

경화처리된 합금공구강의 절삭에서 가공 표면층의 표면성상에 관한 연구

노상래*, 안상욱**

A Study on the Surface Integrity of Machined Surface Layer in Machining Hardened STD11 Steel

Sang-Lai Noh*, Sang-Ook An**

ABSTRACT

In this study, residual stress and surface roughness were investigated experimentally to evaluate surface integrity on surface layer machined by CBN, ceramics and WC cutting tools. When machining difficult-to-cut material (hardened STD11 steel H_RC 60), residual stresses remaining in machined surface layer were mainly compressive. The increase of flank wear caused a shift of the compressive residual stress maximum to greater workpiece depths, but the changes did not penetrate the workpiece beneath a depth of 300 μ m. Surface roughness was influenced considerably by variations of the cutting speed and feed. In machining hard material, CBN and Al₂O₃ ceramics cutting tool materials proved significantly superior to mixed ceramics Al₂O₃-TiC and WC in evaluation of surface integrity.

Key Words : Surface integrity, Machined surface layer, Residual stress, Difficult-to-cut material, Flank wear, CBN, Ceramics, WC, X-ray diffraction method

1. 서론

기계산업에서 응력을 많이 받는 부품들은 강도와 마모저항을 향상시킬 목적으로 경화처리하여 사용하는 경

우가 날로 증가하고 있다. 피삭재의 경도가 H_RC 50 이상이 되면 일반적인 공구재로서는 고능률, 고정밀 가공이 매우 어려운 난삭재(Difficult-to-cut material)로 분류되며 고경도강 절삭에서 가장 중요한 평가기준은

인하대학교 대학원

** 인하대학교 기계공학과

가공면에 대한 표면상태와 공구마모로 알려지고 있다.

절삭과정에서 공구와 피삭재는 심한 마찰작용이 발생하며 피삭재는 소성변형을 받아 표면이 변형되어 새로운 가공변질층이 생기고 가공변질층은 내부에 잔류응력(Residual stress)을 가지며, 경도변화, 부식, 소성유동등 피삭재의 피로강도에 영향을 미치는 변화가 수반되기 때문에 변질층을 얇게하고 가공면의 품질을 향상시키는 일이 매우 중요시 되고 있다. 따라서 가공면의 품질에 관련되는 항목을 표면성상(Surface integrity)이라 하여 이에 대한 연구는 가공 표면층(Machined surface layer)의 기계적, 물리적 특성을 정의하기 위한 개념으로 1960년대 부터 시작 되어 현재 절삭가공에서 잔류응력에 대한 연구는 확대되고 있는 추세이다. AISI 4340 절삭에서는 낮은 경도에서 인장잔류응력이 나타나고 경도가 증가하면 압축잔류응력이 크게 증가하는 것으로 알려졌다.¹⁾ W. Koenig²⁾는 고경도강(H_RC 61) 절삭 실험에서 피드를 증가시키면 압축잔류응력이 최대가 되고 잔류응력영역이 더 깊어진다고 했다. 최근에는 표면성상에 대한 선삭가공과 연삭가공의 비교³⁾와 절삭가공 변질층에 대한 해석적 예측⁴⁾도 이루어 지고 있으며 난삭재에 대한 각종 세라믹과 CBN 공구재의 적용실험⁵⁻⁷⁾을 하고 있지만 가공면의 품질에 대한 신뢰성은 아직도 문제로 남아있다.

따라서 본 연구에서는 WC, Ceramics, CBN등의 공구재를 사용하여 경화처리된 합금공구강(H_RC 60)을 절삭하여 X선 회절법으로 가공 표면층의 잔류응력을 측정하고 다듬질 표면거칠기를 비교하여 가공면의 표면성상을 실험적으로 검토하고자 한다.

