

## 계장화 압입시험: 금속재료의 유동 응력-변형률과 잔류응력 평가를 위한 신 비파괴 측정 기술

### Instrumented Indentation Technique: New Nondestructive Measurement Technique for Flow Stress-Strain and Residual Stress of Metallic Materials

이경우\*<sup>†</sup>, 최민재\*, 김주영\*, 김광호\*\*, 권동일\*

Kyung-Woo Lee\*<sup>†</sup>, Min-Jae Choi\*, Ju-Young Kim\*, Kwang-ho Kim\*\* and Dongil Kwon\*

초 록 가동 중인 설비 및 대형 구조물은 장시간 사용, 고온 환경 및 반복되는 하중 등의 영향으로 설비재료의 교체 및 유지 보수가 요구된다. 이때 설비의 기계적 특성을 평가하는 것은 필수 불가결한 요소 이지만 대부분의 물성평가방법이 파괴적이기 때문에 가동 중인 설비에 직접 적용하는 것은 상당한 어려움이 따른다. 그러나 계장화 압입시험법은 다양한 기계적인 특성을 비파괴적으로 측정하는 최신기술로서 재료에 하중 인가 및 제거 과정 중 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 획득된 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 유동물성, 잔류응력, 파괴인성 등의 기계적 특성을 평가 할 수 있다. 본 연구에서는 계장화 압입시험을 이용하여 철강재료 및 용접부 유동물성과 잔류응력을 정량적으로 평가하였다. 계장화 압입시험 시 발생하는 압입자 하부의 응력상태를 고려하여 유동응력과 변형률을 정의하고, 이를 최적화된 응력-변형률 구성방정식을 통해 유동곡선 및 항복강도, 인장강도 등의 유동물성을 평가 하였다. 계장화 압입시험을 이용하여 잔류응력을 측정하기 위해 소성변형과 직접 관련된 편차 응력 성분만으로 압입변형과 잔류응력 간의 상호작용을 분석하여 잔류응력 모델을 정의하였다. 측정된 유동물성은 일축인장시험의 결과를 통해 그 정확성을 검증하였고, 잔류응력은 홀-드릴링, 절단법 및 ED-XRD 시험과 비교하여 그 모델을 검증하였다.

**주요용어:** 계장화 압입시험, 비파괴, 잔류응력, 유동응력-변형률, 용접부

**Abstract** Instrumented indentation technique is a new way to evaluate nondestructive such mechanical properties as flow properties, residual stress and fracture toughness by analyzing indentation load-depth curves. This study evaluated quantitatively the flow properties of steels and residual stress of weldments. First, flow properties can be evaluated by defining a representative stress and strain from analysis of deformation behavior beneath the rigid spherical indenter and the parameters obtained from instrumented indentation tests. For estimating residual stress, the deviatoric-stress part of the residual stress affects the indentation load-depth curve, so that by analyzing the difference between the residual-stress-induced indentation curve and residual-stress-free curve, the quantitative residual stress of the target region can be evaluated. The algorithm for flow property evaluation was verified by comparison with uniaxial tensile test and the residual stress evaluation model was compared to mechanical cutting and ED-XRD results.

