

## Type 316LN 스테인리스강의 절삭특성과 가공 변질층

오 선 세\* · 이 원\*

(2003년 10월 7일 접수, 2004년 1월 7일 심사완료)

### Cutting Characteristics and Deformed Layer of Type 316LN Stainless Steel

Sun Sae Oh and Won Yi

**Key Words** : 316LN Stainless Steel(316LN 스테인리스강), Face Milling Works(정면밀링가공), Surface Roughness(표면거칠기), Tool Wear(공구마모), Resultant Force(합성절삭력), Deformed Layer(가공변질층)

#### Abstract

The cutting characteristics and the deformed layer of nitrogen(N)-added type 316LN stainless steel were comparatively investigated to type 316L stainless steel. The cutting force, the surface roughness(Ra) and the tool wear in face milling works were measured with cutting conditions, and the deformed layers were obtained from micro-hardness testing method. The cutting resistance of type 316LN was similar to type 316L in spite of its high strength. The surface roughness of type 316LN was superior to type 316L for all the cutting conditions. In particular, in the high cutting speed above 345m/min, the surface roughness of the two stainless steels was closely same. The deformed layer thickness of the two stainless steels was generated in the 150 $\mu$ m-300 $\mu$ m ranges, and its value of type 316LN was lower than that of type 316L. This is due to the high strength properties by nitrogen effect. It was found that type 316LN was higher in the tool wear than that type 316L, and flank wear was dominant to crater wear. In face milling works of type 316LN steel, tool wear is regarded as a important problem.

#### 1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 고온강도, 연성, 인성, 내식성 등이 우수하여 다양한 산업 분야에 광범위하게 사용되고 있다. 특히 316계 스테인리스강은 304계 스테인리스강에 비해 고온에서의 기계적 특성 및 내식성이 우수하여, 축류, 화학장치 및 내산, 내식용 등 다양한 용도로 각광받고 있다. 종래의 316계 스테인리스강은 강도를 확보한다는 관점에서 탄소량을 0.04wt% 이상 첨

가하였으나 온도가 올라가면 결정입계에 탄화물이 석출되어 부식에 대한 저항이 현저히 저하되므로 탄소함량을 낮게 한 316L강재가 개발되었다. 그러나 저탄소의 스테인리스강은 강도 저하를 가져오므로 강도를 확보하기 위해 고용강화 효과가 탄소보다 크고 입계부식저항성이 큰 316LN강이 최근 개발되었다.<sup>(1,2)</sup>

316LN강에서 질소의 첨가량은 약 0.10wt.%일 때 좋은 고온에서의 기계적 특성을 갖는 것으로 보고 되었으며, 이 재료를 고온장치나 구조물에 적용하기 위하여 크리프, 피로, 열-피로 등 고온물성 평가가 여러 연구자들에 의해 이루어지고 있다. 그 결과 316LN강의 우수성이 점차 입증되어, 향후 고온용 재료로 주목받고 있다.<sup>(3-5)</sup>

† 책임저자, 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

E-mail : sun@tgpc.ac.kr

TEL : (053)560-3152 FAX : (053)560-3148

\* 회원, 숭실대학교 기계공학과

한편, 오스테나이트계 스테인리스강은 절삭 시 가공경화성이 매우 크며, 칩이 공구면에 용착되기 쉽고 전단저항이 크고, 절삭인선의 결손이나 용융을 유발하며 가공면을 안정시키기 어려운 난삭 재료로 알려져 있다.<sup>(6-8)</sup> 특히 316LN강은 고강도로 인하여 절삭특성이 좋지 않을 뿐만 아니라 금속 절삭 시 전단면 부근에서 필연적으로 발생하는 열적현상과 소성유동으로 인하여 내부와는 다른 가공 변질층(deformed layer)이 크게 존재할 수 있다. 따라서 316LN강을 사용하기 위해서는 절삭 가공시의 절삭특성과 가공 변질층에 영향을 미치는 재료의 기계적 성질, 경화능, 절삭저항, 표면 거칠기, 공구마모, 칩의 형상 등 여러 인자들을 폭넓게 관찰하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 질소가 0.11wt.% 첨가된 316LN 스테인리스강을 정면밀링가공(face milling cutting) 할 때 절삭특성과 재료 표층부에 생성되는 가공 변질층에 대하여 질소를 첨가하지 않은 316L강과 비교 분석하였다. 이를 위해 두 재료를 동일한 절삭조건으로 절삭실험을 실시하여 절삭저항, 표면 거칠기, 공구마모, 칩 형성(chip formation)등의 절삭특성 인자들과 가공 변질층을 관찰하고, 이들 특성에 영향을 미치는 재료의 기계적 성질을 분석하여 316LN 스테인리스강의 응용시 효율성을 증대하는 방안을 강구하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편 재료 및 절삭공구

본 실험에 사용된 재료는 316L과 316LN 스테인리스강이다. 316LN강재는 크리프, 피로, 크리프-피로, 열-피로 등 고온강도 성질이 우수한 재료이므로 본 실험에서의 시험편으로 선정하였다. 특히 316LN강재는 Table 1의 조성에서처럼 질소가 0.11wt.% 첨가된 상용 소재이다. 시험편은 25.4mm의 정육면체로 제작하였으며, 밀링가공 시 절삭유를 충분히 공급하여 가공 변질층의 형성이 최소화 되도록 주의하면서 가공하였다.

사용된 절삭공구는 스테인리스강의 밀링가공에 널리 사용되고 있는 초경합금 인서트 팁(SPKN 1203 EDR TT8020 throw away tip) 1개가 부착된 정면밀링커터(지름 100mm의 6개 인서트 삽입용)를 사용하였다. 그리고 절삭조건을 변화시킬 때 마다 새로운 인선으로 교환하였다.