2. 이 론

2.1 X선 잔류응력 측정원리

X선에 의한 잔류응력측정은 시편의 표면에 X선을 입사시켜 표면의 극히 얇은 층에서 반사된 회절선을 이용하는데 X선의 파장(λ)과 응력이 존재할 때 격자의 면간거리(d), 그리고 회절각(θ) 사이에 Bragg법칙($\lambda = 2d \cdot \sin\theta$)이 만족할때만 회절선이 θ 방향으로 나온다. 실제로 응력을 계산할 때는 격자 면간거리의 변화량 Δd 와 회절각의 변위 $\Delta\theta$ 와의 관계로부터 Bragg식을 미분하여 얻은

$$\Delta d/d = -\cot\theta \cdot \Delta\theta \quad (1)$$

와 Hooke의 법칙을 이용하여 응력을 계산한다.

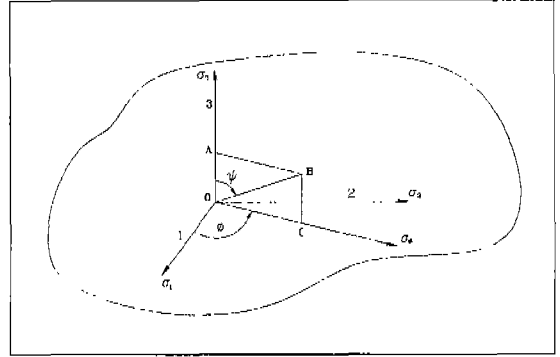


Fig.1 Stresses at the surface of a stressed body

Fig.1에서 주응력의 방향을 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 라 하고 OC 방향의 응력 σ_ψ 를 측정하기 위하여 X선 입사각 ψ 방향의 응력을 σ_ψ 라 하면

$$\sigma_\psi = \sigma_1(\sin\psi \cos\phi)^2 + \sigma_2(\sin\psi \sin\phi)^2 + \sigma_3 \cos^2\psi \quad (2)$$

가 된다. 또 $\psi = 90^\circ$ 라면 ϕ 방향의 응력 σ_ϕ 는

$$\sigma_\phi = \sigma_1 \cos^2\phi + \sigma_2 \sin^2\phi \quad (3)$$

이다.

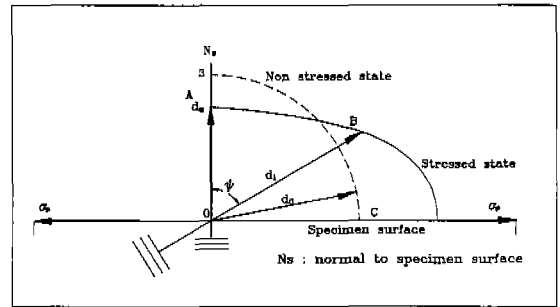


Fig. 2 Vector diagram of plane spacings for a tensile stress

격자간 면간거리는 응력이 없을 때는 Fig.2에서 점선으로 표시된 원형 d_0 로 일정하지만 σ_ϕ 가 작용하면 면간거리는 시료표면(가로방향의 축)의 법선 N_s 로 부터 기울기에 따라 달라지는 타원형 d_1 로 될 것이다. 즉

Ψ 가 커질수록 d_1 는 증가한다. 이러한 σ_{Ψ} 가 작용하였을 때 Ψ 방향으로의 스트레인 ϵ_{Ψ} 는

$$\epsilon_{\Psi} = \epsilon_1(\sin \psi \cos \phi)^2 + \epsilon_2(\sin \psi \sin \phi)^2 + \epsilon_3 \cos^2 \psi \quad (4)$$

가 된다. 식(4)에 Hooke의 법칙을 대입하면

$$\begin{aligned} \epsilon_{\Psi} &= [(\sigma_1 - \nu \sigma_2) \cos^2 \phi \sin^2 \psi + (\sigma_2 - \nu \sigma_1) \sin^2 \phi \sin^2 \psi] / E + \epsilon_3 \cos^2 \psi \\ &= (1 + \nu)(\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi / E + \epsilon_3 \end{aligned} \quad (5)$$

을 얻을 수 있고, 또 식(5)에 식(3)을 대입하여

$$\sigma_{\phi} = (\epsilon_{\Psi} - \epsilon_3) E / [(1 + \nu) \sin^2 \psi] \quad (6)$$

을 얻는데 이 식이 X선 회절법에 의한 잔류응력 측정의 기본이론⁸⁾이다.

