

# 응력 상호작용과 연속압입 기법을 이용한 SS400 강봉의 굽힘 잔류응력 평가

李潤熙 · 池源宰 · 孫東一 · 張宰溢\* · 權東一

서울대학교 공과대학 재료공학부  
 \*(주) 프론틱스 부설연구소

## Analysis of Bending Residual Stress in SS400 Steel Beam Using Continuous Indentation Technique and Stress Interaction Model

Yun-Hee Lee, Wonjae Ji, Dongil Son, Jae-il Jang\* and Dongil Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
 \*R&D Center, Frontics, Inc., Seoul 151-742, Korea

**Abstract :** Apparent mechanical properties of welded structural components are deviated from the initially designed values due to the residual stress. Thus, exact assessment of the residual stress using a nondestructive method became an important issue in reliability researches. A nanoindentation model for evaluating the equi-biaxial thin film residual stress was proposed in the previous study. However, the surface residual stress in the welded joint is a non-equi-biaxial state and complex elastic/plastic deformations are involved in the macroindentation. Therefore, the previous model was modified to evaluate the real non-equi-biaxial residual stress by considering a new stress-proportional factor and a significant effect of the plasticity. The newly modified stress-analyzing model was verified empirically by comparing the evaluated uniaxial stress with the already known residual stress of 4-point bended specimen. (Received June 11, 2002)

**Key words :** Continuous indentation, Stress interaction, Stress generating jig

### 1. 서 론

용접과 같은 이종소재의 접합부에서 발생하는 잔류응력은 굽힘변형을 유발하고, 인장 잔류응력에 의해 형성된 표면균열은 피로 및 파괴 특성을 저하시키고 궁극적으로 구조물의 수명을 단축시킨다<sup>1)</sup>. 따라서 구조물 내의 잔류응력을 정확하게 측정하고자 하는 연구가 진행되었고, 실험실 수준의 다양한 잔류응력 측정 기법<sup>1-3)</sup>들이 개발되었다. 대표적인 잔류응력의 측정 방법으로 hole-drilling, saw-cutting 및 X선 회절법 등이 있다<sup>1-3)</sup>. 우선 hole-drilling과 saw-cutting 방법은 잔류응력이 걸린 일부 소재를 기계적으로 제거하여 완화되는 응력을 측정하는 방법이기 때문에 별도의 잔류응력이 존재하지 않는 기준시편이 필요하지 않지만 파괴적인 방법이라는 단점이 있다. 반면 X선 회절법은 비파괴적인 방법이지만 잔류응력이 없는 상태에 대응하는 회절 피크에 대한 정보를 필요로 하고, 기계적 응력 뿐만 아니라 미세 조직에 의해서도 회절 피크가 영향을 받는다는 문제점이 있다. 이들 방법은 응력완화가 수반되는 시편 채취과정이 필요하다는 단점이 있을 뿐만 아니라 실험실 수준의 정밀한 환경제어와 복잡한 시편과정으로 인하여 현장 구조물에 적용하는 데는 한계가 있을 수 밖에 없다. 이에 따라 시편채취 없이 현장구조물에 in-situ 적용이 가능하고, 또한 수백  $\mu\text{m}$  이내의 미소한 압흔만을 남기는 비파괴적인 연속 압입시험법(continuous indentation technique)<sup>4)</sup>이 새로운 잔류응력 측정기법으로 제안되었다. 연속 압입시험법은 압입하중과 압입자 침투깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 형성한다<sup>4,5)</sup>.

그림 1에 실선으로 나타낸 다중 압입하중-변위곡선은 압입자

를 통하여 시편에 하중을 인가하는 단계의 하중인가곡선(loading curve)과 압입하중 인가 이후 시편에서 압입자를 제거하는 여러 단계의 부분 하중제거곡선(partial unloading curve)들로 구성된다. 압입하중 인가 및 제거 곡선들은 그림 1에 나타낸 것과 같이 압입깊이의 멱급수 식(power-law equation)으로 적합화되며, 부분 하중제거곡선을 분석하면 여러 압입하중에서 압입자/시편 간의 접촉깊이 ( $h_c$ )들을 결정할 수 있다. 일정한 침단각을 갖는 압입자로 압입을 행할 때 압입자/시편 간의 접촉깊이는 Oliver와 Pharr<sup>5)</sup>에 의해 식 (1)로 정의되었다.

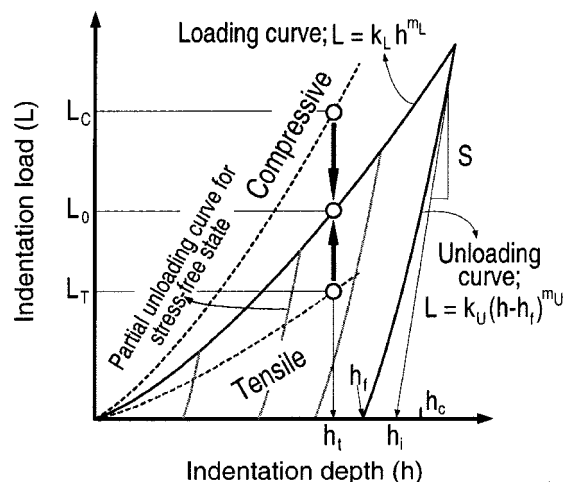


Fig. 1. Schematic diagram showing the theoretical analysis of indentation unloading curve<sup>5)</sup> and the variation of indentation loading curves by the change of stress states<sup>6-9)</sup>.

