

SKD11 의 하드터닝 가공 열처리 시편의 표면잔류응력 측정에 관한 연구

김종혁*, 이태홍**, 장동영#, 한동철***

Residual Stress Measurement in Hard Turned Workpiece

Jong-Hyuk Kim*, Tae-Hong Lee**, Dong-Young Jang# and Dong-Chul Han***

ABSTRACT

Most manufacturing processes such as welding, cutting and molding generate residual stresses on the surface of manufactured parts. Between compressive and tensile residual stresses, the tensile residual stress is harmful to the surface integrity, which results in reduced fatigue life and causes other structural failures when the service stresses are superimposed on the residual stresses.

In the research, the residual stresses in the hardened tool steel (SKD11) were measured using hole-drilling method. The specimens were prepared through hard turning. Most of residual stresses in the machined surface were compressive.

Key Words : Surface Residual Stress(표면잔류응력), Hard-Turning(하드터닝), SKD11(냉간가공용 금형강), Hole-Drilling Method(천공법)

1. 서론

하드터닝이란, 연삭작업을 대체하여 고경도의 공작물을 경면 가공 수준으로 최종 가공할 수 있는 공정을 의미한다. 또한 가공 정밀도만 보장이 되면 절삭유를 사용하지 않으므로 환경 친화적이며, 가공 후 표면에 압축 잔류응력이 생성되기 때문에 부품의 내구성이 연삭에 의한 제품 보다 우수하다.

하드터닝에 의한 가공 면의 표면 품위(Surface Integrity)는 여러 가지 인자에 의해 그 특성이 결정된다. 특히 이러한 표면 품위 인자들은 가공부

위의 피로 수명과 직접적인 연관이 있기 때문에 가공 공정과 표면품위의 관계를 밝히는 것이 피로 수명을 고려한 기계설계나 제작에 중요한 역할을 한다. 가공물에서의 품질을 결정하는 요소 중 가공물의 치수, 표면 조도, 경도측정 및 가공물의 표면 잔류응력의 크기 등이 있다. 그 중 본 연구에서는 하드터닝 후 표면에 압축 잔류응력이 생성되는지를 확인하였으며, 그 크기를 측정하였다.

잔류응력이란, 외력이 제거된 후에도 탄성체에 응력이 남아 있는 것을 말한다. 잔류응력은 그 형성 원인에 따라, 여러 가지 기계 가공방법에 의해서 순수하게 발생하는 mechanical stress 와, 원재료

✉ 2002년 9월 27일 접수

* 서울대학교 대학원

** The University of New South Wales

교신저자, 서울산업대학교 산업정보시스템공학과, 정밀기계설계연구소
Email dyjang@snut.ac.kr Tel. (02) 970-6450

*** 서울대학교 기계항공공학부

에 남아 있는 응력이 부품의 특성과 가공 시 나타나는 응력에 영향을 주는 contingent stress 로 나눌 수 있다. 비록 서로 다른 메커니즘에 의해 생성되지만, 이것들은 가공 상황에서 동시에 발생한다.

하드터닝의 가공방법 특성상 가공된 부품의 표면에 압축 잔류응력이 생겨나게 된다. 이러한 압축 잔류응력은 가공된 부품의 품질에 영향을 미치며, 일반적으로 부품에 인장 잔류응력보다는 적당한 압축 잔류응력이 존재하는 것이 부품의 피로 수명에 긍정적인 영향을 미친다고 널리 알려져 있다.

이에 하드터닝 가공 조건 및 재료에 따른 적당한 잔류응력 분포를 데이터 베이스화 하는 일이 하드터닝에서 가공 품질을 높일 수 있는 방법 중의 하나이다.

잔류응력 측정 방법으로는 중성자 회절법, X-Ray 를 이용하는 방법 및 천공(Hole-drilling)법 등이 있다¹. 기존의 연구동향으로는, 천공법 및 X-ray, 중성자 회절법을 이용한 용접부위의 잔류응력이 주를 이루고 있으며^{1,2}, 절삭가공 후 공작물에 대한 잔류응력측정은 X-ray 를 이용한 측정³ 및 FEM 해석이 주를 이루고 있다. 그러나 중성자 회절법 및 X-ray 를 이용한 방법은 비파괴검사법으로 측정대상을 손상시키지 않고 잔류응력을 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 측정장비가 고가이고 이에 비해 상대적으로 측정 오차율이 높으며, X-ray 의 경우 깊이 250 μm 미만에서만 측정 가능하다. 또한 단순히 절삭시 열발생, 가공조건 및 재료의 특성으로만 FEM 해석을 하면 대략적인 잔류응력의 분포를 알 수 있으나, 실제로 잔류응력 생성에 대한 여러 가지 변수를 파악하기 어렵다.

