

비파괴 계장화 압입시험기법을 통한 API X65 배관 용접부 잔류응력 평가

지원재* · 이윤희* · 김우식** · 김철만** · 권동일*

*서울대학교 재료공학부

**한국가스공사 연구개발원

Evaluation of Residual Stress on Welded Joint in API X65 Pipe Line through Nondestructive Instrumented Indentation Technique

Won-jae Ji*, Yun-Hee Lee*, Woo-sik Kim**, Cheol Man Kim** and Dongil Kwon*

* School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

**Research and Development Center, Korea Gas Corporation, Ansan 425-150, Korea

Abstract

Apparent mechanical properties in structural components can be different from the initially designed values due to the formation of the residual stress in metal forming and welding. Therefore, the evaluation of residual stress has great importance in the reliability diagnosis of structural components. A nondestructive instrumented indentation technique has been proposed to evaluate various strength concerning mechanical properties from the analysis of load-depth curve. In this study, quantitative residual stress estimation on API X65 welded joints for natural gas pipeline was performed by analyzing the variation of indentation loading curve by residual stress through a new proposed theoretical model. The residual stress from the indentation method was compared with that from the saw-cutting method.

* Corresponding author : torr75@empal.com

(Received May 16, 2003)

Key Words : Residual stress, Advanced indentation, Welded joint, Saw-cutting, Pipeline steel

1. 서 론

불균질한 소성가공이나 용접과 같은 이종 소재의 접합으로 발생하는 잔류응력은 구조물의 안정성을 크게 저하시킬 수 있다^{1,2)}. 또한, 부품들의 기계가공 및 용접 등의 방법으로 형성된 대형 구조물에서는 잔류응력의 영향에 의해서 구조물의 왜곡을 유발하기도 하며, 장기간의 열화과정을 거칠 때는 용접 잔류응력이 미세조직적인 영향과 결합함으로써 예기치 않은 구조물의 파괴를 동반할 수도 있다.

잔류응력을 측정하는 기존 방법^{3,4)}으로는 hole-drilling 방법 및 절단법, X선 회절법등을 들 수 있다. 절단법은 잔류응력이 걸린 일부 소재를 기계적으로 절

단하여 완화되는 응력을 측정하는 방법이므로 잔류응력이 존재하지 않는 기준 시편이 필요없다는 장점이 있는 반면, 파괴적인 특징으로 인해 용접부에 손상 없이 적용하는 것이 불가능하다. 이에 비해 X 선 회절법은 비파괴적인 방법이지만 잔류응력이 없는 상태에 대응하는 회절 피크의 측정이 필요하며, 미세조직의 영향도 복합적으로 나타난다는 단점이 있다. 이러한 기존의 잔류응력 측정방법은 응력완화가 수반되는 시편 채취과정이 필요하다는 단점과 더불어 실험실 수준의 정밀한 환경 제어와 복잡한 시험과정이 요구된다는 점에서 현장 구조물에 적용하기에는 한계가 있을 수 밖에 없다. 따라서 비파괴적이면서 실 용접부에 손상을 주지 않는 새로운 잔류응력 평가기법의 개발이 요구되었다.

비파괴 계장화 압입시험법(instrumented indentation

technique)은 특정한 기하학적 형태를 지닌 강성 압입자로 시편 표면에 수백 μm 이내의 압흔을 형성시킬 때 나타나는 압입하중-변위곡선의 분석을 통해서 다양한 기계적 물성을 얻는 방법이다. 기존 연구⁵⁾에서 응력의 유무에 따라 압입곡선 및 접촉형상의 변화가 보고되고 있으므로, 잔류응력과 압입인자간의 관계를 도출하게 되면, 잔류 응력의 정량적인 평가가 가능하다. 또한 잔류응력 완화 시의 압입하중-변위곡선의 형태변화로부터 잔류응력을 계산하는 연구^{6,7)}가 저자들에 의해 진행되어 왔다.

Fig. 1에 실선으로 나타낸 다중 압입하중-변위곡선은 압입자를 통하여 시편에 하중을 인가하는 단계의 하중 인가곡선과 압입하중 인가 이후 시편에서 압입자를 제거하는 여러단계의 부분 하중제거곡선들로 구성된다. 압입하중 인가 및 제거 곡선들은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 압입깊이의 멱급수 형태로 적합화되며, 부분하중 제거곡선들을 분석하면 여러 압입하중에서 압입자/시편간의 접촉깊이(h_c)들을 결정할 수 있다. 일정한 침단각을 갖는 압입자로 압입을 행할 때 압입자/시편간의 접촉깊이는 Oliver 와 Pharr에 의해서 식 (1)로 정의되었다⁸⁾.

