

STS 316L과 316LN 강의 고온 기계적 특성 및 가공 변질층에 관한 연구

오선세#, 이원*

A Study on the Mechanical Properties and Deformed Layer of STS 316L and 316LN Stainless Steels

Sun Sae Oh[#], Won Yi^{*}

ABSTRACT

The deformed layers generated in face milling works were comparatively investigated to type 316L and nitrogen(N)-added type 316LN stainless steels. In order to characterize mechanical properties between type 316L and type 316LN, high-temperature tensile tests were conducted with different temperatures: R.T. to 700°C. The cutting forces of three components, Fx, Fy and Fz were measured using a tool dynamometer through the face milling cutting tests. The deformed layers were measured by micro-hardness tests along deformed layers. The results of mechanical properties showed that type 316LN was superior to type 316L. The deformed layers of two steels were generated in the 150µm-300µm ranges, and type 316L was higher than type 316LN. The reason for this is due to the high strength properties by nitrogen effect. It was found that deformed structures were well observed for type 316L, but were minutely observed for type 316LN in this cutting conditions.

Key Words : Deformed Layer(가공변질층), Face Milling Work(정면밀링가공), Nitrogen(질소), Stainless Steels(스테인리스강), Strain Hardening Exponent(가공경화지수), Resultant Force(합성절삭력)

1. 서론

최근 CNC 및 FMS의 생산가공 시스템 발달로 무인화를 실현하므로써 생산성 향상을 기할 수 있는 연구와 기술개발이 활발히 진행되고 있다.^{1,2} 그러나 재료의 표면에 잔류하는 손상을 중요하게 생각하지 않아 장기간에 걸쳐 치수를 안정하게 보증할 수 있는 가공 변질층부에서의 치수 안정성 문제

에 직면하게 된다.³

금속 절삭 가공 시 전단면 부근은 절삭기구상으로 열적현상과 소성유동으로 인하여 내부와는 다른 변질층이 반드시 존재하게 된다. 따라서 정밀한 가공을 하기 위해서는 치수의 안정적인 측면을 고려해 볼때 가공된 재료의 변질층을 최소로 하는 것은 중요한 과제라 하겠다. 이러한 변질층을 구속하는 조건으로는 재료의 기계적 강도 특성, 경화능, 절삭저

접수일: 2003년 6월 16일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

교신저자 : 송신대학교 대학원 기계공학과
E-mail sun@tgc.ac.kr Tel. (053) 560-3152

* 송신대학교 기계공학과

항, 표면 거칠기 등 여러 인자들이 영향을 미치는 것으로 보고 되고 있다.^{3,4,5}

오오스테나이트계 스테인리스강은 고온강도, 연성, 인성, 내식성 등이 우수하여 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 스테인리스강은 난삭재로서 가공경화가 매우 크며, 고온 고압하에서 절삭시에 용착되기 쉽고 전단저항이 크므로 절삭날 결손이나 용융을 유발하여 가공면을 안정시키기 어려운 재료로 알려져 있다.⁶ 한편, 316L 스테인리스강에 질소를 약 0.1 wt.% 첨가한 316LN 강은 316L강에 비해 고온강도 특성이 우수하여 주목받고 있는 재료로서, 현재 고온 장치나 구조물에 적용하기 위해 크리프, 피로, 열-피로 등 고온 물성평가가 진행되고 있는 재료이다.⁷ 그러나 316LN 강은 저탄소 함유로 인한 강도 약점을 보완하기 위하여 고용강화원으로 질소를 첨가하기 때문에 높은 강도로 인하여 절삭가공하기 어려운 난삭 재료이다. 따라서 이 재료를 응용하기 위해서는 절삭시 재료 표층부에 발생하는 가공 변질층에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 316L강과 질소를 첨가한 316LN 강의 두 재료를 선정하여 고온 기계적 특성을 비교 평가하고, face milling cutter로 가공할때 재료 표층부에 생성되는 가공 변질층의 거동을 비교 조사하였다. 두 재료의 가공 표면층 깊이별로 미소 경도 값을 측정하여 변질층 두께를 각각 얻었으며, 가공 변질층에 영향을 미치는 재료의 기계적 특성, 절삭 저항, 가공경화 지수, 미세조직 거동을 조사하여 논하였다.

2. 실험

2.1 시험편 재료 및 절삭공구

본 실험에 사용된 재료는 STS 316L과 316LN 오오스테나이트계 스테인리스강으로서 고온강도, 연성, 인성, 내식성이 우수하여 다양한 용도로 사용되고 있으며, 특히 316LN 강은 크리프, 피로, 크리프-피로, 열-피로 등 고온강도 특성이 뛰어난 유망한 재료이므로 본 시험편을 선정하였다.⁷ 본 실험에 사용된 316L 및 316LN 두 재료의 화학적 조성 성분은 Table 1과 같다.