그러므로 직접적인 변형률을 측정하여 유한요소법에 의해 유도된 식에 대입하는 천공법을 이용하면, 측정값의 신뢰도를 높일 수 있을 뿐아니라, 측정장비도 다른 방법에 이용되는 장비에 비해 저렴하므로 측정비용 절감효과를 얻을 수 있다.

따라서 본 논문은 천공법을 이용하여 냉간가공용 금형강(SKD11)의 하드터닝에서 다구찌 방법을 이용한 실험조건에 따른 깊이별 잔류응력의 분포 및 깊이에 따른 최대 압축응력과 최대 인장응력이 나타나는 지점을 측정하였다.

2. 천공법에 의한 잔류응력측정의 개요

표면에 잔류응력이 존재하고 있는 시편에 작은 구멍을 천공하면 응력이 이완되고, 이로 인해 변형이 발생하고 이를 측정하면 초기의 잔류응력을 계산할 수 있다는 것이 천공법을 이용한 잔류응력측정의 기본개념이며, 이는 Mathar⁴ 에 의해 처음 제안되었다.

즉, 시편에 3 방향 스트레인 게이지(Rosette)를 부착하고 기계적인 가공을 통해 구멍을 천공하여, 구멍의 깊이를 점차 늘려가면서 그때의 이완된 변형률의 값을 측정하면 시편의 깊이 방향으로의 잔류응력 분포를 계산할 수 있다. 하지만, 탄성학에 기초하여 변형률로부터 구멍주위의 응력 분포를 계산하는 과정이 매우 복잡하고, 또한 엄밀해가 존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서, 변형률로부터 응력을 구하기 위해서는 실험을 통해 보정을 하거나 유한요소법으로 해석하여야 한다.

이에 대해 Schajer⁵ 등이 다음과 같은 방법을 제시하였다. Fig. 1 과 같이 잔류응력이 깊이 방향에 따라 균일하게 분포하고 있다고 가정하여, 구멍의 내부 표면에 균일한 응력이 가해질 때, 시편의 표면에 발생하는 변형률을 유한요소법에 의해 유도하였다.

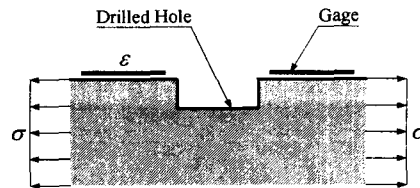


Fig. 1 Uniformly distributed stresses around the hole

구멍의 크기가 시편의 표면에 비해 매우 작고 구멍의 깊이가 시편의 두께에 비해 작으며 시편의 재료가 등방성이라고 가정하면, 구멍의 깊이가 Z 일 때 시편의 표면에서부터 구멍깊이까지 분포하고 있는 균일한 잔류응력의 주응력의 크기와 방향은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \mp \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4B} \quad (1-a)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (1-b)$$

여기서, ϵ_n 은 스트레인 게이지의 n 번째 게이지에서 측정된 변형률이며, α 는 1 번 게이지에서부터 σ_{max} 까지의 각도이다. 또한, 계수 \bar{A} 와 \bar{B} 는 다음과 같다.

$$\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E}\bar{a}, \quad \bar{B} = -\frac{1}{2E}\bar{b} \quad (2)$$

여기서, \bar{a} , \bar{b} 는 무차원 변수 D_0/D , Z/D 의 함수이고, 미국재료시험협회(ASTM)⁶ 에 규격화되어 있다.

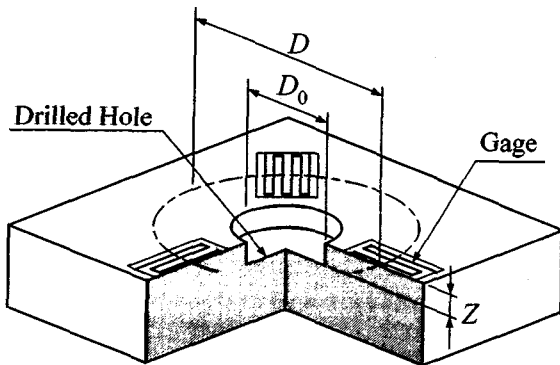


Fig. 2 Related hole diameter and depth

실제의 경우에는 구멍주위에 깊이 방향으로 분포하는 잔류응력이 균일하지 않기 때문에 위 방법으로 측정된 잔류응력의 값은 시편의 표면에서 깊이 Z 까지 분포하는 잔류응력의 평균값이라 할 수 있다.