$$h_c = h - 0.72(h - h_i) = h - 0.72\left(\frac{L}{S}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서  $h_i$ 는 하중제거곡선의 접선을 외삽하여 압입깊이 축과 만나는 점인 절편깊이(intercept depth)를 나타내고,  $S$ 는 하중제거곡선의 초기 기울기이다. 136도의 대면각을 갖는 사각 피라미드 형태를 고려하면 Vickers 압입자의 접촉면적,  $A_c$ 는  $24.5h_c^2$ 로 표현된다.

그림 1에는 등방향 2축 압축 및 인장 잔류응력(그림 1에서 compressive 및 tensile로 표시)에 의해 발생하는 압입하중 인가곡선의 형상변화를 접선으로 나타내었다. 일정한 최대 압입깊이 ( $h$ )에 대응하는 인가 압입하중은 등방향 2축 압축 및 인장 잔류응력 하에서 각각  $L_c$ 와  $L_t$ 로 잔류응력이 없는 상태의 압입하중인  $L_0$ 에 비해 증가 및 감소한다<sup>6,9)</sup>. 이 압입하중의 증감분은 잔류응력의 영향으로 발생하기 때문에 잔류응력 유도 수직하중(residual stress-induced normal load)으로 정의하였고<sup>6,8)</sup>, 잔류응력에 무관한 고유경도(stress-independent intrinsic hardness;  $H$ )를<sup>9,10)</sup> 고려하면 압축 및 인장 잔류응력에 의하여 압흔(indentation mark) 주변에는 pile-up 및 sink-in 변형이 발생하였다<sup>6,8)</sup>. 그림 1에 화살표로 표시한 압입깊이를 일정하게 유지하면서 잔류응력을 완화시키는 과정(depth-controlled relaxation procedure)에서 나타나는 압입하중, 접촉면적 및 소재 내부응력의 연속적인 변화를 적분식으로 표현함으로써 등방향 2축 박막 잔류응력을 평가할 수 있었다<sup>8)</sup>.

그러나 대형 구조물의 용접부에 존재하는 표면 잔류응력은 방향에 따라 크기와 부호가 다른 비등방향 2축 응력(non-equibiaxial stress state;  $\sigma_{res,x} \neq \sigma_{res,y}$ )이며, 용접부의 전형적인 잔류응력 분포는 그림 2와 같이 용접선에 평행한 방향의 잔류응력( $\sigma_{res,x}$ )이 수직방향의 잔류응력( $\sigma_{res,y}$ )에 비해 10배 이상 커서 비등방향 1축 응력과 유사하게 나타났다<sup>11)</sup>. 연속 압입시험을 통해 용접부의 잔류응력을 평가하기 위해서는 비등방향 잔류응력과 압입응력 간의 상호작용을 분석하여 기존에 제시된 등방향 2축 잔류응력 평가 모델을 수정하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 압입응력장과 비등방향 1축 잔류응력의 중첩 및 재분해를 통해 응력 이방성이 압입곡선에 미치는 영향을 이론적으로 모델링하였다. 4점 굽힘 장치를 이용하여 인위적인 비등방향 1축 잔류응력 상태를 형성하고, 각 응력 상태에서 얻어진 압입하중-변위곡선을 제

안된 응력평가 모델에 대입하여 분석·비교함으로써 비등방향 1축 잔류응력 평가모델의 타당성을 실험적으로 검증하고자 하였다.

## 2. 이론적 모델링

### 비등방향 1축 잔류응력과 압입응력의 상호작용

표면 잔류응력을 연속압입시험을 이용하여 분석하기 위해서는 잔류응력과 압입응력 간의 상호작용에 대한 이론적인 모델링이 필요하다. 응력중첩과 재분해 방법<sup>8)</sup>을 이용하면 식 (2)로 표현한 압입자 하부의 정수압 응력과 비등방향 1축 잔류응력의 합인  $\sigma_{com}$ 을 정수압 성분과 압입 소성변형에 주요한 영향을 미치는 편차응력으로 재분해할 수 있다. 식 (2)의 편차응력 상태는 각 축방향의 응력합이 0이므로 정수압 성분이 완전히 배제된 것을 알 수 있으며,  $\sigma_y$ 는 항복강도를 나타낸다.