**Keywords:** Instrumented Indentation Technique, Nondestructive, Residual Stress, Flow Stress-Strain, Weldments

## 1. 서 론

금속소재의 가공이나 접합에 의하여 발생하는 잔류응력은 구조물의 형상을 왜곡시킬 뿐만 아니라, 외부에서 부가되는 화학적, 역학적인 환경인자들의 영향을 증가시켜 부식, 소성변형, 내피로 및 파괴 저항성을 저하시키고 궁극적으로 구조물의 수명을 단축시킨다. 특히 용접 시의 열적 처리과정을 통해 발생하는 용접 잔류응력은 설비 구조물의 파괴를 유발할 수 있는 중요한 영향인자이므로, 설비 건설 및 운용 중 정상적인 평가를 통한 관리가 필수적이다. 또한 용착금속, 열 영향부, 모재 등의 용접부 각 영역의 미세조직 차이 및 이로 인한 강도적 불균질 효과 역시 용접부의 건전성 모니터링을 위한 중요한 평가 인자이다. 사용 중인 설비의 재료 적합성과 용접의 적정성을 평가하기 위해서는 크리프 시험, 인장시험, 잔류응력시험 등 각종 파괴적인 시험법을 실시할 수 밖에 없는 실정이다. 그러나 이러한 파괴적인 시험법은 표준화된 시편 형상을 만들기 어려우며, 불균질한 미세조직으로 인하여 시편 채취 위치에 따라 강도 특성이 달라져 정확한 물성을 측정하는데 어려움이 존재한다. 기존 잔류응력 측정 방법[1,2]인 X-선 회절법, 중성자 회절법, 초음파법 등의 비파괴적인 방법은 미세조직이나 측정온도에 민감하게 반응하며, 일정한 사전 정보가 필요하다는 단점이 있다. 또한 홀 드릴링, 절단법 등의 방법은 파괴적이라는 단점뿐 아니라 소재 제거 시 추가적인 응력 유발의 가능성이 있다는 문제점이 있다. 한편 인장물성의 평가로서는 일축인장시험이 전 세계적으로 표준화되어 사용되고 있으나, 표준시편의 가공을 위한 시편 채취 및 가공의 문제로 인해 운용중이거나 설치 완료된 구조물에의 적용은 불가능하다. 따라서 시편 채취의 제한이 적으며, 국소 부위의 강도 특성과 잔류응력 효과를 정확히 평가할 수 있는 새로운 시험법의 개발이 필요하게 되었다. 이에 효율적으로 현장 발전설비 구조물의 잔류응력, 인장물성을 평가하는 비파괴적인 시험법으로서 연속 압입 시험법이 개발되었다. 계장화 압입시험법은 압입하중에 따른 압입깊이의 연속적인 측정을 통하여 Fig. 1과 같은 압입하중-변위 곡선을 분석함으로써 유동특성[3,4], 파괴인성[5] 그리고 잔류응력[6,7] 등의 다양한 기계적 특성을 평가할 수 있다. 또한 최대 수백 마이크로미터 이내

의 좁은 영역을 평가하므로 용접부와 같은 국부적인 물성변화가 존재하는 재료에 대해서도 그 변화양상을 평가할 수 있다. 또한 시험한 재료에 매우 작은 압흔만을 남기기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다.

본고에서는 계장화 압입시험법을 이용하여 유동응력 및 변형률을 고려해 인장물성과 잔류응력의 측정 원리를 설명하고 실제 기계적 특성을 평가한 결과들을 소개하고자 하였다.

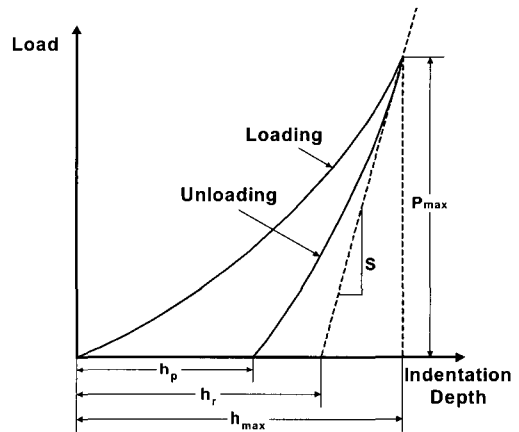


Fig. 1 The load-depth curve obtained during instrumented indentation test

## 2. 이 론

### 2.1. 계장화 압입시험을 이용한 유동 특성 평가

일반적으로 계장화 압입시험을 통해 유동특성을 평가하는 방법은 다음과 같은 순서로 진행된다. 먼저 유동물성을 얻고자 하는 재료에 대해 구형 압입자로 계장화 압입시험을 수행하여 가장 기본적인 데이터인 압입하중-변위곡선을 얻는다. 이 곡선은 탄성 굽힘과 pile-up 등의 압입자 주변의 재료의 변형양상을 반영하지 못하므로, 재료 물성과 연관하여 실제 접촉깊이를 보정한다. 이 단계에서 탄성굽힘과 pile-up에 관한 여러 가지 보정식이 적용된다. 보정된 압입하중-변위곡선을 이용하여 진변형률과 진응력을 계산하게 되는데, 일반적으로 진변형률은 실제 접촉깊이의 함수로 표현되며 진응력은 압입하중과 실제 접촉깊이의 함수로 표현된다. 이를 진응력-진변형률의 구성방정식으로 최적화함으로써 최종적인 유동곡선을 얻게 된다.