3. 절삭 조건 및 잔류응력 측정

본 실험은 화천 CNC 선반에서 고주파 열처리 및 절삭시편의 제작 과정에서 나타날 수 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 풀림 처리된 9 개의 실린더 형상의 공작물(SKD11)을 세라믹 공구($Al_2O_3 - TiC$ 계)를 사용하여 하드터닝 하였다. 공작물의 구성 성분은 Table 1 과 같으며, 공작물의 직경은 67 mm, 가공 부 길이는 150 mm 의 것을 사용하였다. Table 2 는 SKD11 의 물성치이다. Fig. 3 은 각 가공물의 로크웰경도(H_{RC})를 측정된 값이며, 각 가공물의 경도는 H_{RC} 62~65 사이의 값을 가지는 것을 알

수 있다. 따라서 각 가공물의 경도 차에 의한 응력 값은 크지 않다고 추정할 수 있다.

Table 1 Ingredients of Workpiece[%]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.55	0.3	0.3	12.0	0.8	0.8

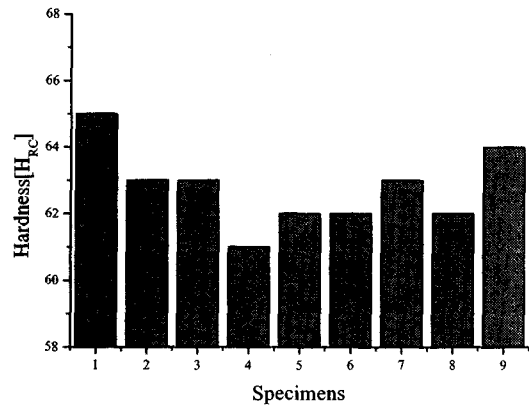


Fig. 3 Rockwell hardness of specimens

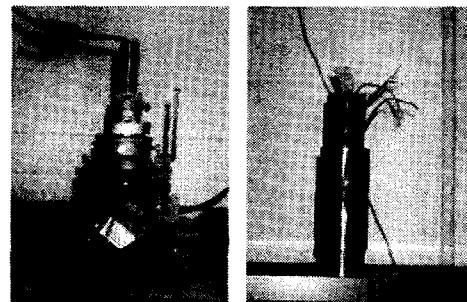


Fig. 4 Set up and assemble Kit

잔류응력 측정을 위한 스트레인 게이지로는 잔류응력측정 전용 게이지인 Vishay 사 Measurement Group 의 CEA-06-062UL-120 을 사용하였으며, 동사의 System 5000 을 이용하여 퍼스널 컴퓨터로 측정 데이터를 처리하였다. 또한 절삭시편의 천공을 위해서 Rs-200 Air Milling 장비를 사용하였으며, 이 장비는 최고 100,000 rpm 까지 회전할 수 있어 고속 천공법으로 평저공의 작업에 알맞은 장비이다. 측정된 변형률을 응력으로 변환하는 프로그램에 입력하여 구멍의 깊이에 따른 잔류응력의 변화량

을 조사하였다. Fig. 4는 가공 후 공작물에 스트레인 게이지를 부착한 모습이며, 잔류응력을 측정하기 위해 공작물을 완전히 고정 할 수 있는 치구와 천공장치를 조립한 모습이다. 또한 천공하는 Milling cutter는 직경 1.6 mm 카바이드 공구를 사용하였다. 천공 시 주의할 점은 게이지 중심부에 정확히 천공이 되어야 한다는 점이다. Rendler와 Vigness^[9]에 의하면, 062UL 게이지의 경우에 게이지의 중심과 구멍의 중심이 0.001 in 이내에 동심을 이루면 측정오차가 3%이내를 유지한다.

Table 2 Mechanical Properties

Young's Modulus [Kg/mm ²]	Poisson's ratio	Yield Strength [Kg/mm ²]
2.04×10 ⁴	0.29	210

가공조건이 표면 잔류응력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 3 과 같이 다구찌 계획법에 의해 L9-직교배열표를 작성하여 가공 조건을 설정하였다. 예를 들어 test-1 의 가공조건은 절삭속도 50m/min, 이송량 0.1mm/rev, 절삭깊이 0.05mm 이다. 잔류응력을 측정하기 위한 절차는 Fig. 5 와 같다. 구멍의 깊이는 Rs-200 에 부착되어 있는 나사 게이지를 이용하여 원하는 깊이까지 천공하게 된다. 구멍의 깊이는 최초 50 μm에서 시작하여 500 μm까지 14 단계로 나누어 천공을 수행하였으며, 각 단계에서 이완되는 변형률의 값을 측정하였다.