[코어내부 정수압 상태] [비등방향 1축 잔류응력 상태]

$$\sigma_{com} = \begin{pmatrix} -\frac{2}{3}\sigma_y & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{3}\sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}\sigma_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[재분해된 코어내부 정수압 상태]

$$= \begin{pmatrix} -\frac{1}{3}(2\sigma_y - \sigma_{res}) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}(2\sigma_y - \sigma_{res}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}(2\sigma_y - \sigma_{res}) \end{pmatrix}$$

[편차응력 상태]

$$+ \begin{pmatrix} \frac{2}{3}\sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma_{res} \end{pmatrix} \quad (2)$$

재분해된 편차응력 성분 중 시편 표면에 수직이고, 압입하중에 직접 가감되는 것은 압입축 방향의  $\sigma_{33}$ 이다.  $\sigma_{33}$ 는  $-\sigma_{res}/3$ 이며 비등방향 1축 잔류응력에 의해 발생하는 잔류응력 유도 수직하중( $L_{res}^{uni}$ )는 식 (3)과 같이  $\sigma_{33}$ 과 접촉면적( $A_c$ )의 곱으로 나타났다.

$$L_{res}^{uni} = \frac{1}{3}\sigma_{res} \cdot A_c \quad (3)$$

$L_{res}^{uni}$ 는 일정 압입깊이에 도달하기 위해 필요한 압입하중이 잔류응력으로 인해 변화하는 양이며, 잔류응력이 존재하는 상태와 응력이 제거된 상태에서 얻어진 압입하중 인가곡선들을 중첩·비교하여 측정할 수 있다. 따라서 잔류응력 완화 과정 중에 접촉면적만 결정되면 식 (3)을 이용하여 잔류응력을 평가할 수 있다.

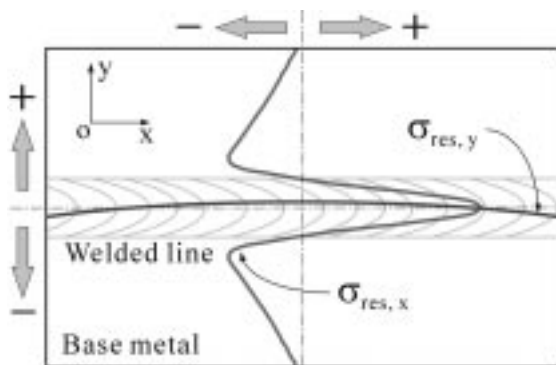


Fig. 2. Typical distributions of stresses near welded joint; the residual stress parallel to welded line,  $\sigma_{res,x}$  is dominant over the line-vertical residual stress,  $\sigma_{res,y}$ .

**잔류응력 완화 중 접촉면적의 변화 거동**

잔류응력에 무관하게 일정한 고유경도<sup>6-10)</sup>의 전제가정을 사용하면 접촉면적은 식 (4)와 같이 압입하중에 선형적으로 비례한다.

$$H = \frac{L_T}{A_C^T} = \frac{L_0}{A_C} = \frac{L_C}{A_C^C} \quad (4)$$

즉 동일한 압입깊이( $h_i$ )에서 잔류응력이 없는 상태의 압입자/시편 간의 접촉깊이( $h_c$ ) 및 접촉면적( $A_C$ )은  $L_T$ 의 압입하중을 갖는 인장 잔류응력 상태( $L_T$ 는 잔류응력이 없는 상태의 압입하중인  $L_0$ 에 비해 잔류응력 유도 수직하중 만큼 감소한 값)에서는 압입자 주변의 sink-in 깊이( $h_s$ )의 존재로 인해  $h_c^T$ 와  $A_C^T$ 로 감소하여 식 (4)의 고유경도를 일정하게 유지시킨다. 반대로 잔류응력이 없는 상태의 압입하중( $L_0$ )에 비해 잔류응력 유도 수직하중 만큼 압입하중이 증가한 압축 잔류응력 상태(압입하중;  $L_C$ )에서는 압입자 주변의 pile-up 높이( $h_p$ )가 발생하여 접촉깊이와 접촉면적이 각각  $h_c^C$ 와  $A_C^C$ 로 증가하여 식 (4)를 만족시킨다<sup>6-8)</sup>. 그러나 압입시 pile-up 변형이 심한 금속재료에서는 sink-in 대신에 pile-up 높이의 감소로 인장 잔류응력의 영향이 발생한다. 즉 식 (3)의 접촉면적은 응력 상태에 따라서 변화하며, 잔류응력 완화 과정 중에 나타나는 접촉면적의 변화를 적절히 모델링하여 잔류응력을 평가할 수 있다.

비등방향 1축 인장 잔류응력을 가진 시편에  $L_T$ 의 압입하중을 인가하여  $h_i$ 의 압입깊이를 형성시킨 뒤, 강체의 프레임(rigid frame)으로 압입자와 시편을 구속하여 잔류응력 제거시에도 최대 압입깊이는  $h_i$ 로 유지되도록 하였다. 그림 3과 같이 인장 잔류응력을 일순간에 완화시키면 잔류응력이 없는 상태의 접촉형상으로 가역적으로 회복되기 위해서 압입자 주변에 잔류응력의 영향으로 발생되었던 sink-in 깊이가 제거되면서 압입자를 시편표면에서 밀어내려는 힘(rebounding force)이 작용하게 된다<sup>6-8)</sup>. 그러나 강체 프레임의 구속에 의해 압입깊이는 유지되고, 압입자를 밀어내는 힘은 압입하중 및 접촉면적을 증가시킨다( $L_T \rightarrow L_0$ ,  $A_C^T \rightarrow A_C$ ). 압입자를 표면에서 밀어내는 힘을  $L_{res}^{uni}$ 로 표시하면, 응력 완화 전후의 압입하중 변화는 적분식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_0 &= L_T + L_{res}^{uni} = L_T + \int_{L_T}^{L_0} dL_{res}^{uni} \\ &= L_T + \frac{1}{3} \int_{L_T}^{L_0} d(\sigma \cdot A_C) \end{aligned} \quad (5)$$

