

## 단속하드터닝에서 잔류응력과 가공변질층의 고찰

### Residual stress and damaged layer in an intermittent hard turning

전준용\*(한국OSG(주)), 고태조(영남대 공대), 김희술(영남대 공대),

Joon Yong Jeon (OSG Korea.), Tae Jo Ko (Yeungnam Univ.), Hee Sool Kim (Yeungnam Univ.)

Abstract : Hard turning has the potential to replace grinding process and to achieve significant reduction in production time and cost. The main applications for hard turning is finishing process, namely grinding process. Therefore, it must be able to satisfy high surface integrity of the workpiece. This paper discusses surface quality in terms of residual stress and damaged layer with respect to cutting parameters in an intermittent hard turning. Damaged layer experiment is carried out with Taguchi's method that is based on the orthogonal array. From the response table, cutting parameters are analyzed from the view point of the damaged layer and residual stress. From this experimental results, even though in the intermittent hard turning, surface integrity turns out be good enough for replacing grinding process

터를 필요로 하게 되었다. 즉, 복잡하고 단이 있는 형상의 고경도 재료를 CBN이나 PCD 공구 등을 이용하여 선삭공정에 의해 다듬질 가공을 함으로써 연삭을 대체할 수 있도록 하여야 한다.<sup>[1][2]</sup>

하드터닝은 Fig. 1에서와 같이 여러 요소들의 성능을 향상시킴으로써 생산성 향상과 비용을 절감하고, 공정의 최적화를 가져오는 기술로 파악되고 있다.<sup>[3]</sup>

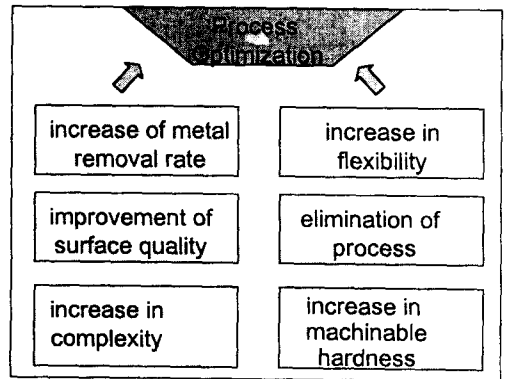


Fig.1 Merit of hard turning

#### 1. 서론

최근에 기계가공 분야에서는 고정밀도와 동시에 고경도, 내열, 내마모성의 특성을 가진 기계부품의 사용량이 증가되고 있다. 이들 고경도 부품의 다듬질 가공은 통상적으로 연삭공정을 이용하였다. 그러나 10여년 전에 연속하드터닝 가공기술이 도입된 이래 꾸준한 연구가 수행되어 이 기술을 이용함으로써 부분적이긴 하나 연삭공정 없이 다듬질가공이 가능하게 되었다. 최근에는 부품의 형상이 날로 복잡해져서 단속가공을 필요로 하는 가공물이 많아지게 되었다. 따라서 지금까지 이 기술의 발전에도 불구하고 기존의 연속하드터닝 연구에서 밝혀진 연구결과와 다른 기술적인 데이

하드터닝은 경화강의 다듬질 가공이고 가공된 부품은 최종제품이기 때문에 표면품질은 매우 중요하다. 현재까지 하드터닝의 연구결과를 살펴보면 표면조도를 2-3 $\mu$ m R<sub>max</sub>이하로 확보할 수 있고, 칩으로 대부분 열을 발산하여 연삭시와 같이 표면이 타는 현상이 없음이 확인되었다. 또한, 공구인선이 피삭재에 가하는 소성력에 의해 가공변질층에 존재하는 잔류응력이 연삭에 비해 큰 압축응력을 받는 상태로 존재하기 때문에 연삭으로 가공한 부품 보다도 피로수명이 향상된다.<sup>[1][4][5]</sup>

