

## 연속압입시험 기법을 이용한 용접부 국소부위별 잔류응력의 비파괴적 평가

정원석 · 이백우 · 김성훈 · 최 열 · 이윤희 · 김광호\* · 권동일

서울대학교 공과대학 재료공학부  
\*(주) 프론틱스 부설연구소

### Non-Destructive Evaluation of Residual Stress in Welded Partial Zone Using Continuous Indentation Test

Won-Seok Jung, Baik-Woo Lee, Sung-Hun Kim, Yeol Choi, Yun-Hee Lee, Kwang-Ho Kim\* 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 :** In a welded joint, the formation of residual stress is inevitable. The stress can result in decrease of fatigue life in a welded structure under superimposed external stress. On this account it is important to evaluate the residual stress in use of structural steel. But conventional residual stress evaluating methods have difficulties of the derivation of residual stress free state in the field and destructive or lab-scale experiments. In this study, new residual stress evaluating model was suggested using continuous indentation technique. We theoretically induced load-depth curve for residual stress free state from the hardness and strength of the material. From the curve, we evaluated the residual stress in a welded joint using the difference from residual stress state. And we used invariant contact area because it is uniform value regardless of residual stress in the material or plastic deformation at the indentation test. The residual stress results from continuous indentation technique showed good agreement with conventional methods such as hole-drilling and saw cutting methods for API X65 and SS400. Therefore, this method has possibilities in actual application of industrial field.

(Received January 25, 2005)

**Key words :** Continuous indentation technique, Load-depth curve for residual stress free state from the hardness and strength of the material, Invariant contact area

## 1. 서 론

용접은 금속 재료를 결합, 가공하기 널리 사용되는 공정이지만, 재료에 국부적 소성변형을 유발하여 용접잔류응력을 남기게 된다. 과도한 잔류응력은 구조물의 파손, 왜곡, 피로 등의 원인 [1]이 되며, 이를 정확히 평가하는 것이 용접구조물의 안전성 확보에 매우 중요하다. 기존의 일반적 잔류응력 평가법은 잔류응력 평가의 기준인 무잔류응력 상태를 열적, 기계적 방법으로 유도한다. 그러나 이러한 방법은 시편의 크기제한이 있고, 파괴적인 방법이기 때문에 현장에서 유도하는 것이 거의 불가능한 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 사용중인 구조체에서 직접 무잔류응력 상태를 유도하여, 잔류응력을 평가하는 현장적용성이 높은 비파괴적 연속압입시험법을 제시하였다.

연속압입시험법은 압입자를 통하여 압입시험을 수행하면서 압입하중과 압입깊이를 연속적으로 측정하는 기법이다. 이를 활용하여 경도, 탄성계수 그리고 다양한 강도특성 [2, 3]을 평가하며, 최근에는 잔류응력 평가 [4]를 시도하는 등 그 활용범위가 넓어지고 있다. 이를 이용한 잔류응력 평가는 국부지역의 잔류응력을 직접 평가하고 취약한 부분을 정확히 찾아내어 구조물의 안전성

확보에 큰 역할을 할 수 있다.

연속압입시험법을 통한 잔류응력 평가법은 기존의 비등방향 2축 잔류응력 평가모델 [5]을 용접부에 활용가능하도록 수정하여 적용하였다. 이 방법은 무잔류응력상태와 잔류응력상태의 차이에 따라 발생하는 압입하중의 변화량과 이때의 접촉면적을 통해 잔류응력을 평가한다. 용접부 잔류응력 평가의 기본인 용접부 무잔류응력 상태의 압입하중-변위 곡선을 얻기 위하여, 미세구조가 다른 용접부와 모재부의 기계적 물성을 이용하였다. 두 지역의 강도비를 이용하여, 얻기 쉬운 모재부 무잔류응력 상태 곡선의 기울기로부터 용접부 무잔류응력 상태의 곡선의 기울기를 압입시험을 행하지 않고 이론적 방법으로 유도하였다. 이렇게 유도한 곡선을 기초로 잔류응력에 의한 곡선의 변화량을 정량적으로 구하여 잔류응력의 크기를 평가할 수 있었다. 본 연구에서는 API X65, SS400 강재에 대하여 연속압입시험법으로 용접잔류응력을 평가한 결과를 일반적으로 활용되는 파괴적 기법인 홀드릴링법, 절단법에 의한 결과와 비교하여 타당성을 검증하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 비등방향 2축 잔류응력 평가식