사용된 절삭공구는 스테인리스강의 face milling 가공에 널리 사용되고 있는 Insert SPKN 1203 EDR TT8020 throw away tip이 1개가 부착된 face milling cutter (지름 100mm의 6개 Insert 삽입용)를

사용하였다. 공구 및 시험편의 형상 과 치수는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같으며, throw away tip의 상세 치수는 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of test materials

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
STS316L	0.03	1.0	2.0	0.04	0.03	16	18	2.5	-
STS316LN	0.02	0.53	0.87	0.02	0.01	10.6	17.7	2.6	0.113

Table 2 Dimension of throw a way tip

Type	form	d	t	a	b	m ₁	m ₂
SPKN 1203	square	12.7	3.18	1.4	1.0	0.91	1.87
EDR TT8020							

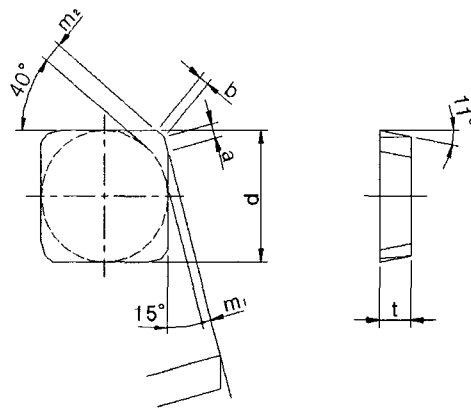


Fig. 1 Geometry of throw away tip

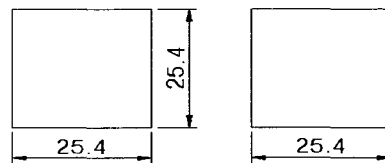


Fig. 2 Dimensions of test specimens

2.2 실험장치

본 실험을 위하여 설치한 실험장치는 Fig. 3과 같다. Fig. 1과 같은 throw away tip 6개를 삽입할 수 있는 face milling cutter에 1개의 tip을 삽입 고정시키고 수직형 밀링머신 테이블 위에 공구 동력계(tool dynamometer)를 설치하였다. 그리고 Fig. 2와 같은 형상치수로 제작한 시험편을 공구동력계에 견고히 고정될 수 있도록 하기 위해 지그(jig)를 설계,

제작하여 고정한 후 Table 3과 같이 선정된 절삭조건에 따른 절삭실험을 실시하였다. 그리고 시험편에 발생하는 수평분력과 수직분력을 공구동력계로 측정하여 증폭기(amplifier)에서 증폭시켜 기록계에 기록시킨 후 컴퓨터에 저장하여 프린터로 출력되도록 하였다.

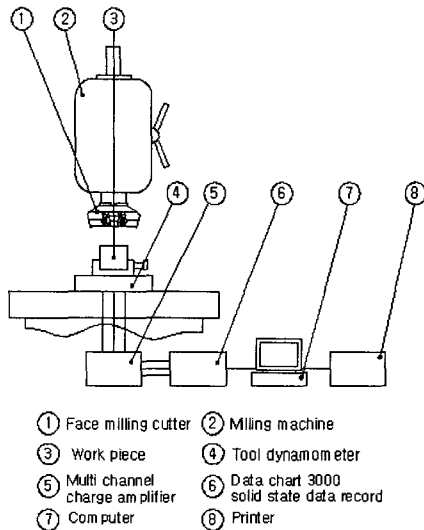


Fig. 3 Schematic diagram of testing apparatus

Table 3 Cutting condition for the experiment

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

2.3 실험방법

2.3.1 Throw away tip의 삽입설치 및 교환

시험편을 절삭하기 전에 throw away tip을 cutter body에 정밀하게 설치하기 위하여 정밀정반 위에서 throw away tip을 고정 시켰으며, cutter body를 밀링 머신의 스핀들에 부착 시킨후 다이얼 게이지를 사용하여 삽입 인선(insert tip)의 설치 오차를 확인하여 그 설치 오차가 ±0.01mm의 공차 범위에 들어가도록 하였다. 그리고 절삭조건이 변화될 때 마다 새로운 인선으로 교환하였다.