2.1.1. 진응력과 진변형률의 정의

구형 압입자를 이용한 계장화 압입시험 시 재료는 압입하중이 증가함에 따라 Fig. 2와 같이 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며, 압입자와 시편의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다[8]. 따라서 구형압입의 경우에는 압입깊이가 증가함에 따라 재료의 변형이 증가하여, 압입하중-변위곡선으로부터 일축인장에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 구형압입 시 발생하는 변형의 3단계를 보다 자세히 살펴보면, 먼저 초기의 탄성단계에서는 평균접촉압력이 하중의 제곱에 비례하여 증가하고, 압흔이 관찰되지 않는 가역적인 반응을 보이게 된다. 다음으로 압입하중이 일정한 값 이상이 되면, 재료 내부에 소성역이 발생하고 평균접촉압력은 탄성단계에 비해 서서히 증가하게 된다. 마지막으로 소성역이 표면까지 충분히 확장된 완전소성 단계에서는 평균접촉압력은 거의 일정하게 되며 재료의 가공경화특성에 의해 매우 서서히 증가하게 된다. 따라서 이러한 변화양상의 분석을 통해 재료의 유동특성을 압입시험으로부터 예측할 수 있다.

구형압입 시 발생하는 재료의 변형률은 일반적으로 이러한 압입변형양상을 분석하여 얻어진다. 압입자 하부 깊이 방향의 변위  $U_z$ 는 압입자의 기하학적인 관계에 의해 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$U_z = h - (R - \sqrt{R^2 - r^2}) \tag{1}$$

여기서  $R$ 은 압입자 반지름이고,  $r$ 은 반지름 방향의 변위를 나타낸다.

이 변위를 반지름 방향의 변위  $r$ 에 대해 미분하게 되면, 각 부분에서의 변형률은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a_c/R)^2}} \frac{a_c}{R} = \alpha \tan \gamma \tag{2}$$

여기서  $\alpha$ 는 상수이다.

또한, 재료가 나타내는 대표적인 진응력( $\sigma$ )은 평균압력( $P_m$ )과 식 (3)과 같은 관계가 있음이 알려져 있다[9].

$$\sigma = \frac{1}{\psi} P_m = \frac{1}{\psi} \frac{L_{max}}{\pi a_c^2} \tag{3}$$

여기서  $\psi$ 는 소성구속인자,  $L_{max}$ 는 압입하중,  $a_c$ 는 압입자와 재료간의 실제접촉반경을 의미한다. 압입하중은 시험기의 하중 측정 장치에서 얻어지는 값을 그대로 사용할 수 있으나 실제접촉반경은 압입자 주변에서 발생하는 재료의 탄성, 소성 변형 특성에 의해 변위 측정 장치에서 측정된 압입깊이를 보정한 후 압입자의 기하학적 관계에 의해 얻어야 한다.

식 (2, 3)에 의해 얻어진 진변형률, 진응력 값은 각 재료의 변형 속성을 나타내는 식 (4)와 같은 구성방정식에 최적화시킴으로써 재료의 전체 변형속성 및 유동물성을 측정할 수 있다.

$$\sigma = K \epsilon^n \tag{4}$$

여기서  $K$ 는 응력계수이다.