용접에 의한 철강재 표면에 발생한 복잡한 구조의 잔류응력을 분석하기 위해서 우선 잔류응력과 압입응력간의 상호작용에 대해

여 모델링을 하였다. 기존의 연구 [5]에서 제시한 비등방향 2축 잔류응력( $\sigma_{res,X} \neq 0, \sigma_{res,Y} \neq 0, \sigma_{res,Z} = 0$ )이 압입 소성변형(indentation plasticity)에 끼치는 영향에 대한 이론적 모델링을 수정 및 보완하여, 용접부의 잔류응력 평가에 적용하였다. 비등방향 2축 잔류응력 중 재료의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 큰 방향의 잔류응력 값을  $\sigma_{res,X}$ 라 하면 값이 작은 방향의 응력성분인  $\sigma_{res,Y}$ 는  $p\sigma_{res,X}$ 로 나타낼 수 있다. 이 때 응력비례인자( $p$ , stress-proportional factor)는 2축 등방향 분포를 나타내는 +1.0에서부터 전단응력분포를 나타내는 -1.0 사이의 값을 갖게 된다. 이러한 응력은 식 (1)과 같이 표면에 존재하는 잔류응력 성분을 소성변형에 영향을 주지 않는 정수압응력 부분(hydrostatic stress part)과 소성변형에 민감한 편차응력 부분(deviator stress part)으로 나눌 수 있다.

$$\sigma_{com} = \begin{pmatrix} \sigma_{res,x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res,y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{res} & 0 & 0 \\ 0 & p\sigma_{res} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

코어내부 정수압 상태

$$= \begin{pmatrix} \frac{(1+p)\sigma_{res}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1+p)\sigma_{res}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+p)\sigma_{res}}{3} \end{pmatrix}$$

비등방향 2축 응력 상태

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

따라서 최종적인 비등방향 2축 잔류응력 평가는 압입하중변화량( $\Delta L$ ), 접촉면적( $A$ ),  $\Psi$ , 식 (1)의 Z방향 성분과 함께 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\Psi} \frac{\Delta L}{A} = \frac{1+p}{3} \sigma_{res} \quad (2)$$

여기서 소성구속 인자( $\Psi$ )는 평균접촉압력( $P_m$ )을 진응력으로 나눈 값이며, 완전소성변형에서 거의 일정한 값 값(3.0) [6]을 가짐이 알려져 있다. 또한  $p$ 는 Vickers 압입자를 이용한 연속압입시험법 만으로 유도하는 것이 불가능하여 [5], 경험적으로 얻은 1/3의 값을 적용하였다.

#### 용접부 무잔류응력 상태 L-h곡선 유도 및 $\Delta L$ 의 결정

잔류응력 평가식에 필요한  $\Delta L$ 을 구하기 위해, 압입하중(L)이 Vickers 경도(H)에 비례하는 관계를 이용하였다. 또한 H는 압입시험 시 얻은 압입하중 변위(L-h) 곡선에서 하중인가부 곡선식

( $L=kh^2$ )의 기울기(k)에 비례하며 [7], 강도( $\sigma$ )와 일정한 비를 가진다 [6-11]. 용접부와 열영향부의 무잔류응력 상태의 곡선의 기울기( $k_0^{W,H}$  (W: 용접부, H: 열영향부, 0: 무잔류응력상태))를 구하기 위한  $H_0^{W,H}$ 는 현장에서 직접 구할 수 없으므로 완전소성영역에서  $\sigma$ 는 잔류응력에 영향을 받지 않고 일정한 값( $\sigma_0 = \sigma_s$  (S: 잔류응력상태))을 보임 [12, 13]을 이용하여 식 (3)을 유도하였다.

$$k_0^{W,H} = \frac{H_0^{W,H}}{H_0^B} k_0^B = \frac{\sigma^{W,H}}{\sigma^B} k_0^B \quad (3)$$

식 (3)은 L을  $h^2$ 으로 나눈 k와 L을 A로 나눈 H가 비례하는 관계(모두 단위는  $kgf/\mu m^2$ )를 이용한 것이다. 또한 H와  $\sigma$ 가 비례하는 관계도 이용하였다.  $k_0^B$ 와  $\sigma^W, \sigma^B$ 를 구하여 식 (3)을 이용한 이론적 방법으로  $k_0^W$ 를 구할 수 있으며,  $k_0^W$ 를 하중인가부 곡선식에 적용하여 잔류응력 측정의 기초가 되는  $L_0$ 를 얻고  $L_s$ 와의 차이에서  $\Delta L$ 을 구할 수 있다.

#### 용접부 잔류응력 상태에서의 A의 결정

H는 잔류응력의 유무에 관계없이 일정한 값을 가진다 [14, 15]. 이는 재료에 다양한 응력상태가 있을 경우에 주어진 L에 대해서 일정한 h를 가지기 때문이며  $H_0^W = H_S^W$ 와 같이 나타낼 수 있다. 그러나 연속압입시험법 만으로 정확한 h를 평가할 수 없어, 식 (3)에서  $\sigma$ 의 비를 이용하여  $H_0^W$ 를 얻고 식 (4)와 같이  $A_S^W$ 를 구할 수 있다.

