high CBN과 low CBN 공구를 이용하고, 절삭속도 130m/min, 이송속도 0.157mm/rev인 조건으로 실험한 각 방향에 따른 절삭력의 변화를 보여주고 있다. high CBN과 low CBN 공구가 동일하게 절삭력 중 배분력이 가장 크게 나타나고 있다. 이는 절삭력 중에서 고경도강 가공 시 배분력이 주분력과 이송분력보다 높은 값을 보여주고 있는 것으로 고경도강 절삭시 배분력이 절삭에 더 많은 영향을 주고 있는 것을 알 수 있었으며, 이의 결과는 다른 연구가들에 의해 발표된 결

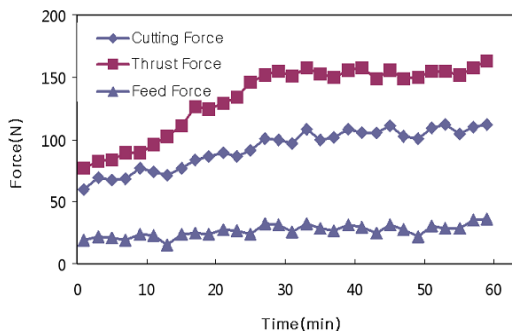
과와 유사한 결과를 보여주고 있는 것이다.^(7~9)

Fig. 3은 절삭속도를 130m/min으로 하고 이송속도를 0.157와 0.193mm/rev로 하여 2가지 공구인 high CBN과 low CBN 공구에 대한 절삭력의 평균값을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 공구 재료에 따른 평균 절삭력이 차이가 나는 경향을 확인할 수 있었다. 전체적으로 절삭속도와 이송속도가 높아질수록, high CBN의 경우가 높은 절삭력을 보여주고 있다. 이는 초기의 절삭과정을 지난 후에 high CBN 공구가 열에 의한 기계적 성질 및 화학적 반응에 민감하게 작용하여 연화됨을 보여주며, 절삭조건이 높아짐에 따라 절삭력에 대한 증가로 나타남을 알 수 있다. low CBN 공구가 초기 절삭과정을 지나 절삭이 진행되는 과정에서도 평균 절삭력의 변화를 보면 절삭분력 전부분에서 낮은 절삭력을 보여주고 있으며 이는 고경도강의 절삭에 매우 유리하다는 결과를 보여주고 있다.

Fig. 4에서는 절삭속도 130m/min인 조건에서 이송속도에 따른 평균 절삭력 양상을 나타낸 것으로 high CBN 공구와 low CBN공구를 비교하였다. 평균 절삭력은 절삭력 중 가장 영향력이 큰 배분력의 평균값을 선택하였다. 그림에서 알 수 있듯이 절삭속도가 일정할 때 이송속도의 변화에 대해서 low CBN 공구의 배분력이 high CBN공구 보다 작게 나옴을 알 수 있으며, high CBN 공구와 low CBN 공구 모두 이송속도의 증가에 따라 배분력이 증가함을 보여준다. 이는 이송속도의 증가에 따라

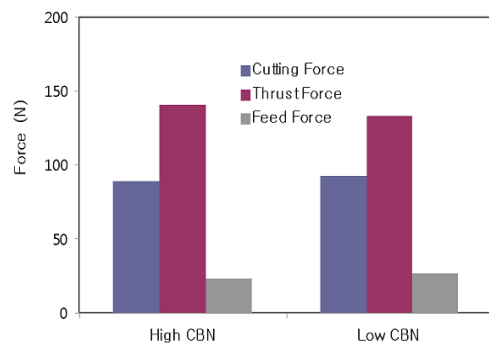


(a) high CBN

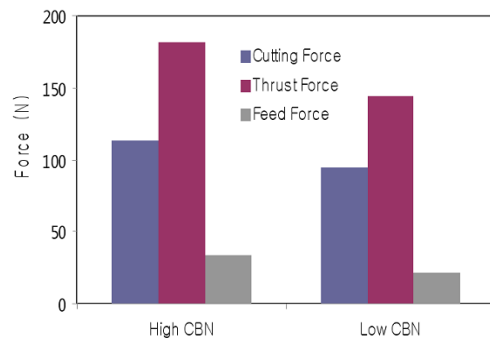


(b) low CBN

Fig. 2 Typical force progression over the life of a single cutting tool(v=130m/min, f=0.157mm/rev)