반면, 직선운동 베어링으로 사용되는 기계부품인 볼 부시와 같이 내경이나 외경에 단이 있는 경우처럼 단속하드터닝이 되면 연속 하드터닝과

는 다른 관점에서 가공기술을 개발하여야 한다. 그 첫째는 가공시에 발생하는 절삭성과 공구마모이다. 따라서 단속절삭으로 인하여 발생하는 충격 절삭력에 대하여 공구의 치핑이나 파단에 충분히 견딜만한 절삭공구 재료의 선정과 함께, 이 공구로 절삭할 때 얻을 수 있는 표면조도, 절삭력 등에 대한 분석이 필요하다. 이 부분에 관한 연구는 단속하드터닝에서 절삭성과 CBN공구의 마모특성<sup>[19]</sup>에서 다루었다. 둘째는 단속하드터닝에 대해 충분히 잘 견딜 수 있는 절삭공구재료로 절삭했을 때 가공면의 잔류응력과 가공변질층에 관한 고찰이 필요하다. 즉, 가공된 부품의 표면품위가 연삭공정에 비교하여 하드터닝의 중요한 장점 중의 하나이기 때문에 이에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 단속 하드터닝에서 다양한 절삭변수들이 표면품위에 미치는 영향과 결과를 고찰하고, 연삭가공의 결과와 비교 검토함으로써 단속 하드터닝의 유용성에 대하여 평가를 하고자 한다.

## 2. 표면품위

표면품위란 용어는 1964년 미국과 주변국가들 사이에서 기계가공업 분야에 대해 처음으로 사용되었다. 표면품위는 기계가공이나 다른 표면생성 기구를 통하여 생성된 원래 또는 변화된 표면 부근에서의 상태로 기하학적 특성뿐만 아니라 기계적 및 야금학적 특성을 기술하기 위해 사용되었다.<sup>[6][7][8]</sup> 일반적으로는 기계 가공면의 표면품위를 파악하기 위해서 가공변질층에서의 변질층 두께와 잔류응력 등의 고찰이 요구된다.

### 2.1 가공변질층

가공변질층은 결정입자가 파쇄되어 미세화되고, 절삭방향으로 유동하여 동일 방향을 취하는 섬유조직과 비슷하다. 이러한 변질층에는 커다란 잔류응력이 존재하며 미시적인 균열이나 비결합부를 포함하는 취성구조를 가지고 있기 때문에 기계적 성질을 나쁘게 하는 것으로 알려져 있다. 하드터닝에서도 이미 알려진 바와 같이 연삭공정보다는 가공변질층의 두께가 작아지지만 가공변질층의 생성은 불가피하다. 그러나, 이를 최소화 하는 것은 가공물의 표면품위 향상에 매우 중요

하다.<sup>[10]</sup>

Fig. 2는 절삭 model에서 가공변질층의 생성원리를 도식적으로 나타낸 것이다. 절삭동안에 피삭재와 접촉한 공구가 인선의 진행에 따라 가공면적  $\square ABEF$ 를 절삭깊이  $t$ 로 절삭할 때 전단면

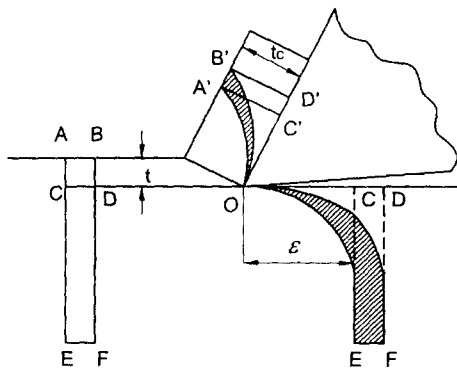


Fig.2 Damaged layer occurred in turning

에서  $\square ABCD$ 는  $\square A'B'C'D'$ 로 되지만, 공구 경사면에서의 마찰에 의해 해칭부분  $A'B'O$ 로 변형된다. 또한 가공표면의 내부면적  $\square CDEF$ 는 공구날의 압축과 마찰에 의하여 OFE로 소성변형된다. 이와 함께 하드터닝시 가공면에는 소성변형과 더불어 수반되는 열변형으로 인해 결정구조와 조직의 변화를 가져오는 가공변질층이 발생하게 된다.<sup>[11]</sup>

한편, 가공변질층 중에서 White layer의 발생 원인은 아직 분명하게 규명되지 않았지만 지금까지의 연구결과로는 금속이 어떤 임계 온도에 도달할 때 금속 상(Phase)의 변화후 급속한 냉각에 의한 것으로 가설되어져 있다.<sup>[9][13]</sup> White layer는 마르텐사이트와 오스테나이트 성분이 섞여 있는 복잡한 OTM(over tempered layer)미세조직을 가지고 있으며, 그 두께는 절삭조건에 따라 다른데 일반적으로 약  $25\mu m$ 정도이다.<sup>[5]</sup>

### 2.2 잔류응력

잔류응력이란 소재의 변형이 탄성한계를 넘어 외력이 완전히 제거되어도 소재에 남아 있는 응력을 말한다. Fig. 3에서와 같이 하드터닝된 부품에 존재하는 잔류응력은 기계적 영향과 열적 영향이 복합적으로 작용하여 발생한다.