$$A_S^W = \frac{L_S^W}{H_S^W (= H_0^W)} \quad (4)$$

### 3. 실험 방법

#### H와 $\sigma$ 의 비례관계 확립 실험

먼저 식 (3)의 H와  $\sigma$ 의 비례관계를 실험적으로 검증하기 위하여 철강 13종, 알루미늄합금 3종, 구리합금 3종에 대하여 압입시험을 이용하여 H를, 인장시험을 이용하여 얻은 응력-변형을 곡선에서 다양한  $\sigma$ 를 측정하였다. 그 중 항복강도( $\sigma_{YS}$ ), 최대인장강도( $\sigma_{TS}$ ), 항복강도와 최대인장강도의 평균값( $\sigma_T$ ), 변형률 0.08에서의 강도값( $\sigma$ ), 가공경화 지수( $n$ )를 고려한 Cahoon [9]의 식( $HV = 3\sigma_{YS}/(0.1)^n$ )에서의 항복강도를 구하여 H와 비교하였다.

#### 용접시편에 대한 연속압입시험법 적용을 통한 잔류응력 평가

배관용 소재인 API X65는 길이 1000 mm, 지름 760 mm, 두께 20 mm, 일반구조용 강재인 SS400은 가로와 세로 길이 1000 mm, 두께 20 mm의 시편을 각각 절반으로 절단 후 용접하였다. 용접후 표면을 1000번 사포로 연마하였고, 2% Nital로 10초간 에칭하였다. 연속압입시험법은 그림 1의 Frontics사의 AIS3000(Advanced Indentation System 3000)을 이용하여 그림 2와 같이 용접선에 수직방향으로 연마를 하고, 그 연마면을 따라 Vickers 압입자를 이용하여 5 mm 간격으로 압입시험을 실시하였다. 압입조건은 압입하중 80 kgf, 압입속도 0.3 mm/min이며 압입자와 재료가 최초로 접촉한 하중(zero index)은 0.06 gf이다. API X65와 SS400 소재 모두에서 용접선으로부터 약 250 mm 부근에서부터 곡선이 일치하는 경향을 보여 용접에 의



Fig. 1. AIS3000 of Frontics, Inc. used for residual stress measurement on local region.

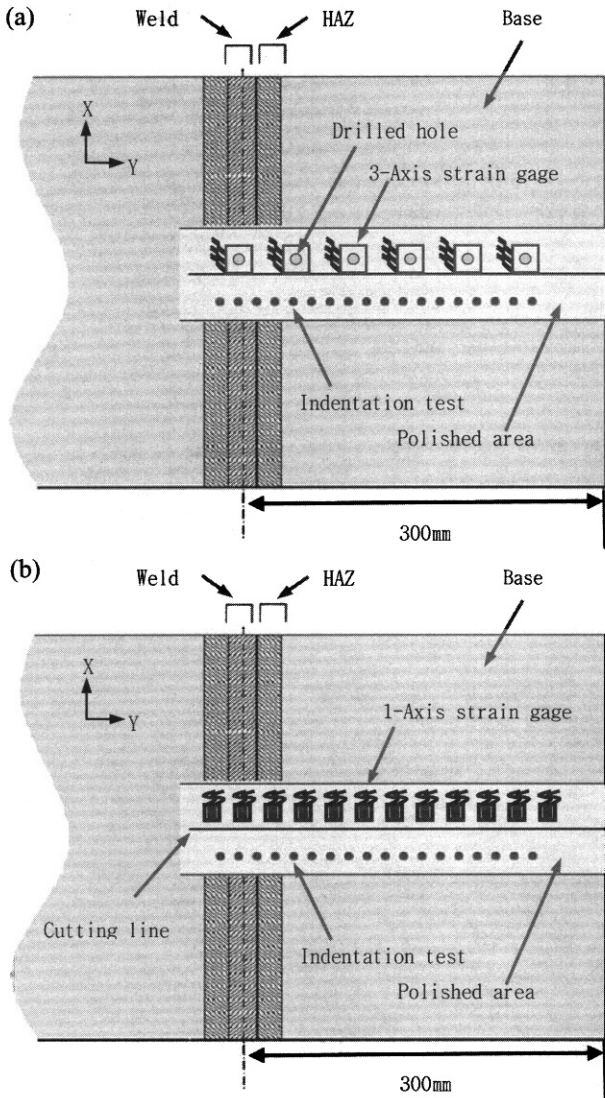


Fig. 2. Schematic diagram for Continuous indentation and (a) 3-axis strain gages and drilled hole and (b) attached 1-axis strain gages and cutting line on welded joint of API X65 and SS400 specimens.