(a) v=130m/min, f=0.157mm/rev



(a) v=130m/min, f=0.193mm/rev

Fig. 3 Average cutting forces

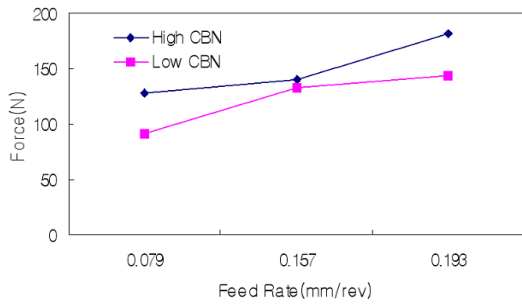


Fig. 4 Effect of feed rate(v=130m/min)

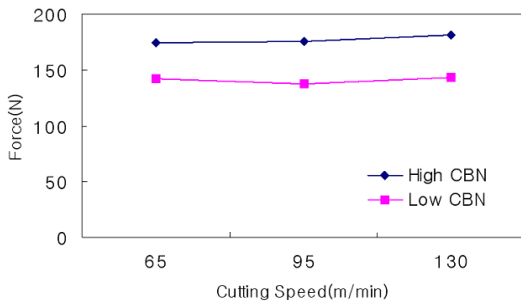


Fig. 5 Effect of cutting speed on the cutting force(f=0.193 mm/rev)

절삭되는 체적이 증가하기 때문이며, 고경도강 절삭에도 이송 속도의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 이송속도를 0.157mm/rev인 조건에서 절삭속도에 따른 배분력의 평균 절삭력 양상을 나타낸 것으로 high CBN 공구와 low CBN 공구를 비교하였다. low CBN 공구가 모든 절삭속도에서 high CBN 공구보다 배분력이 작아 절삭이 더욱 용이함을 알 수 있다.

절삭속도의 증가에 따라 배분력이 다소 감소하거나 일정한 경향을 보이는데, 이는 절삭속도가 증가됨에 따라 배분력 역시 증가하는 경향을 보여야 하지만 고경도강 절삭에서는 절삭속도 증가에 따른 배분력의 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 공구와 가공물간의 온도가 높아지지만 고경도의 절삭 시에 작은 절삭깊이 등의 조건으로 작은 절삭력으로 가공하기 때문이다. 한편, 절삭속도 120m/min 이상의 속도에서는 구성인선 등 절삭저항의 증가 요인이 발생하기 않기 때문에 고경도강 선삭 시 120m/min 속도 이상의 빠른 절삭속도를 가공 조건으로 유지하고 이송속도의 경우는 0.157mm/rev 보다 낮은 조건을 선택하는 것이 원활한 절삭을 행하는데 적절함을 알 수 있다.

3.2 공구마모 비교

Photo. 2는 low CBN을 가지고 절삭속도 130m/min, 이송속도 0.157mm/rev으로 선삭한 후 SEM으로 공구마모를 보기 위하여 촬영한 것이다.