이론적으로는, 측정된 변형률이 Fig. 2 에서의 스트레인 게이지 직경 대비 구멍깊이 Z/D = 0.4 까지 유효하지만, 고주파 처리된 SKD11 은 경도가 아주 높기 때문에 현재 천공법에 널리 쓰이고 있는 카바이드 공구로는 여러 번 시험한 결과, 공구의 급격한 마모와 가공 조건이 모재에 미치는 영향이 250 μm이하이므로, 약 250 μm까지의 잔류응력의 변화를 관찰하였다.

Table 3 Cutting Condition

Variable Factor	Level 1	Level 2	Level 3
(A) cutting speed [m/min]	50	90	130
(B) feed rate [mm/rev]	0.1	0.15	0.2
(C) depth of cut [mm]	0.05	0.1	0.2

Factor \ Test	A	B	C	D
1	Level 1	Level 1	Level 1	Level 1
2	Level 1	Level 2	Level 2	Level 2
3	Level 1	Level 3	Level 3	Level 3
4	Level 2	Level 1	Level 2	Level 3
5	Level 2	Level 2	Level 3	Level 1
6	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2
7	Level 3	Level 1	Level 3	Level 2
8	Level 3	Level 2	Level 1	Level 3
9	Level 3	Level 3	Level 2	Level 1

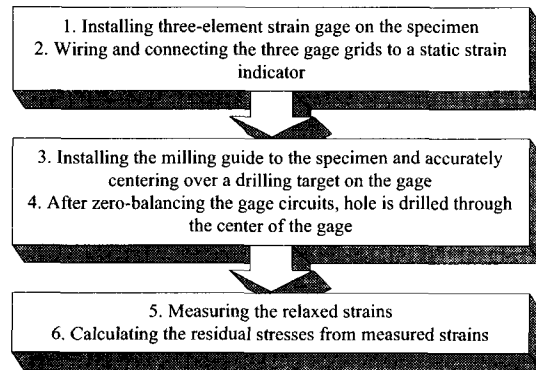


Fig. 5 Procedures for measuring residual stresses

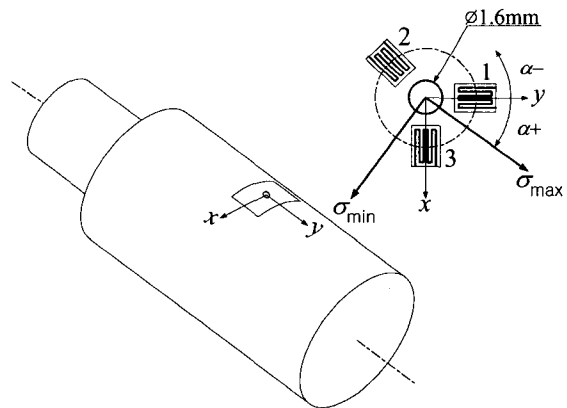


Fig. 6 The position of strain gage

Fig. 6 에서 보는 바와 같이 절삭 시편에 게이지를 부착하고, 각 깊이별로 구멍에 대한 반경방향 변형률 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 을 측정하면 식(1)에 의하여 잔류응력의 표면에서부터 해당 깊이까지의 최대, 최소 주응력($\sigma_{max}, \sigma_{min}$)의 평균값 및 그때의 주응력 방향 α 를 구할 수 있다.

위에서 계산된 σ_{max} 와 σ_{min} 및 α 에 의하여 각 잔류응력의 절삭방향(σ_x), 이송방향(σ_y) 성분의 절삭시편의 표면에서 해당 깊이까지의 평균값을 구할 수 있다.