Table 1 Chemical composition of test materials

Materials	Composition (%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
316L		0.3	1.0	2.0	0.04	0.03	16	18	2.5	-
316LN		0.02	0.53	0.87	0.02	0.01	10.6	17.7	2.6	0.11

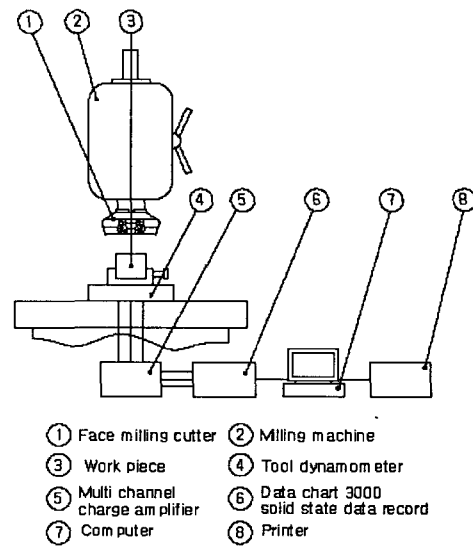


Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus

Table 2 Cutting condition for the experiment

Cutting speed (m/min)	Feed (mm/min)	Depth of cut (mm)	Remarks
107	22	0.15	Dry cutting
173	41	0.30	
251	61	0.45	
345	87	0.60	
393	127		

### 2.2 실험장치

본 실험을 위하여 설치한 절삭 실험장치는 Fig.1 과 같다. 정면밀링커터에 인서트 팁을 삽입 고정시키고 수직형 밀링머신 테이블 위에 공구 동력계(tool dynamometer)를 설치하였다. 제작한 시험편은 공구 동력계에 견고히 고정될 수 있도록 지그(jig)를 설계, 제작하여 고정하였다. 절삭 실험은 Table 2와 같이 선정한 절삭조건에 따라 실시하였다.

## 2.3. 실험방법

### 2.3.1 고온인장 특성 실험

절삭 실험 전에 316L 및 316LN강재의 기계적 성질을 조사하는 것이 필요하므로 고온 인장시험을 수행하였다. 고온 인장시험은 게이지 길이가 25.4mm이고, 게이지 길이부의 폭은 3.7mm, 두께는 1.0mm인 판상으로 제작하였다. 인장시험 온도는 R.T, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C로서 각 온도별로 2회씩 실시하였다. 인장시험 변형속도(strain rate)는  $2 \times 10^{-3}$  (1/sec)로 두 재료에 대하여 동일한 조건으로 하였으며, 하중-변위의 모든 데이터를 컴퓨터로 분석하였다. 온도측정은 시험편의 게이지 길이부에 열전대를 부착하여 측정하였다. 온도제어는 ASTM의 요구조건인  $\pm 2^\circ\text{C}$  온도 이내로 제어하였으며,<sup>(9)</sup> 목표 온도에 도달 후 충분히 가열 유지시켜 실험을 실시하였다. 실험이 끝난 각 시험편별 실험결과로부터 공칭응력-공칭변형률의 인장곡선을 얻었다. 316L과 316LN강재의 가공경화지수  $n$ 값은 공칭응력-공칭변형률의 인장곡선을 진응력-진변형률 곡선으로 바꾼 다음 응력-변형률의 기울기로부터 구하였다.

### 2.3.2 절삭저항의 측정

Fig. 1의 실험 장치를 이용하여 STS 316L재와 316LN재 두 종류의 시험편에 대한 절삭저항을 공구동력계(piezoe type 9257B, KISTLER)를 이용하여 측정하였다. 두 종류의 시험편을 동일한 절삭조건으로 절삭실험을 실시할 때 절삭저항의 변화를 증폭기에서 전압변화로 증폭시켜 데이터 기록장치로 3절삭력의 3분력(주분력  $F_x$ , 이송분력  $F_y$ , 배분력  $F_z$ )을 기록하고, 이로부터 합성절삭저항력,  $F_R$ (resultant force)을 구하였다.

### 2.3.3 표면거칠기 측정

정면 밀링가공으로 절삭시험을 수행 한 두 스테인리스강의 가공면에 대한 표면 거칠기 변화를 측정하였다. 표면 거칠기 측정 방법은 선단의 반지름이  $5\mu\text{m}$ 인 다이아몬드 촉침을 일정속도로 이동시킬 때 발생된 신호로 증폭기를 거쳐 기록계에 거칠기 곡선을 기록토록하고 필터를 통하여 중심선 평균거칠기(centerline average roughness,  $R_a$ )를 직접 읽는 방법을 병행하였다. 이때 컷오프(cut off) 값을 0.8mm, 이송길이를 2.5mm, 속도

(tracing speed)를 0.3mm/sec, 기록계 속도를 6mm/sec로 하고 수직방향의 배율은 2000배로 하였다. 정확한 표면 거칠기 값을 얻기 위하여 시험편의 3부분을 반복 측정하여 평균값을 택하였다.

### 2.3.4 미세조직 관찰

절삭실험이 끝난 각 시험편은 에폭시로 마운팅하고 SiC 연마지에서 연마하여 미세조직 관찰을 위한 시험편을 준비하였다. 연마된 시험편은 질산( $\text{HNO}_3$ ) 40%와 물( $\text{H}_2\text{O}$ ) 60%를 혼합한 부식용액 속에서 1.5Volt의 전압으로 전해 에칭(etching)하였다. 316L재의 에칭시간은 40초, 316LN재는 1분 10초 정도로 하여 시험의 부식 정도를 관찰하면서 에칭하였다. 에칭된 시험편은 알콜 용액 속에서 깨끗이 세척한 후 건조시켜 광학 현미경(OM)으로 변형조직을 관찰하였다. 또한 316L 및 316LN강재의 고온인장 시험후의 파면은 주사전자 현미경(SEM, JEOL-JSM 5200)으로 재료 및 온도별 파괴거동을 비교 분석하였다.