한 잔류응력이 없는 모재부 무잔류응력 지역으로 판단하였다. 따라서 이 지역에서 Vickers 압입자와 구형압입자로 압입시험을 수행하여  $H_0^B$ 와  $\sigma^B$ 를 얻었다. 에칭에 의해 드러난 용접부와 열영향부 영역에도 구형압입자로 압입시험을 실시하여 인장곡선을 유도하고  $\sigma^W$ ,  $\sigma^H$ 를 각각 평가하여 이론적 방법으로  $k_0^W$ 를 유도하였다. 구형 압입시험 조건은 변위 150  $\mu\text{m}$ 이며 이 변위에 이르기까지 15회 다중압입하였고, 압입속도 0.3 mm/min, zero index는 1 kgf 이다. 이론적으로 유도한  $k_0^W$ 를 비교하기 위해 600°C에서 2시간 동안 잔류응력완화 열처리를 실시하여 용접 중심선에서 같은 거리만큼 떨어진 위치에서 이전과 동일한 조건의 압입시험을 행하였다. 또한 연속압입시험법에서 얻은  $h$ 에서 구한  $A(=24.5h^2)$ 와 참값인 광학현미경으로 압흔을 측정하여 얻은  $A$ 를 비교하여,  $h$ 를 수정 및 보완하였다.

**홀-드릴링법(Hole-drilling method)과 절단법(Saw cutting method)법 이용한 잔류응력 측정**

홀-드릴링법에 의한 잔류응력 측정을 위하여 그림 2와 같이 ASTM E837에 따라 3축 스트레인 게이지를 부착하였다. 홀-드릴링법에 의한 잔류응력 측정장치인 Vishay사의 RS-200을 이용하여 직경 1.8 mm, 깊이 2 mm의 구멍을 깊이별로 8차례에 걸쳐 나누어 내고 그때 마다의 스트레인을 측정하고 H-Drill 프로그램을 이용하여 잔류응력을 평가하였다. 절단법은 폭 2 mm의 1축 스트레인 게이지를 용접선에 평행한 방향(X축 방향)으로 0.5 mm 간격으로 용접선에서 300 mm 떨어진 모재까지 부착하였다. 절단에 의한 원화변형률을 다채널 인디게이터를 통하여 측정하고 초음파 속도분석을 통해 결정된 탄성계수를 Hooke's Law에 적용하여 잔류응력을 평가하였다.

**4. 결과 및 고찰**

**Vickers 압입자를 이용한 압입시험 시 하중인가 곡선식의 수정**

Suresh [7]에 의한 기존의 연구에서는 sharp tip 압입자로 압입시험을 행할 시 하중인가부의 L-h 곡선은 Kick's Law에 의해 2차식의 양상을 나타낸다고 하였다. 그러나 압입시험에 의해 재료에 소성쌍임 현상(pile-up), 탄성회절(deflection), 압입자 첨단 무딘(tip blunting) 등의 현상이 압입 시에 일어나기 때문에 2차식에서 약간의 오차를 가진다. 이러한 영향을 모두 반영한 곡선식을 나타내기 위해서  $h_a$ (depth by additional effect)를 도입하여 식 (5)와 같이 유도하였다 [16].

$$L = k(h + \Delta h_a)^2 \tag{5}$$

여기서  $h_a$ 는 L-h곡선의 초기 오차부분을 iteration법을 통하여 제거하면서 구할 수 있다. 그림 3과 같이 하중인가 곡선과 식 (5)를 이용한 곡선식을 중첩하여 본 결과,  $h_a$ 의 항목이 포함된 경우가 더 정확히 압입시험에 의한 곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다. 무잔류응력 상태의 곡선을 식 (5)로 나타냄으로써 잔류응력 평가에 필요한  $\Delta L$ 과  $A$ 를 정량적으로 평가할 수 있었다.

**Vickers 압입시험 시  $\Delta L$  및  $A$ 의 결정**

식 (3)이 성립하기 위해서는 H에 일정비를 가지는  $\sigma$ 의 개념

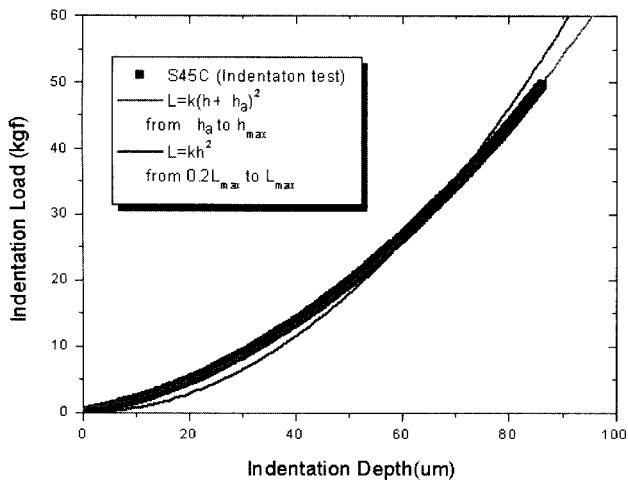


Fig. 3. Superposition of loading curves from indentation test, fitting equation  $L=kh^2$  and  $L=k(h+h_a)^2$  for S45C specimens.