절삭시편의 표면에서 해당 깊이까지의 평균응력으로부터 해당깊이에서의 실제 응력을 구하기 위하여 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\sigma'_i = \frac{\sigma_i Z_i - \sigma_{i-1} Z_{i-1}}{Z_i - Z_{i-1}} \quad (3)$$

여기서, σ_i 는 표면에서부터 깊이 Z_i 까지 작용하는 잔류응력의 평균값이며 σ'_{i-1} 는 구멍 깊이 Z_{i-1} 과 Z_i 사이에 작용하는 잔류응력의 값이다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 7 과 Fig. 8 은 측정된 변형률 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 로부터 식(1)을 이용하여 구한 주응력 $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ 의 구멍 깊이에 따른 변화량이다. 이는 공작물 표면에서부터 해당 깊이까지 작용하는 잔류응력의 평균값으로, 그림에서 볼 수 있듯이 구멍의 깊이가 증가할수록 잔류응력의 평균값이 0으로 수렴한다.

위에서 구한 값들을 토대로 식(3)을 이용하여 해당깊이에서의 실제로 작용하는 잔류응력(σ_x, σ_y)을 구하였으며, 또한 5 차의 다항식으로 근사하였다. 그 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 여기서 Vc는 절삭속도, Fd는 이송량, DC는 절삭깊이를 나타낸다. 최초 두께에서 최대 압축응력이 나타나며 구멍 깊이가 증가할수록 압축응력이 감소하여, 최대 인장응력에 도달한다. 최대 인장응력에 도달 후 인장응력이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 절삭시 이송이 Level 3 (0.2mm/rev)일 때 공작물 표면에서 가장 큰 압축 잔류응력이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 절삭 속도가 높을수록 공작물 표면에서의 최대 압축응력이 감소함을 볼 수 있다. 그러나 절삭 깊이에 따른 최대응력의 변화는 다른 절삭조건

에 비해 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 표면 아래에서의 최대 인장응력은 절삭 속도가 증가할수록 커지는 것을 볼 수 있다.

그러나, 최대 약 10 μm 미만의 두께에서는 백색층의 영향으로 인장 응력이 나타나는 것이 알려진 사실이나, 천공법의 단점인, 표면에서 10 μm 이하의 두께에 대한 측정이 어려우므로, 백색층에 대한 응력 값은 생략하기로 한다. 따라서 본 연구에서는 최초 25 μm 이상의 깊이를 시작으로 평균 잔류응력 및 깊이 별 잔류응력을 구함으로써 가공상태에 따른 응력의 분포 및 영향을 평가하였다.

Table 4는 실험 값 중에 표면으로부터 25 μm 의 두께에 대한 각 성분 잔류응력의 평균값이다.

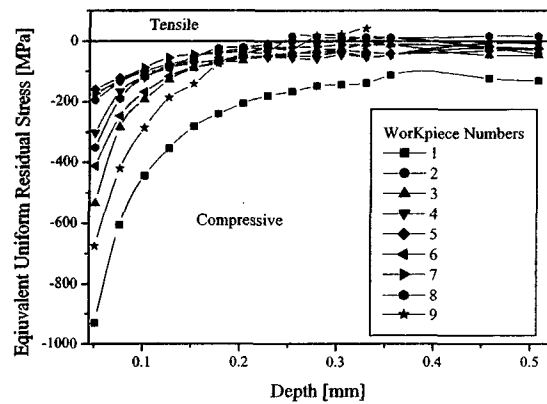


Fig. 7 Maximum principal residual stress in SKD11

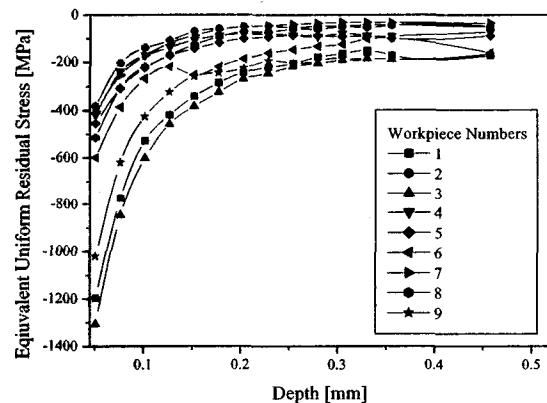
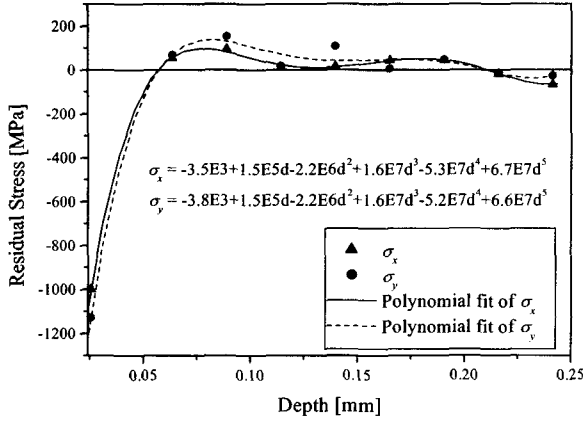
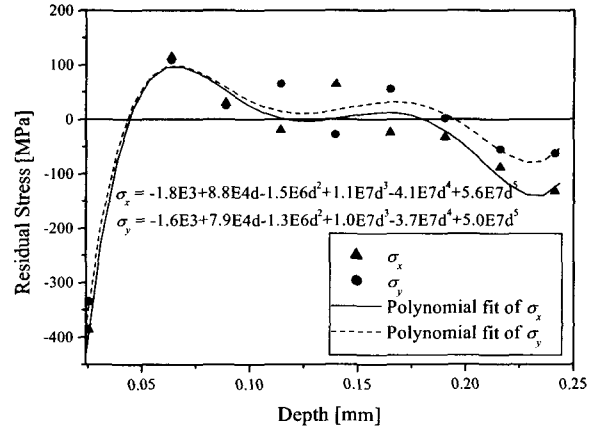