### 2.3.5 가공 단면부의 경도 측정

정면 밀링가공으로 절삭시험 한 두 시험편의 변질층 두께는 경도법을 이용하여 측정하였다. 가공면의 표면으로부터  $50\mu\text{m}$  간격으로 총 10 단계인  $500\mu\text{m}$ 의 충분한 내부 깊이 단면까지의 경도 변화를 측정하였으며, 일정한 경도 값을 보일 때의 깊이가 변질층의 깊이가 된다. 이때 미소 경도계의 하중은 200g, 시간은 15초, 배율은 400배로 하여 각 부위를 3회 반복 측정한 후 평균값을 택하였다. 측정시험은 Table 2의 절삭조건에서 절삭속도 107m/min과 393m/min 그리고 절삭깊이 0.45mm와 0.60mm에서 조건의 시험편에 대하여 이송량을 22, 41, 61, 87, 127 mm/min로 변화시킨 시험편이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 재료의 기계적 성질

Fig. 2, 3은 316L 및 316LN강재의 고온 인장시험으로부터 얻은 최대인장강도, 연신율의 결과를 나타낸 것이다. 각 온도별 결과 값들은 2회씩 측정한 것으로 두 재료는 분명한 차이를 보이고 있다. Fig. 2의 최대 인장강도는 실험을 수행한 온도 구간에서 316LN강재가 316L강재에 비해 약

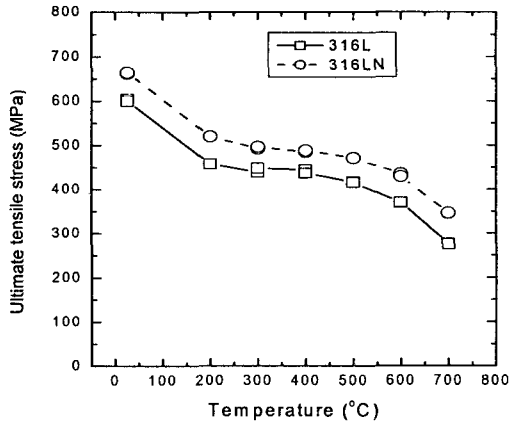


Fig. 2 UTS of 316L and 316LN steels

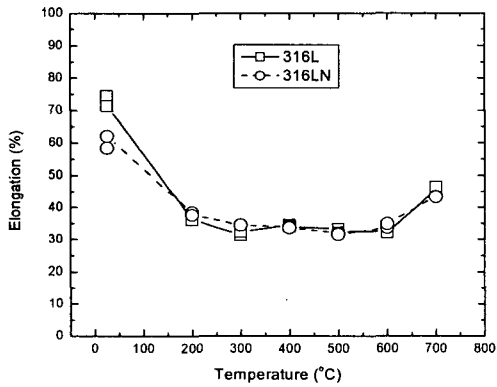


Fig. 3 Elongation of 316L and 316LN steels

50 MPa 정도 높은 강도를 나타내고 있다. 그러나 Fig. 3의 연신율은 상온을 제외하면 두 재료는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 통상 인장강도가 높으면 연신율이 낮아지지만, 316LN강재는 강도가 높음에도 불구하고 연신율이 저하되지 않는 우수한 고온 재료임이 확인되고 있다.

Fig. 4는 316L 및 316LN 강재의 미세조직을 나타낸 것으로 두강재는 입자크기(grain size)에서 상당히 차이가 있음을 볼 수 있다. 사진 (a)의 316L재의 입자크기는 약 80 $\mu$ m 정도로 다소 불균일한 반면, 질소가 첨가된 사진 (b)의 316LN재의 입자크기는 약 30 $\mu$ m로 매우 미세한 조직을 보인다. 따라서 질소의 첨가는 재료의 결정립을 미세하게 하고, 고용강화 효과로 강도를 높게 하였던 것으로 판단된다. 본 결과는 후술할 두 재료의 가공 변질층 두께와 밀접한 영향을 갖는다.

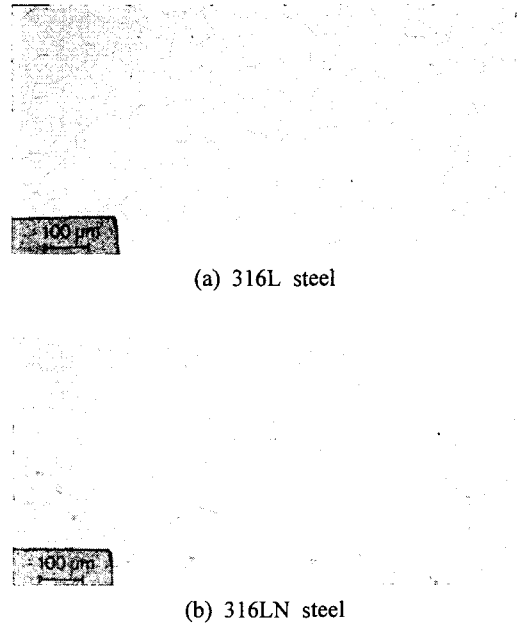


Fig. 4 Microstructures of 316L and 316LN steels

Fig. 5, 6은 316L 및 316LN 두 강재에 대하여 상온, 300 $^{\circ}$ C, 500 $^{\circ}$ C, 700 $^{\circ}$ C의 온도별로 비교 관찰한 SEM 파면 사진이다. 인장 파면 사진은 1500 배로 관찰한 것으로, 두 재료는 파면 덩플의 크기에 있어서 분명한 차이를 잘 보여주고 있다. 316LN강재의 덩플 크기는 316L강재 보다 현저히 작으며, 수많은 미세한 덩플들이 파면 전체에 걸쳐 섬유조직처럼 보인다. 따라서 316LN강재는 덩플이 큰 316L강재 보다 고온강도 성질에 있어서 높았던 것으로 확인된다. 또한 덩플들의 크기는 온도가 증가할수록 크게 성장되었음을 볼 수 있다.