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

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

시편 표면에 평행하게 2축 등방향 인장 및 압축 잔류

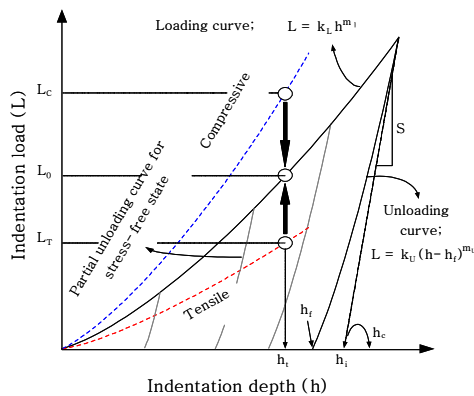


Fig. 1 Theoretical analysis of contact depth and the variation of indentation loading curve by residual stress state

응력이 존재하면 Fig. 1과 같이 압입 하중 인가곡선의 기울기가 변화한다. 동일한 최대 압입깊이에 도달하기 위해서 인장 잔류응력을 갖는 시편은 무응력 상태에 비해 낮은 압입하중이 필요하고, 반대로 압축 잔류응력을 갖는 시편은 높은 압입하중이 필요하다. 이러한 압입하중의 감소 및 증가분은 잔류응력의 영향으로 판단되며 인장 잔류응력 상태의 시편에서는 표면 내 잔류응력에 의해 유도된 수직하중이 외부 인가하중에 더해지므로 무응력 상태보다 낮은 인가하중에서 정해진 최대 압입깊이가 얻어지는 반면, 압축 잔류응력을 갖는 시편에서는 면내 잔류응력에 의해 유도된 수직하중이 외부 인가하중과 반대방향으로 작용하기 때문에 정해진 최대 압입깊이에 도달하는데 보다 높은 인가하중이 필요하게 된다. 그러므로 계장화압입시험을 통해 측정된 무응력 및 잔류응력 상태의 압입하중 인가곡선의 비교를 통해 측정되는 잔류응력 유도 수직하중(residual stress-induced normal load)의 분석을 통해 정량적인 잔류응력을 평가할 수 있다.

일반적으로 용접 잔류응력의 분포양상은 Fig. 2와 같으며 (+)부호는 인장을, (-)부호는 압축 잔류응력을 나타낸다. 전형적인 용접선 방향의 잔류응력, $\sigma_{res,x}$ 는 용접선의 수직방향의 잔류응력 $\sigma_{res,y}$ 에 비해 몇 배 이상으로 큰 것으로 보고되었으며, $\sigma_{res,x}$ 가 주된 연구 대상이다⁹⁾.

본 연구에서는 용접시편의 위치에 따라 계장화 압입 시험을 행하고 각각의 실험에서 도출된 압입하중-변위곡선의 변화추이 분석을 통해서 용접부 잔류응력의 정량적 평가를 시도하였으며, 절단실험을 병행하여 각 실험에서 얻어진 결과치들을 상호비교함으로써 계장화 압입시험법을 통한 잔류응력 평가기법의 타당성을 검증하고자 하였다.

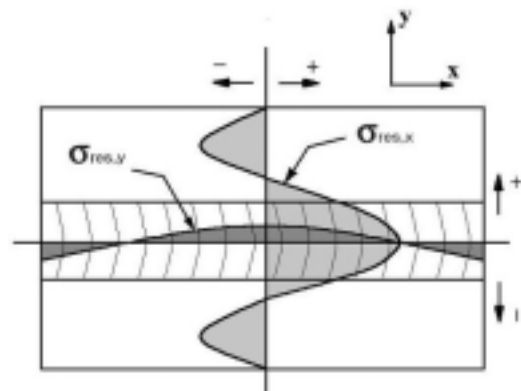


Fig. 2 General stress distribution around welded joint

2. 이론적 배경

2.1 표면 잔류응력과 압입응력의 상호작용

표면 잔류응력을 계장화 압입시험을 이용하여 분석하기 위해서는 잔류응력과 압입응력간의 상호작용에 대한 이론적인 모델링이 필요하다. 초기 연구에서는 잔류 응력에 의해 압입축 방향으로 발생하는 가상 응력과 접촉 면적의 곱인 $\sigma_{res} A_c$ 로 잔류응력 유도하중을 나타내었으나¹⁰⁾ 잔류응력의 소성변형에 대한 영향을 분석하기 위하여 부가된 1축 가상 응력에는 여전히 소성변형과 무관한 정수압 혹은 평균 응력(mean stress, σ_m) 성분이 포함되어 있다.