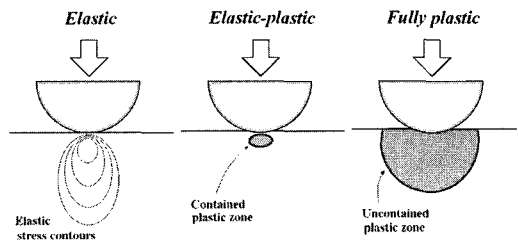


Fig. 2 Schematic representation of plastic zone expansion during spherical indentation: elastic, elastic-plastic and fully plastic stages

2.2. 계장화 압입시험을 이용한 잔류응력 평가

2.2.1. 압입하중과 잔류응력 간의 상관관계

시험편 표면에 평행하게 2축 인장/압축 잔류응력이 존재하면 Fig. 3과 같이 압입하중 인가곡선의 기울기가 변화한다[6,7]. 동일한 최대압입깊이에 도달하기 위해 인장 잔류응력을 갖는 시험편은 무응력 상태에 비해 낮은 압입하중이 필요하고, 이와 반대로 압축 잔류응력을 갖는 시험편은 높은 압입하중이 필요하다. 이러한 압입하중의 감소 및 증가분은 잔류응력의 영향으로 판단할 수 있다.

즉, 인장 잔류응력 상태의 시험편에서는 표면과 평행한 잔류응력에 의해 유도된 수직하중이 외부 인가하중에 더해지므로 무응력 상태보다 낮은 인가하중에서 정해진 최대 압입깊이가 얻어진다. 반면

압축 잔류응력을 갖는 재료에서는 면내 잔류응력에 의해 유도된 수직하중이 외부 인가하중과 반대방향으로 작용하기 때문에 정해진 최대 압입깊이에 도달하는데 보다 높은 인가하중이 필요하게 된다. 그러므로 계장화 압입시험으로 측정된 무응력 및 잔류응력 상태의 압입하중 인가곡선의 비교를 통해 측정되는 잔류응력 유도 수직하중(residual stress-induced normal load)을 분석하여 정량적인 잔류응력을 평가할 수 있다.

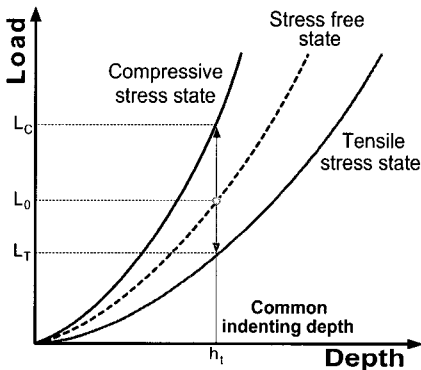


Fig. 3 Variation of indentation loading curves with changes in the stress state

2.2.2 비 등방향 2축 잔류응력

잔류응력 유도 수직하중을 정의하기 위하여 소성 변형과 직접 관련된 편차 응력 성분만으로 압입 변형과 잔류응력 간의 상호작용을 분석하였다. 또한 압입자 직하에 존재하는 코어는 구형 공동 모델(spherical cavity model)을 고려하여, 공동 내부의 정수압 응력(hydrostatic stress)은  $-2\sigma_y/3$ 로 결정하였다[11]. 여기서  $\sigma_y$  는 재료의 항복강도를 의미한다. 재료가 탄성-강소성 거동(elastic-rigid plastic behavior)을 보이면, 정수압의 증가에 대응해 공동 외각의 소성역이 점차 확장하게 되는데, 이때 소성역 내부의 응력 분포는 구형 셀에 대한 응력 해석과 항복조건을 결합하여 분석되었다[12]. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 복잡한 압입변형 응력장 중 코어 내부의 응력( $-2\sigma_y/3$ )과 외부에서 인가되는 등방향 2축 잔류응력,  $\sigma_{res}$  ( $\sigma_{res,x}=\sigma_{res,y}$ ,  $\sigma_{res,z}=0$ )와의 상호충돌을 고려하였다. 등방향 2축 잔류응력을 코어에 인가하면 내부의 정수압은 변화되어 전단응력 성분이 부가적으로 발생하게 되며 코어 내부 정수