적분식을 풀기 위해서 잔류응력 완화 과정 중에 나타나는 접

촉면적( $A_C$ )와 완화 중의 응력( $\sigma$ )의 압입하중에 대한 의존성을 식 (6)과 (7)로 모델링하였다. 나노 압입에서 Berkovich 압입자의 복잡한 접촉면적 변화에 대응하여 3차의 적합회식을 도입<sup>8)</sup>한 반면에 시험 하중영역에서는 기하학적 형상이 일정한 Vickers 압입자의 연속압입시험에서는  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ 의 실험적인 적합화 상수를 갖는 식 (6)으로 접촉면적의 압입하중 의존성을 표현하였다.

$$A_C = R_2 L^2 + R_1 L + R_0 \quad (6)$$

완화과정 중 소재 내부의 응력은 압입하중에 선형적으로 반비례하여 감소하는 것으로 가정되었고, 이로부터 식 (7)과 같이 잔류응력의 변화가 모델링되었다<sup>8)</sup>.

$$\sigma = \left( \frac{\sigma_{res}}{L_{res}} \right) L_0 - \left( \frac{\sigma_{res}}{L_{res}} \right) L \quad (7)$$

비등방향 1축 잔류응력 유도 수직하중의 정의와 식 (6), (7)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 잔류응력 평가식은 식 (8)로 정의되며,  $\Omega$ 는  $R_2 L_T^3 + (R_1 - R_2 L_0) L_T^2 + (R_0 - R_1 L_0) L_T - R_0 L_0$ 로 주어진다.

$$\sigma_{res} = 3 \frac{L_{res}^{uni}{}^2}{\Omega} \quad (8)$$

**3. 실험 방법**

**시편 준비 및 잔류응력 발생 지그의 고안**

비등방향 1축 잔류응력( $\sigma_{res,x} \neq \sigma_{res,y}$ ,  $\sigma_{res,y} = 0$ )을 유발하는 그림 4(a)의 4점 굽힘 장치는 각각 30 mm와 160 mm의 내부간격(inner span)과 외부간격(outer span)을 갖도록 제작하였고, 내부간격 치구의 나사를 돌려 시편에 비등방향 1축 잔류응력을 형성하도록 하였다. 그림 4(b)와 같이 시편 두께 방향을 가로질러 인장에서 압축으로 선형적으로 변하는 1축 잔류응력( $\sigma_{res,x} \neq 0$ ,  $\sigma_{res,y} = 0$ )이 형성되었다. 압입시험 영역인 내부 간격 안쪽에서 시편 두께 방향으로 걸리는 응력 기울기는 동일하므로, 1회 굽힘 이후 시편 두께 방향을 가로질러 여러 번 연속압입 시험을 수행하였다. 굽힘시험을 위한 사각 빔 시편은 두께×높이×길이 가 각각 30×24×200 mm를 가지며, 표 1의 조성과 기계적 물성을 갖는 SS400 구조강을 사용하였다. 시편은 500°C에서 1시간 동안 어닐링한 뒤 노냉하여 내부에 존재하는 잔류응력을 제거하였고, 연속 압입시험과 스트레인 게이지 부착을 위하여 표면

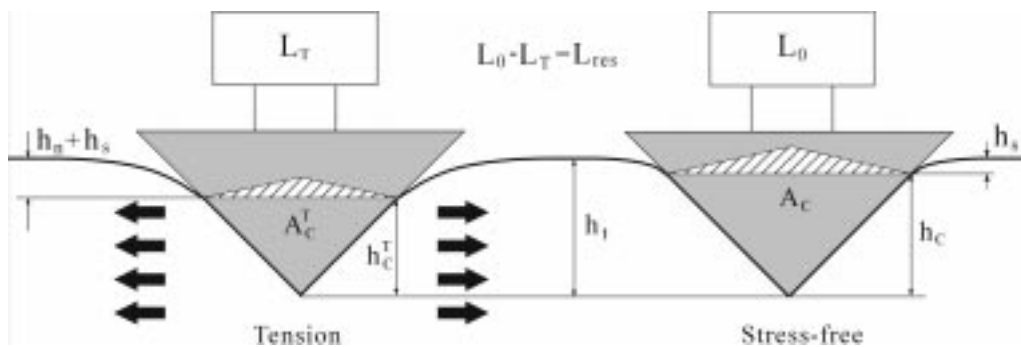


Fig. 3. Schematic diagram for the changes in contact load and morphology during maximum depth controlled stress relaxation<sup>6-8)</sup>.