2.2 $\sin^2 \Psi$ 응력 측정법

$\sin^2 \Psi$ 법은 식(6)에서 처럼 ϵ_{Ψ} 와 $\sin^2 \Psi$ 의 1차식 직선 기울기로 부터 응력을 구하는 방법이다. 식(6)에서 스트레인은 면간거리로 표시하면

$$\epsilon_{\Psi} - \epsilon_3 = \sigma_{\phi}(1 + \nu) \sin^2 \psi / E \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [(d_i - d_o) / d_o] - [(d_n - d_o) / d_o] &= [(d_i - d_n) / d_o] \\ &= \sigma_{\phi}(1 + \nu) \sin^2 \psi / E \end{aligned} \quad (8)$$

가 되고 d_i , d_o , d_n 는 서로 편차가 매우 작기 때문에 d_n 을 d_o 로 대치해도 오차는 무시할 수 있다. 즉

$$\Delta d / d_o = (1 + \nu) \sigma_{\phi} \sin^2 \psi / E \quad (9)$$

d_i 는 시료표면에 Ψ 각도 만큼 기울어진 결정면의 면간거리이다. 이때 $\Delta d / d_o$ 에 대한 $\sin^2 \Psi$ 선도를 그리면 그 기울기 값이 응력 σ_{ϕ} 가 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 시험편 및 절삭공구

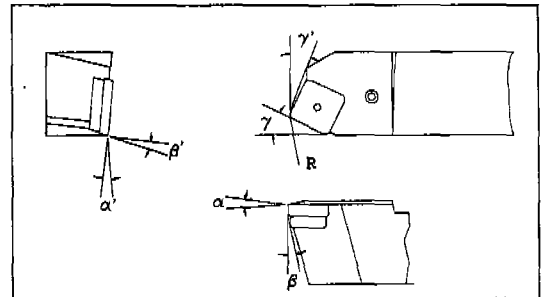
본 실험에서 사용된 피삭재는 합금공구강 STD11을

$\phi 50 \times 200$ mm로 예비 선삭가공후 경화처리하였다. Salt bath와 Vacuum furnace에서 행한 열처리 조건은 1030 $^{\circ}$ C로 가열하여 2시간 유지후 유냉시켜서 Quenching 한 다음 다시 2회에 걸쳐 180 $^{\circ}$ C로 가열하여 2시간 유지후 공냉처리로 Tempering 하였다. 이때 시험편의 경도는 H_{RC} 60이었으며 화학적 성분은 Table 1과 같다.

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

절삭공구는 Throw-away tip으로 초경합금(P20), Ceramics, CBN의 재종을 사용하였다.



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

Fig. 3 Geometry and specification of cutting tools

Fig. 3은 본 실험에 사용한 공구의 형상과 재원을 나타내며 공구재종의 물리적, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

3.2 실험장치 및 측정기기

절삭가공을 위하여 NC선반(Daewoo, Pro-6 300 \times 550)을 사용하였으며 Residual stress analyzer (Denver & proto co., Model XRD-1000L)를 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 가공면의 표면거칠기는 Surface roughness tester(Kosaka laboratory

Ltd., Model SE-30H)로 측정하여 기록지에 출력하였다. 그외에 Digital vernier calipers(1/100mm), Dial gauge(1/1000mm), PC computer, Data recorder, Pen recorder 및 Plotter 등이 사용되었다.

Table 2. Physical and mechanical properties of cutting tool materials

Cutting Materials Properties	WC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -TiC	CBN
Hardness (nhv)	2000	2800	3200	4500
Modulus of elasticity (Kg/mm ²)	53000	38000	32000	71000
Transverse rupture strength (Kg/mm ²)	150	90	90	80
Thermal conductivity (Cal/Cm °C Sec)	0.07	0.002	0.04	3.1
Thermal expansion coefficient(X 10 ⁻⁶ /°C)	6.5	7.6	7.4	4.7
Density (g/Cm ³)	15.7	4.23	4.92	3.48

3.3 실험 방법

3.3.1 절삭실험

절삭실험은 Table 3의 절삭조건을 적용하여 매절삭마다 Table 2에 표기된 재종별로 새로운 공구를 교환했으며 이때 실험 데이터를 보다 정량화시키기 위하여 절삭 초기의 공구마멸이 이루어진 직후의 절삭날로 절삭된 가공면을 측정하였다. 절삭날의 프랭크 마멸(Flank wear)과 잔류응력의 관계를 규명하기 위해서는 공구의 마멸폭이 미리 준비된 Worn tool을 사용하여 가공하였다.

