

## 구형압입을 이용한 레이저 용접된 절단 휠의 잔류응력 분포 측정

### Stress Distribution around Laser-Welded Cutting Wheels Using a Spherical Indentation

이윤희\*<sup>†</sup>, 이완규\*, 정인현\*, 남승훈\*

Yun-Hee Lee\*<sup>†</sup>, Wan-Kyu Lee\*, In-Hyeon Jeong\* and Seung-Hoon Nahm\*

**초 록** 레이저 용접부의 국소 잔류응력을 측정하기 위한 비파괴 기법으로 구형압입시험이 제안되었다. 용접 상태 절단휠의 구형압입시험으로 얻어진 겉보기 항복강도와 절단휠 용접부에 대한 응력완화 열처리 이후 동등한 위치에서 구한 고유 항복강도를 정량적으로 비교하였다. 고유항복강도가 탄성한도 내의 잔류응력에 의해서 변화하지 않는다고 고려하면 용융선으로부터 거리에 따른 두 항복강도의 차이가 용접잔류응력의 분포로 나타난다. 레이저 용접된 다이아몬드 절단휠의 구형압입시험으로부터 약 10 mm 폭에 걸친 잔류응력의 분포를 확인하였으며, 잔류응력은 샹크와 절단팁 내에서 각각 최대 압축 및 인장 잔류응력치를 나타내었다.

**주요용어:** 레이저 용접부, 잔류응력, 계장화 압입, 겉보기/고유 항복강도, 절단 휠

**Abstract** A spherical indentation has been proposed as a nondestructive method of measuring local residual stress field in laser-welded joints. The apparent yield strengths interpreted from the spherical indentation data of as-welded cutting wheel were compared with the intrinsic yield strengths measured at nearly equivalent locations in annealed wheel. Their difference along the distance from the welding line is welding stress distribution because the intrinsic yield strength is invariant regardless of the elastic residual stress. The spherical indentations show that the laser-welded diamond cutting wheel displays a 10 mm-wide distribution of the welding residual stress and has peak compressive and tensile stresses in the shank and tip regions, respectively.

**Keywords:** Laser Welds, Residual Stress, Instrumented Indentation, Apparent/intrinsic Yield Strengths, Cutting Wheel

#### 1. 서 론

대형구조물이나 설비의 용접접합부는 공정 중의 용착금속의 용입이 적어서 발생하는 결함, 습한 환경에서 진행된 공정에 의한 수소가스의 발생 및 기공결함, 국소영역에 열이 집중되어 발생하는 열영향부(heat-affected zone) 등 다양한 응력과 결함요소들을 복합적으로 포함하고 있다. 따라서 운용 중 발생하는 외부 부하에 의해 심각한 손상이 발생되거나, 외부환경의 침식으로 인해 부식, 소성변형,

내피로 및 파괴저항성의 저하와 같은 구조물 혹은 설비의 열화를 가속시키는 요인이 된다[1,2].

다양한 접근 방법으로 용접부의 잔류응력을 측정하고, 이를 해소하기 위한 연구가 진행되고 있다. 잔류응력 측정의 기본원리는 응력상태에서 물리적인 신호를 얻고, 응력제거 후에 동일한 물리적 신호를 측정했을 때 신호 변화량과 응력의 상관관계를 맺어주는 것이다. 파괴적인 방법으로 hole-drilling, 절단법, 층 제거법 등이 존재하며, 비파괴적인 방법으로 X-선 및 중성자 회절, Barkhausen

noise 측정, 초음파 속도 측정 등이 존재하나 잔류응력 측정에 있어서 표준화된 방법은 아직까지 전무한 실정이다[1,2].