이 필요하다. 이를 위해서 H를 각각의  $\sigma$ 와 각  $\sigma$ 에 대한 평균 비례상수로 나누어 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 결과가 y축 값의 1에 근접하고 편차가 작을수록 H와  $\sigma$ 가 모든 재료에 대해 일정한 비를 가진다는 것을 의미한다. 그림 4에서 알 수 있듯이 편차가 가장 적은 강도로  $\sigma_r$ 을 선택할 수 있었다. 이는 Vickers 압입자로 압입시 압입자 주변의 재료에 나타나는 변형률은 인장곡선의 인장변형률 0.08에 해당하는 변형률과 같으며 이때의 인장곡선에서의 강도값( $\sigma_r$ )은 H와 일정한 비를 가진다는 기존의 연구 [6]와 일치하였다. 또, 여러 강도비 중에서  $\sigma_r$ 의 비를 이용하여 이론적으로 구한  $k_0^W$ 가 잔류응력완화 열처리를 거친 용접부 시편에 압입시험을 실시하여 구한  $k_0^W$ 에 가장 가까운 결과를 보임을 표 1에서도 알 수 있다. 이로써  $\sigma_r$ 의 비를 사용하여  $k_0^W$ 를 유도한 식 (3)의 타당성을 실험적으로 입증할 수 있었다.

$\sigma_r$ 의 비를 이용하여 유도한  $k_0^W$ 를 식 (5)의 곡선식으로 나타내어  $L_0^W$ 를 얻었다. 또한 용접부 잔류응력 상태의 시편에 압입 시험을 실시하여 얻은  $k_s^W$ 를 같은 곡선식으로 나타내어  $L_s^W$ 를

Table 1.  $k_0^W$  is indentation loading curve curvature of the residual stress free state at the welded zone. It is induced from 2hrs annealing (real value) and various  $\sigma$  ratios (induced value)

$k_0^W$	After 2hrs annealing	Induced from $\sigma_r$ ratio	Induced from $\sigma_f$ ratio	Induced from $\sigma_{TS}$ ratio	Induced from $\sigma_{YS}$ ratio
API X65	<b>0.00697</b>	0.00696	0.00697	0.00695	0.00700
SS400	<b>0.00510</b>	0.00501	0.00497	0.00464	0.00553

Table 2. 15 cycle's load values in residual stress free state and residual stress state at indentation test for SS400. The residual stress caused two values to be different

Cycle No.	h	$L_0^W$	$L_s^W$	$\Delta L$
1	25.9	7.283	6.138	-1.145
2	41.6	13.975	12.313	-1.662
3	53.9	20.728	18.638	-2.090
4	64.1	27.334	24.873	-2.461
5	73.6	34.308	31.488	-2.819
6	82.0	41.133	37.986	-3.147
7	90.1	48.300	44.829	-3.471
8	97.6	55.450	51.671	-3.779
9	104.1	62.045	57.992	-4.053
10	110.5	68.901	64.573	-4.328
11	117.0	76.232	71.619	-4.613
12	122.8	83.086	78.214	-4.872
13	128.6	90.235	85.099	-5.136
14	134.2	97.417	92.023	-5.394
15	139.7	104.739	99.086	-5.653
	um	kgf	kgf	kgf

얻은 후 그 차이인  $\Delta L$ 을 표 2와 같이 구할 수 있었다. 압입자와 재료간의 접촉면적인 A를 평가하기 위하여 압입시험에서 얻을 수 있는 h와 재료의 소성변형, 압입자 첨단 부분의 무덤현상을 고려하였다. 이러한 현상이 h에 얼마만큼의 영향을 주는지에 대하여 알기 위해서 기존의 연구 [16]에서 제시된 길이비(f,

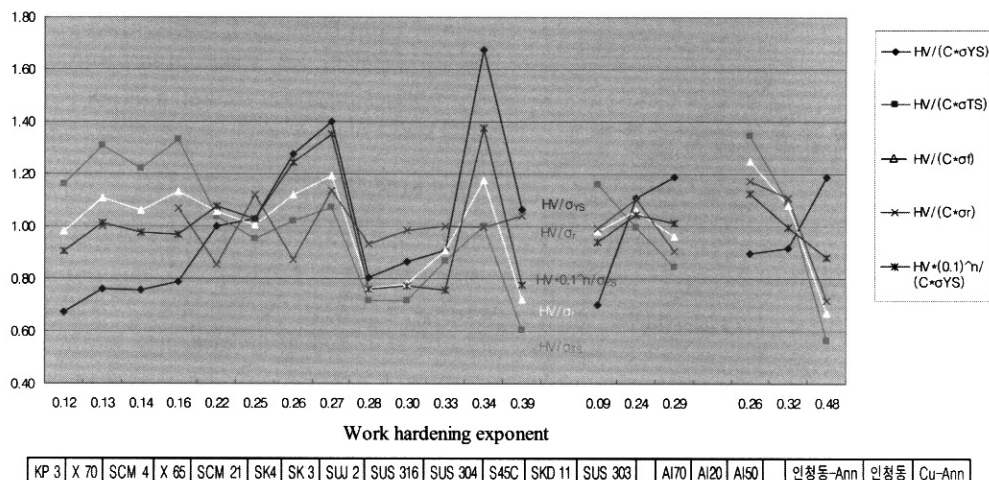


Fig. 4. HV is divided by various flow strengths. The result must be 1 if HV is proportional to flow strength.