결국 두 강재의 파면거동은 덩플의 성장에 의한 전형적인 컵-콘(cup-cone)형의 연성파면 조직임을 알 수 있다. 이러한 덩플의 성장에 의한 연성 파괴 현상은 작은 공극(void)의 형성으로부터 시작되는데, 공극의 근원은 재료 내에 내재하는 계재물(inclusion)들에 의해 생성되고, 작은 공극들이 성장하고 서로 결합하면 균열이 되고 균열이 성장함에 따라서 파단이 시작된 것으로 보고 되고 있다.<sup>(10)</sup> 두 강재의 덩플 크기의 차이는 Fig. 4의 광학현미경 관찰의 미세조직 사진에서 보여준 바와 같이 입자 크기의 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

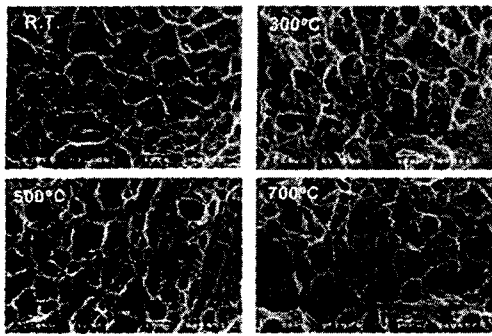


Fig. 5 SEM with temperatures of 316L steel

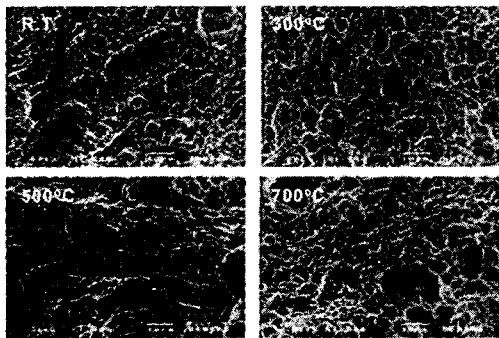


Fig. 6 SEM with temperatures of 316LN steel

3.2 가공경화 거동

316L 및 316LN 두 강재의 절삭가공 시 소성변형에 따른 재료거동을 파악하기 위하여 가공경화지수  $n$ 값을 구하였다. 인장시험으로 얻은 공칭응력-공칭변형률 곡선을 진응력-진변형률로 바꾸고 이를 소성변형 영역에 대하여 로그 좌표로 도식화하여 직선의 기울기로부터  $n$ 값을 얻었다.

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \epsilon)} \quad (1)$$

소성가공에 의한 응력과 변형률의 재료거동이 Hollomon식  $\sigma = K\epsilon^n$ 을 따른다고 가정하면,<sup>(11)</sup>  $n$ 값은 식 (1)로 구할 수 있다. 316L 및 316LN재의 온도별  $n$ 값의 변화 결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 강도가 높았던 상온을 제외하면 316LN강재는 316L강재에 비하여 실험을 수행한 전 온도 구간에서 높은  $n$ 값을 보이고 있다. 두 강재의 전체  $n$ 값의 범위는 700℃를 제외하면 대략  $n=0.4 \sim 0.6$ 의 범위의 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

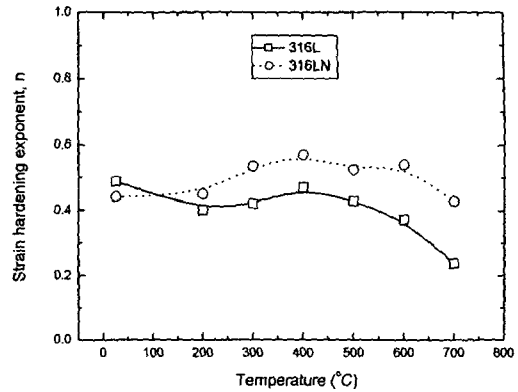


Fig. 7 Strain hardening exponents with temperatures of 316L and 316LN steels

본 결과에서 얻어진  $n$ 값은 오스테나이트계 스테인리스강에서 보고되는<sup>(12)</sup>  $n=0.45 \sim 0.55$  범위와 큰 차이는 없으나, 철-합금에서의  $n=0.05 \sim 0.15$ 나 구리-합금에서의  $n=0.3 \sim 0.35$ , 알루미늄-합금에서의  $n=0.15 \sim 0.25$ 의 값에 비하여 상당히 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 한편 700℃의 고온인 경우에 316L강재는  $n=0.2$ 로 그 값이 현저히 줄어드는데 비해 316LN강재는 약  $n=0.4$ 의 비교적 높은 값을 갖는다.  $n$ 값은 일반적으로 강도가 높을수록 그리고 결정 격자내의 전위의 이동성이 감소할수록 증가하고, 특히 어닐링 등의 열처리 조건에서는 높은 값을 가지며, 냉간가공 된 상태에서는 낮은 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 316LN강재는 316L강재에 비해 소성변형에서 결정격자내의 전위이동이 낮기 때문에 높은  $n$ 값을 갖는 것으로 분석된다.

3.3 절삭조건에 따른 절삭저항

Fig. 8, 9, 10은 절삭속도, 절삭깊이, 이송량을 변화시킬 때 절삭 주분력( $F_x$ )의 변화를 두 강재에 대하여 비교하여 나타낸 결과이다. 각 그림에서 잘 볼 수 있듯이 두 강재의 주분력 변화는 이송량 및 절삭깊이가 증가함에 따라서 절삭저항력은 거의 선형적으로 증가되는 경향을 보인다. 그러나 절삭속도가 증가함에 따라서는 절삭저항이 오히려 감소함을 보이고 있으며, 그 값의 감소경향은 지수 함수적으로 감소됨을 알 수 있다. 특히 393m/min의 높은 절삭속도에서는 이송량의 변화가 절삭저항력에 큰 변화를 주지 않음을 알 수 있다.