Table 3. Cutting conditions

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

3.3.2 잔류응력 측정

X선에 의한 잔류응력 측정은 표준시료를 이용하여

회절선 최대강도(Peak intensity)를 찾아서 그 값을 기준으로 강도의 이동된 2θ값을 반가폭 중점법(Middle point method of half value width)으로 측정하였으며, 면간거리d₀의 변화에 대한 sin²ψ선도를 그려서 그 기울기로서 응력을 산출하였다. 측정조건은 Table 4와 같다.

Table 4. Conditions of X-ray diffraction

Voltage	30Kv
current	50mA
X-ray target	Cr-Kα ₁
No. of detector	2

표면으로 부터 깊이 방향으로의 측정은 X선이 표면에 침투하는 깊이가 매우 작으므로 가공 표면층을 20μm 단위로 전해연마한 후 측정하였다.

열처리 및 기계가공을 한 소재는 2θ의 범위가 넓어지고 회절선의 강도가 비대칭적으로 되기 때문에 측정값의 오차가 커질수 있으므로⁹⁾ Bragg법칙을 만족하는 2θ의 범위를 7~9°로 했으며 시편을 고정하고 Detector로 ψ를 0°~±30° tilting하며 Cr-Kα₁선으로 회절실험을 행하였다.

3.3.3 표면 거칠기 측정

가공물의 표면 거칠기 측정은 진동이 없는 수평면 위에 Surface roughness tester를 설치하고 선삭된 시편을 V-Block 위에 고정시킨 후 Cut off값을 0.8mm로 선정하여 피삭재의 축방향으로 측정하고 평균 높이 거칠기(Ra)가 Recorder에 기록되도록 하였다. 정확한 측정값을 얻기 위하여 3개소를 위상각 120°씩 위치 변경하며 반복 측정하여 그 평균값을 기록하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 잔류응력

4.1.1 가공면 층과 잔류응력 분포

Fig.4는 절삭조건을 일정하고 WC, Ceramics, CBN공구로 절삭했을때 가공면의 깊이 변화에 따른 잔

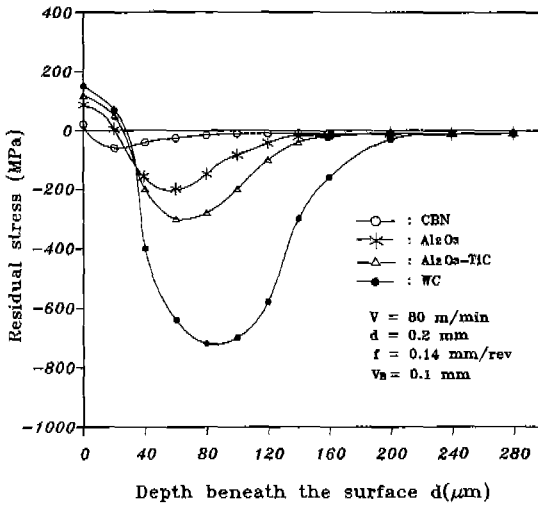


Fig. 4 Distribution of residual stress on surface layer machined with different cutting tools