depth ratio)를 도입하였다. 이는 압입시험에서 얻는  $h$ 와 식 (5)의  $h_a$ 의 합과 실제접촉 깊이  $h_c$ 의 비로 나타나며  $h$ 에 무관하게 일정 값을 가진다. 따라서 실제 접촉 깊이  $h_c$ 는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$h_c = f(h + \Delta h_a) \tag{6}$$

$f$ 를 재료의 기계적 성질인  $n$ ,  $\sigma_{YS}$ , 재료와 압입자간의 환산탄성계수( $E_r$ )로 나타내어, 유한요소해석 결과 식 (7)로 나타낼 수 있다 [16].

$$f = 1.2445(1 - 0.6n) \left( 1 - 7.2 \frac{\sigma_{YS}}{E_r} \right) \tag{7}$$

금속재료에 사용되는 일반적인  $f$ 를 얻기 위하여 철강 15종, Al 합금 4종에 대하여, 인장실험 결과에서 얻은 값들을 식 (7)에 대입하여 구한 결과 표 3과 같이 평균값 1.04를 얻을 수 있었다.  $f(=1.04)$ 를 적용한  $h_c$ 로부터 구한  $A(=24.5h_c^2)$ 로  $L$ 을 나누어  $H_{IT}$ (압입시험법을 이용한 경도측정법 이용)를 구하였다. 또 광학현미경으로 측정된  $A$ 로  $L$ 을 나누어 구한  $H_{opt}$ (광학현미경을 이용한 경도측정법 이용)를  $H_{IT}$ 와 비교한 결과 그림 5와 같이 일치함을 알 수 있었다.

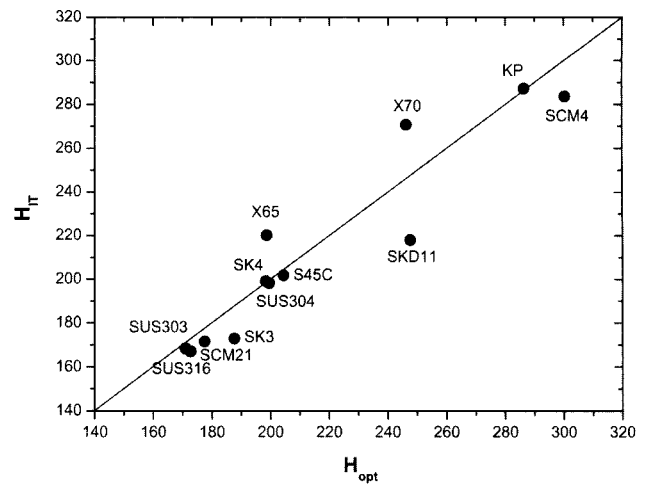
이를 식 (6)에 적용하여  $A$ 를 구하고  $L$ 에 나누어 얻은  $H_{IT}$ 와 광학현미경으로  $A$ 를 측정하여 구한  $H_{opt}$ 와 비교한 결과 그림 5와 같이 일치함을 알 수 있었다.

**연속압입시험법을 이용한 용접부의 잔류응력 평가와 검증**

연속압입시험법을 통한 기존의 잔류응력 평가식을 2축 비등방형 용접부의 잔류응력 평가에 적용이 가능하도록 수정하여 새로운 식을 유도하였다. 용접부와 모재부의 강도비를 이용하여 이론

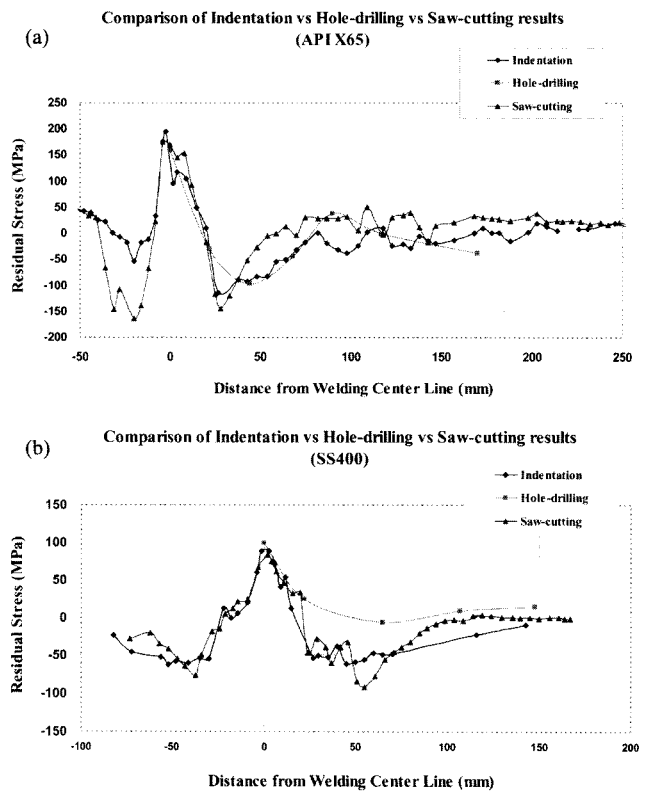
**Table 3.**  $f$  value is the ratio of contact depth ( $h_c$ ) and sum of indentation depth and additional effect depth ( $h + h_a$ )