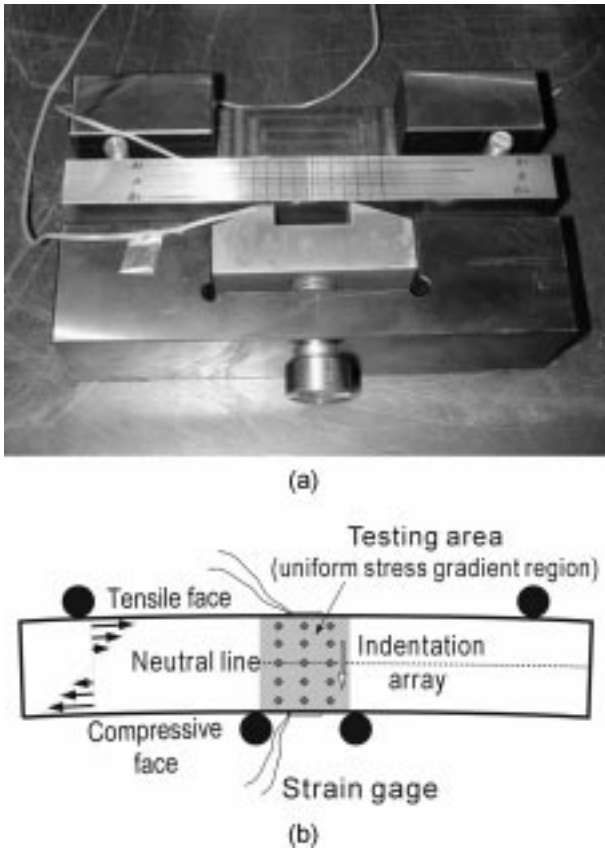


Fig. 4. (a) Photograph of 4-point bending jig and (b) formation of uniaxial residual stress in a rectangular beam specimen using the stress-generating jig.

을 1000번 사포로 연마하였다. 시편의 양쪽 단면에 스트레인 게이지를 부착하여 탄성 변형률을 측정하고, 초음파 속도 분석법 (ultrasonic velocity analysis)<sup>12)</sup>을 통해 측정된 탄성계수와 포아슨 비를 이용하여 발생한 비등방향 1축 잔류응력을 계산하였다.

**잔류응력 상태에 대한 연속압입시험**

Vickers 압입자를 부착한 Frontics 사의 AIS 3000R을 이용하여 0.3 mm/min의 압입속도로 연속압입시험을 행하였다. 잔류응력의 유무에 관계없이 압입시험 조건이 동일하도록 잔류응력이 존재하지 않는 시편도 4점 굽힘지지 위에 올려놓은 채 연속 압입시험을 진행하였다. 196 N부터 392 N까지 49 N씩 압입하중을 증가시키면서 하중인가-제거-재인가의 사이클을 갖는 다중 연속압입(multiple continuous indentation) 방법으로 잔류응력이 없는 상태의 압입곡선을 형성하였으며, 각 하중단계에서 식 (1)을 이용하여 계산된 접촉물성을 내삽(interpolation)하여 원하는 압입깊이에 대응하는 접촉물성을 예측하였다. 또한 잔류응력이 없는 상태에서 얻어진 단일 연속압입곡선(single continuous indentation curve)과의 중첩비교를 통하여 다중 및 단일 압입방법에 의한

압입변형의 차이가 없음을 실험적으로 확인하였다.

비등방향 1축 잔류응력을 유발한 이후에는 동일한 응력구배가 발생된 내부간격(inner span) 내에서 시편 두께를 가로지르면서 3 mm 간격으로 3열의 연속 압입시험선을 형성하여 잔류응력의 영향을 분석하고자 하였다. 잔류응력이 존재하는 상태와 제거된 상태에서 얻어진 압입하중 인가곡선들을 중첩하여 원하는 압입깊이에서 잔류응력에 의해 변화한 압입하중을 비등방향 1축 잔류응력 유도 수직하중으로 측정하였다. 식 (6)으로 표현된 접촉면적의 압입하중 의존성과 잔류응력 유도 수직하중 측정결과를 최종 잔류응력 평가식 (8)에 대입하여 잔류응력을 분석하였다.

**4. 결과 및 고찰**

비등방향 1축 잔류응력에 대응하는 압입곡선의 형상변화 어닐링을 통해 잔류응력이 제거된 SS400 강 시편에서 얻어진 다중 압입하중-변위곡선은 그림 5(a)에 나타내었으며, 단일 압입