기계적 영향은 절삭중에 기계적인 힘이 가공면에 가해지고, 이로 인하여 소성 변형된 표면은 압

축 잔류응력 상태를 가진다. 그 아래 표면은 탄성적으로 인장 잔류응력 상태로 남게된다. 역학적 관점에서 절삭은 직경이 작은 비드로 Shot peening한 표면층의 소성변형과 유사한 응력의 형태를 가진다. 반면, 열적 영향은 절삭 중에 표

절삭조건에 따라 일치하게 대응하지는 않는다. 따라서 연속 하드터닝에서와 마찬가지로 단속 하드터닝에 있어서도 단속적인 충격 절삭력에 의해 잔류응력의 분포 형태가 어떻게 구성되어 있는지를 파악하는 것이 중요하다.

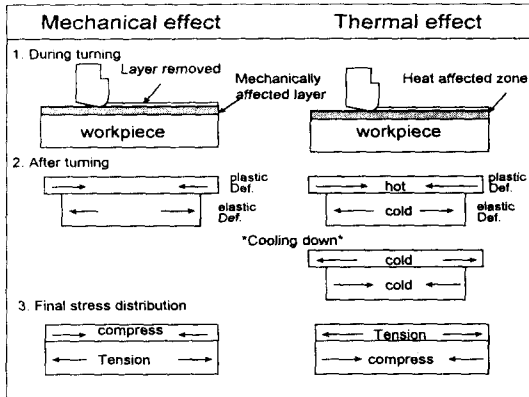


Fig.3 The Mechanical behaviour of materials

면층은 국부적으로 상당한 고열이 발생되어 결정이 조대해지지만, 모재의 내부는 냉각상태로 남아 있게 된다. 이는 절삭후 변질층이 냉각될 때 모재의 내부와의 온도차에 의해 급격한 열 수축을 가져오게 되어 인장 잔류응력을 발생시키는 원인이 된다.<sup>[6][8]</sup> 이 두가지 요소에 의해 소재의 응력이 결정되게 된다.

하드터닝은 연삭과는 달리 칩으로 대부분의 열을 발산하고, 동시에 공구의 인선으로 표면층에 큰 압력을 가하므로 압축 잔류응력과 UTM(untempered martensite layer)층을 생성한다. 그러나 플랭크 마모의 증가와 높은 절삭속도에서는 열영향으로 서서히 OTM(overtempered martensite layer)층과 인장응력을 유발하게 된다.<sup>[3][14]</sup>

잔류응력은 사용응력과 방향과 부호가 같으면 해롭고, 방향은 같으나 부호가 다르면 이로운 영향을 준다. 일반적으로 가공물 표면층에서 인장 잔류응력은 압축 잔류응력에 비해 취성파괴, 피로 수명에 불리하다. 그래서 자동차용 부품중 크랭크축, 차축, 엔진벨브, 스프링 등은 표면층에 압축 잔류응력을 기계적으로 얻기 위해 쇼트 피이닝을 하는 것이 보편적이다.<sup>[12]</sup>

잔류응력은 가공면에서부터 내부로 향할 수록 응력 상태가 달라지며, 반드시 변질층의 깊이와

### 3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 소재는 Fig. 4와 같이 내경에 단이 있는 ball-bush로서 내부 홈을 인발가공으로 성형한 후  $H_R C60$ 으로 열처리한 SUJ2강이다. 열처리는  $820\text{ }^\circ\text{C}$ 로 30분간 가열한후  $80\text{ }^\circ\text{C}$  오일에서 퀴칭을 하고  $190\text{ }^\circ\text{C}$ 로 2시간 동안 템퍼링을 하였다. 이 소재의 원래 공정은 내부를 절삭가공한 후 담금질 열처리를 하고, 최종적으로 연삭가공을 한다. 이러한 공정의 부품을 하드터닝함으로써 연삭공정 없이 열처리된 부품을 선삭하고자 한다. 이 과정에서 내부의 스플라인 홈 때문에 단속절삭이 일어나게 된다.