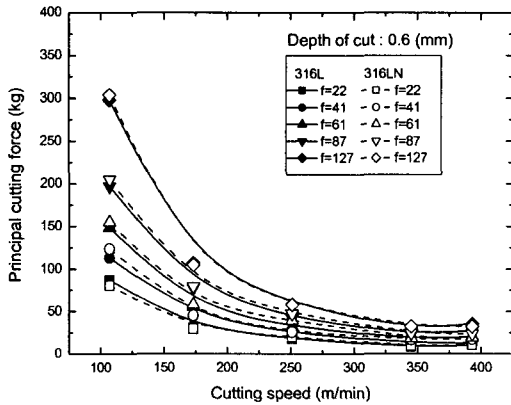


Fig. 8 Principal cutting force versus cutting speed for various feed rates

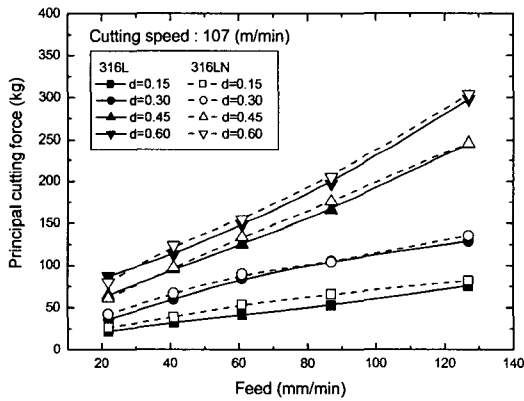


Fig. 9 Principal cutting force versus feed for various depth of cuts

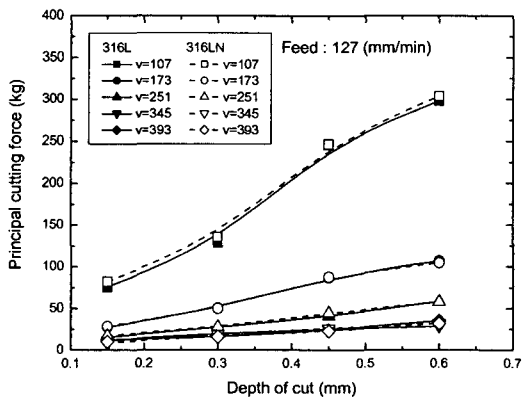


Fig. 10 Principal cutting force versus depth of cut for various cutting speeds

그리고 모든 절삭조건에서 질소가 첨가된 316LN강재는 316L강재 보다 약간 높은 절삭 저항력을 보이고 있다. 그러나 전술한 두 스테인리스강의 인장강도 차이 값인 50 MPa에 비하면 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 이유는 316LN강재가 316L강재에 비하여 강도는 상당히 높지만 연성은 316L강재와 거의 같은 우수한 성질을 갖기 때문이다. 결국 316LN강재의 인장강도는 316L강재보다 상당히 높지만 실제 절삭저항력은 316L강재와 거의 같은 값을 보임을 알 수 있다. 두 강재를 절삭시 절삭저항력을 감소시키기 위해서는 절삭속도를 가능한 고속으로 선정하고, 이송량과 절삭깊이는 절삭저항이 직선적으로 증가되는 본 결과를 이용하여 낮게 선정하는 것이 바람직하다.

#### 3.4 절삭조건에 따른 표면 거칠기

Fig. 11, 12, 13은 이송량, 절삭깊이, 절삭속도의 변화에 따른 가공면의 중심선 표면 거칠기( $R_a$ )의 변화관계를 나타낸 것이다. 이송량이 증가함에 따라 표면 거칠기 값은 증가하며, 절삭깊이에 대해서는 큰 차이가 없으며, 절삭속도가 증가함에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 표면 거칠기 결과에 대하여 주목할 점은 316LN강재가 316L강재에 비해 강도가 높음에도 불구하고 양호한 가공면의 표면 거칠기를 보이고 있다는 것이다. 특히 낮은 절삭속도, 낮은 이송량, 낮은 절삭깊이에서 316LN강재가 316L강재에 비해 현저히 양호한 표면 거칠기 값을 보이며, 345m/min 이상의 절삭속도로 되면 두 강재는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 낮은 절삭조건에서 양호한 표면 거칠기 값을 316LN강재가 316L강재에 비하여 재료강도 차이에서 오는 결과로 칩의 처리성이 양호하였던 것으로 판단된다.<sup>(13)</sup> 이상에서 관찰된 절삭저항과 가공면의 표면 거칠기는 가공 변질층의 깊이와 서로 관련이 있다.

#### 3.5 공구 마모 및 칩의 형상

Fig. 14는 여러 절삭조건 중에서 초경합금공구 TT 8020으로 316L재와 316LN재를 절삭속도 345m/min, 절삭깊이 0.5mm, 이송량 127mm/min의 조건으로 절삭실험을 할 때, 각 절삭시간 10분, 20분, 30분, 40분, 50분에서 교환한 공구의 크레