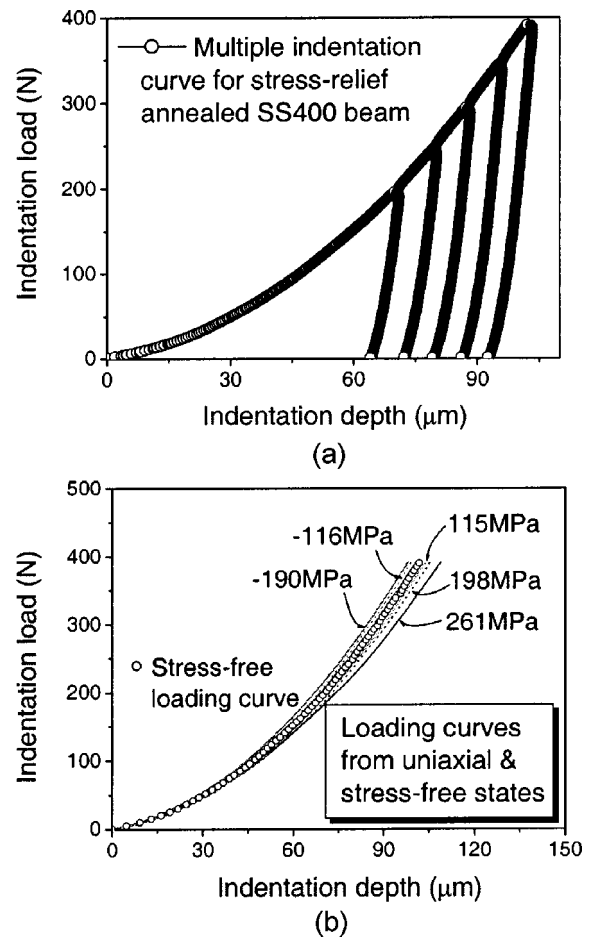


Fig. 5. (a) Multiple continuous indentation curves for stress relaxed state and (b) superposition of indentation loading curves from various uniaxial stressed states for SS400 steel specimen.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of SS400 steel specimen

Sample	C	Mn	Si	Cu	P	S	Zn	Elastic modulus	Poisson ratio	Yield strength
SS 400 wt(%)	0.148	0.458	0.213	-	0.012	0.018	-	209 GPa	0.29	267 MPa

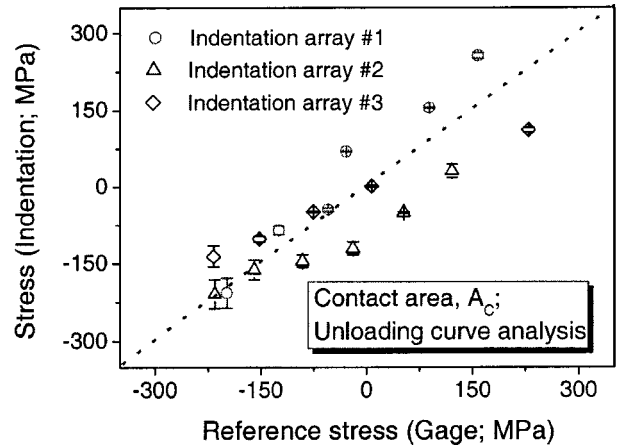
**Table 2.** Contact properties evaluated from the unloading parts in the multiple indentation curve for SS400 beam specimen

Indentation load (N)	Fitted unloading curve	Contact depth ( $\mu\text{m}$ )
196	$L=8.27(h-h_p)^{1.61}$	64.9
245	$L=9.49(h-h_p)^{1.55}$	74.2
294	$L=7.43(h-h_p)^{1.65}$	83.1
343	$L=7.98(h-h_p)^{1.62}$	91.2
392	$L=9.58(h-h_p)^{1.55}$	98.5

**Table 3.** Power-law fitted loading curves of various uniaxial stress and stress-free states for SS400 beam specimen

Stress state (MPa)	Fitted loading curve	Stress-induced load at 90 $\mu\text{m}$ depth (N)
261	$L=0.160h^{1.66}$	-30.1
198	$L=0.119h^{1.74}$	-17.1
115	$L=0.121h^{1.74}$	-10.2
40	$L=0.152h^{1.69}$	2.2
-34	$L=0.139h^{1.72}$	9.1
-116	$L=0.161h^{1.69}$	15.2
-190	$L=0.184h^{1.67}$	22.2
Stress-free (0)	$L=0.147h^{1.70}$	-