산업현장에서 플랭크 마모가 0.25mm 정도가 되었을 때 공

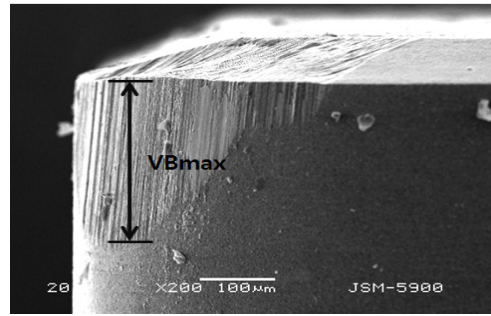


Photo. 2 Flank wear on CBN cutting tool(x200)(v=130m/min, f=0.157mm/rev)

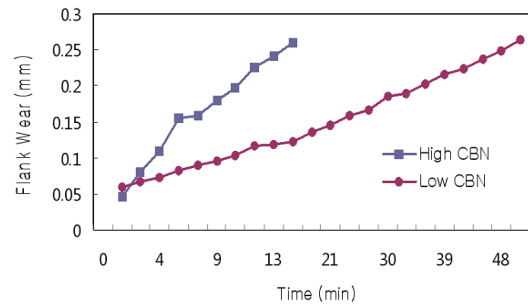


Fig. 6 Vision wear length after filtering by computer image system(v=130m/min, f=0.193mm/rev)

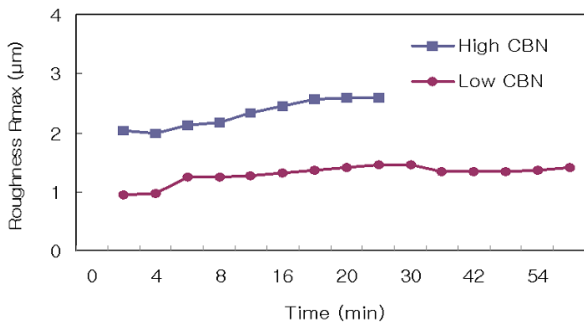
구 수명이 한계에 이른 것으로 보고 있으며 플랭크 마모의 증가는 공구와 가공물 사이의 온도와 절삭력을 증가시키므로 플랭크 마모의 수치는 공구 수명의 중요한 요소가 된다.

Fig. 6은 절삭속도 v=135m/min, 이송속도 f=0.193mm/rev, 절입 깊이 0.2mm 조건으로 가공시간에 따른 플랭크 마모길이를 나타내었다. 그림에서 나타난 것처럼 가공시간의 증가에 따라 모든 조건에서 플랭크 마모길이가 증가함을 알 수 있다. 그리고 low CBN 공구가 high CBN 공구보다도 플랭크 마모길이가 서서히 증가됨도 알 수 있으며, low CBN 공구가 고경도강 절삭에 적합하다는 것을 알 수 있다.

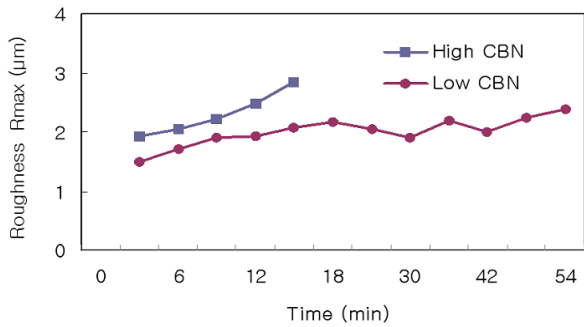
한편 가공 조건에 따른 두 공구의 마모를 비교하여 보면 가공시간이 50분이 지났어도 low CBN 공구는 아직 공구 수명에 이르지 않은 반면 high CBN 공구는 15분 정도에서 이미 공구 수명에 이른 것을 확인 할 수 있다. 이는 CBN 자체도 용해성이 낮고 low CBN 공구에 TiC가 첨가되어 용해성이 더욱 감소하여 마모저항이 향상되었기 때문이다. 공구의 마모의 경우 절삭력과 비교하여 보면 이송속도와 절삭속도의 영향을 모두 크게 받는다.