2.3.2 고온 인장특성 실험

본 실험에 사용된 316L 및 316LN 두 소재의 고온 기계적 특성 값은 인장시험을 수행하여 비교 평가하였다. 인장시험은 게이지 길이가 1인치이고, 게이지 길이부의 폭 3.7mm, 두께 1.0mm의 판상으로 제작하였다. 고온 인장시험은 상온, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C의 각 온도별로 2회씩 실시하였다. 인장시의 변형속도(strain rate)는 2×10^{-3} 1/s로 두 재료에 대하여 동일한 조건으로 하였으며, 하중-변위의 모든 데이터는 컴퓨터로 데이터를 처리하였다. 시험편의 온도 측정은 시험편의 게이지 길이부에 열전대를 부착하여 측정하였다. 온도 제어는 ASTM의 요구조건인 ±2°C 온도 이내로 제어하였으며,⁸ 목표 온도에 도달후 충분히 가열 유지시켜 실험을 실시하였다. 실험이 끝난 각 시험별 실험결과로부터 공칭응력-공칭변형률의 인장곡선을 얻었다. 316L 과 316LN 강에 대한 가공경화지수(strain hardening exponent), *n*값은 공칭응력-공칭변형률의 인장곡선을 진응력-진변형률 곡선으로 바꾼 다음 응력-변형률의 기울기로부터 구하였다.

2.3.3 절삭저항의 측정

본 실험장치에서 Table 3과 같은 절삭조건으로 절삭실험을 실시할때 KISTLER (piezoe type 9257B) 사의 공구동력계에 의한 절삭저항 변화를 증폭기에서 전압변화로 증폭하여 데이터 기록장치로 절삭 3분력 주분력 *F_x*, 이송분력 *F_y*, 배분력 *F_z*을 3.5" 플로피 디스크에 기록한후 컴퓨터의 하드디스크에 연결하여 COMPAN 소프트웨어를 이용하여 분석된 값을 프린터로 출력시켰다. 그리고 측정된 *F_x*, *F_y*, *F_z*을 이용하여 합성절삭저항력 *F_R*(resultant force)을 계산하였다.

2.3.4 미세조직 관찰

절삭저항 실험이 끝난 각 시험편을 에폭시로 cold mounting한 다음 SiC grinding paper로 #120, #320, #600 grit 단계로 연삭한 후 알루미나 분말로 1.0, 0.5, 0.3µm 단계로 연마(polishing)하였다. 연마된 시험편은 질산(HNO₃) 40%와 물(H₂O) 60%를 혼합한 부식용액 속에서 1.5Volt의 전압으로 전해 에칭(etching)하였다. 316L강의 경우 에칭시간은 40초 정도, 316LN강의 경우는 1분 10초 정도의 시간으로 하여 시험편의 부식 정도를 관찰하면서 에칭하였다. 에칭된 시험편은 알콜 용액 속에서 깨끗이

세척한 후 건조시켜 광학 현미경(OM)으로 가공면의 변형조직을 관찰하였다. 또한 316L 및 316LN 재의 고온인장 시험후의 파면에 대하여 주사전자현미경(SEM)으로 파면 조직을 관찰하여 재료 및 온도별 파괴거동을 비교 분석하였다.

2.3.5 가공 단면부의 경도 측정

가공 변질층 두께는 가공의 영향을 받지 않은 모재의 내부경도와 같은 일정한 값이 되는 곳이 된다. 따라서 316L 및 316LN 두 재료의 경도 변화 측정에는 가공면의 수직단면에 대하여 표면으로부터 50 μ m 간격으로 총 10 단계인 500 μ m의 충분한 깊이까지의 내부로 경도변화 값을 측정하였다. 이때 미소경도계의 하중은 200g, loading time은 15sec, 배율은 400배로 하여 각 부위를 3회 반복 측정한 후 평균값을 택하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온 기계적 특성 비교

Figs. 4, 5, 6은 316L 및 316LN간의 고온 인장특성시험으로부터 얻은 항복강도, 최대인장강도, 연신율의 결과를 나타낸 것이다. 각 온도별 결과 값들은 2회씩 측정된 것으로 두 재료는 분명한 차이를 보이고 있다. Fig. 4는 0.2% 오프셋 항복강도 값을 나타낸 것으로 316L이 약간 높은 값을 보이나 두 재료는 거의 큰 차이가 없었다. 그러나 Fig. 5의