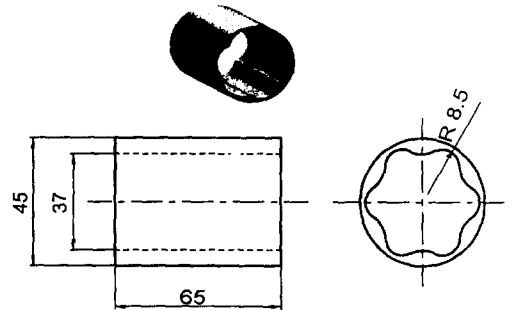


Fig.4 Schematic diagram of ball-bush

절삭실험은 CNC선반(대우중공업 Pro-6)에서 내경 공구홀더(PCNLR2525)에 스미또모사의 BN250 (60% CBN+TiN) CBN공구를 장착하여 절삭실험을 하였으며, 이 공구의 노즈 반경은  $0.8\text{mm}$ , 챔퍼폭은  $0.1\text{mm}$ , 챔퍼각은  $30^\circ$ 이다. 이 실험에서 60%의 CBN공구를 채택한 이유는 참고 문헌 [19]에서 연구한 결과 60%의 저밀도 CBN의 공구재료가 단속절삭에 유리한 결과가 나왔기 때문이다.

한편 절삭변수가 가공변질층에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 여러가지 절삭조건을 조합하여 적용하여야 하며, 이 경우 실험의 가지수가 상

당히 많게 된다. 이러한 이유 때문에 실험의 수를 줄임과 동시에 효과적으로 실험에 영향을 크게 미치는 인자의 특성을 파악할 수 있는 통계적 실험 방법인 Taguchi 실험법을 적용하였다. 이 실험법을 이용하여 가공변질층의 깊이를 적게 하는 절삭조건도 예측하고 확인실험을 통하여 실험의 신빙성을 확인하였다. 이때 가공변질층은 Fig. 5와 같이 하드터닝된 소재를 Wire-EDM으로 소재를 절단하여 샘플을 만든후 Epoxy에 마운팅하였다. 이를 Polishing한 후, Nital 2%로 에칭하여 금속 현미경(Axiotech)으로 측정하고 사진촬영을 하였다.

또한, 가공변질층에 분포하는 잔류응력의 강도와 분포를 X-선 회절법을 이용하여 표면층으로부터 깊이 방향으로  $10\mu\text{m}$ 씩 전해 연마를 하면서 측정하였다. 이 경우 잔류응력은 XRD(Rigaku)를 이용하여 측정하였고, 잔류응력의 계산방법은  $2\theta - \sin^2\psi$  법을 사용하였다.<sup>[15][16][17]</sup>

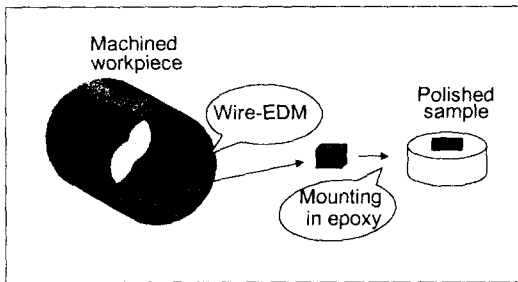


Fig.5 Sample preparation of damaged layer

#### 4. 실험결과

본 연구에서는 단속 하드터닝을 할 때 절삭조건과 공구마모에 따라서 가공변질층의 생성과 응력상태를 고찰하였다. 이를 위해서 Table 1과 같이 가공변질층에 영향을 미치는 요소로서 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이, 그리고 공구마모에 대해 각각의 요소 수준(Factor level)을 조합하여 실험을 하면 실험의 가지수가 상당히 많게 된다. 이런 이유로 통계적 실험법인 Taguchi 방법의 직교배열(Orthogonal array)을 이용하여 실험을 하였다. 따라서 실험의 수를 줄임과 동시에 실험 목적에 영향을 크게 미치는 요소의 특성을 추정하

여 가공변질층을 적게 발생시키는 절삭조건을 효율적으로 선정할 수 있었다.

먼저 Fig. 6은 Table 2의 직교배열에 따라 9가지의 실험조건으로 절삭하였을 때 얻어진 각각의 가공변질층 사진들이다. 실험조건에 따라 가공변질층의 깊이가 큰 것부터 작은 것까지 다양하게 나타나고 있다. 이때 가공변질층 깊이는 금속현미경에 장착된 디지털 게이지로 특정 부분 세 곳을 측정하여 평균값을 취하였다.