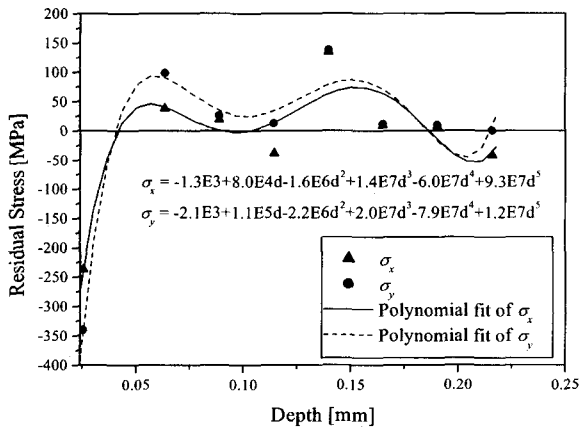
Fig. 8 Minimum principal residual stress in SKD11



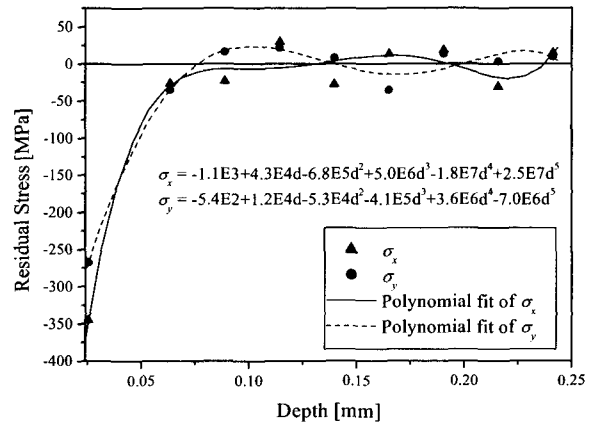
(a) Vc=50m/min, Fd=0.1mm/rev, DC=0.05mm



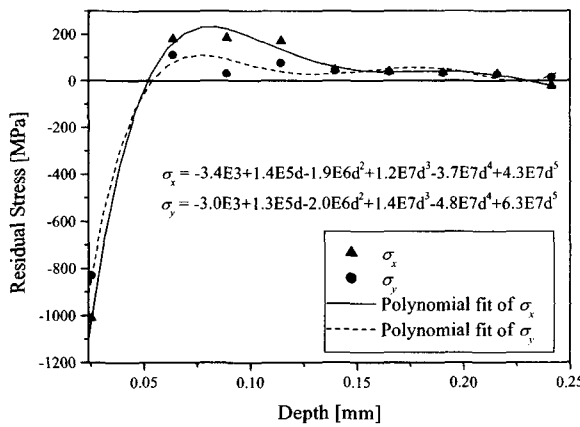
(d) Vc=90m/min, Fd=0.1mm/rev, DC=0.1mm



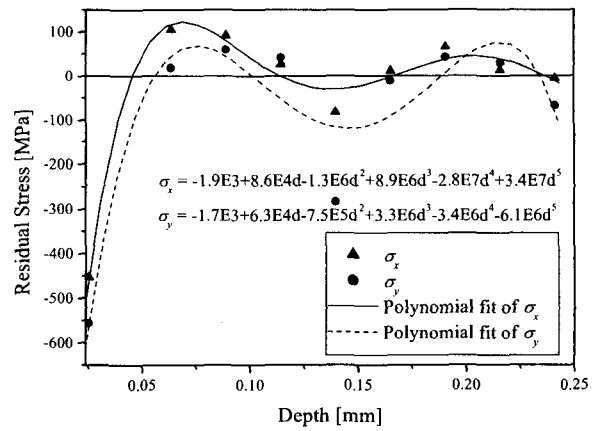
(b) Vc=50m/min, Fd=0.15mm/rev, DC=0.1mm



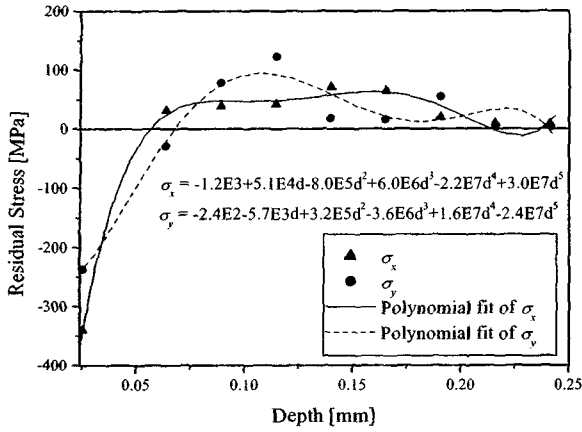
(e) Vc=90m/min, Fd=0.15mm/rev, DC=0.2mm



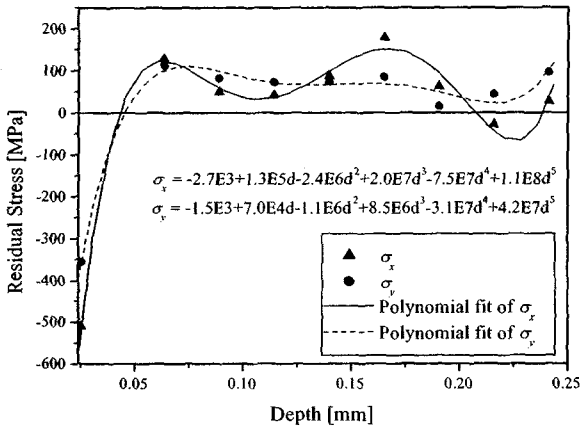
(c) Vc=50m/min, Fd=0.2mm/rev, DC=0.2mm



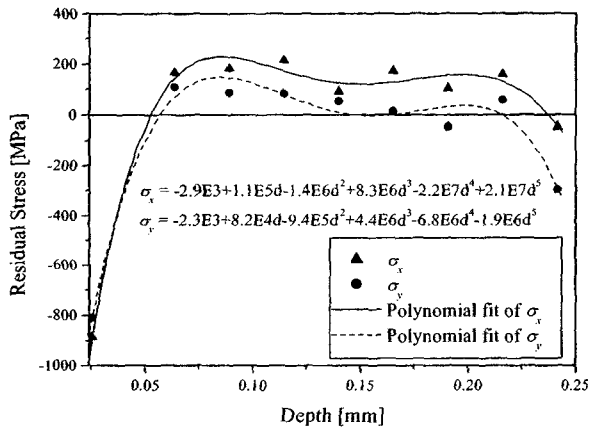
(f) Vc=90m/min, Fd=0.2mm/rev, DC=0.05mm



(g) Vc=130m/min, Fd=0.1mm/rev, DC=0.2mm



(h) Vc=130m/min, Fd=0.15mm/rev, DC=0.05mm



(i) Vc=130m/min, Fd=0.2mm/rev, DC=0.1mm

Fig. 9 Variation in residual stress with depth

Table 4 Each direction residual stress on surface [MPa]

test	direction	tangential	feed	shear stress
1		-999.0	-1128.1	116.2
2		-236.7	-340.0	77.4
3		-1009.7	-828.9	-374.4
4		-386.3	-334.7	51.6
5		-345.1	-267.7	-142.0
6		-453.1	-556.3	77.4
7		-340.0	-236.7	103.2
8		-510.1	-355.1	-25.8
9		-885.9	-808.5	-167.8