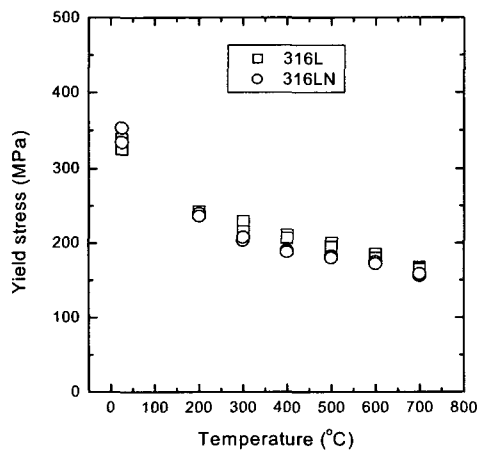


Fig. 4 Yield stress of 316L and 316LN

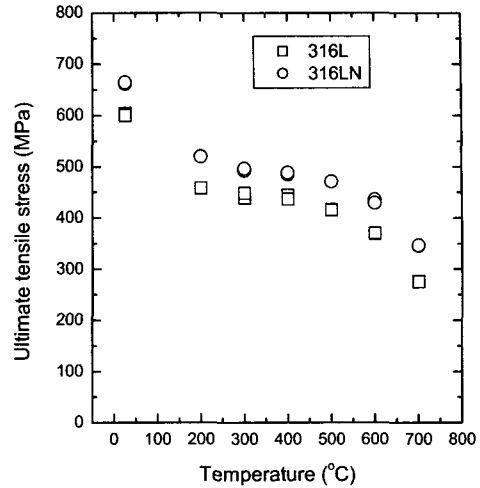


Fig. 5 Ultimate tensile stress of 316L and 316LN

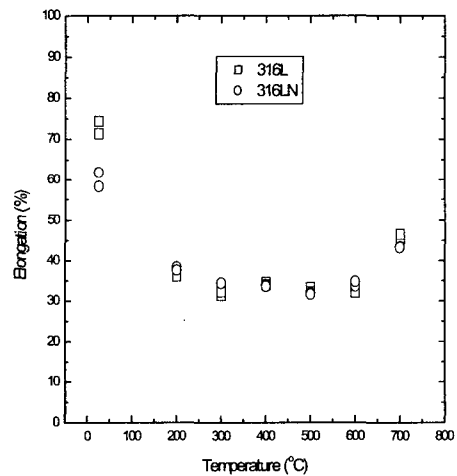


Fig. 6 Elongation of 316L and 316LN

최대 인장강도는 전 온도에서 316L에 비해 316LN 값이 약 50MPa 정도로 현저히 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 연신율의 경우 Fig. 6과 같이 상온을 제외하면 두강은 큰 차이가 없다. 일반적으로 인장강도가 높으면 연신율이 낮아지지만, 316LN의 경우는 강도가 높음에도 불구하고 연신율이 저하되지 않으므로 우수한 고온강도 재료임을 알 수 있다. 두 재료의 기계적 강도 특성 자료는 후술할 가공 변질층과 밀접한 관련이 된다.

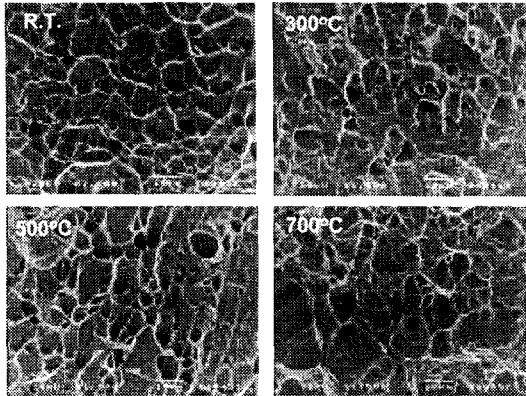


Fig. 7 SEM photos with temperatures of 316L

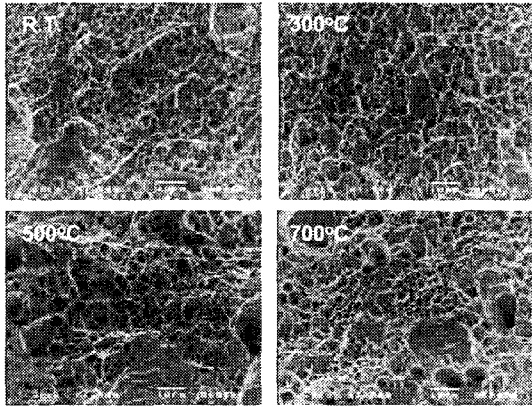


Fig. 8 SEM photos with temperatures of 316LN

Fig. 7 및 Fig. 8은 316L 및 316LN 강에 대해 상온, 300°C, 500°C, 700°C의 온도별 인장 파면조직을 1500배율로 비교 관찰한 SEM 사진이다. 두 재료는 딴플(dimple)의 크기에서 분명한 차이를 보이고 있다. 316LN의 딴플 크기는 316L 보다 현저히 작으며 수많은 미소한 딴플들이 파단면 전체에 걸쳐 섬유조직처럼 보이므로, 316LN은 딴플이 큰 316L보다 고온강도에서 우수한 것으로 판단된다. 딴플의 크기는 온도가 증가할수록 크게 성장되었다. 결국 두 강의 파면거동은 딴플의 성장에 의한 전형적인 컵-콘(cup-cone)형의 연성파괴 조직임을 알 수 있다. 이러한 딴플의 성장에 의한 연성파괴는 작은 공극(void)의 형성으로부터 시작되는데, 공극의 근원은 재료내에 내재하는 계재물들에 의해 생성되고, 작은 공극들이 성장하고 서로 결합하면 균열이 되고 균열이 성장함에 따라서 파단이 시작된 것으로 생각된다.⁹

3.2 가공경화 거동

316L 및 316LN 두 강에 대하여 가공경화 지수, n 값을 구하였다. 이를위해 본 실험으로 얻은 공칭 응력-공칭변형률 (nominal stress-nominal strain) 곡선을 진응력-진변형률(true stress-true strain) 곡선으로 바꾸고 이를 $\log \sigma - \log \epsilon$ 으로 도식화하여 직선의 기울기로부터 n 값을 얻었다. 이 n 값을 이용하면 소성영역에서의 재료거동을 잘 파악할 수 있다.