기존 아크용접부가 갖는 용접불량, 결함 및 후속적인 열화와 손상에 대한 취약성을 제거하기 위해 최근에는 레이저 용접(laser welding), 마찰교반용접(friction-stir welding), 반도체 소자에서의 와이어 본딩(wire bonding) 등과 같이 입열량을 줄여서 용착부와 용접열영향부를 mm 이내로 축소하는 기술들이 연구되고 있다. 원판형의 강제 샹크(shank) 외륜부에 다이아몬드 분말을 혼입한 절단팁을 접합하여 제작되는 절단휠에서도 위와 같은 소규모 용접기술이 적용되고 있다. mm 수준의 두께를 갖는 판상 샹크와 절단팁을 접합하는 데 대입열량 아크용접기술을 적용할 경우 열변형과 함께 잔류응력의 영향으로 면외 변형(out-of-plane deformation)이 발생하여 절단휠 불량을 유발할 수 있다. 이에 따라 소입열량 레이저 용접기술을 접목한 절단휠 접합기술이 개발되고 있으나, 아직까지 국소 용접접합부에 대한 상세한 연구가 이뤄지지 못하고 있는 실정이다. 선행연구[3]를 통해 마찰교반용접에서 예기치 않은 잔류응력 분포양상과 심각한 미세조직 변화를 확인할 수 있었다. 잔류응력이 넓게 분포하는 것보다 좁은 영역이라 하더라도 높은 인장응력 피크가 존재할 경우 열화라든지 손상에 취약할 수 있기 때문에 이들 특수 용접부의 잔류응력 측정에 대한 연구 필요성이 증대되고 있다. 그러나 용접부 폭이 수 mm 이내로 좁게 존재하기 때문에 기존의 스트레인게이지를 부착하는 절단법을 이용하여 잔류응력 분포를 측정하는 것은 한계를 나타내었다. 이에 따라 공간분해능이 우수한 계장화 압입시험기법[4-7]이 소입열 특수용접부의 잔류응력 측정기법으로 연구되었다. 특히 본 연구에서는 표면 잔류응력에 따른 압입하중 인가곡선의 위, 아래 이동[6]이 아닌 겹보기 항복강도의 변화로부터 잔류응력의 정량적인 분포를 확인하는 기술을 새롭게 시도하였다.

## 2. 이론적 배경

탄성한도 내에 존재하는 잔류응력은 후속적으로 인가되는 탄성응력에 산술적으로 중첩될 수 있으며, 탄성구간 내의 응력-변형률 그래프의 기울기에 해당하는 탄성계수에는 영향을 미치지 않는다. 즉 인장 잔류응력이 존재할 경우 일축인장 시험에 따

른 인장외력이 부가되면 탄성구간의 응력-변형률 그래프 기울기 변화는 없지만 Fig. 1과 같이 잔류응력만큼 낮은 항복강도를 나타내며, 압축 잔류응력이 존재할 경우 일축인장 시험에서 잔류응력만큼 높은 항복강도를 나타낸다. 재료 물성치인 고유 항복강도(intrinsic yield strength;  $\sigma_y$ )에 비해서 잔류응력에 따라 변화하는 시험 데이터를 겹보기 항복강도(apparent yield strength;  $\sigma_y^{app}$ )로 표현할 수 있으며, 식 (1)과 같이 두 항복강도 값의 차이에서 정량적인 잔류응력  $\sigma_{res}$ 로 평가할 수 있다. Fig. 1과 같이 일축인장 시험을 통해 겹보기 및 고유 항복강도의 측정 및 비교가 가능하면 잔류응력은 두 항복강도의 차이로 간략히 표현될 수 있으나, 본 연구와 같이 압입시험을 적용할 경우에는 소성구속과 응력방향성의 의미를 포함하는 비례상수  $\kappa$ 의 도입이 필요하다. 즉 삼축 구속도를 갖는 압입변형으로부터 잔류응력 방향과 평행한 방향의 면내 일축 항복강도를 환산하기 위한 소성구속인자의 고려가 필요하다. 그러나 계장화 압입시험을 통해 항복강도를 측정하는 Ahn 등의 선행연구[4]의 일축유동응력의 결정과정에 소성구속인자  $\psi$ 가 도입되기 때문에 재보정의 필요는 없다. 또한 압입변형에 영향을 주는 잔류응력은 대개 이축상태(biaxial state)이며 Lee 등의 선행연구[6]에 따르면 방향성없이 평균응력만을 고려할 경우 방향성인자인  $\kappa$ 를 1로 두어도 무방함을 알 수 있다.