류응력 분포를 나타낸 것이다. 피삭재의 얇은 가공표면층에서는 인장잔류응력이 나타났고 표면으로 부터 깊이가 어느정도 깊어지면 압축잔류응력으로 변했으며 가공 표면층의 깊이가 더 증가하면 압축잔류응력은 급격히 증가하여 최대값(Peak residual stress)이 나타났다. 이후 부터는 깊이가 부터 증가하더라도 압축잔류응력은 점차로 감소하여 약 3000 μ m 깊이 이상의 가공층부터는 잔류응력은 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다. 절삭시에 절삭날의 선단부 주위에 가장 높은 압축응력이 작용하며 이 압축응력은 기계적 응력(Mechanical stress)과 열 응력(Thermal stress)이 피삭재의 표면에 작용하기 때문³⁾인 것으로 알려져으나 본 실험에서 기계적 응력은 절삭저항에 의한 스트레인의 변화와 잔류 오스테나이트의 변태가 가공 표면층을 경화시키는 원인이 되어 이것이 높은 압축잔류응력을 야기시키는 것으로 판단된다. 열 응력은 공구의 마멸부(Wear land)와 피삭재 사이의 마찰에 의하며, 마찰열은 높은 온도상승을 가져오지만 칩에 의하여 다량 소멸되기 때문에 피삭재의 내부로 깊이 침투하지는 못한다. 그러나 이 온도가 γ - α 전이 온도를 넘어서면 마르텐사이트는 조직변화를 가져와 가공면의 표면에 백층(White layer)을 발생시키는 것으로 사료된다. 결과적으로 마찰에 의한 마르텐사이트 변태는 인장잔류응력을 가져오는데 이는 기계적 압축에 의한 압축응력이 중첩되어 발생하기

때문에 가공면의 표면에는 열에 의한 인장잔류응력이 나타나고 열의 영향이 크지 않은 가공면의 깊은 층에는 압축 잔류응력이 나타나는 것으로 판단된다.

절삭공구의 소재에 따른 영향도 크게 차이가 있어 CBN, Ceramics, WC의 순으로 압축잔류응력이 크게 나타났으며 최대 압축잔류응력이 존재하는 가공면 층의 깊이도 표면 밑으로 더 깊게 이동되어 나타났다. 이는 절삭공구재의 고온경도와 항절력의 차이 그리고 공구마멸에 의한 절삭저항의 증가로 기계적 응력이 더욱 크게 작용되었기 때문인 것으로 생각된다. Al₂O₃세라믹 공구가 Mixed세라믹 공구 보다도 응력이 크게 작용하는 원인은 Mixed세라믹 공구는 경도는 높지만 절삭시에 마멸보다는 칩핑(Chipping)현상이 현저하게 나타났는데 이로 말미암아 높은 절삭저항을 일으키고 피삭재에 응력도 크게 작용하는 것으로 생각된다.

4.1.2 공구마멸과 잔류응력

Fig. 5는 마멸된 공구로 절삭했을시 공구마멸에 따른 공구소재별 최대응력이 잔류하는 가공 표면층의 깊이를 나타낸 것이다.

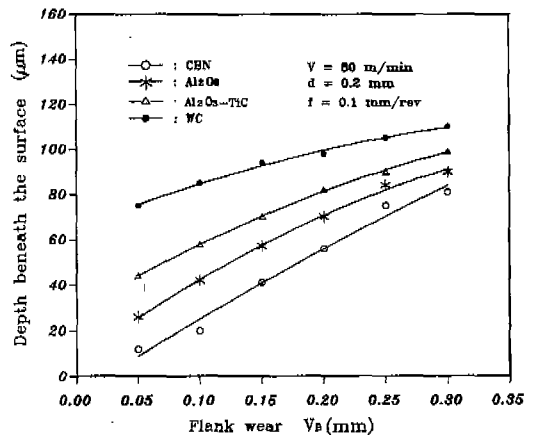


Fig. 5 Depth distribution of maximum compressive residual stress on the surface layer machined with worn tools

공구재종과 마멸량에 관계없이 피삭재에 존재하는 최대잔류응력은 모두 압축으로 나타났다. CBN공구가 가장 얇은 가공 표면층에서 최대 압축잔류응력이 나타났

으며 Ceramics공구는 중간층 깊이에서, WC공구는 가장 깊은 층에서 나타났다. 또 공구 마멸이 커질수록 최대 압축잔류응력이 존재하는 깊이도 점점 깊게 나타났다. 이러한 현상은 프랭크 마멸이 증가함에 따라 공구의 프랭크 면과 피삭재와의 접촉면이 확대되어 절삭저항이 증가하게 되며 증가된 절삭저항이 잔류응력에 영향을 미쳤으리라 판단되며, 절삭날에 프랭크 마멸이 발생하면 압축응력이 프랭크면과 피삭재의 접촉면으로 분산되는데 고경도강에 내마모성이 큰 CBN보다는 WC공구의 절삭저항이 크게 증가하여 가공표면층에 더 큰 영향을 미치기 때문이라 생각된다.