따라서 본 연구에서는 소성변형과 직접 관련된 편차 응력 성분만으로 잔류응력 유도 수직하중을 정의하기 위하여 압입 변형과 잔류응력 간의 상호작용을 재분석하였다. Johnson 모델에 의하면 강성 압입자(rigid indenter)에 의한 압입 변형은 셸(shell) 모양으로 확장한 소성역이 비압축성 코어(incompressible core)를 둘러싸고 있는 Fig. 3의 단면 형태로 모델링되었다¹¹⁾. 또한 압입자 직하에 존재하는 코어는 구형공동 모델(spherical cavity model)로 고려하면, 공동 내부의 정수압 응력(hydrostatic stress)은 $-2\sigma_y/3$ 로 결정되었다¹²⁾. 여기서 σ_y 는 재료의 항복강도를 의미한다. 재료가 탄성-강소성 거동(elastic-rigid plastic behavior)을 가지면, 정수압의 증가에 대응해 공동 외각의 소성역이 점차 확장하게 되는데, 이때 소성역 내부의 응력 분포도 구형 셸에 대한 응력 해석과 항복조건을 결합하여 분석되었다. 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 복잡한 압입변형 응력장 중에서 코어 내부의 응력 ($-2\sigma_y/3$)과 외부에서 인가되는 등방향 2축 잔류응력, σ_{res} ($= \sigma_{res,x} = \sigma_{res,y}$, $\sigma_{res,z} = 0$)와의 상호

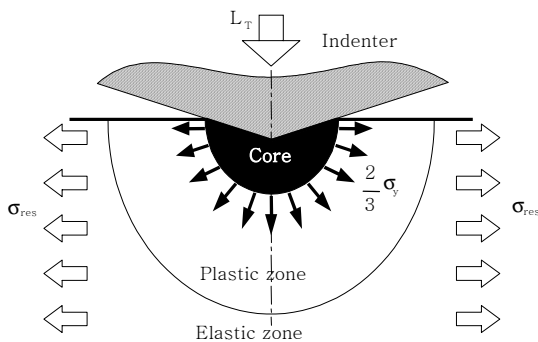


Fig. 3 Stress interaction between residual stress and hydrostatic stress in the incompressible core of an elastic/plastic indentation

중첩을 고려하였다. 등방향 2축 잔류응력을 코어에 인가하면 내부의 정수압은 변화되어 전단응력 성분이 부가적으로 발생하게 되며 식 (2)의 코어 내부 정수압과 등방향 2축 잔류응력의 합, σ_{com} 은 정수압과 편차 응력(deviator stress)으로 재 분해될 수 있고, 편차 응력 성분에서 잔류응력의 압입 소성 변형에 대한 영향을 확인할 수 있다. 식 (2)의 편차 응력 성분 중 시편 표면에 수직인 압입 하중에 미치는 잔류응력의 영향은 σ_{33} 로 나타나는 $-2\sigma_{res}/3$ 이다. 본 연구에서는 식 (3)으로 표현된 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 새롭게 정의하였다. 여기서 L_{res} 는 잔류응력 유도 수직하중이며 A_c 는 이때의 접촉 면적을 의미한다. 즉, 최대 압입 깊이가 일정하도록 압입 시험을 제어하면 잔류응력 유·무에 의해서 잔류응력 유도 수직하중 만큼의 압입 하중 차이가 발생한다.

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

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

$$L_{res} = -\frac{2}{3} \sigma_{res} \cdot A_c \quad (3)$$

2.2 압입하중-변위곡선의 분석을 통한 잔류응력의 정량적 분석

최대 압입 깊이를 일정하도록 제어하면 인장 및 압축 잔류응력에 의해 인가되는 압입하중은 무응력 상태에 대응하는 압입 하중에 비해 감소하거나 증가한다. 그러나 기존의 연구에 따르면 잔류응력과 고유경도는 상호 의존성이 없는 것으로 알려져 있다.^{7,13,14)} 이에 따라 식 (4)로 표시된 압입 경도를 일정하도록 유지하기 위해서 접촉면적은 압입 하중에 선형적으로 비례하게 된다. 여기서 H는 재료의 고유 경도를 의미하는 것으로 잔류응력에 따라 접촉면적이 변화하므로 최대 압입 깊이를 일정하게 제어하는 조건에서의 잔류응력에 따른 접촉형상의 변화는 Fig. 4의 모식도로 모델링 할 수 있다. (a)의 인장 잔류응력에서 (b)의 무응력 상태로 변화함에 따라 동일한 최대 압입깊이에 도달하기 위한 외부 인가하중은 L_T 에서 L_0 로 증가하게 되며, 일정한 압입 경도, H의 유지를 위하여 인가하중의 증가와 동일하게 접촉면적도 A_c^T 에서 A_c^0 로 증가하게 된다. Fig