Table 1 Factors and factor levels

Level	A. Cutting speed (m/min)	B. Feed rate (mm/rev)	C. Depth of cut (mm)	D. Tool wear ( $\mu\text{m}$ )
1	97	0.05	0.05	50 이하
2	145	0.1	0.1	50-160
3	218	0.15	0.2	160이상

Table 2 Factors design used in the experiment (Orthogonal array)

No.	A. Cutting speed	B. Feed rate	C. Depth of cut	D. Tool wear
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

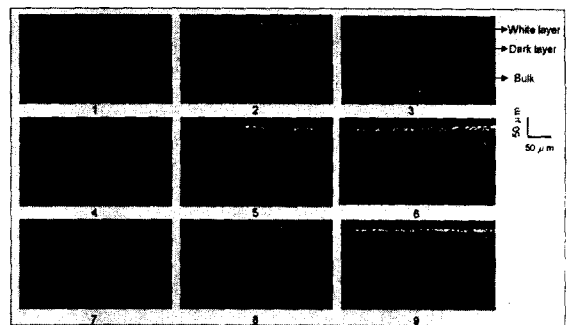


Fig.6 Different damaged layer by Taguchi experiment(X100)

Table 3은 Table 2의 직교배열표에서 9가지의

실험 조건으로 가공변질층 깊이를 측정된 데이터 값을 식(1)과 같이 망소특성(Smaller-The-better)을 구하는 식으로 S/N비(dB)를 구하였다.<sup>[18]</sup>

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2) \quad (1)$$

여기에서  $n$ 은 실험반복회수,  $y_n$ 은 반복된 실험 데이터이다.

Table 3 S/N ratio table (dB)

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/N ratio	-36.54	-33.32	-41.29	-40.14	-37.55	-42.42	-36.07	-48.40	-35.88

이 S/N비는 가공변질층의 크기 정도를 나타내는 역할을 하며, 따라서 S/N비가 작을 때는 가공변질층이 작은 양호한 표면품위를 의미한다. 그리고 실험 결과를 토대로 Table 4와 같이 응답 테이블을 만들 수가 있는데, 이는 각 인자의 레벨을 변화시켰을 때 그 인자가 가공변질층에 미치는 정도를 나타낸 것이다. 이 값은 각 인자의 값에 해당하는 값을 모두 합하여 그 개수 만큼 평균을 취한 것이다.

Table 4 Response table

Level	A. Cutting speed	B. Feed rate	C. Depth of cut	D. Tool wear
1	-37.05	-37.58	-42.45	-36.65
2	-40.03	-39.75	-36.44	-37.27
3	-40.11	-39.86	-38.30	-43.27

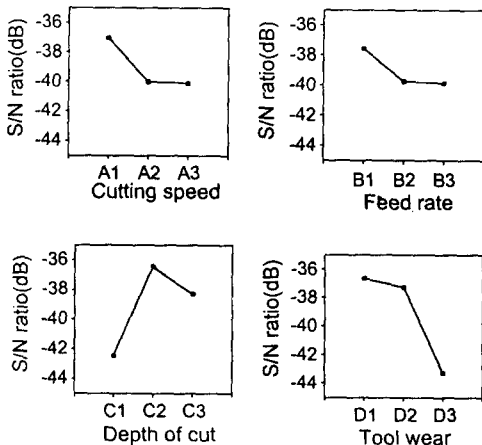


Fig.7 Response graph with respect to each factor

Fig.7은 Table 4의 응답테이블을 도식적으로 나타낸 것으로 망소특성을 고려한 각 인자의 효과를 보여주고 있다. Fig.7을 살펴보면 가공변질층은 절삭조건에 따라서 많은 변화를 보이고 있으나, 공구의 마모에 따라서 가공변질층이 가장 민감하게 변하고 있음을 알 수가 있다. 따라서 하드터닝을 이용하여 최종 제품을 만들기 위해서는 공구마모에 가장 많은 주의를 기울여야 한다. 한편 절삭조건의 경우, 절삭속도와 이송속도가 클 때 가공변질층이 크게 나타나며, 절삭깊이에 따라서는 변동을 하고 있다. 이는 선삭가공의 경우 칩부하는 이송속도에 의해 거의 결정이 되기 때문에 반경방향의 절삭깊이는 크게 절삭부하에 영향을 미치지 못하고 있음을 보이고 있는 것이다. 결국 단속 하드터닝에서의 가공변질층은 일반절삭시의 가공변질층의 경향과 일치하는 결과를 보이지만, 일반절삭보다도 특히 공구의 마모에 의한 영향을 더욱 많이 받음을 나타낸다.