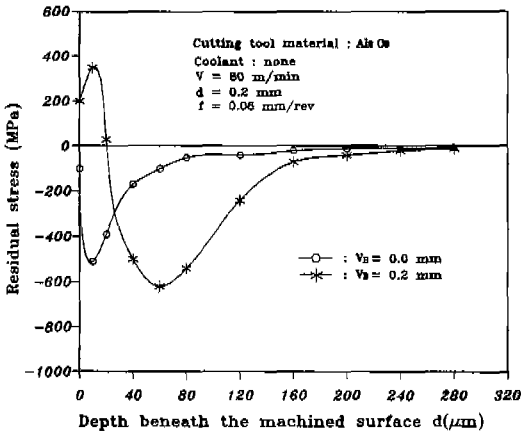


Fig. 6 Variation of residual stress on surface layer machined with sharp tool and worn tool edge

Fig. 6은 Al_2O_3 세라믹 공구를 사용하여 잔류응력의 변화를 실험한 것이다. 프랭크마멸이 없는 공구보다는 프랭크 마멸이 있는 공구가 압축잔류응력이 존재하는 가공 표면층의 깊이도 깊고, 응력도 더 크게 나타났는데 원인은 절삭저항에 의한 현상으로 판단된다. 또 프랭크 마멸이 0.2mm에서도 가공 표면층의 250 μ m 깊이 이후로는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 절삭가공에 의한 가공면의 변질층은 절삭저항과 열응력에 의하여 피삭재 깊이 침투하지 못하고 표면층에만 조직변화를 가져오기 때문이라 생각된다.

4. 1. 3 절삭속도와 잔류응력

Fig. 7과 Fig. 8은 절삭속도의 변화에 대한 최대 잔류

응력의 관계를 나타낸 것이다. 고경도강 절삭시 절삭날의 소재와 관계없이 모든 절삭속도 영역에서 압축잔류응력으로 나타났다. 절삭방향과 이에 수직인 방향으로의 잔류응력은 절삭방향의 응력이 더 크게 나타났는데 이는 절삭저항에 의한 영향으로 주분력이 이송분력보다 크게 작용하기 때문이라 생각된다.

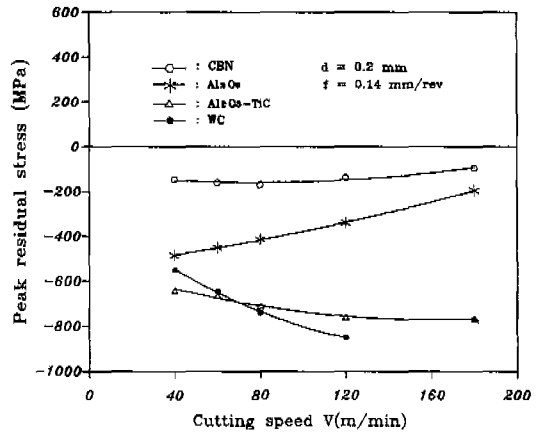


Fig. 7 Effect of cutting speed in cutting direction on peak residual stress

절삭속도가 증가할수록 CBN과 Al_2O_3 세라믹 공구에 의한 응력은 점점 감소하고 있으나 Mixed세라믹 공구와 WC공구에 의한 응력은 크게 증가하고 있다. CBN과 Al_2O_3 세라믹 공구는 절삭속도의 증가에 따라 절삭력이 크게 변하지 않으며 공구의 마멸도 심하지 않으나 Mixed세라믹과 WC공구는 절삭속도가 증가할수록 절삭력이 급증하며 공구의 마멸도 극심하게 나타났기 때문에 이에 대한 영향이 크게 작용했기 때문이라 사료된다.