압과 등방향 2축 잔류응력의 합은 정수압과 편차 응력(deviatoric stress)으로 재 분해될 수 있고, 편차 응력 성분에서 잔류응력의 압입 소성 변형에 대한 영향을 확인할 수 있다. 하지만 대부분 철강 재료의 용접부에는 비등방성 2축 잔류응력이 인가되어 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 2축 잔류응력 중 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 값이 큰 방향의 잔류응력이  $\sigma_{res,x}$ 이면 값이 작은 방향의 응력성분인  $\sigma_{res,y}$ 는  $p\sigma_{res,x}$  로 나타낼 수 있다. 이때  $p$  는 -1.0에서 +1.0사이의 값을 갖게 된다. 이를 행렬 식으로 표현하면 식 (5)와 같이 나타난다. 식 (5)의 편차 응력 성분 중 시편 표면에 수직인 압입 하중에 미치는 잔류응력의 영향은  $\sigma_{33}$ 으로 나타나는  $-\frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x$ 이다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Biaxial stress} \\
 &\begin{pmatrix} \sigma_{res}^x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res}^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{res}^x & 0 & 0 \\ 0 & p\sigma_{res}^x & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 &\text{Mean stress} \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x \end{pmatrix} \quad (5) \\
 &\text{Deviatoric stress} \\
 &+ \begin{pmatrix} \frac{(2-p)}{3}\sigma_{res}^x & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(2p-1)}{3}\sigma_{res}^x & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

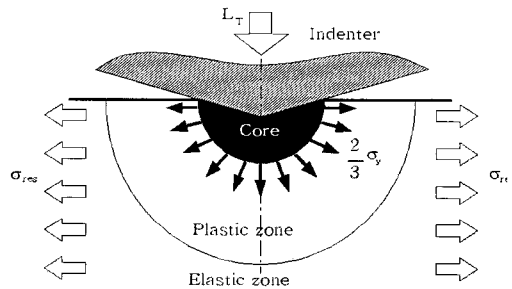


Fig. 4 Stress interaction between residual stress and hydrostatic stress in the incompressible core of an elastic/plastic indentation

본 연구에서는 식 (6)로 표현된 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 새롭게 정의하였다.

$$\frac{1}{\psi} \frac{L_{res}}{A_c} = \frac{(1+p)}{3} \sigma_{res} \quad (6)$$

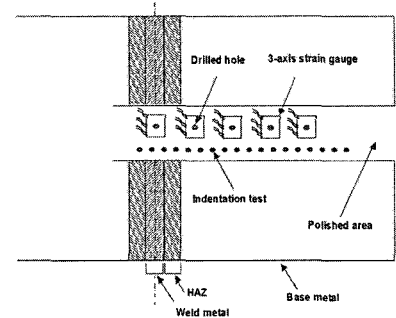
여기서  $L_{res}$ 는 잔류응력 유도 수직하중이며  $A_c$ 는 이때의 접촉 면적을 의미한다. 즉, 최대 압입 깊이가 일정하도록 압입 시험을 제어하면 잔류응력 유무에 의해서 잔류응력 유도 수직하중만큼의 압입 하중 차이가 발생한다.  $p$ 는 비등방 2축 응력 계수로서 본 연구에서는 1/3로 가정한다.

### 3. 실험

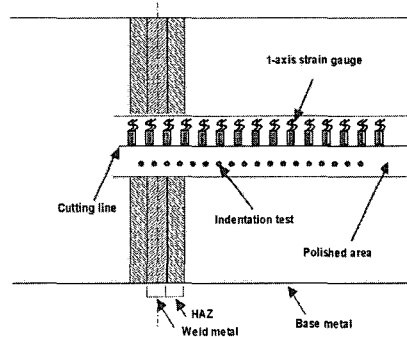
유동물성의 측정을 위해 7개의 철강 재료를 3×3×3 cm 크기의 시편으로 가공하여 압입시험을 수행하고, 그 결과와 비교하기 위해 일축인장시험을 수행하였다. 인장시험은 Instron 5582를 이용하여, cross-head 속도 1 mm/min로 총 3회 실시한 결과의 평균을 이용하였다. 또한 직경 750 mm, 두께 15.5 mm의 규격을 갖는 천연가스 운반용 강재 API X65와 일반구조용 압연강재 SS400 용접배관상 일부를 채취하여 계장화 압입시험, 홀-드릴링 그리고 절단법을 수행하였다. 먼저 홀-드릴링은 Fig. 5(a)와 같이 홀-드릴링 용 3축 스트레인 게이지를 부착하여 광학현미경으로 스트레인 게이지의 중앙에 위치한 구멍에 정확히 설정한 후 2 mm 깊이의 구멍을 8차례로 나누어 만들었다. 각 단계별 스트레인 게이지의 변화량을 관찰하여 방향별 잔류응력을 평가하였다. 절단법은 Fig. 5(b)와 같이 용접선에 수직한 방향으로 절단 시험용 스트레인 게이지를 부착하여 시편이 절단됨에 따라 이완되는 변형률을 측정하여 연속적인 잔류응력의 변화를 얻었다. 또한 마찰교반용접법(friction stir welding)에 의해 용접된 한랭지용 천연가스 배관 재료인 API X80의 잔류응력을 계장화 압입시험으로 측정하여 그 결과를 ED-XRD와 비교하였다.