Materials	YS (MPa)	n	E (GPa)	Poisson's ratio	$E_r$ (GPa)	f
SUJ2	306.8	0.268	214.9	0.286	194.4	1.033
X65	451.8	0.161	204.2	0.300	187.6	1.105
X70	592.9	0.129	195.9	0.296	180.9	1.121
SKD61	348.9	0.303	211.5	0.268	190.0	1.005
SCM21	290.2	0.221	199.4	0.300	184.0	1.067
SKH51	263	0.315	246.8	0.241	213.3	1.000
KP3	763.7	0.124	203.1	0.295	186.2	1.118
SKD11	243.4	0.338	215.7	0.294	195.8	0.983
SK3	244.1	0.264	198.2	0.303	183.4	1.037
SCM4	592.4	0.141	207.1	0.286	188.5	1.113
S45C	372.9	0.333	209.1	0.287	190.1	0.982
SK4	336.1	0.252	209.2	0.291	190.5	1.043
SUS304	398.8	0.3	198.7	0.283	181.7	1.004
SUS316	357.2	0.276	198.5	0.298	183.1	1.024
SUS303	264.4	0.39	188.1	0.301	175.3	0.943
A106	332.6	0.223	199.6	0.292	183.4	1.064
Al20	206.5	0.243	65.0	0.352	69.7	1.040
Al50	82.9	0.287	70.9	0.338	74.8	1.022
Al70	526.2	0.089	66.0	0.343	70.2	1.114
Average :						1.043



**Fig. 5.** Comparison of  $H_{IT}$  (Contact area is calculated from  $f$ ) and  $H_{opt}$  (Contact area is measured by optical microscope).

적으로 구한  $k_0^W$ 로  $\Delta L$ 을 구하고, 재료의 소성변형과 압입자 첨단부의 무뎠음을 고려한  $A$ 를 식 (2)에 적용하여 철강재 용접부의 잔류응력을 평가할 수 있었다. 또한 이를 검증하기 위하여 파괴적인 잔류응력 측정법을 실시하여 그림 6과 같이 정량적 크기와 응력의 부호에서 일치함을 얻었다. 용접부에서 가장 큰 잔류응력의 변화를 보이며 모재부로 멀어질수록 변형의 폭이 차츰 감소하는 경향을 보인다. 이는 용접에 의해 발생한 인장잔류응력과 이에 평형을 맞추기 위해 발생한 압축잔류응력이 모재부로 멀어질수록 감소하여 0이 됨을 보여주며 기존 연구 [17]와 같은



**Fig. 6.** Comparison of the residual stress distribution evaluated from continuous indentation test model and hole-drilling method and saw cutting method for (a) API X65 and (b) SS400.