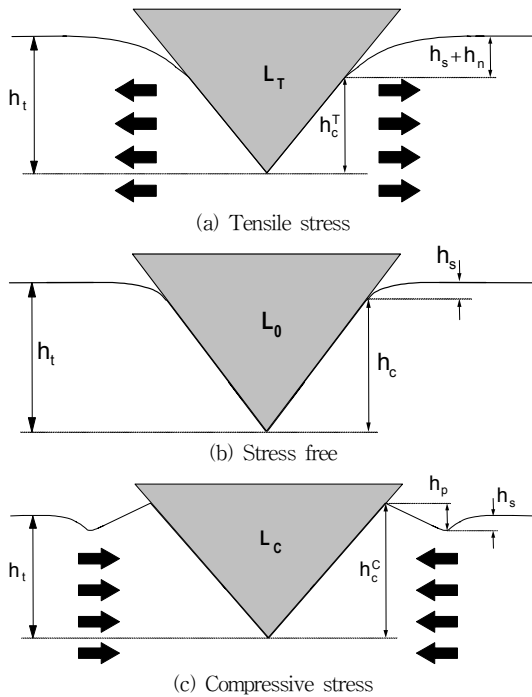


Fig. 4 Theoretically modeled surface morphologies around the contacts for (a) tensile stress, (b) stress free, (c) compressive stress

4-(b)의 무응력 상태와 비교해 보면, 인장 잔류응력의 영향은 접촉부 외각의 sink-in 깊이인 h_n 으로 나타나며, 잔류응력 제거에 따라 sink-in 현상이 무응력 상태의 접촉형상으로 완전히 회복된다는 것을 가정하였다.

$$H = \frac{L_T}{A_C^T} = \frac{L_0}{A_C^0} \quad (4)$$

잔류응력 유도 수직하중 L_{res} 의 결정과 함께 압입 깊이제어 잔류응력 완화 과정에서 나타나는 접촉면적 및 응력의 연속적인 변화도 고려해야 정량적인 잔류응력의 분석이 가능하다. 잔류응력 유도 수직하중의 정의인 식 (3)과 Fig. 4의 접촉 형상의 변화를 고려하면 응력 완화 과정에서의 압입 하중의 변화는 적분형태의 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_0 &= L_T + L_{res} = L_T + \int_{L_T}^{L_0} dL_{res} \\ &= L_T - \frac{2}{3} \int_{L_T}^{L_0} d(\sigma_{res} \cdot A_c) \end{aligned} \quad (5)$$

적분식을 풀기 위해서 잔류응력 완화 과정 중에 나타나는 접촉면적, A_c 와 완화 중의 응력, σ 의 압입 하중, L 에 대한 의존성을 Fig. 5에 나타내었다. 잔류응력 유무에 따른 압입 하중 증가곡선 및 잔류응력의 완

화경로는 Fig 5-(a)에서 살펴볼 수 있다. 인장 잔류응력 하에서 압입 하중을 인가하여 일정 압입 깊이, h_t 에 도달하면 압입 하중은 L_T 가 된다. 최대 압입 깊이를 h_t 로 일정하게 유지하면서 인장 잔류응력을 완화시키면 압입자/시편의 압입하중 및 접촉깊이는 증가하여 (L_0, h_c)의 무응력 상태에 도달하게 된다. 압입깊이 제어 응력완화 경로를 따를 때 접촉면적의 변화와 잔류응력의 감소양상은 Fig. 5의 (b)와 (c)에 구체적으로 나타내었다.

Fig 5-(b)에서 일정한 압입경도를 고려하면 식 (4)에 따라 접촉면적은 압입하중에 선형적으로 비례하게 되며 그 기울기는 $1/H$ 가 된다. 완화과정중의 소재 내