압입시험은 Fig. 6과 같은 Frontics Inc.에서 제작한 계장화 압입시험기인 Advanced Indentation System 3000(AIS 3000)을 이용하였다. 이 계장화 압입시험기는 최대하중 300 kgf인 load cell과 0.1 μm의 분해능을 가진 LVDT(linear variable displacement transducer)를 이용하여 제작되었고, 실험실뿐만 아니라 Fig. 7과 같이 각종 보조 장치를 이용하여 실제

현장에서 적용이 가능하다. 유동물성 측정 시, 반경 0.25 mm의 WC 구형압입자를 이용하였고, 최대압입 깊이는 150 μm, 압입속도는 0.2 mm/min으로 수행하였다. 한편 잔류응력 측정 시 다이아몬드 비커스 압입자를 이용, 최대하중 30 kgf와 0.2 mm/min의 압입 속도로 시험을 수행하였다.



(a) hole-drilling



(b) saw-cutting

Fig. 5 Test for validity of the residual stress evaluated in welded joint

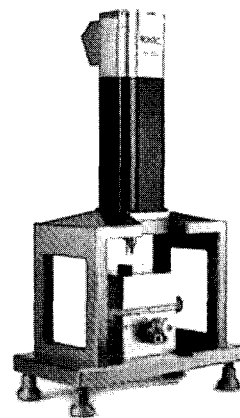


Fig. 6 Advanced indentation system made by Frontics Inc.

4. 결과 및 고찰

4.1 계장화 압입시험을 통한 유동 물성 측정 결과

Table 1에 일축인장시험과 계장화 압입시험을 통해서 얻은 유동물성을 각각 정리하였다. 그 결과 인장강도는 5%, 항복강도는 10%내외의 오차 범위 안에서 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 일부 재료의 항복강도의 오차가 상대적으로 크게 발생하는 것은 다음과 같은 이유로 생각해 볼 수 있다. 대부분의 금속재료에서 항복은 0.5% 미만의 변형에서 발생하는데 비해 계장화 압입시험에서는 최초 결정되는 진 변형률이 10  $\mu$ m의 압입깊이에서 정의된 4%의 변형률에 해당한다. 이를 지수함수로 구성된 응력-변형률 구성방정식에 의해 최적화하는 과정에서 상대적으로 낮은 변형률에 해당하는 부분이 높은 변형률 구간보다 값의 변화가 민감하게 반영되어 항복강도가 인장강도보다는 큰 오차범위를 나타내고 있음을 확인하였다[15]. 계장화 압입시험을 통해 얻어진 유동곡선과 일축인장곡선이 잘 일치하고 있음을 Fig. 8에서 볼 수 있다.