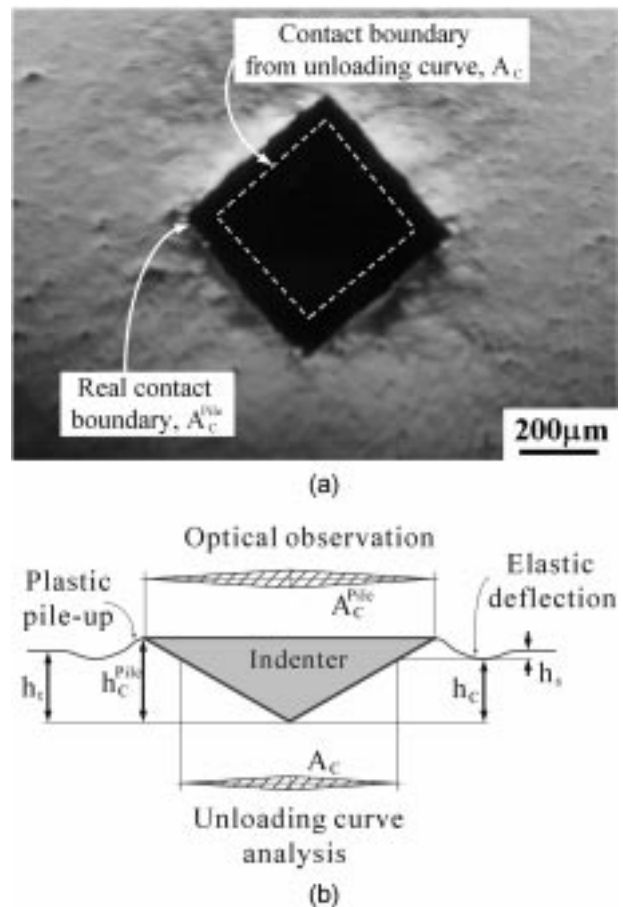
곡선과도 완전히 중첩되어 압입방법에 따른 변형양상의 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 잔류응력이 없는 상태의 압입곡선에서 얻어진 압입하중 인가곡선과 비등방향 1축 잔류응력에 의한 압입하중 인가곡선의 형상변화는 그림 5(b)에 중첩하여 나타내었다. 빔 두께 방향을 가로질러 일축 압축에서 인장 잔류응력으로 변화함에 따라 압입하중 인가곡선은 잔류응력이 없는 상태의 압입하중 인가곡선에 비해 왼쪽에서부터 오른쪽으로 이동함을 확인할 수 있었다. 표 2에는 잔류응력이 없는 상태의 SS400 강 시편에서 얻어진 다중 압입하중-변위곡선을 분석하여 여러 압입하중 단계에서 계산된 접촉물성을 나타내었다. 식 (6)과 같이 접촉물성을 압입하중의 2차식으로 나타내었을 때, 적합화 상수인  $R_0, R_1, R_2$ 는 각각  $-2.70 \times 10^4, 6.42 \times 10^2$  및  $7.48 \times 10^2$ 으로 결정되었다. 표 3에는 잔류응력 상태에 대응하는 압입하중 인가곡선의 형상을 멱급수 식(power-law equation;  $L=k_L h^{m_L}$ )으로 적합화하고, 일정한 압입깊이에서 비등방향 1축 잔류응력에 의해 발생하는 잔류응력 유도 수직하중( $L_{res}^{uni}$ )를 계산하였다. 표 2와 3에서 구해진 접촉물성과 잔류응력에 의해 변화한 압입하중 자료를 비등방향 1축 잔류응력 평가식인 식 (8)에 대입하였다. 비등방향 1축 잔류응력 평가 모델을 이용하여 평가한 응력치와 스트레인 게이지로부터 측정된 잔류응력을 그림 6에서 비교하였다. 두 방법에서 평가된 응력값은 압축 잔류응력 영역에서는 유사한 결과를 나타내었으나 인장 잔류응력 영역에서는 오차가 존재하였다. 식 (8)을 살펴볼 때 잔류응력의 평가에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인으로는 식 (1)로부터 분석되는 접촉깊이의 오차를 들 수 있다. 본 연구에서는 금속재료의 연속 압입시험시 빈번하게 발생하는 압흔 주위의 pile-up 변형에 의한 실제 접촉면적(접촉깊이)의 증가를 고려하여 벌크 구조물에 적용할 수 있도록 잔류응력 평가 압입모델을 수정하였다.



**Fig. 6.** Stress evaluated from the uniaxial indentation model based on theoretical unloading curve analysis partially deviated from the applied residual stress of SS 400 steel beam.

**Pile-up 형상보정을 통한 잔류응력 평가 모델의 수정**

그림 7(a)는 잔류응력이 없는 상태에서 392 N의 압입하중을 인가했을 때 발생하는 Vickers 압흔의 형상을 관찰한 것이다.



**Fig. 7.** Difference in the analysis from indentation load-depth curve with the real contact morphology; (a) underestimation of the theoretically analyzed contact area,  $A_c$  by the effect of plastic pile-up and (b) schematic diagram for elastic-plastic contact morphology with considering pile-up and elastic deflection.

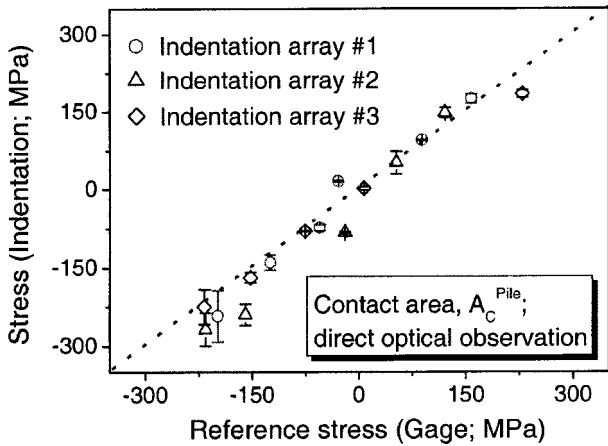


Fig. 8. Comparison of the evaluated stress from the pile-up modified indentation model and the residual stress measured from strain gage. Two stress values from the contact-modified uniaxial indentation model and the strain gage agreed well.

식 (1)을 이용하여 압입하중 제거곡선에서 계산된 접촉면적(접선)과 비교하면 압흔 주위에 pile-up에 의해서 실제 접촉면적이 약 1.21배로 증가하는 것으로 나타났다. 그림 7(b)에는 pile-up 존재시의 최대 압입하중에서 관찰되는 실제 접촉면적( $A_C^{Pile}$ )과 식 (1)의 하중 제거곡선에서 분석되는 접촉면적( $A_C$ )의 차이를 모식도로 나타낸 것이다. 압흔 주변의 탄성적인 굽힘변형 만을 고려하여 분석된 접촉깊이( $h_C$ )는 pile-up이 존재할 때의 실제 접촉깊이( $h_C^{Pile}$ )보다 작은 값을 나타낸다.