4. 1. 4 이송과 잔류응력

Fig. 9는 이송과 최대 잔류응력의 관계를 나타낸 것이다. 이송이 증가할수록 CBN과 세라믹공구는 압축잔류응력을 감소시키고 있으나 WC공구는 잔류응력을 증가시키고 있다. 가공중의 절삭저항과 공구마멸을 함께

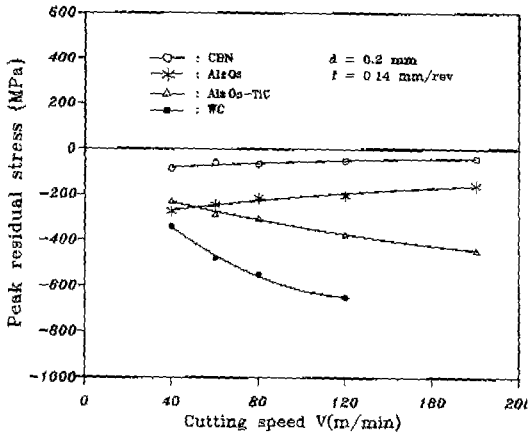


Fig. 8 Effect of cutting speed on peak residual stress measured perpendicular to cutting direction

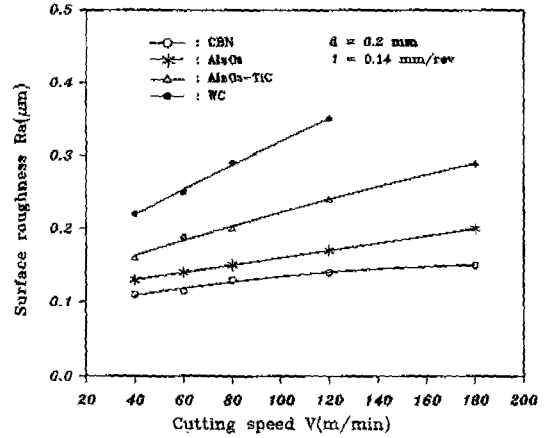


Fig. 10 Relationship between cutting tool materials and cutting speed on surface roughness

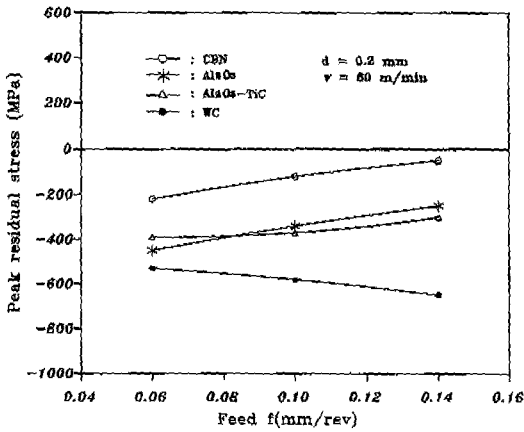


Fig. 9 Effect of feed in cutting direction on peak residual stress

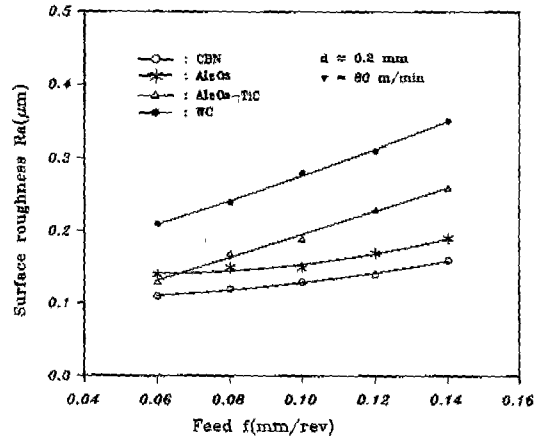


Fig. 11 Relationship between cutting tool materials and feed on surface roughness

고찰한 바 이송이 증가할수록 CBN과 세라믹공구는 정상마모가 이루어지면서 절삭저항의 변화가 크지 않은 반면 WC공구는 마멸이 극심하여 배분력이 급증하는 경향이 확인되었다. 즉, 공구 마멸에 의한 배분력의 증가가 잔류응력에 영향을 미쳤으리라 생각된다.