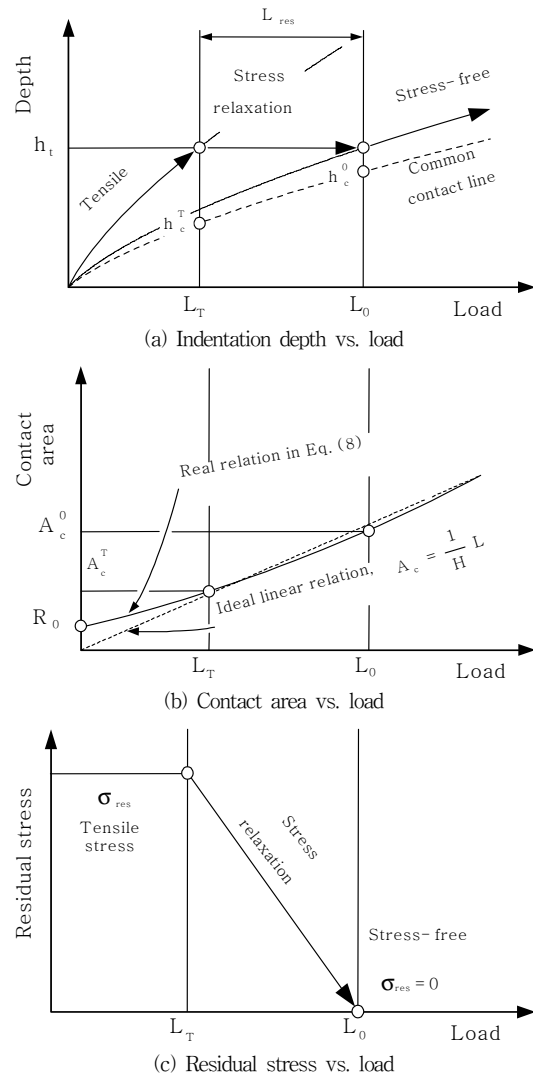


Fig. 5 Schematic diagrams for the contact changes during residual stress relaxation procedure; (a) transition in the indentation loading curve (b) increase in contact area in a blunt indenter and (c) reduction of residual stress in material

부의 응력은 압입하중에 선형적으로 반비례하여 감소하는 것으로 가정하였고 이를 Fig. 5-(c)로 나타내었다.

한편, 계장화 압입시험에 사용되는 Vickers 압입자의 경우, 침단 수 μm 영역에서 가공상의 한계로 불완전한 무딘 형상을 갖는다. 이러한 Vickers 압입자의 형상보정을 위해서 접촉면적은 $A_c = f(L)$ 와 같이 압입 하중에 대한 다차식의 형태를 취하게 되는데, 수십 N의 고하중 영역에서는 2차식으로 근사화 시킬 수 있다. 여기서 R_0, R_1, R_2 는 실험적으로 결정되는 적합화 상수이다.

잔류응력 유도 수직하중의 정의인 식 (3)을 사용하고, 위에서 제시한 바와 같이 잔류응력 완화 시 접촉면적 증가와 응력 감소거동을 식 (5)에 대입하여 정리하면 잔류응력 평가식은 식 (6)으로 표현되며, Ω 는 $R_2 L_T^3 + (R_1 - R_2 L_0) L_T^2 + (R_0 - R_1 L_0) L_T - R_0 L_0$ 의 형태로 주어졌다.

$$\sigma_{res} = \frac{3}{2} \frac{L_{res}^2}{\Omega} \quad (6)$$

3. 실험방법

직경 750mm, 두께 15.5mm의 규격을 갖는 천연가스운반용 API X65 강제 용접배관상의 일부를 채취하여 시편으로 가공하였다. 시편의 조성과 기계적 물성, 용접조건은 Table 1과 2에 표시하였다. 각각의 시편은 2000번 사포까지의 기계적 연마를 거친후 2% Nital 용액으로 에칭하여 용착금속과 용접 열영향부(HAZ), 모재 간의 경계를 명확히 하였다. Saw-cutting 실험의 경우 정확한 값의 측정을 위하여 용접선을 가로질러 3mm 간격으로 스트레인게이지를 부착한 후, 절단 전후의 변형률의 변화량을 식 (7)에 대입하여 잔류응력값을 정량적으로 측정하였다. 용접선의 수직방향에 대해서도 스트레인 게이지를 부착시켜 절단시 완료되는 잔류응력치를 측정하였으며 절단실험 후의 시편사진은 Fig. 6으로 제시하였다.

압입시험을 위하여 시편 상단에 압입자와 만나는, 폭 25mm 영역을 평평하게 가공한 후, 모재로부터 용접부

Table 2 Welding condition of API X65 specimen

V-groove welding
GTAW + SMAW
ER 70S-G, E9016-G
Preheat : 100°C, No PWHT
Amp./Volt. : 80~130A/12~23V