$$\sigma_{res} = \kappa(\sigma_y - \sigma_y^{app}) \quad (1)$$

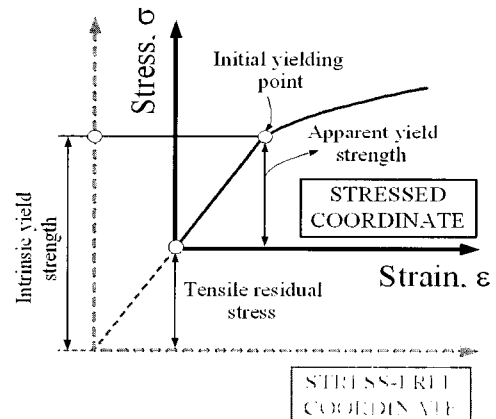


Fig. 1 Definition of the residual stress as the difference of apparent and intrinsic yield strengths

이 개념을 계장화 압입시험에 적용시켜서 고유 항복강도가 알려진 소재의 국소영역에 걸쳐 결보기 항복강도의 변화를 조사하면 두 값의 차이로부터 잔류응력의 분포 측정이 가능하다. 구형 압입자를 이용하여 금속소재의 소성유동특성을 평가하기 위해서는 소재 표면에 압입자가 침투할 때 발생하는 응력과 변형률에 대한 분석이 필요하다. 응력과 변형률의 분석을 위해서 압입자와 소재표면이 맞닿아 있는 정확한 접촉깊이의 결정이 필요하며, 계장화 압입곡선의 일반적인 분석에 빈번히 사용되어온 Oliver-Pharr 방법[8]에서 고려할 수 없는 압입자 주변의 소성적인 재료쌓임 현상(pile-up phenomenon)을 감안해야 한다. 구형 압입시 접촉부의 불균일 현상을 시험소재의 가공경화지수와 관련지어 설명하는 Ahn 등의 연구[4]에 따르면, 접촉반경  $a_C$ 는 식 (2)로 표현되었다.

$$a_C^2 = \frac{5(2-n)}{2(4+n)}(2Rh_C^* - h_C^{*3}) \quad (2)$$

여기서  $n$ ,  $R$ ,  $h_C^*$ 는 각각 대상소재의 가공경화지수, 압입자 반경, Oliver-Pharr 방법[8]으로 얻어진 압입곡선 분석 접촉깊이를 나타낸다. 이와 함께 압입변형에 대응하는 변형률은 압입자에 의해 눌린 변형 변위를 압입자 축방향으로 미분함으로써 식 (3)과 같이 주어졌고, 다양한 소재의 시험을 통해 최적화 상수  $\alpha$ 는 0.1로 주어졌다 [4]. 일반적으로 낮은 변형률 영역에서  $a_C/R$ 은 짜인 함수로 표현되기도 하나 가공경화가 심하여 변형률 영역이 넓은 경우에는 식 (3)을 탄젠트 함수로 표현하기도 한다[5].

$$\epsilon_R = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a_C/R)^2}} \frac{a_C}{R} \quad (3)$$

또 압입자/시편표면 사이에 걸리는 접촉압력  $P_m$ 은 압입하중  $L$ 을 접촉면적으로 나눈 것으로  $L/\pi a_C^2$ 로 정의되며, 식 (4)와 같이 이를 소성구속인자  $\Psi$ 로 나누어 유동응력  $\sigma_R$ 을 정의하였다. 일반적으로 강재의 압입시험 시 약 1 kgf 이상의 압입하중이 인가되면 구형 압입자 주변으로 소성역이 전파된 완전소성단계로 접어드는 것으로 알려져 있으며[4], 본 연구에서는 완전소성단계에 대응하여 약 3.0의 값으로 고정된 소성구속인자를 사용하였다.