소성영역에서의 응력과 변형률의 재료 거동이 Hollomon식 $\sigma = K\epsilon^n$ 을 따른다고 가정하면,¹⁰ n 값은

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

식(1)로 구할 수 있다. 316L 및 316LN의 온도별 n 값의 변화 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 보는 것처럼 강도가 높았던 상온을 제외하면 316LN 재는 316L강에 비하여 전 온도 구간에서 높은 n 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 의미는 316LN 강이 316L강에 비해 소성변형에 저항하는 재료 능력이 우수하다는 것을 의미한다.

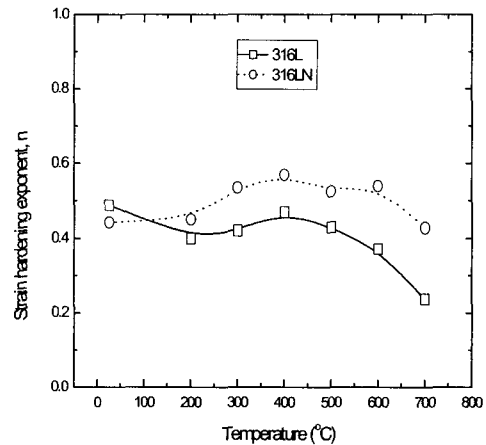


Fig. 9 Strain hardening exponents with temperatures of 316L and 316LN

두 강의 전체 n 값의 범위는 대략 700°C를 제외하면 0.4-0.6의 범위의 값을 가지고 있다. 이 값은 오스테나이트계 스테인리스강에서 보고¹¹ 되는 가공경화지수 0.45-0.55 범위와 큰 차이는 없으나, 철-합금 0.05-0.15나 구리-합금 0.3-0.35 그리고 알루미늄-합금 0.15-0.25의 값에 비하면 상당히 높은 값임을

알 수 있다. 한편 700°C의 고온인 경우 316L은 0.2로 현저히 줄어드는데 비해 316LN은 약 0.4의 비교적 높은 값을 갖는다. n 값은 일반적으로 강도가 높을수록 결정격자내의 전위(dislocation)의 이동성이 감소할수록 증가하고, 특히 어닐링(annealing)등의 열처리 조건에서는 높은 값을 가지고 냉간가공된 상태에서는 낮은 값을 갖는다. 이상에서 얻은 두 재료의 n 의 변화 결과는 후술할 가공 변질층의 거동을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다.

3.3 절삭조건에 따른 경도분포 및 가공변질층

Fig. 10 및 Fig. 11은 316L 및 316LN강을 절삭깊이 0.45mm, 절삭속도 393 m/min로 선정하고 이송량을 22, 42, 61, 87, 127 mm/min로 변화시켰을 때 가공 변질층 부위의 경도변화 결과를 전체적으로 나타낸 것이다. 두 재료의 전체적인 경도 변화 경향을 보면 표면층 바로 아래 부분인 0~50 μ m에서 경도 값의 감소가 가장 크고, 모재의 내부로 향할수록 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 경도 감소경향은 316L의 경우 316LN 보다 완만한 감소를 보이거나 316LN은 316L보다 급격한 감소를 보인다. 316L의 경우는 316LN보다 완만한 경도변화 경향으로 경도 영향층의 깊이가 316LN 보다 두껍다. 반면 316LN의 경우는 표면 및 내부의 변형층의 경도가 높지만 경도 영향층의 깊이는 316L 보다 낮다. 이러한 것은 앞절에서의 기계적 특성의 비교 결과에서처럼 316LN이 316L에 비해 강도가 높기 때문에 경도 영향층의 두께가 낮은 것으로 판단된다.