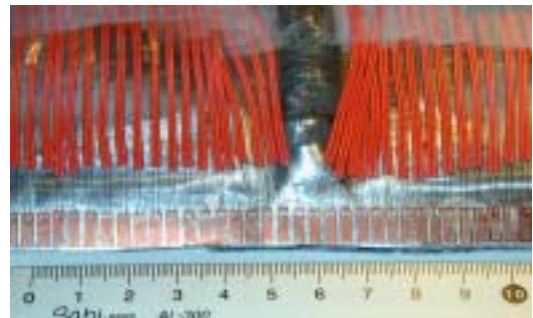


Fig. 6 Specimen used in saw-cutting test

를 가로질러 각각의 압입시험을 행하였다. 압흔 간의 상호 변형중첩을 피하기 위하여 압입시험은 용접선을 가로질러 약 5mm 정도의 충분한 간격을 두고 행하였으며 실험오차를 줄이기 위해 3회에 걸쳐 압입시험을 반복하였다. 최대압입하중은 50kgf로 결정하였고 압입 속도는 0.2mm/min 로 설정하였다. 잔류응력상태의 압입곡선과 비교하기 위한 무응력 상태를 얻기 위해서 600°C에서 2시간 어닐링시킨 후 노냉시키는 열처리 과정을 통해서 잔류응력을 제거하고, 용접 중심선에 대해 열처리 이전에 압입실험을 행하였던 거리만큼 떨어진 위치에 대하여 각각 열처리 이전과 동일한 조건의 압입 실험을 행하였다. 접촉면적 계산을 위하여 10, 20, 30, 40, 50kgf 하중에서 각각의 하중제거 단계를 거쳤다. 잔류응력 존재시의 압입곡선은 하중인가 부분만 분리하여 먹급수 형태로 적합화하여 정리하였으며, 무응력 상태의 압입하중-변위곡선은 하중인가 곡선의 분리와 함께 하중제거 곡선 분석을 통해서 접촉면적을 유도하였다. 분석결과를 Table 3, 4로 제시하였으며 실험과정을 전체적으로 도식화하여 Fig. 7로 나타내었다.

$$\sigma_{res} = E \epsilon_{res} \quad (7)$$

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of API X65

	C	P	Mn	S	Si	Fe	Ceq	Yield strength	Elastic Modulus	Poisson ratio
Composition (wt%)	0.08	0.019	1.45	0.003	0.31	Bal.	0.32	490 MPa	210 GPa	0.284

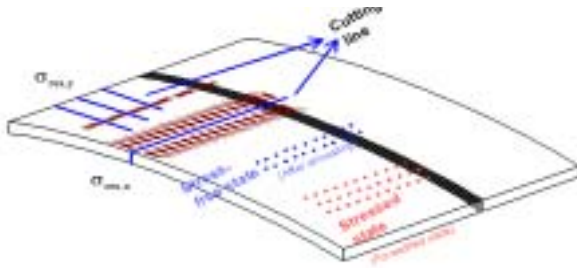


Fig. 7 Detailed schematic diagram of experimental procedures

Table 3 Loading curve analysis at each indent

Indenting position (distance from welding line, mm)	Loading curve fitting
1 (-7.67)	0.1141h ^{1.8851}
2 (-3.2)	0.1072h ^{1.9051}
3 (0.14)	0.0977h ^{1.925}
4 (4.96)	0.1021h ^{1.909}
5 (9.29)	0.1147h ^{1.886}
6 (14.51)	0.1024h ^{1.912}
7 (20.2)	0.1182h ^{1.88}
8 (29.66)	0.1131h ^{1.891}
9 (34.55)	0.1193h ^{1.875}
10 (39.81)	0.1219h ^{1.877}
11 (44.7)	0.0827h ^{1.963}
12 (49.87)	0.104h ^{1.906}
13 (54.69)	0.1004h ^{1.897}
14 (59.8)	0.1342h ^{1.865}
15 (64.59)	0.1163h ^{1.892}
16 (69.94)	0.0958h ^{1.921}
17 (74.9)	0.0514h ^{2.005}
18 (79.21)	0.0423h ^{2.084}

Table 4 Example of unloading curve analysis at each maximum applied load

Load (N)	Depth (μm)	Unloading curve fitting	Contact depth (μm)
98	38.975	L=3.614(h-h _f) ^{1.829}	36.507
196	56.50	L=2.134(h-h _f) ^{2.066}	53.086
294	70.208	L=3.642(h-h _f) ^{1.825}	64.237
392	81.907	L=4.923(h-h _f) ^{1.717}	74.447
490	92.307	L=2.837(h-h _f) ^{1.909}	84.491

4. 결과 및 토의

4.1 절단 시 용접 잔류응력의 이완

Fig. 8은 절단 시 측정된 각 방향의 변형률을 나타낸 것이다. 기존 연구결과에서 보고된 바와 같이 용접부와 평행한 방향의 변형률이 수직방향의 변형률에 비해 비

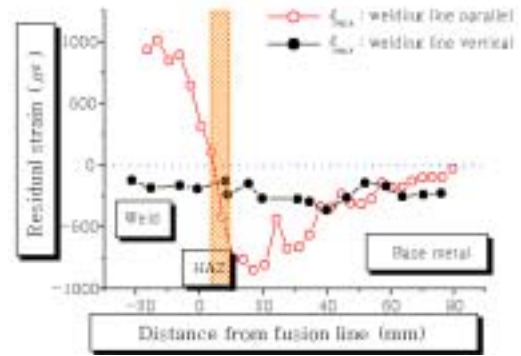


Fig. 8 Saw-cutting results(strain)

교적 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 각 방향의 변형률을 식 (7)에 대입하여 정리하는 과정을 통해서 완화된 잔류응력값을 평가하였으며 압입시험과의 비교 결과는 Fig. 10에 도시하였다.