경향을 보이고 있다. 각각의 실험 결과에서 보이는 절대값간의 오차는 잔류응력의 방향성을 완벽히 반영하지 못하는 데서 원인을 찾을 수 있다. 홀-드릴링법에서도 최대 잔류응력의 방향이 일반적으로 알려진 용접선의 수평방향(X방향)으로 항상 일치하지는 않았다. 이로써 용접부의 잔류응력 분포가 얼마나 복잡한 형상을 가지고 있는지 단적으로 알 수 있었다. 그러나 절단법 실험의 경우 한 지점에 두개의 절단선을 내고 각각의 변형률을 측정하는 것은 어려움이 있고, X방향에 비하여 Y방향의 잔류응력은 미미하다는 기존의 연구에 의하여 Y방향의 잔류응력은 이번 연구에서 고려하지 않았다. 또한 Vickers 압입자에 의한 압입시험만으로 재료가 가지는 방향별 응력분포를 모두 알기에는 아직 한계가 있다. 또 다른 오차원인으로는 강도비를 이용하여 유도한  $k_0^w$ 가 완벽한 무잔류응력 상태의 곡선의 기울기라고 단정할 수가 없다는 점이다. 본 연구에서 사용된 연속압입시험법을 통한 용접부 무잔류응력 상태 유도는 열처리를 통하여 얻은 무잔류응력 상태의  $k_0^w$ 와 비교하여서는 신뢰성이 다소 떨어지는 단점을 가지고 있다. 그러나 연속압입시험법은 재료에 수백  $\mu\text{m}$  이내의 압흔만을 내어 잔류응력을 평가하는 친환경, 비파괴, 실시간적인 장점을 가지며 현장에서 사용되고 있는 구조물에 무한한 적용 가능성을 가지고 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 철강 용접부에 인가된 2축 비등방향 잔류응력 중 재료의 신뢰성에 가장 큰 영향을 주는 방향의 응력을 연속 압입시험법과 비등방향 2축 잔류응력 평가모델을 이용하여 평가하였다. 현장에서 쉽게 유도하기 어려운 무잔류응력 상태를 재료 고유의 물성인 경도와 강도를 바탕으로 유도하여 많은 비용과 시간을 절감할 수 있었다. 이를 위하여 경도와 인장변형률 0.08에 해당하는 강도가 가장 일정한 비를 가짐을 이론적, 실험적으로 증명하였다. 압입시 발생하는 재료의 소성변형과 압입자 침단의 무덤 현상을 고려한 곡선식으로 정확한 압입하중-변위 곡선을 나타내었다. 이 곡선식으로 잔류응력에 의한 압입하중의 변화량과 잔류응력의 정량적인 비례관계를 유도할 수 있었다. 또한 곡선식에서 알 수 있는 정확한 접촉깊이를 통하여 광학현미경을 통하지 않고도 압입시험에 의한 면적을 측정할 수 있었다. 연속압입시험법으로 얻은 용접부의 잔류응력 결과가 파괴적 잔류응력 측정법인 홀-드릴링법과 절단법 결과와 비교하여 일치함을 얻어 높은 효용성을 보여주었다. 연속압입시험법은 용접부의 국부적 잔류응력을 평가함으로써 재료의 취약부분을 쉽게 찾아낼 수 있으며 안전한 성능을 발휘할 수 있도록 신뢰성을 더하여 줄 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 ‘나노소재기술개발사업단’의 지원(과제번호: 04K1501-01210)으로 수행되었습니다.

### ~ 기 호 ~

X, Y, Z 용접선에 수직방향, 용접선에 평행방향, 재료의 두께방향

$\sigma_{res.X}, \sigma_{res.Y}, \sigma_{res.Z}$	X, Y, Z 방향별 잔류응력
P	X방향에 대한 Y방향의 잔류응력 비례인자
$\Delta L$	압입시험시 재료의 잔류응력 유무에 따른 압입하중 변화량
A	압입시험에 의해 발생한 압흔의 투영접촉면적
$\Psi$	소성구속인자
$P_m$	평균접촉압력
L	압입시험시 압입하중
H	Vickers hardness
h	압입시험시 압입깊이(변위)
k	L-h 곡선의 하중인가부 곡선의 기울기
$\sigma$	강도
W, H, B	용접부, 열영향부, 모재부
0	무잔류응력상태
S	잔류응력상태
$\sigma_{vs}$	항복강도
$\sigma_{TS}$	인장강도
$\sigma_f$	항복강도와 인장강도의 평균값
$\sigma_r$	인장변형률 0.08에서의 강도값
n	가공경화지수
$h_a$	재료와 압입자의 소성변형에 의한 압입깊이의 변화량
$h_c$	재료와 압입자의 소성변형을 고려한 실제 접촉깊이
$E_r$	환산탄성계수
$H_{IT}$	L-h 곡선분석을 통한 경도측정법으로 구한 경도
$H_{opt}$	광학현미경을 통한 경도측정법으로 구한 경도

### REFERENCES

- Jian Lu, Handbook of measurement of residual stresses, p. 2-3, Fair Mont Press. Ins. (1986).
- J.-H. Ahn, Y. Choi and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **38**, 1606 (2000).
- KS B 0950, Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Indentation Tensile Properties (2002).
- Y. H. Lee and D. I. Kwon, *Acta Mater.* **52**, 1555 (2004).
- Y.-H. Lee, J.-h. Jeong, J-S Park and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **41**, 737 (2003).
- D. Tabor, The hardness of metals (1951).
- M. Dao, N. Chollacoop, K. J. Van Vliet, T. A. Venkatesh and S. Suresh, *Acta Mater.* **49**, 3899 (2001).
- G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, UK, 329 (1988).
- J. B. Cahoon, W. H. Broughton and A. R. Kutzak, *Metall. Trans.* **2**, 1979 (1971).
- Y. J. Kim and Hyungyil Lee, *KSME Int. J.* **15**, 1079 (2001).
- W. D. Callister, *Introduction to Materials Science and Engineering*, 3rd ed., p. 128, John Wiley & Sons, USA (1995).
- B. Goes, Javier Gil-Sevillano and Urbain D' Haene, *Int. J. Mech. Sci.* **41**, 1311 (1999).
- J. G. Swadener, B. Taljat and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **16**, 2091 (2001).
- T. Y. Tsui, W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **11**, 752 (1996).
- A. Bolshakov, W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **11**, 760 (1996).
- Yeol Choi, Ho-Seung Lee and Dongil Kwon, *J. Mater. Res.* **19**, 3307 (2004).
- P. Dong and J. Zhang, *Engng. Fract. Mech.* **64**, 485 (1999).