한편, Table 4의 응답 테이블을 근거로 본 실험에서 선정한 절삭조건의 범위 내에서 가공변질층을 최소화 할 수 있는 인자, 즉 해칭된 영역(절삭속도97m/min, 이송속도0.05mm/rev, 절삭깊이 0.1mm)을 선정한 후 실제로 선택된 인자가 예상치와 같이 가공변질층의 깊이가 작은지 확인 실험을 하였다. Fig. 8의 (a)와 (b)는 표면품위에 가장 양호한 절삭조건으로 절삭한 경우(S/N비가 가장 작은 조건)와 바람직하지 않은 조건(S/N비가 가장 큰 조건)으로 절삭된 경우의 가공변질층을 비교한 사진이다. (a)의 경우 가공변질층의 깊이는 90 $\mu$ m정도로 작게 나타났으며, white layer는 8 $\mu$ m정도 발생하였다. 반면, (b)의 경우는 가공변질층 깊이가 260 $\mu$ m정도 발생하였고 열적 영향으로 추론되는 white layer가 40 $\mu$ m로 크게 나타남을 볼 수 있다.

이상의 두 경우에 대하여 잔류응력을 측정하였는데, 이 경우에 가공변질층 내에서의 잔류응력 분포는 Fig. 9의 (a), (b)로 나타내었다. 먼저 (a)의 경우는 S/N비가 작은 절삭조건으로 가공된 면의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로 표면층에는 인장 잔류응력이 약 600Mpa정도 발생하였으나 표면으로부터 white layer를 지난 약 15 $\mu$ m지점부터는 압축응력이 분포하는 것을 볼 수 있다. 이

응력은 계속 압축응력으로 존재하다가 가공변질층의 깊이라고 언급한  $90\mu\text{m}$  이후부터는 거의 0으로 도달하고 있음을 알 수가 있다. 반면 S/N비가 큰 경우의 절삭조건으로 가공된 (b)면의 응력 분포는 표면층의 인장 잔류응력이 (a)의 경우보다 크며, 인장잔류응력이 존재하는 깊이도 매우 큼을 볼 수가 있다. 이 값은 white layer의 깊이로 측정된  $40\mu\text{m}$  이후 지점부터 압축응력으로 존재하며, 이 응력은 가공변질층의 깊이까지 계속하여 방향이 변하지 않다가 그 이후에 응력이 거의 0으로 돌아옴을 알 수가 있다.

한편 상기의 결과처럼 단속 하드터닝에서는 일반적으로 알려진 하드터닝과 같이 표면층부터 압축응력이 되는 것이 아니라 표면층에는 일단 인장응력이 일정부분 존재하다가 압축응력으로 존재하게 된다. 이 이유는 단속절삭에서의 충격력에 의한 것으로 사료되며, 이 원인과 함께 공구가 많이 마모될 경우 인장응력이 더욱 커지는 것으로 보아서 열적영향이 더하여지고 있음을 알 수가 있다. 이러한 인장응력의 존재는 결국 하드터닝의 큰 장점중의 하나인 응력상태가 압축으로 존재한다는 결과에 위배가 되며, 이 결과의 원인 분석에 대한 연구를 필요로 할 것이다. 그러나 M. Field의 연삭가공 결과<sup>[7]</sup>와 비교를 해보면 연삭의 경우는 표면층부터 강한 인장잔류응력을 받다가 응력의 방향 변화없이 응력이 0이 된다. 또한 잔류응력이 존재하는 변질층의 깊이는 단속 하드터닝의 조건 (a)와 비슷하다. 이 경우 절삭조건 등이 서로 틀리기 때문에 절대적인 값을 비교할 수는 없고 단지 경향에서 볼 때 연삭가공보다는 잔류응력의 존재 측면에서 좋다고 할 수가 있다.