3.3 표면거칠기 비교

표면 조도계를 이용하여 가공 후 공작물의 표면을 측정하여 공구에 따른 표면 거칠기 및 가공 조건에 따른 표면 거칠기 특성을 알아보았다. Fig. 7에 나타난 그래프를 보면 알 수 있듯이



(a) $v=130\text{m/min}$, $f=0157\text{mm/rev}$



(b) $v=130\text{m/min}$, $f=0193\text{mm/rev}$

Fig. 7 Effect of tool materials and time on the roughness

절삭속도가 일정할 때 이송속도가 증가함에 따라 표면 거칠기(Rmax)의 값은 high CBN 공구가 low CBN 공구보다 높게 나온다. 그러나 두 공구의 마모가 0.25mm에 이르러 공구수명을 다하는 구간에 다다른 면은 표면 거칠기(Rmax) 값이 거의 같은 값인 2.5µm을 보여준다. 이송속도가 일정할 때 절삭속도의 증가에서도 표면거칠기의 값은 high CBN 공구가 low CBN 공구보다 많이 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 고경도강의 경우는 표면 거칠기 low CBN 공구가 high CBN 공구보다 우수하지만, 두 공구 모두 연강 등 일반적인 절삭의 표면 거칠기 보다는 상대적으로 매우 양호함을 알 수 있다. 실험결과와 표면 거칠기는 이송속도와 절삭속도의 영향을 받으며 특히 이송속도의 영향을 더욱 많이 받는 것으로 나타났다.

3.4 잔류응력의 특성

절삭 중에 일어나는 공작물의 변화에 가장 많은 영향을 미치는 중요한 인자는 잔류응력이다. 이러한 잔류응력은 가혹한 하중이 작용하는 조건에 대한 재질 특성의 영향을 가장 잘 나타낸다. 하드터닝의 경우 공구와 공작물 사이에 발생하는 고열로 인하여 체적 변화에 따른 압축잔류응력이 발생하는 것으로 되어 있다. 따라서 보다 경제적인 가공 방법을 찾기 위해, 고경도강의 하드터닝에 사용하는 high CBN과 low CBN 공구에 대해 피삭재 표면에 발생하는 압축 잔류응력이 어느 정도인지를 알고, 어느 깊이까지 영향이 미치는 가를 알아보았다.

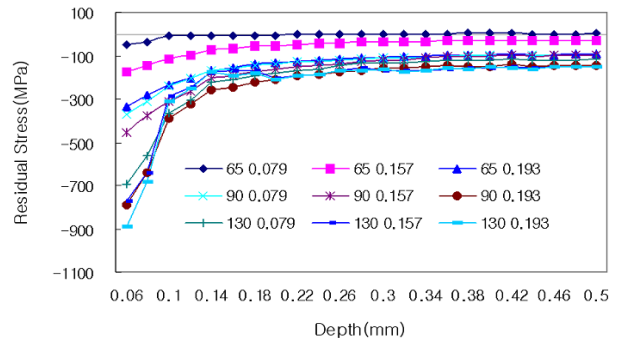


Fig. 8 Residual stress in tangential direction(low CBN)

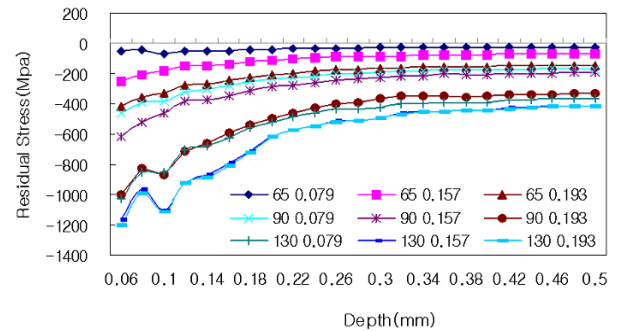


Fig. 9 Residual stress in feed direction(low CBN)

Fig. 8 ~ Fig. 11은 고경도강인 AISI 52100의 선삭 시 low CBN과 high CBN 공구를 사용하였을 때 제품의 표면층에 생성된 잔류응력의 평균값을 구멍 깊이 증가에 따른 최대 주응력과 최소 주응력(σ_{max} , σ_{min}) 값으로 나타낸 것이다. 여기서 최대 주응력의 방향은 절삭방향과 나란한 방향인 접선 방향이고, 최소 주응력 방향은 절삭방향과 직각인 피드 방향이다.