$$\sigma_R = \frac{L}{\Psi(\pi a_C^2)} \quad (4)$$

소재의 가공경화지수는 1회 압입시험을 통해 측정될 수 없기 때문에 Ahn 등[4]은 다중회귀 방법(iteration method)를 이용하여 식 (2)에서  $n$ 으로 표현된 가공경화지수를 결정하였다. 즉 임의로  $n_{in}$  값을 0.5로 입력하여 다중 압입시험에서 획득되는 다단의 하중재거곡선을 식 (3)과 (4)로 분석하면 다단의 유동응력과 변형률 쌍이 얻어지며, 이를 단축 인장시험의 소성유동 거동을 표현하는 Holomon 떡급수 식  $\sigma_R = K\epsilon_R^{n_{out}}$ 에 대입함으로써  $n_{out}$  값을 결정할 수 있다.  $n_{in}$  값을 순차적으로 감소시키면서 유동특성 분석을 반복하여 궁극적으로  $n_{in}$ 과  $n_{out}$ 이 같아지는 값을 대상소재의 가공경화지수  $n$ 으로 결정하였다. 최종 결정된 유동특성곡선에 강재의 선형탄성곡선을 중첩함으로써 두선이 접하는 점에서 소재의 결보기 혹은 고유 항복강도를 결정하였다. 여러 강재를 포함하는 금속소재에서 재현성있는 항복강도가 계장화 압입시험을 통해 평가되었고, 용접부의 경우 잔류응력 제거 전후의 계장화 압입시험 결과를 식 (1)에 대입함으로써 잔류응력의 정량적 평가가 가능하다.

### 3. 실험방법

잔류응력 측정을 위한 구형압입시험에는 다이아몬드 혼입 절단팁을 강재 썩크에 용접한 절단휠을 사용하였다. 직경 305 mm의 SCM 435 강으로 만들어진 원판형 썩크부의 가장자리에 CO<sub>2</sub> 레이저 용접방법으로 7×45 mm 크기의 다이아몬드 절단팁을 접합하였다. 용접전원은 1.44 kW를 사용하였고, 불활성 질소가스 분위기에서 5°의 레이저빔 각도로 5 m/min의 속도로 용접작업을 진행하였다. 강재 썩크와 맞붙이기 위해 절단팁은 1.0 mm 폭의 Co 접합층과 6.0 mm 폭의 다이아몬드 분말을 혼합한 복합합금의 절단층으로 구성되었다. 절단층의 구체적인 화학조성을 무게 백분율로 나타내면 43Cu-21Ni-19W-16Sn 합금과 다이아몬드 분말로 구성되었다. 용접된 절단휠로부터 25×45 mm의 용접부 시편을 채취하였으며, 구형 압입시험을 위해 시편표면을 기계 연마하였다.