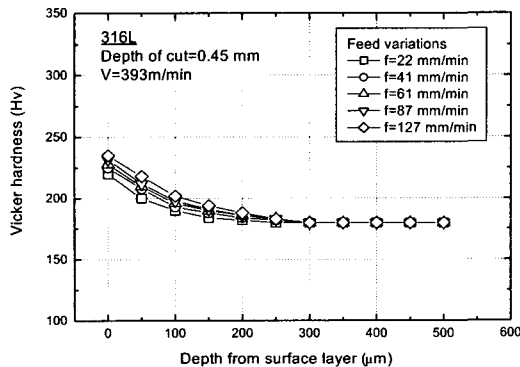


Fig. 10 Vickers hardness distribution of 316L

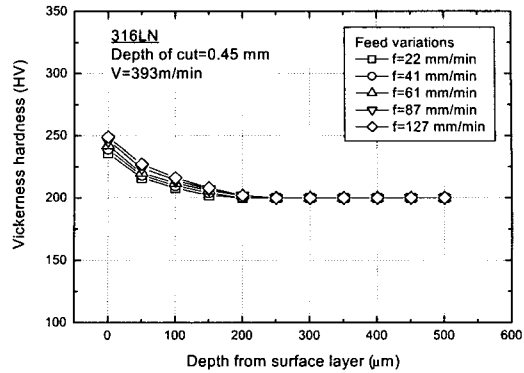


Fig. 11 Vickers hardness distribution of 316LN

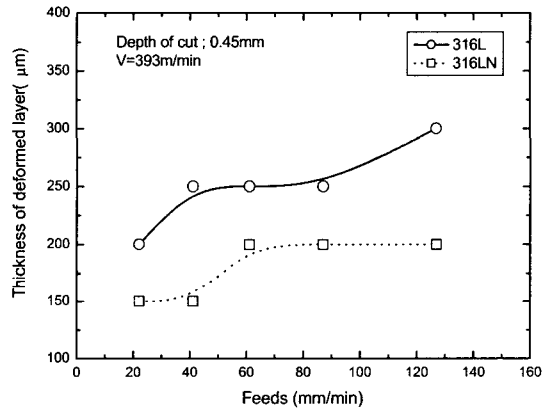


Fig. 12 Deformed layers vs. feeds in depth of cut of 0.45 mm for 316L and 316LN

그 이유는 316LN은 절삭저항력이 높아 가공 변형에 의한 경도 영향층이 낮아지기 때문이다. 또한 316LN은 절삭 가공에 의한 소성영역에서의 가공경화지수, n 값이 316L보다 높지만 가공 표층부에서 내부로 향할수록 가공경화 속도가 낮아지기 때문에 급격한 경도감소가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 절삭 깊이 0.45mm 및 0.6 mm에서 이송량의 변화에 따른 가공 변질층의 두께를 나타낸 것이다. 두 강은 동일한 절삭조건에서 이송량이 증가할수록 변질층의 두께가 증가하는 경향을 보이며, 전체적으로 316LN은 316L 보다 낮은 가공 변질층 두께를 보인다. 절삭 깊이 0.45m 및 절삭속도 393m/min에서 이송량을 22, 42, 61, 87, 127 mm/min로 변화시킬 경우 316L의 가공 변질층 두

께는 200 μ m-300 μ m 범위의 값을 보였으며, 316LN의 경우는 150 μ m-200 μ m로 낮은 값을 보였다. 또한 절삭 깊이 0.60mm 및 절삭속도 107m/min에서는 316L의 경우 200 μ m-300 μ m이었으며, 316LN은 200 μ m-250 μ m 범위의 값으로 316LN은 316L 재료보다 낮은 변질층 두께를 보임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 이송량을 증가시키면 절삭저항이 증가되어 표면에 심한 소성유동이 발생하여 압축에 의해 모재 내부까지 경화가 진행됨으로서 변질층의 두께가 증가된다. 한편 절삭속도를 107m/min로 변화시켰을 때는 가공재의 표면에서 슬립변형이 발생되고 393m/min에서는 결정조직이 미세화 되어 오히려 절삭저항은 감소되는 경향을 보였다. 본 실험에서의 두 절삭속도 조건에서 절삭 깊이의 변화에도 불구하고 변질층의 깊이는 큰 차이가 없는 것은 절삭속도의 차이 때문으로 판단된다.¹²

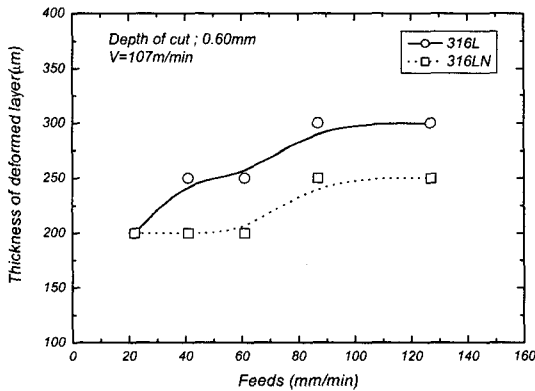


Fig. 13 Deformed layers vs. feeds in depth of cut of 0.60mm for 316L and 316LN

3.4 절삭저항과 가공변질층과의 관계

미소경도계로 측정된 가공 변질층의 두께와 공구 동력계로 측정된 절삭저항의 3분력 F_x , F_y , F_z 를 구하여 공구에 작용하는 합성절삭저항력, F_R 을 계산하여 얻었다. F_R 은 식(2)로 정의되는 값으로 공구가 받는 전체 힘으로 가공물의 저항력이 된다.