Fig. 8과 9는 AISI 52100의 고경도강을 low CBN 공구로 선삭 할 경우 구멍 깊이에 대하여 압축 잔류응력을 나타내었다. 잔류응력은 가공 표면과 공구에서 발생하는 마찰열에 의하여 재료는 변형이 일어나고 배분력에 의한 영향이 커지므로 변형 효과에 의해 표면층에서 압축 잔류응력이 생성된 것으로 판단된다. 접선 방향과 피드 방향에 대한 잔류응력의 분포 상태를 살펴보면 초기 깊이에서 압축이 크게 나타남을 알 수 있으며 표면층에서 깊이가 증가할수록 압축 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 압축 잔류응력은 접선 방향보다 피드 방향에서 더 크게 나타났으며 절삭속도와 이송속도 중에서 가장 가혹한 조건에서 큰 변화를 보여주고 있다. 이송속도가 0.193mm/rev인 경우의 조건들에서 전체 실험 중 압축 잔류응력이 크게 발생한 것을 알 수 있듯이 압축 잔류응력은 고경도강 절삭 시 이송속도와 큰 관련이 있을 것으로 추측할 수 있다.

Fig. 10과 11은 AISI 52100의 고경도강을 high CBN 공구로 선삭 할 경우 구멍 깊이에 대하여 압축 잔류응력을 나타내었다. 접선방향과 이송방향에 대한 잔류응력의 분포 상태를 살펴

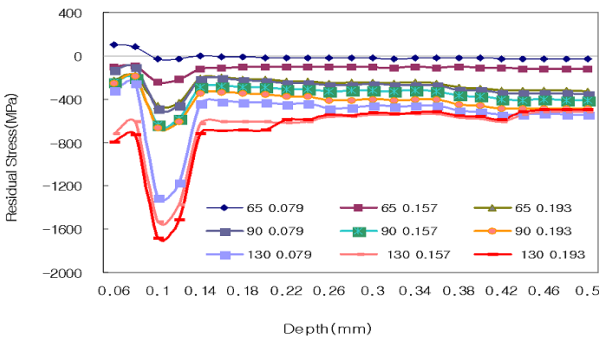


Fig. 10 Residual stress in tangential direction (high CBN)

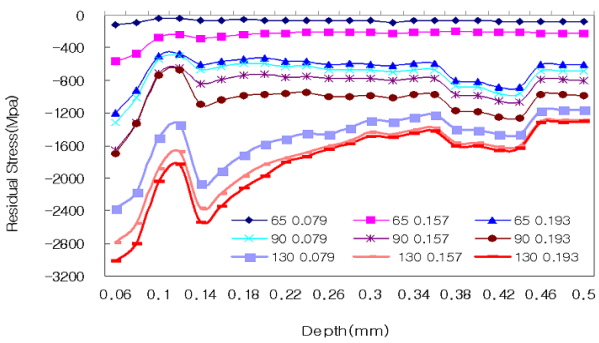


Fig. 11 Residual stress in feed direction (high CBN)

보면 0.1mm 이하에서 압축이 크게 나타남을 알 수 있으며 이는 high CBN 공구의 높은 경도치에 따라 초기에 재료의 압축률이 증가한 것으로 판단되며, 접선 방향보다 피드 방향에서 더 크게 나타나고 절삭속도와 이송속도 중에서 가장 가혹한 조건에서 큰 변화를 보여주고 있다.