구형압입 시험은  $0.1 \mu\text{m}$ 와  $14.7 \text{ mN}$ 의 깊이 및 하중 분해능을 갖는 프론티스사의 AIS 3000 계장화 압입시험기를 사용하였으며, 구형 압입자는 직경  $0.5 \text{ mm}$ 의 텅스텐카바이드 볼을 사용하였다. 최대 압입깊이는  $150 \mu\text{m}$ 로 설정하였고, 각  $10 \mu\text{m}$ 씩 압입깊이를 증가시키면서 하중을 제거하는 단단 압입 시험 절차를 따랐다. 이로부터 연속적으로 얻어진 압입하중-변위곡선은 접촉물성 분석을 통해 각 압입위치의 유동특성 평가에 사용되었다. 썩크부 외각에 압입시험 시작선을 만들고  $2 \text{ mm}$  간격으로 용접부를 가로질러 3 열로 구형압입시험을 진행하여 용접 잔류응력이 존재하는 경우의 결보기 항복강도의 변화를 측정하였다. 압입시험이 완료된 시편은 잔류응력 제거를 목적으로 불활성 아르곤 가스 분위기에서 열처리하였다. 즉  $650^\circ\text{C}$ 의 가열로 내에서  $1 \text{ h}$  동안 어닐링한 뒤 노냉을 통해 레이저 용접부에 존재하는 잔류응력을 제거하였다. 용접 잔류응력이 완화된 시편에도 동일한 압입조건으로 레이저 용접부를 가로질러 구형 압입시험을 수행하였고, 이 결과로부터 무응력 상태의 고유 항복강도 변화를 측정하였다. 이후 압입 시작선으로부터 각 압입지점의 상대적인 위치는 2% 나이탈 용액으로 부식된 표면을 광학현미경으로 관찰함으로써 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 잔류응력 완화 열처리 전후에 썩크부의 계장화 압입시험에서 얻어진 압입하중-변위곡선을 중첩하였다. 열처리 이전 용접부(as-welded state)에서 얻어진 압입곡선과 잔류응력 제거 열처리를 거친 용접부(stress-relieved state)에서 얻어진 압입곡선을 비교하였을 때 최대 압입깊이에 대응하여 열처리를 거친 상태의 압입하중이 약  $20 \text{ kgf}$  정도 낮게 측정됨으로부터 썩크부의 잔류응력 부호는 압축임을 예측할 수 있었다.

반면 절단팁 부에서 얻어진 압입곡선 중첩 결과는 동일한 압입깊이에 대응하여 열처리 이후에 도리어 압입하중이 증가하는 인장 잔류응력에 대응하는 거동을 나타내었다. Fig. 2의 압입하중-변위곡선을 Eqs. (2)-(4)의 유동특성 분석과정을 거쳐 Fig. 3과 같은 열처리 전후의 소성유동곡선을 획득하였고, 이론적 배경에서 설명된 오프셋선을 도입함으로써 썩크 부의 결보기 및 고유 항복강도를 분석하였다.

Fig. 3과 같은 분석을 썩크부 뿐만 아니라 용융선, 절단팁에도 공히 진행함으로써 Table 1과 같이  $0.9 \text{ mm}$  폭을 갖는 용융선을 가로질러 압입 시작선으로부터 거리에 따른 결보기 및 고유 항복강도의 분포를 얻었다.

압입시험 시작선으로부터 지정된 위치에 용접 직후 및 잔류응력 제거 열처리 후에 공히 동일한 압흔을 형성한다는 것이 불가능하였기 때문에 결보기 및 고유 항복강도를 동일지점에서 비교할 수 없다. 대신 Fig. 4와 같이 항복강도 값의 연속적인 변화를 고려하여 Table 1에 주어진 데이터를 부드러운 곡선으로 연결함으로써 원하는 위치의 항복강도 값을 유추하였다.

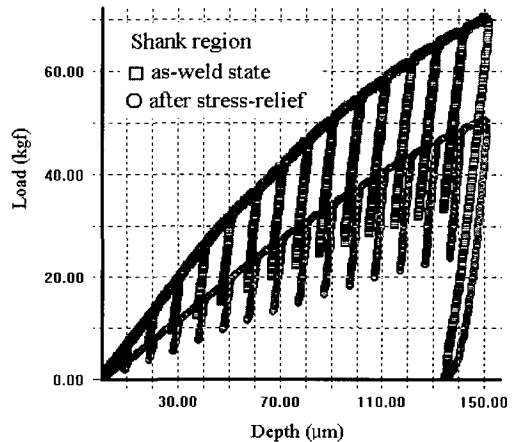


Fig. 2 Overlapping of both indentation curves from the laser-welds before and after the stress-relief heat-treatment