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

Fig. 14는 본 실험조건에서 얻은 F_R 과 가공변질층과의 관계를 나타낸 것이다. F_R 이 증가함에 따라 변질층의 두께는 증가하는 경향이며, 절삭 저항력은 같은 변질층 두께에서 316L 보다 316LN이 높은

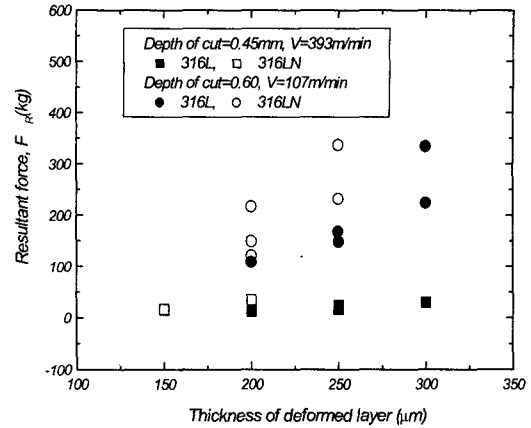


Fig. 14 Resultant force vs. deformed layers

값을 보인다. 절삭시 F_R 은 가공물에 압축력으로 작용하게 되고, 작용된 F_R 은 변질층 두께에 직접적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 절삭저항의 증가는 소성유동변형의 발생에 따라 경화현상을 진전시켜 표면층 부위에 경화층을 형성하여 가공 변질층의 두께가 증가되는 것으로 생각된다.

Fig. 15는 가공면의 표면경도와 합성 절삭저항력의 변화관계를 나타낸 것이다. 가공면의 표면경도가 증가함에 따라서 절삭저항력은 증가하며 Fig. 14의 가공 변질층의 변화 경향과 유사한 경향을 보인다. 따라서 표면경도가 증가하면 변질층 두께도 증가하는 관계임을 알 수 있다.

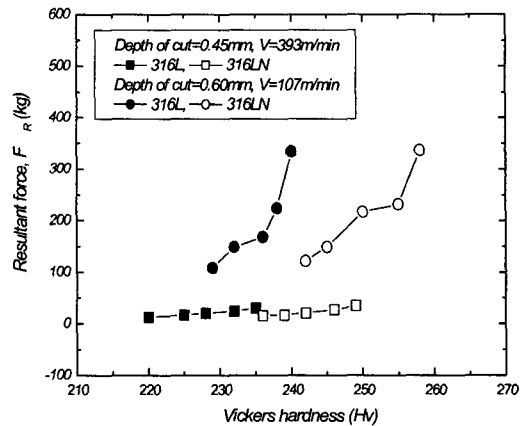


Fig. 15 Resultant force vs. vickers hardness

3.5 가공 변형조직 관찰

Fig. 16의 (a) 및 (b)는 316L과 316LN 두강의 face milling 가공 시 표면층 부위의 소성변형 상태를 관찰한 전형적인 광학 현미경 사진을 나타낸 것이다. 두강의 절삭조건은 절삭속도 393m/min, 절삭깊이 0.45mm, 이송량 127 mm/min로 동일한 절삭조건이었으며, 절삭한 후 face cutter의 회전방향에 대하여 직각방향으로 시편을 채취하여 관찰한 것이다. 가공된 모든 시편에 대한 변형 미세조직 관찰 결과, 가공 조건에 따른 변형조직은 큰 차이가 없음을 보였다. 사진 (a)는 316L에 대한 것이며, 사진 (b)는 316LN에 대한 것으로 316L의 경우는 최상층의 표층부에 절삭력에 의하여 변형된 조직이 관찰된다. 316LN의 경우는 변형조직이 316L 보다는 크지는 않지만 최상층 부위에 미소한 변형조직이 관찰된다. 즉 316L의 경우 입계(grain boundary)에서 미시적 변형조직으로 절삭저항이 가해진 방향으로 방향성 조직을 보인다. 가공 변질층의 표면조직은 재료에 따라 다르지만 통상 수십 A 정도의 Beilby 층이 형성되는데 이것은 원자가 격자를 만들지 않고 흐트러져있는 비결정질층이 형성되며 아래 부분은 섬유 조직층으로 되어 모재조직과 연결되는 것으로 알려져 있다.^{4,12}

본 연구에서의 광학현미경 관찰로는 비결정질층을 분명하게 관찰할 수는 없었으나, 316L의 경우 가공 변형에 의한 변형조직이 어느 정도 형성되고 있음을 관찰할 수 있다. 반면에 316LN의 경우는 변형조직을 뚜렷하게 관찰되지는 않았지만 미세한 변형조직을 관찰할 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 316LN 재는 재료의 기계적 강도가 높기 때문에 본 실험의 절삭조건에서는 가공 조직의 큰 변화를 일으키지 않았던 것으로 보여 진다.