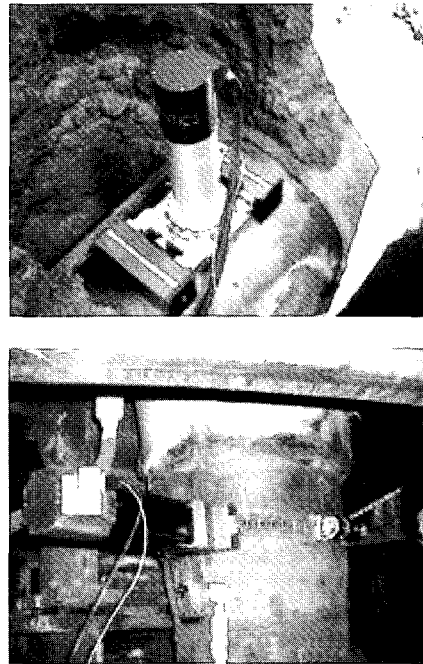


Fig. 7 Examples of indentation technique application for in-service inspection

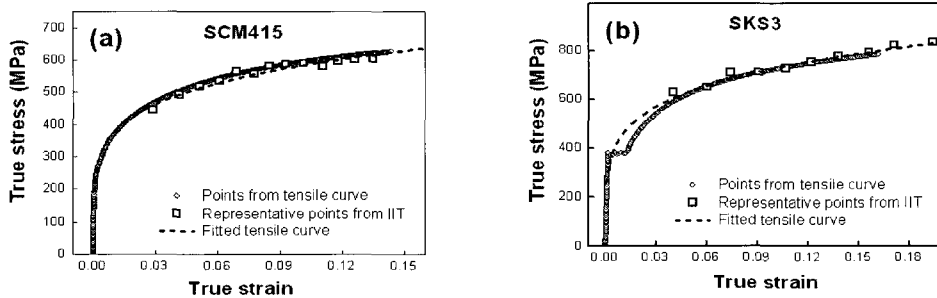


Fig. 8 Comparison between tensile curves from tensile tests and instrumented indentation test for (a) SCM 415 and (b) SKS3

Table 1 Tensile properties obtained from tensile tests and instrumented indentation tests

Materials	Yield strength (MPa)			Tensile strength (MPa)		
	Tensile	IIT	Error(%)	Tensile	IIT	Error(%)
P91	569.7	558.7	-1.9	772.0	807.5	4.6
S45C	379.2	336.4	-9.8	883.2	843.7	-4.5
SCM21	290.2	314.9	8.5	626.5	609.3	-2.8
SCM415	237.4	230.1	-3.1	616.3	620.7	0.7
SKD61	348.9	361.8	3.7	896.5	882.2	-1.6
SKS3	366.4	330.9	-9.7	781.5	810.6	3.7
API X70	592.9	550.9	-7.1	782.2	770.9	-1.4

계장화 압입시험은 재료의 유동물성을 평가하는 것뿐만 아니라 용접부와 같은 복잡한 물성분포를 보이는 국소부의 물성을 모니터링 하는데 적용할 수 있다. 일반적으로 용접부의 강도를 측정하기 위해 용접부 전체를 채취하여 인장시험을 실시하지만, 열 영향부와 같은 상대적으로 취약한 부위의 영향으로 정확한 용접부의 강도 측정은 현실적으로 불가능하다. 또한 열 영향부는 그 폭이 작아 시편을 채취하기가 어려우며, 만약 시편을 채취한다 하더라도 그 크기에 따라 강도 값은 달라진다. 그러나 계장화 압입시험은 국소 부위의 물성평가가 가능하기 때문에, 열 영향부와 같은 국부의 물성을 평가하는 데 적합하다. Fig. 9는 계장화 압입시험을 적용하여 용착금속, 열 영향부, 모재부의 강도에 대한 각 용접라인의 강도분포 결과를 보여준다. 전체적인 부위별 강도 분포는 용착 금속에서 가장 크게 나타났고, 열 영향부는 모재부와 거의 유사하거나 낮은 결과를 보였다. 이는 일반적으로 용접부에서 나타나는 강도 분포와 동일한 것으로, 계장화 압입시험의 적용을 통해 쉽고 정확하게 그 결과를 모니터링 할 수 있음을 보여준다.