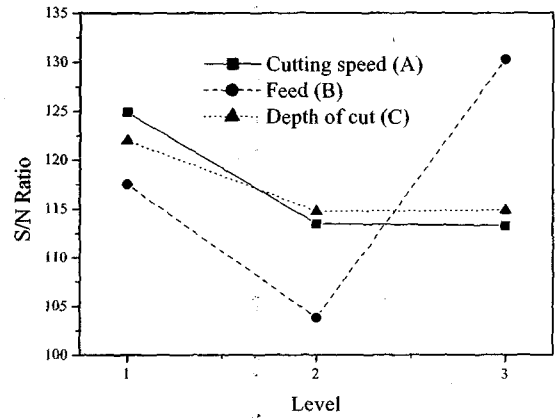


Fig. 10 S/N Ratio of tangential direction residual stresses

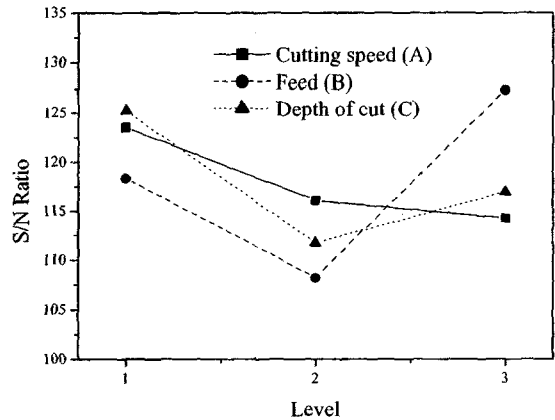


Fig. 11 S/N Ratio of feed direction residual stresses

절삭 조건이 잔류응력에 미치는 정확한 영향을 알아보기 위하여, 위에서 측정된 값으로 다구찌 방법을 이용해 각 절삭조건에 대해 S/N 비를 구하였다.

Fig. 10, Fig. 11 에서 볼 수 있듯이, 잔류응력의 수준은 절삭 방향과 이송 방향 모두 동일하게 절삭속도에서는 Level 1, 이송에서는 Level 3, 절삭깊이에서는 Level 1 에서 가장 큰 압축응력을 보이고 있다. 이는 절삭가공 시에 발열이 증가하면 이에 따른 인장응력 성분이 커짐으로 압축응력이 감소한다고 추측된다. 따라서 절삭속도와 절삭깊이는 작게 이송은 크게 가공을 수행해야 가장 큰 압축응력을 가진 공작물을 얻을 수 있다고 할 수 있다.

5. 결론

하드터닝 시 절삭조건이 공작물의 잔류응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 다구찌 방법을 이용하여 가공조건을 선정하였으며, 선정된 가공조건으로 냉간가공용 금형강인 SKD11 을 하드터닝 하였다. 또한 가공된 공작물을 천공법을 이용하여 잔류응력을 측정하였다.

그 결과, 하드터닝 후에 공작물에는 압축 잔류응력이 발생한다는 것을 확인하였다.

최초 두께에서 최대 압축응력이 나타나며, 구멍 깊이가 증가할수록 압축응력이 감소하여 최대 인장응력에 도달한다. 최대 인장응력에 도달 후 인장응력이 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

또한, 가공조건에 대해 S/N 비를 구해 가공조건이 압축잔류응력의 크기에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭방향에서는 이송, 절삭속도, 절삭깊이 순으로 잔류응력에 미치는 영향이 크다.
- (2) 이송방향에서는 이송, 절삭깊이, 절삭속도의 순으로 잔류응력에 미치는 영향이 크다.
- (3) 전단응력의 크기에는 가공조건이 미치는 영향이 작다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-008-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Cheong, C. C., Cha, I. N., Kim, G. N., "Residual Stress Distribution according to working Conditions in Grinding Operation," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 23~28, 1990.
2. Lee, O. S., Park, C. Y., "Effect of Residual Stress in Al5083 TIG Weld Region on Fatigue Crack Propagation Behavior," *Trans. of KSME-A*, Vol. 23, No. 6, pp. 943~951, 1999.
3. Matsumoto, Y., Hashimoto, F., Lahoti, G., "Surface Integrity Generated by Precision Hard Turning," *STC C*, 48/1, p. 59, 1999.
4. Mathar, J., "Determination of Initial Stresses by the Measuring the Deformation Around Drilled Hole," *Trans., ASME* 56, No. 4:249-254, 1934.
5. Schajer, G. S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method," *Journal of Engineering Materials and Technology*, 110, No. 4: Part I, 338-343; Part II, 344-349, 1998.
6. "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," *ASTM Standard E837*.
7. Rendler, N. J. and Vigness, I., "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses." *Proc.. SESA X X III*, No. 2: 577-586, 1966
8. Measurements Group, Vishay, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method," *Technical Note TN-503-5*, 1993