실제 접촉면적의 증가비( $A_C^{Pile}/A_C$ )를 고려하여 잔류응력이 존재하지 않는 상태의 접촉면적을 다시 계산하고, 식 (6)의 압입하중에 대한 실험적인 2차식으로 적합화시키면  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ 는 각각  $-3.27 \times 10^4$ ,  $7.75 \times 10^2$  및  $9.03 \times 10^{-2}$ 로 재결정되었다. 수정된 접촉면적 표현식을 비등방향 1축 잔류응력 평가식 (8)에 대입하여 응력값을 재분석하였다. 그림 8에서 압입모델을 통해 재분석된 응력값과 스트레인 게이지로부터 측정된 잔류응력을 비교해 보면 압축 잔류응력 영역에서는 응력치가 약간 낮게 평가되었으나 구조물의 안전성에 크게 영향을 미치는 인장 잔류응력 영역에서는 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 이로부터 비등방향 1축 응력에 대해 수정된 응력 상호작용 개념과 응력 평가식의 타당성을 실험적으로 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

나노 압입시험과 압입깊이 제어 잔류응력 완화 모델링을 통하여 개발된 박막 잔류응력을 평가기법을 연속 압입시험을 이용한 벌크 용접 구조물의 응력 평가로 확대하기 위하여 이론적 모델의 수정과 검증 실험들을 수행하였으며 연구결과는 아래와 같이 정리하였다.

1. 박막의 등방향 2축 잔류응력(equi-biaxial residual stress) 상태와 달리 벌크 구조물에는 주로 비등방향 2축 잔류응력(non-

equi-biaxial residual stress)이 존재한다. 특히 용접부에는 용접선에 평행한 잔류응력이 지배적이기 때문에 비등방향 1축 잔류응력으로 모델링할 수 있었다.

2. 압입응력에 미치는 비등방향 1축 잔류응력의 영향은 금속 재료의 소성변형을 유발하는 편차응력 성분만을 잔류응력에서 분리함으로써 비등방향 1축 잔류응력 유도 수직하중( $L_{res}^{uni}$ )로 제시하였으며, 비등방향 1축 잔류응력 평가식을 아래와 같이 유도하였다.

$$\sigma_{res} = 3 \frac{L_{res}^{uni}{}^2}{\Omega}$$

3. 수정된 비등방향 1축 잔류응력 평가 모델의 검증을 위하여 4점 굽힘 지그를 이용하여 SS400 강의 빔 시편에 다양한 1축 인장과 압축 잔류응력 상태를 형성하였다. 인위적인 잔류응력 상태에 대응하는 압입하중 인가곡선의 분석과 함께 잔류응력이 존재하지 않는 상태에 대응하는 다중 압입곡선 중 하중제거부분을 이론적으로 분석하여 계산된 접촉면적을 이용하여 잔류응력을 평가하였다. 압입모델을 통해 평가된 응력치는 스트레인 게이지에서 측정된 잔류응력과 비교할 때 인장응력 영역에서 오차를 나타내었다.

4. 금속 소재의 고하중 연속 압입시험에서는 압흔 주변에 두드러진 pile-up 변형이 나타나며, 이로 인해 접촉면적의 증가가 발생한다. 광학 현미경으로 측정된 접촉면적과 하중제거곡선의 분석을 통해 계산된 접촉면적의 비를 이용하여 각 하중 단계에 대응하는 실제 접촉면적을 보정하였다. 보정된 접촉면적을 대입하여 재평가된 잔류응력은 압축 및 인장 응력 전반에 걸쳐 스트레인 게이지에서 측정된 잔류응력과 일치하였으며, 이로부터 비등방향 1축 잔류응력 평가식의 타당성이 검증되었다.

### REFERENCES

1. I. C. Noyan and J. B. Cohen: Residual Stresses, Springer-Verlag, New York (1987)
2. C. O. Ruud, P. S. DiMascio, and J. J. Yavelak: Experimental Mechanics, **25** (1985) 338
3. J. W. Joo and C. K. Park: Trans KSME A, **22** (1998) 268
4. Y.-H. Lee, D. Kwon, E.-C. Jeon, Y. Choi, and J.-i. Jang: Proc. 14th Symp. Mater. Strength (2000) 103
5. W. C. Oliver and G. M. Pharr: J. Mater. Res., **7** (1992) 1564
6. Y.-H. Lee, Y. Choi, and D. Kwon: J. Kor. Inst. Met. & Mater., **39** (2001) 1101
7. Y.-H. Lee and D. Kwon: J. Mater. Res., **17** (2002) 901
8. Y.-H. Lee, W. Ji, J.-H. Jeong, and D. Kwon: J. Kor. Inst. Met. & Mater., **40** (2002) 744
9. T. Y. Tsui, W. C. Oliver, and G. M. Pharr: J. Mater. Res., **11** (1996) 752
10. A. Bolshakov, W. C. Oliver, and G. M. Pharr: J. Mater. Res., **11** (1996) 760
11. The Korean Welding Society: Handbook for Welding and Joining (1998) Ch. 3
12. M. Sternitzke, E. Dupas, P. Twigg, and B. Derby: Acta Mater., **45** (1997) 3963