4.2 가공면의 표면 거칠기

Fig. 10과 Fig. 11은 피삭재의 가공면을 축방향으로 측정된 표면 거칠기를 절삭속도와 이송에 대하여 각각 나타낸 것이다. 공구재종에 관계없이 절삭속도와 이송

의 증가는 표면 거칠기를 악화시키는데 CBN과 Al_2O_3 세라믹 공구는 내마모성이 강하여 프랭크 마멸이 서서히 진행되는 반면 Mixed세라믹과 WC공구는 초기 마멸과 더불어 고온경도가 약해서 일정시간 절삭후에 절삭날의 일부가 탈락되어 칩핑이 발생하여 표면 거칠기를 악화시키는 현상으로 사료된다.

5. 결론

합금공구강 STD11을 경화처리한 ($H_{RC} 60$) 후

CBN, Ceramics, WC공구로 절삭하여 절삭된 피삭재의 표면층을 X선 회절법에 의하여 측정된 잔류응력과 표면거칠기를 고찰하고 가공 표면층의 표면성상을 실험적으로 평가한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가공면에 나타난 잔류응력은 얇은 가공 표면층에서 인장이 발생하고 층이 깊어 질수록 압축으로 변하여 증가되며, 최대값을 이룬후 점차 감소하여 소멸되는데 잔류응력의 영향을 미치는 깊이는 300 μ m를 넘지 않았다.

2) 절삭공구에 프랭크 마멸이 증가할수록 잔류응력도 증가하였으며 최대 압축 잔류응력이 존재하는 가공 표면층의 깊이도 깊게 나타났다.

3) 잔류응력의 최고값은 절삭속도의 변화에 관계없이 모두 압축으로 작용했으며 절삭방향의 잔류응력이 절삭수직방향의 잔류응력 보다 더 크게 나타났다.

4) 가공면의 표면 거칠기는 절삭 속도와 이송이 증가할수록 더 악화되었다.

5) 고경도강 절삭에서 가공면의 표면성상에 관련하여 CBN과 Al₂O₃세라믹공구는 대체로 양호했으나 Mixed 세라믹과 WC공구는 비교적 불량한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구논문은 '93년도 인하대학교 산업과학기술연구소 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Y. Matsumoto, M. M. Barash, C. R. Liu, "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.108, Aug., 1986
2. W. Koenig, M. Klinger, R. Link, "Mach-

- ing Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges-Field of Applications and Limitations", Annals of the CIRP, Vol. 39, pp 61-64, 1990
3. W. Koenig, A. Berktold, K. F. Koch, "Turning versus Grinding -A Comparison of Surface Integrity Aspects and Attainable Accuracies", Annals of the CIRP, Vol.42, No.1, pp 39-43, 1993
4. T. Shirakashi, T. Obikawa, H. Sasahara, T. Wada, "The Analytical Prediction of the Characteristics within Machined Surface Layer", JSPE-59-10, pp 1695-1700, 1993
5. K. Oishi, "Early Fracture of Ceramic Tools in Turning of Hardened Steel", JSPE-55-06, pp 295-300, 1992
6. S. Enomoto, M. Kato, "Cutting Characteristics of CBN Cutting Tool in Turning Chromium-molybdenum Steels of Various Hardness", JSPE-55-06, pp 1079-1084, 1989
7. N. Narutaki, Y. Yamane, "High-Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools", Annals of the CIRP, Vol.42, No.1; pp 103-106, 1993
8. H. P. Klug, "X-ray Diffraction Procedure", John Wiley, 1974
9. E. Kula, V. Weiss, "Residual Stress and Stress Relaxation", Plenum Press, 1982
10. S. O. An, S. L. Noh, "Cutting Characteristics of Hardened STD11 Steel in Turning", Inha Uni., R. I. S. T, Vol.21, pp 17-24, 1993