(a) 316L stainless steel



(b) 316LN stainless steel

Fig. 16 OM photos of deformed structures

그러나 경도 변화가 발생한 것은 본 가공조건에서의 절삭력 및 절삭열 등에 의하여 재료가 가공 경화되어 발생되었던 것으로 판단된다. 본 실험 조건에서의 316L 및 316LN의 변질층의 최대 변화 범위는 150 μ m-300 μ m인 것으로 나타났다. 한편, 두강의 입자크기(grain size)가 상당히 차이가 있음을 보였다. 316L의 크기는 약 80 μ m정도로 다소 불균일한 반면, 질소가 첨가된 316LN은 약 30 μ m로 매우 미세한 조직을 보였다. 이러한 결과는 Fig. 7 및 Fig. 8의 SEM 표면조직에서 관찰한 바와 같이 덩플의 크기로부터도 잘 확인되고 있다. 따라서 질소는 재료의 결정립을 미세하게 하며 입자크기는 재료의 강도특성에 밀접한 영향을 미친다.

4. 결론

STS 316L과 STS 316LN 스테인리스강의 고온 기계적 특성과 face milling 절삭 시 생성된 가공 변질층을 조사 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 316LN의 최대인장강도는 316L에 비해 전 온도 구간에서 약 50MPa 정도로 현저히 높게 나타났으며, 연신율은 높은 강도에 비해 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한 316LN은 316L에 비하여 전 온도 구간에서 높은 가공경화지수를 나타내었다.
- (2) 가공 변질층 부위의 경도변화는 316LN의 경우 표면에서 내부로 향할수록 감소 폭이 크나 316L은 완만하였으며, 본 절삭조건에서의 두 강도의 가공 변질층 두께는 150 μ m~300 μ m 범위로 316L이 316LN 보다 높았다.
- (3) 가공 변질층의 두께는 이송량이 증가할수록 증가 하였으며 이는 절삭저항력과 밀접한 관련이 있으며, 316LN은 316L 보다 강도, 절삭 저항력, 경도, 가공경화지수에서 높은 재료 거동에 기인하여 변질층의 두께가 낮게 생성된 것으로 분석되었다.
- (4) 본 절삭조건에서의 가공 변형부의 미세조직 관찰결과 316L은 절삭력에 의하여 변형 조직이 관찰되었으나 316LN은 높은 강도로 인하여 변형조직이 생성되지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Kang, E. G., Park, S. J., Lee, S. J. and Kwon, H. D., "Cutting Force Measuring System Using the

- Load Cell for a Milling Process," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 6, pp. 133-140, 2001.
2. Hwang, J., Chung, E. S., Lee, K. Y., Shin, S. C. and Namgung, S., "A Study on the Detection of Cutter Runout Magnitude in Milling," Proc. of the KSPE, Fall, Annual, Meeting, pp. 151-156, 1997.
 3. Park, Y. W., "Mathematical Modeling for the Depth of Deformed Layer in Machining," Proc. of the KSPE, Fall, Annual, Meeting, pp. 247-250, 1997.
 4. Liu, C. R. and Barash, M. M., "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, 1976.
 5. Matsumoto, Y. Barash, M. M. and Liu, C. R., "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel," Trans. ASME, Vol. 108, pp. 169-175, 1986.
 6. Trend., E. M., "Metal Cutting," Butterworth and Co., pp. 164-165, 1977.
 7. Pickering, F. B., "Some Beneficial Effects of Nitrogen in Steel," Proc. of High Nitrogen Steels -HNS 88, Lille France, May, pp. 10-31, 1988.
 8. ASTM E8M., "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," pp. 77-97, 1995.
 9. Hosford, W. F. and Caddell, R. M., "Metal Forming," PTR Prentice-Hall, Inc, pp. 61-66, 1993.
 10. Kalpakjian, S., "Manufacturing Processes for Engineering Materials," 2nd Ed., Addison-Wesley Publishing Company, Inc, pp. 61-66, 1993.
 11. Hertzberg, R. H., "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," John Wiley & Sons, New York, pp. 16-18, 1976.
 12. Elkhabeery, M. M. and Bailey, J. A., "Surface Integrity in Machining Solution-Treated and Aged 2024-Aluminum Alloy Using Natural and Controlled Contact Length Tools (Part1, Part2)," Trans. ASME, Vol. 106, pp. 152-166, 1984.