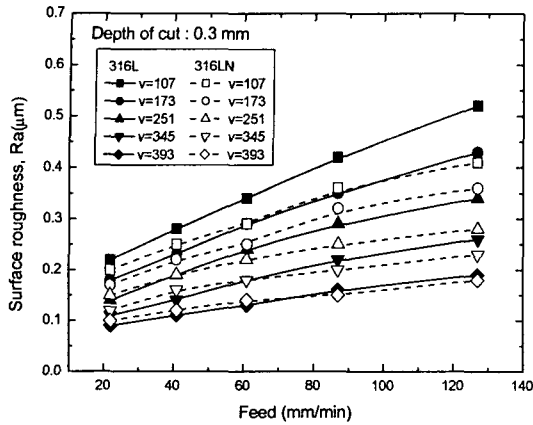


Fig. 11 Surface roughness(Ra) versus feed for various cutting speeds

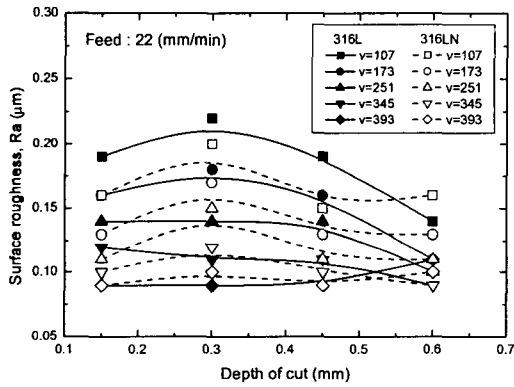


Fig. 12 Surface roughness(Ra) versus depth of cut for various cutting speeds

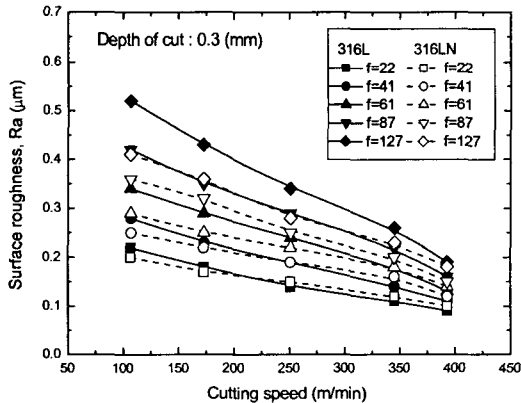


Fig. 13 Surface roughness(Ra) versus cutting speed for various feed rates

이터 마모(crater wear)와 플랭크 마모(flank wear) 상태를 100배의 공구현미경(Nikon, EPIHST)으로 촬영한 사진을 나타낸 것이다. 크레이터와 플랭크 마모량의 측정은 100배의 사진을 이용하여 공구 현미경의 눈금자를 이용하여 측정하였다.

Fig. 14, 15에서 확인할 수 있듯이 316L 및 316LN강재의 절삭공구 마모는 플랭크 마모가 크레이터 마모량보다 훨씬 크게 발생됨을 알 수 있다. 크레이터 마모량은 절삭시간 30분까지는 두 강재 모두 차이가 적었으나 그 이후에서는 316LN강재가 현저히 증가하며, 크레이터 깊이 ( $K_T$ ) 값이 약 2배로 크게 나타났다. 또한 플랭크 마모는 크레이터 마모와 달리 절삭시간이 10분 이후부터 316LN강재는 316L강재보다 크게 증가하며, 플랭크 마모폭( $V_B$ ) 값이 약 1~2배로 크게 나타났다. 이러한 결과는 316LN강재가 316L강재에 비하여 재료의 강도가 높았기 때문에 공구 마모량이 크게 발생한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 16은 절삭속도 345m/min, 절삭깊이 0.3mm에서 이송량을 22, 41, 61, 87, 127mm/min로 변화시킬 때 두 강재의 칩 형상을 나타낸 사진이다. 칩의 형태는 유동각이 동일할 때 절삭인자 중 이송량의 변화가 칩의 두께와 곡률반경에 크게 영향을 주며 가공재료의 성질에 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 절삭조건 중 이송량을 변화시킬 때 칩의 형태를 두 재료에 대하여 비교 조사하였다. 사진에 보인 것처럼 두 강재는 저 이송량에서는 긴 리본형 칩(long ribbon chip, LRC)이 발생하고, 고 이송량에서는 적합하게 부서진 짧은 길이의 아크형(loose arc chip, LAC)의 칩이 발생되고 있다. 또한 316LN강재의 칩은 이송량이 증가함에 따라 316L강재의 칩에 비해 다소 짧은 길이의 아크형 칩이 부서진 모양을 보인다. 이러한 316LN강재에서의 부서진 칩의 형성은 질소 첨가에 의한 높은 강도특성에 기인된 것으로 판단된다.

이상의 절삭시험 결과에서 알 수 있듯이 316LN강재는 높은 강도 특성에도 불구하고 표면 거칠기 및 칩 형상의 절삭특성에 있어서 316L강재 보다 우수한 가공특성을 보임을 알 수 있다. 그러나 공구 마모량에 있어서는 재료의 높은 강도성질로 인하여 절삭시간이 길어짐에 따라 다소 높은 량의 플랭크 마모가 발생됨을 알 수 있다. 그러나 316LN강재는 높은 인장강도에 비하여 연

성은 316L재만큼 저하되지 않으므로 절삭력의 큰 증가는 없었다. 따라서 316LN강재를 절삭 가공하는 경우 문제점으로는 높은 마모량을 적절히 제어하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

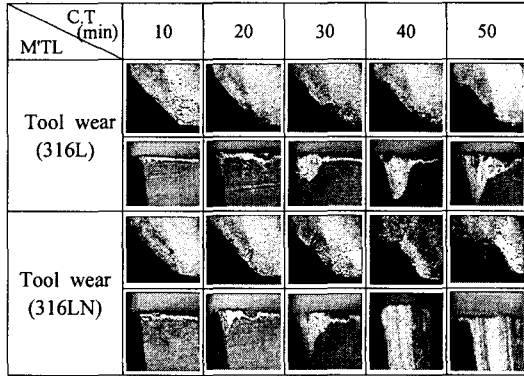


Fig. 14 Photographs on the crater and flank wears with time variations in 316L and 316LN steels ( $v=345\text{m/min}$ ,  $d=0.5\text{mm}$ )

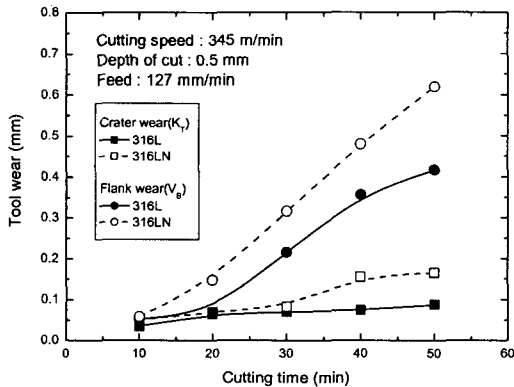


Fig. 15 Comparison of 316L and 316LN on tool wears

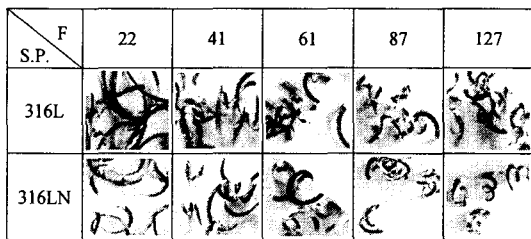


Fig. 16 Photographs on chip formation of 316L and 316LN steels ( $v=345\text{m/min}$ ,  $d=0.3\text{mm}$ )