4.2 잔류응력에 따른 압입곡선 형상천이

Fig. 9와 같이 무응력 상태의 압입곡선과 잔류응력 존재 시 압입곡선에는 차이가 발생한다. 하중변위곡선 분석과정과 이론적 배경 및 실험방법에서 제시된 분석 절차에 의하여 각각의 압입위치에서 잔류응력 값을 정량적으로 평가하고 이를 Table 5에 나타내었다. Table 5와 Fig. 10은 압입시험에서 얻어진 잔류응력치와 절단 실험결과를 도표로 비교하여 나타낸 것으로, 정량적 크기 및 응력의 부호에서 서로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

응력의 부호는 절단실험에 의한 값과 압입시험을 통해서 얻어낸 결과가 완전히 일치하고 있음을 보여주고 있다. 모재로부터 HAZ, 용착금속을 거치면서 각각 압축-인장의 잔류응력이 존재함을 뚜렷이 볼 수 있었으며, 이는 기존 연구보고와 같은 경향을 보이고 있다.

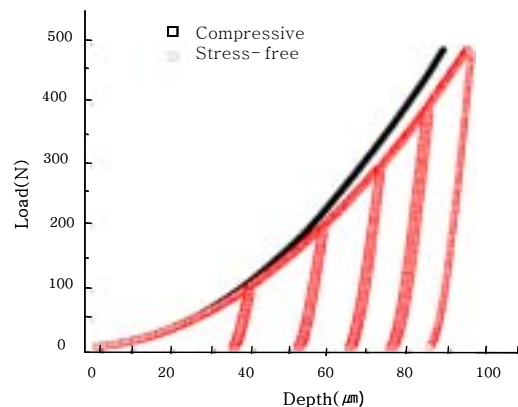


Fig. 9 Loading curve shifting on local region by the effect of residual stress(HAZ : 4.96mm from welding line)

Table 5 Summary of evaluated residual stress by indentation and saw-cutting.

Indentation		Saw-cutting	
Indentation position from welding line(mm)	Residual stress (MPa)	Strain gage position (mm)	Residual stress (MPa)
74.9	-4.82	75.2	-20.37
69.94	-72.86	68.8	-21.21
64.59	-43.86	65.7	-26.67
59.8	-72.31	59.4	-38.01
54.69	-47.72	56.2	-29.82
49.87	-15.32	49.7	-66.36
44.7	-62.41	43.4	-48.51
39.81	-65.76	40.2	-72.45
34.55	-19.79	33.3	-118.23
29.66	-123.25	30	-139.44
20.2	-49.42	19.4	-168.63
14.51	-163.06	15.6	-178.29
9.29	-172.5	9.4	-159.39
4.96	-166.17	6	-88.2
0.46	93.66	-0.6	65.94
-3.2	228.57	-3.9	135.66
-7.67	294.16	-7.5	187.32

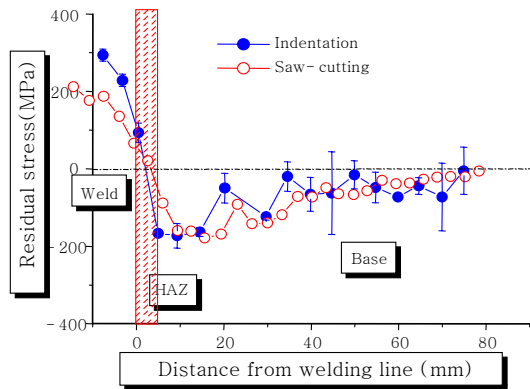


Fig. 10 Comparison of experimental results from saw-cutting and advanced indentation (stress)

4.3 실험 결과 및 고찰

절단 실험과 계장화 압입 시험을 이용하여 평가한 각각의 잔류응력 값이 그 부호와 크기에서 잘 일치한다는 사실은 Fig. 10에서 확인하였다. 두 실험값 간의 오차는 다음의 발생원인에서 생각해 볼 수 있다. 우선 앞에서 전개된 계장화 압입시험을 이용한 잔류응력 평가의 이론적 모델이 이축 등방향 잔류응력의 존재라는 가정 하에서 유도된 것이므로 이를 비등방적인 응력 분포를