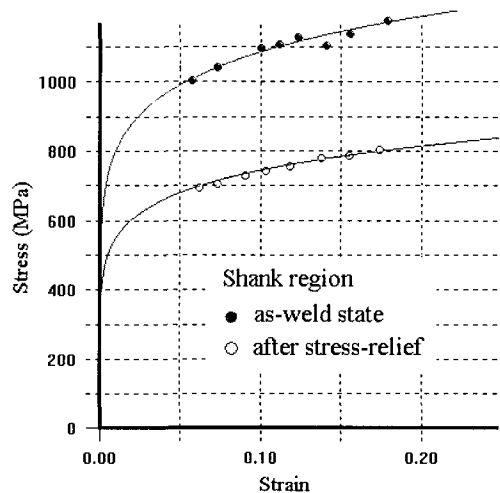


Fig. 3 Flow curves in the shank before and after the stress-relief heat-treatment

Table 1 Apparent and intrinsic yield strengths evaluated from the as-welded and stress-relieved welds, respectively

As-welded state		Stress-relief state	
Distance from the starting line (mm)	Apparent yield strength (MPa)	Distance from the starting line (mm)	Intrinsic yield strength (MPa)
0.56	599.4	2.22	588.7
3.73	805.7	2.88	507.7
4.68	897.1	4.06	551.5
5.72	761.2	5.31	542.2
6.63	713.7	6.04	482.3
7.74	862.5	8.08	761.9
8.09	817.4	9.30	545.6
8.76	521.5	9.95	568.1
9.87	450.6	11.30	530.3
10.12	427.8	11.99	531.0
10.75	519.9	13.33	585.4

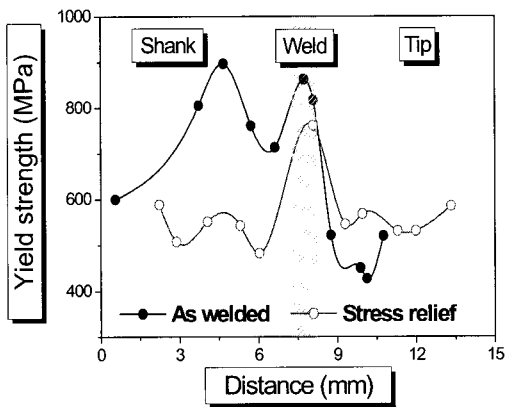


Fig. 4 Approximation of continuous yield strength using an data interpolation method

이로부터 최종적으로 용융선으로부터 거리에 따른 잔류응력의 분포를 Fig. 5와 같이 얻을 수 있었다. Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 국소 레이저 용접을 채택하더라도 수십 mm 영역에 걸쳐 잔류응력의 분포를 예상할 수 있었으며 특히 절단 팁 부근에서는 131 MPa 정도의 높은 인장잔류응력을 확인할 수 있었고, 반면에 샹크 부근에서는 항복강도에 근접하는 높은 압축 잔류응력이 존재함을 확인할 수 있었다.