3.6 가공 변질층의 두께

절삭가공에 있어서 가공 변질층은 이송량의 영향을 크게 받으므로 본 시험에서는 두 강재에 대하여 동일한 절삭깊이와 절삭속도에서 이송량을 변화시켜 조사하였다. Fig. 17, 18은 316L강재와 316LN강재에 대해 절삭깊이, 절삭속도를 각각 전자의 경우 0.45mm, 393m/min, 후자의 경우 0.6mm, 107 m/min로 선정하고, 이송량을 22, 41, 61, 87, 127mm/min로 변화시켰을 때 가공 변질층의 두께 변화 결과를 각각 나타낸 것이다. 이송량이 증가할수록 변질층의 두께가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 316LN강재는 316L강재 보다 낮은 변질층 두께를 보임을 잘 알 수 있다.

Fig. 17은 절삭깊이 0.45mm, 절삭속도 393 m/min 절삭조건에서 이송량을 변화시킬 경우 316L강재의 변질층 두께는 200 $\mu\text{m}$ ~300 $\mu\text{m}$ , 316LN강재는 150 $\mu\text{m}$ ~200 $\mu\text{m}$  범위로 316LN강재가 316L강재 보다 낮다. Fig. 18과 같이 절삭깊이 0.60mm, 절삭속도 107m/min의 조건에서 316L강재는 200 $\mu\text{m}$ ~300 $\mu\text{m}$ , 316LN강재는 200 $\mu\text{m}$ ~250 $\mu\text{m}$  범위로 316LN강재가 316L강재보다 낮은 변질층의 두께를 보인다. 이러한 결과는 이송량을 증가시키면 절삭저항이 증가되어 표면의 심한 소성유동과 압축에 의해 모재 내부에 경화가 진행됨으로서 변질층의 두께가 증가된 것으로 판단된다.

결국 316LN강재는 Fig. 4의 피삭재의 조직에서 관찰한 것처럼 입자크기가 작았고, 가공경화지수  $n$ 값이 Fig. 7에서처럼 316L강재 보다 높았지만, 가공 표층부에서부터 내부로 향할수록 결정격자

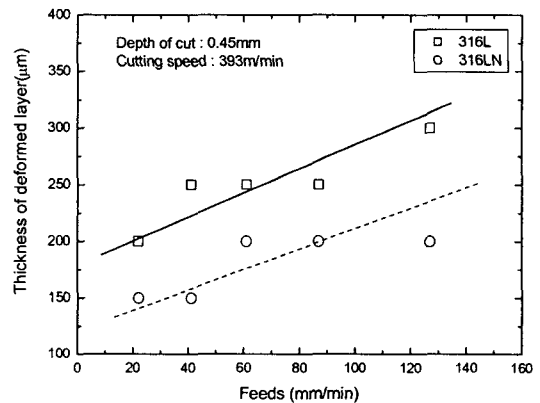


Fig. 17 Deformed layers versus feeds for 316L and 316LN steels



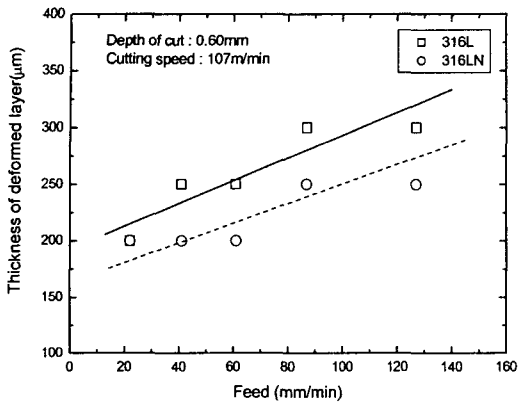


Fig. 18 Deformed layer versus feeds for 316L and 316LN steels

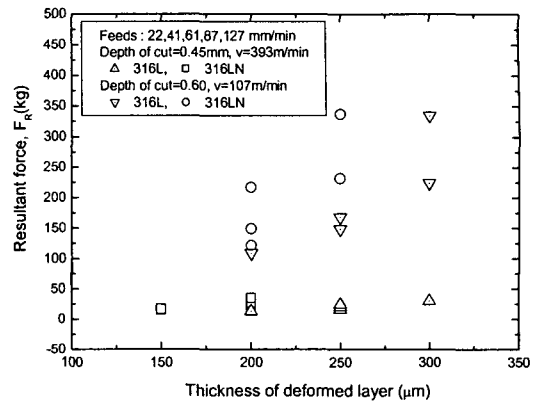
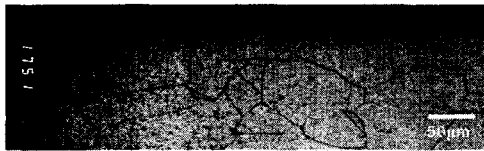


Fig. 20 Relation of resultant force and deformed layers



(a) 316L stainless steel



(b) 316LN stainless steel

Fig. 19 OM photos of deformed structures (v=393m/min, d=0.45mm, f=127mm/min)

내의 전위이동이 감소되어 가공경화속도가 316L 강재에 비해 낮았기 때문에 변질층 두께가 작았던 것으로 분석된다.

Fig. 19의 (a) 및 (b)는 316L과 316LN 두 강재의 정면 밀링가공 시 표면층 부위의 가공변형 상태를 대표적으로 관찰한 광학현미경 사진을 보인 것이다. 두 강재는 동일한 절삭조건이었으며, 절삭 후 정면 밀링커터의 회전방향에 대하여 직각 방향으로 시편을 채취하여 관찰하였다. 사진 (a)는 316L강재에 대한 것이며, 사진 (b)는 316LN강재에 대한 것이다. 316L강재의 경우는 최상층 표층부의 입계에서 미세적 변형조직으로 되어 절삭 저항이 가해진 방향으로 방향성 조직이 분명히 보인다. 반면, 316LN강재의 경우는 변형조직이

316L강재 보다 잘 관찰이 되지 않는다. 이러한 결과로 볼 때 316LN강재는 재료강도가 높기 때문에 본 절삭조건에서는 가공조직의 큰 변화를 크게 일으키지 않았던 것으로 판단된다. 본 실험 조건에서 두 강재의 가공 변질층의 생성 범위는 150μm-300μm인 것으로 나타났다.