가지고 있는 용접부의 응력 해석에 직접 적용하면서 생기는 문제점이 존재한다. Fig. 8과 같이 기존 연구 보고¹⁵⁾에 있어서뿐 아니라, 본 실험결과상에서도 용접선 방향을 기준으로 각 방향의 변형률은 서로 다른 부호와 크기를 가짐이 확인되었다. 그러나 압입시험을 이용한 잔류응력 평가시 적용된 이축 등방향 평가모델에서 실제와 다른 응력상황을 가정하여 반영하였으므로 필연적인 오차가 발생한다. 이와 함께 실제 압입시험결과 분석에 있어서 응력 및 무응력 상태의 각 시편에서 측정된 위치가 상이한 것 또한 원인으로 들 수 있다. 이는 실험을 행할 시에 용접선에 기준하여 같은 거리만큼 떨어진 지점의 잔류응력은 서로 같다는 가정에서 출발한 것이다. 즉 결과해석 시 용접선 수직방향의 변형률 ϵ_y 를 일정하다고 가정하였으나 ϵ_y 값이 상대적으로 작다고 하나 변화량을 무시한 만큼의 오차발생분이 존재함을 예상할 수 있다.

또다른 원인으로서는 열처리를 통해 응력이 완전히 제거되지 않았을 가능성을 생각할 수 있다. Fig. 10에 나와있는 결과를 보면 모재쪽으로 이동할수록 절단실험 및 압입실험결과 모두 응력상황이 수렴함을 알 수 있다. 이를 통해 모재쪽에서는 열처리를 통해 응력이 완전히 제거되었다는 결과로 유추할 수 있는 반면, 용착 금속 영역에서는 두 결과간의 차이가 상대적으로 큼을 볼 수 있는데 용착금속영역에서는 적절한 열처리 조건에 의해 완전한 응력제거가 행하여지지 않았다고 생각할 수 있다.

5. 결 론

계장화 압입시험을 이용해서 용접부의 잔류응력의 크기를 정량적으로 평가하여 절단실험에서 얻은 결과와 비교하였다. 계장화 압입시험에서 얻은 결과는 절단실험에서 얻어진 결과와 비교하여 응력의 방향성뿐 아니라 잔류응력의 크기 또한 비교적 잘 일치한다는 사실을 알 수 있었다. 두 방법에서 평가된 잔류응력 절대치의 차이는 압입시험결과분석에서 적용된 이축 등방향 모델의 가정상의 오류에 의한 것으로 보인다. 적용모델의 경우 응력의 방향성을 인지할 수 있는 방향으로의 추후 연구가 필요할 것으로 생각되며, 무응력 선택상의 원인은 용착 금속이나 HAZ 부분의 무응력 상태를 각각 구하여 적용한다면 해소할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. M. Koichi : Analysis of welded structure, Pergamon Press(1980), 148.

2. I. C. Noyan and J. B. Cohen : Residual Stresses, Springer-Verlag(1987), 1.
3. C. O. Ruud, P. S. DiMascio, and J. J. Yavelak : Comparison of three residual-stress measurement methods on a mild steel, Experimental Mechanics, Vol. 25(1985), 338-343.
4. J. W. Joo and C. K. Park : Determination of Non-uniform Residual Stress by the Hole Drilling Method, Trans KSME A, Vol. 22(1998), 268-277.
5. A. V. Zagrebelny and C. B. Carter : Indentation of strained silicate-glass films on alumina substrates, Scripta Mater., Vol. 37(1997), 1869-1875.
6. Y.-H. Lee and D. Kwon : Residual stresses in DLC/Si and Au/Si systems: application of a stress-relaxation model to the nanoindentation technique, J. Mater. Res., Vol. 17(2002), 901-906.
7. Y.-H. Lee, W.-j. Ji, D. Son, J.-i. Jang, and D. Kwon : Analysis of bending residual stress in SS400 steel beam using continuous indentation technique and stress interaction model, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 40(2002), 1042-1047.
8. W. C. Oliver and G. M. Pharr : An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, J. Mater. Res., Vol. 7 (1992),1564-1583
9. H. S. Bang : Study on the mechanical behavior of welded part in thick plate, J. Kor. Weld. Soc., Vol. 10-4(1992), 250-258 (in Korean)
10. S. Suresh, and A. E. Gianakopoulos : A new method of estimating residual stress by instrumented sharp indentation, Acta Mater., Vol 46(1998), 5755-5767.
11. K. L. Johnson : Contact Mechanics, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, (1985), 84-106.
12. R. Hill : The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon, Oxford(1956)
13. T. Y. Tsui, W. C. Oliver, and G. M. Pharr : Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: part I. experimental studies in an aluminum alloy, J. Mater. Res., Vol. 11(1996), 752-759.
14. A. Bolshakov, W. C. Oliver and G. M. Pharr : Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: part II. finite element simulations, J. Mater. Res., Vol. 11(1996), 760-768.