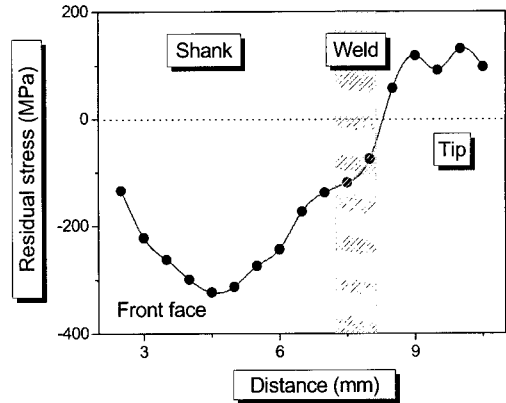


Fig. 5 Residual stress variation estimated from the laser welds

Fig. 5의 결과는 절단휠이 충분한 강도를 갖지 못할 경우 인장 혹은 압축 응력에 의해 면의 변형이 발생할 가능성이 있으며, 이를 수용하기 위한 양면 용접 등과 같은 기술의 확보가 가능할 것으로 판단된다. 덧붙여 박막형 스트레인게이지의 크기 문제로 국소 레이저 용접부에 적용이 불가능한 홀드드릴링이나 절단법을 대체할 방법에 대한 구체적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 덧붙여 본 연구에서 진행된 구형 압입시험의 경우 표면에 존재하는 2축 잔류응력의 방향성에는 둔감한 면이 있으며, 특히 Fig. 5의 잔류응력 결과는 2축 잔류응력값의 평균값으로 알려져 있기 때문에[6] 절단휠의 방사 및 외륜 방향으로의 주축 잔류응력 분리에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이러한 주축 응력 분리 연구의 한 예로는 원추형 압자 주변에 발생한 재료 쌓임 높낮이 비를 주축 응력비로 평가한 선행 연구[9]를 들 수 있으며, 본 연구에서 발생한 압흔 형상 관찰을 통해 Fig. 5의 응력치를 주축응력들로 분리할 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 잔류응력에 따른 곡선형상 변화를 탈피하여 탄성한도 내에 존재하는 잔류응력이 대상부재의 결보기 항복강도를 변화시킨다는 개념에 착안하여 응력완화 열처리 전후에 레이저 용접된 절단휠에 압입시험을 행함으로써 결보기 및 고유 항복강도를 측정하였고, 이 두 값의 차이로부터 잔류응력의 분포를 분석하였다. 분석결과 절단

팁 부근에서는 인장 잔류응력이 존재하였고, 용융선을 지나면서 인장 잔류응력이 감소하여 최종적으로 섹크부에서는 강한 압축응력이 존재하는 것으로 나타났다. 이 결과 절단휠의 경우 면외 변형의 가능성이 있음을 확인할 수 있었고, 이를 제거하기 위한 새로운 양면용접과 같은 공정의 필요성을 확인할 수 있었다. 덧붙여 절단휠과 같은 원판의 경우 방사 및 외륜 방향으로 2종의 주축 잔류응력 성분을 생각할 수 있고, 이 잔류응력 성분 분석에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 에너지기술혁신프로그램의 일환으로 수행되었습니다. ("차세대 에너지안전 첨단관리 시스템 구축" 연구단, 세부과제 번호: 2007-M-CC23-P-09-1-000)

## 참고문헌

- [1] J. Lu, et al., "Comparative study of different techniques," Handbook of Measurement of Residual Stresses, J. Lu, Ed., pp. 225-231, The Fairmont Press, Lilburn, Georgia, United States, (1996)
- [2] C. O. Ruud, P. S. DiMascio and J. J. Yavelak, "Comparison of three residual-stress measurement methods on a mild steel bar," Experimental Mechanics, Vol. 25, No. 4, pp. 338-343, (1985)
- [3] Y.-H. Lee, J.-Y. Kim, J.-S. Lee, K.-H. Kim, J. Y. Koo and D. I. Kwon, "Using the instrumented indentation technique for stress characterization of friction stir-welded API X80 steel," Philosophical Magazine, Vol. 86, Nos. 33-35, pp. 5497-5504, (2006)
- [4] J. H. Ahn and D. I. Kwon, "Derivation of plastic stress - strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect," Journal of Materials Research, Vol. 16, No. 11, pp. 3170-3178, (2001)
- [5] E.-C. Jeon, J.-Y. Kim, M. K. Baik, S. H. Kim, J. S. Park and D. I. Kwon, "Optimum definition of true strain beneath a spherical indenter for deriving indentation flow curves," Materials Science and Engineering A, Vol. 419, Nos. 1-2, pp. 196-201, (2006)
- [6] Y.-H. Lee and D. I. Kwon, "Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters," Acta Materialia, Vol. 52, No. 6, pp. 1555-1563, (2004)
- [7] Y.-H. Lee, K. Takashima and D. I. Kwon, "Micromechanical analysis on residual stress-induced nanoindentation depth shifts in DLC films," Scripta Materialia, Vol. 50, No. 9, pp. 1193-1198, (2004)
- [8] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," Journal of Materials Research, Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583, (1992)
- [9] Y.-H. Lee, K. Takashima, Y. Higo and D. I. Kwon, "Prediction of stress directionality from pile-up morphology around remnant indentation," Scripta Materialia, Vol. 51, No. 9, pp. 887-891, (2004)