### 3.7 합성절삭저항과 가공 변질층과의 관계

가공 변질층과 절삭저항과의 관계를 구하기 위하여 합성절삭저항력,  $F_R$ 을 구하였다.  $F_R$ 은 다음 식 (2)로 정의되는 값으로 절삭가공 시 공구로부터 피삭재료가 받는 전체 힘으로 가공물의 총 저항력이 되므로 총 변질층 두께는 합성 절삭저항력으로 나타낸다.

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2)$$

Fig. 20은 본 실험조건에서 이송속도를 22, 41, 61, 87, 127mm/min로 변화시켜 얻은  $F_R$ 과 가공 변질층의 관계 결과를 나타낸 것이다. 변질층 두께는 동일한  $F_R$ 에서 보면 316LN강재가 316L강재보다 낮은 값을 보인다. 이러한 결과에 대하여 두 강재의 표면에서부터 재료내부의 깊이 방향으로의 미소경도계에 의한 경도 변화를 측정 조사한 결과 표면층 바로 아래 부분인 0~50μm에서 경도 감소가 가장 크고, 모재 내부로 향할수록 완만하게 감소되는 경향을 보였다. 또한 316LN강재는 316L강재에 비해 내부로 향할수록 경도의 감소 폭이 크게 나타나 변질층 두께가 316L강재에 비해 낮게 되는 것으로 조사되었다. 이러한

것은 316LN강재가 316L강재에 비해 절삭 저항력이 높아서 재료 내부의 경도 영향층이 낮아진 결과로 판단된다. 결국 절삭력의 증가는 소성유동변형을 발생시키고 표면층 부위에 영향을 미쳐 가공 변질층이 형성되는데 이는 재료강도 특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

316LN 스테인리스강의 정면 밀링가공에서 절삭특성 및 가공 변질층에 대하여 316L스테인리스강과 비교 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 316LN강재의 최대인장강도는 316L강재에 비해 실험을 수행한 전 온도구간에서 50MPa의 높은 강도를 보였지만 절삭저항력에는 큰 차이가 없었다. 주분력은 이송량 및 절삭깊이의 증가에 따라서 선형적으로 증가하였으나 절삭속도의 증가에 따라서는 지수 함수적으로 감소하였다.

(2) 316LN강재의 표면 거칠기는 316L강재에 비해 모든 절삭조건에서 양호한 가공면의 표면 거칠기를 보였으며, 특히 345m/min 이상의 절삭속도로 되면 두 강재는 큰 차이가 없었다.

(3) 본 절삭조건에서의 316L 및 316LN 강재의 가공 변질층 두께는 150 $\mu$ m~300 $\mu$ m 범위로 316L강재 쪽이 316LN강재 보다 높았다. 이러한 이유는 316LN강재는 가공표면에서부터 재료 내부까지의 경도 감소 폭이 316L강재에 비해 크기 때문이다.

(4) 316LN강재는 316L강재 보다 높은 강도, 높은 절삭 저항력에 기인하여 가공 변질층의 두께가 낮게 생성되었으며 가공 변질층은 재료강도와 밀접한 관련이 있음을 보였다.

(5) 316LN강재의 공구 마모량은 크레이터 마모보다 플랭크 마모가 크게 발생하였으며, 316LN강재를 절삭 가공하는데 있어서 공구 마모량의 문제가 중요할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 숭실대학교의 교내 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Kim, W. G., Kim, D. W. and Ryu, W. S.,

2001, "Creep Design of Type 316LN Stainless Steel by K-R Damage Theory," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 2, pp. 296~303.

(2) Pickering, F. B., 1988, "Some Beneficial Effects of Nitrogen in Steel," *Proc. of High Nitrogen Steels HNS 88*, Lille France, May, pp. 10~31.

(3) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2001, "Creep Characterization of Type 316N and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model," *Int'l J. of KSME*, Vol. 15, No. 11, pp. 1463~1472.

(4) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2002, "Evaluation of Monkman-Grant Parameters for Type 316L and Modified 9Cr-Mo Stainless Steels," *Int'l J. of KSME*, Vol. 16, No. 11, pp.1420~1427.

(5) Kim, D. W., Ryu, W. S. and Hong, J. H., 1998, "Effect of Nitrogen on the Dynamic Strain Aging Behavior of Type 316L Stainless Steel," *J. of Materials Science*, Vol. 33, pp. 675~679.

(6) Trend, E. M., 1977, "Metal Cutting," *Butterworth and Co.*, pp. 164~165.

(7) Liu, C. R. and Barash, M. M., 1976, "The Mechanical State of a Surface Generated by Chip Removal Process, Part I: Cutting with a Sharp Tool," *Trans. ASME*, Vol. 98, No. 3, pp. 1192~1202.

(8) Matsumoto, Y., Barash, M. M. and Liu, C. R., 1986, "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel," *Trans. ASME*, Vol. 108, pp.169~175.

(9) ASTM E8M., 1993, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," pp. 77~97.

(10) Hosford, W. F. and Caddell, R. M., 1993, "Metal Forming," *PTR Prentice-Hall*, pp. 61~66.

(11) Kalpakjian, S., 1993, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," *Addison-Wesley Publish Co.*, pp. 61~66.

(12) Hertzberg, R. H., 1976, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," *John Wiley & Sons*, New York, pp. 16~18.

(13) Merchant and Ernst., 1941, "Chip Formation Friction and High Quality Machined Surface in Surface Treatment of Metals," *ASM*, New York, Vol. 29, pp. 299~312.