Fig.8 Example of microstructural change in hard turning(200X)

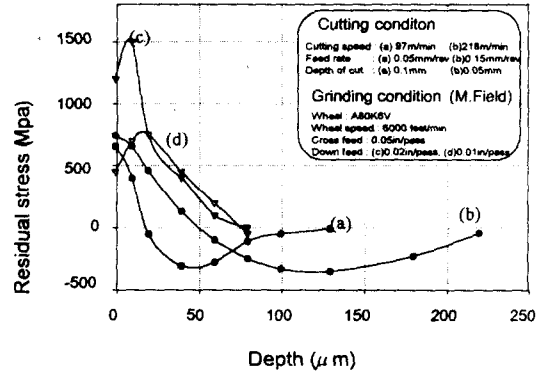


Fig.9 Graph of Residual stress distribution

## 6. 결론

본 연구에서는 단속 하드터닝으로 고경도강의 다듬질 절삭시 가공변질층과 잔류응력의 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단속 하드터닝에서도 일반 하드터닝과 마찬가지로 공구마모와 절삭조건에 따라 가공변질층이 많은 영향을 받지만, 가공면의 표면에서부터 인장잔류응력이 존재하며 이는 단속 하드터닝에서 발생하는 충격력 및 열적 영향에 의한 것으로 사료된다.
2. White layer에 존재하는 이 인장잔류응력은 모재의 깊이방향으로 내려감에 따라서 다시 압축 잔류응력의 상태로 존재하며, 연삭의 경우는 인장 잔류응력이지만 이 층의 크기는 서로 비슷하게 가공변질층의 깊이까지 존재한다. 따라서 단속 하드터닝의 경우 인장잔류응력의 범위를 최소화할 수 있는 절삭조건 선정이 필요하다.
3. 단속 하드터닝에서 가공변질층과 잔류응력을 고찰한 결과 표면층의 측면에서는 연삭가공을 대체할 만큼 충분한 정도를 얻었으나, 튜브 형태의 공작물을 물릴때 유압척의 파지력으로 인한 공작물의 변형으로 기하학적 정도에는 아직 문제가 있다. 이는 향후 연삭에서 Centerless와 같이 선삭에서도 새로운 chucking 방법의 개발을 요구한다.

## 참고 문헌

1. F. Klocke, "High precision turning of hardened steel parts" Fraunhofer-Institute of Production Technology D-52074 Aachen, Germany, pp.314-318.
2. H. K. Tonshoff, "hard turning influences on the workpiece properties", Transactions of NAMRI/SME, Vol. 23, pp.215-220, 1995.
3. W. König, "Turning versus grinding a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies", Annals of the CIRP, Vol. 42, pp.39-43, 1993.
4. C. Gue, "Experimental investigation of hard turning", 2nd international Machining & Grinding Conference, pp.523-539, 1997.
5. A. M. Abrao, "The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel", Wear, pp.279-284, 1996.
6. ASM Handbook volume16, *Machining*, pp.144-151.
7. M. Field and J. F. Kahles, "Review of surface integrity of machined components", Annals of the CIRP, Vol. 20, pp.153-162, 1971.
8. M. M. Barash, "Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface", Journal of Engineering for industry, Vol.104, pp.257-264, 1982.
9. Y. K. Chou and C. J. Evans, "Process effects on white layer formation in hard turning", Transactions of NAMRI/SME, Vol. 25, pp.117-122, 1998.
10. S. Kalpakjian, *Manufacturing processes for engineering materials*, Addison wesley, 1992.
11. 김 동열, 철삭이론과 실제, 기전 연구사 1994.
12. 이 순복, "잔류응력의 공학적 응용", 대한기계학회, Vol. 25/2, pp.111-116, 1985.
13. Y. K. Chou and C. J. Evans, "White layers and thermal modeling of hard turned surfaces", Manufacturing Science and Technology ASME, Vol.2, pp.75-82 1997.
14. J. A. Bailey, "Surface integrity in machining AISI 4340 steel", ASME Journal of Engineering for industry, pp.999-1007, 1976.
15. P. S. Prevey, "X-Ray diffraction residual stress techniques", Metals Handbook10, pp.380-392, 1986.
16. M. E. Hilly "Residual stress measurement by x-ray diffraction", SAE J784a, society of automotive engineers, warrendale, 1971.
17. W. serruys, "Why are x-ray measurements of residual stresses different from mechanical residual stress measurements?", Annals of the CIRP, Vol. 37, pp.527-530, 1988.
18. G. S. pease, *Taguchi methods*, Addison-wesley publishing company, 1993.
19. 전준용, 고태조, 김희술, "단속 하드터닝에 관한 연구(I) : 철삭성과 CBN공구의 마모특성," 한국정밀공학회지, 제16권 7호 1999.