이와 같은 결과들은 low CBN 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 절삭조건이 가장 가혹한 절삭속도 $v = 130\text{m/min}$, 이송속도 $f = 0.193\text{mm/rev}$ 의 경우에 high CBN과 low CBN 공구에 대한 Feed 방향의 최대 잔류응력의 결과를 비교해 보면 high CBN 공구의 잔류응력 값은 $-3,000\text{MPa}$, low CBN 공구의 잔류응력 값은 -900MPa 이고, 접선 방향의 최대 잔류응력의 결과는 high CBN 공구의 잔류응력 값은 $-1,700\text{MPa}$, low CBN 공구의 잔류응력 값은 $-1,200\text{MPa}$ 이다. 이를 통해 low CBN의 공구가 high CBN 공구보다 잔류응력의 분포에도 좋은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 난삭재인 AISI 52100의 피삭재를 PCBN 공구를 이용한 선삭으로 다양한 가공특성에 대하여 살펴보았다. 특히 하드터닝 시 high CBN과 low CBN 공구에 대한 절삭력, 공구 마모, 피삭재에 대한 표면거칠기, 잔류응력 등을 분석해 보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고경도강 절삭엔 low CBN 공구가 효과적임을 확인했다. 이는 low CBN에는 TiC가 다량(65.81%) 첨가되어 용해성이 감소되고 공구의 상면(Crater) 저항이 향상되었기 때문으로 나타났다.
- (2) 동일한 절삭속도와 이송속도에서 low CBN공구가 high CBN보다 많게는 5배 정도의 가공시간을 유지하였다. 이는 low CBN 공구의 플랭크 마모가 high CBN 공구의 경우에 비해 미세하게 진행됨을 알 수 있었다.
- (3) low CBN 공구로 선삭 시, 피삭재에 대하여 접선 방향과 피드 방향에 대한 압축 잔류응력 상태를 살펴보면 피드 방향이 크게 나타났으며, 표면층에서 깊이가 증가할수록 감소하고 절삭속도와 이송속도가 가장 가혹한 130m/min과 0.193mm/rev인 경우에 압축 잔류응력이 크게 발생한 것을 알 수 있었다.
- (4) high CBN과 low CBN의 동일한 가혹조건에서 압축 잔류응력 값을 비교하였더니 방향에 관계없이 깊이 0.1 mm 부근에서 압축이 크게 나타났다. 또한 압축 잔류응력에 대하여 high CBN이 약 2배 정도 크게 나타났으며 절삭속도와 이송속도가 저속 일수록 가공조건이 유리함을 알 수 있었다.

References

- (1) Dawson, Ty. G., 2002, *Machining Hardened Steel with Polycrystalline Cubic Boron Nitride Cutting Tools*, Georgia Institute of Technology.
- (2) Toenshoff, H. K., Arendt, C., and Ben, A. R., 2000, "Cutting Hardened Steel," *Annals of CIRP*, Vol. 49, No. 2, pp. 1~19.
- (3) Dawson, Ty. G., and Kurfess, T. R., 2004, "Quantification of Tool Wear using White Light Interferometry and Three-dimensional Computational Metrology," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 4-5, pp. 591~596.
- (4) Ko, T. J., and Kim, H. S., 2001, "Surface Integrity and Machinability in Intermittent Hard Turning," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, pp. 168~175.
- (5) Matsumoto, Y., Hashimoto, F., and Lahoti, G., 1999, "Surface Integrity Generated by Precision Hard Turning," *STCC*, Vol. 48, No. 1, p. 59.
- (6) Jang, D. Y., Watkins, T. R., Kozaczek, K. J., Hubbard, C. R., and Cavin, O. B., 1996, "Surface Residual Stresses in Machined Austenitic Stainless Steel," *Wear*, vol. 194, No. 1, pp. 168~173.

- (7) Barry, J., and Byrne, G., 2000, "Cutting Tool Wear in the Machining of Hardened Steels, Part II: Cubic Boron Nitride Cutting Tool Wear," *Wear*, Vol. 247, Issue. 2, pp. 152~160.
- (8) Liu, X. L., Wen, D. H., Li, Z. J., Xiao, L., and Yan, F. G., 2002, "Experimental Study on Hard Turning Hardened Gcr15 Steel with PCBN tool," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 217~221.
- (9) Nakai, T., Nakatani, S., Tomita, K., and Goto, M., 1991, "Hard Turning by PCBN," *SuperAbrasive*, 11-13 June, Chicago, pp. 11/61~11/75.