4.2 계장화 압입시험을 통한 잔류응력 측정 결과

홀-드릴링 및 절단법과 동시에 계장화 압입시험을 통해 잔류응력을 측정하여, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 일반적으로 용접 재료의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 용착금속과 열 영향부에서 나타나는 잔류응력의 분포 결과가 정량적 크기 및 응력의 부호에서 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 홀-드릴링법과 절단법에 의한 X축 방향의 변형률의 변화를 관찰한 결과 용접부에서 (-)방향을 나타내었으며 이는 용접에 의해 발생한 인장잔류응력의 완화에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 열 영향부 부근에서 모재까지는 (+)의 변형률을 나타내고, 모재부로 멀어질수록 감소하여 zero가 됨을 보여준다. Table 2에 각 잔류응력 측정방법에 의한 용접부 최대 인장 잔류응력을 나타내었다. 일반적으로 용접선 주변의 잔류응력 값은 항복강도에 근접하는 크기를 가지므로 보고되어 있는데[16], 이와 비교하면 평가된 정량적 잔류응력 값은 상대적으로 작은 크기를 가짐을 알 수 있다. API X65의 경우 알려진 항복강도가 450MPa 정도임을 감안하면 용접 중심부에서 항복강도의 약 40% 정도의 잔류응력이 존재함을 알 수 있다.

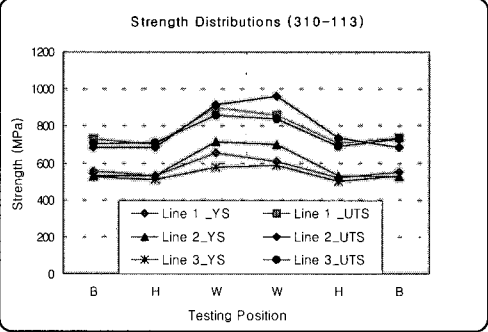
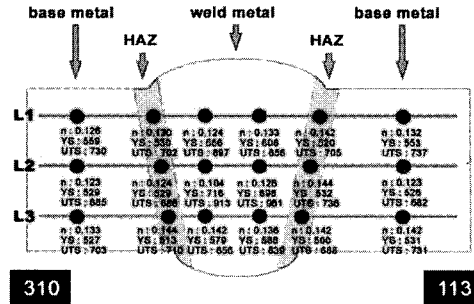
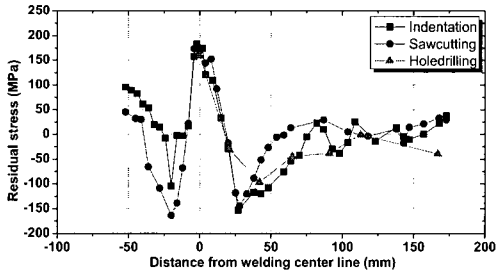
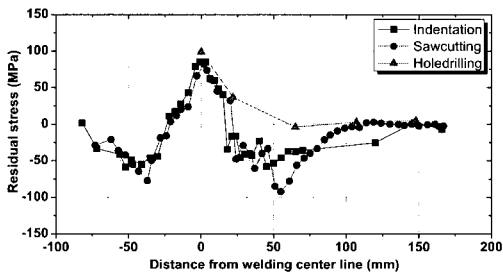


Fig. 9 The result of strength distributions for weldment



(a) API X65



(b) SS400

Fig. 10 Comparison among instrumented indentation test, hole-drilling and saw-cutting methods

Fig. 11은 마찰교반용접에 의해 접합된 API X80의 잔류응력을 계장화 압입시험과 ED-XRD를 통해 측정된 결과이다. 두 시험법에서 측정된 잔류응력의 분포가 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계장화 압입시험과 XRD법에서 용접부의 최대 압축 잔류응력이 각각 136 MPa/150 MPa, 최대 인장 잔류응력이 215 MPa/230 MPa로 거의 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 11에서 일반적인 잔류응력 분포와는 달리 용착금속 부위에서 최대 압축 잔류응력이, 열 영향부에서 최대 인장 잔류응력을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 마찰교반용접의 용접 특성에 의한 것으로 판단된다. 마찰교반용접은 일반 용접방법에 의해서 접합된 부위보다 기계적 성질이 우수할 뿐 아니라 반복용접이나 원래의 모양을 그대로 유지할 수 있다는 측면에서 상당히 유리한 것으로 알려져 있다. 통상 잔류응력에 의한 뒤틀림이 적은 장점을 가지고 있으나, 소재마다 그 영향이 다르게 나타나 잔류응력의 분포가 일반 용접법과는 다르게 형성된다고 보고된다. 그러나 이러한 복잡한 잔류응력 분포 또는 다양한 용접법과는 무관하게 계장화 압입시험을 통한 잔류응력 측정이 가능함을 이 결과로 판단할 수 있다.

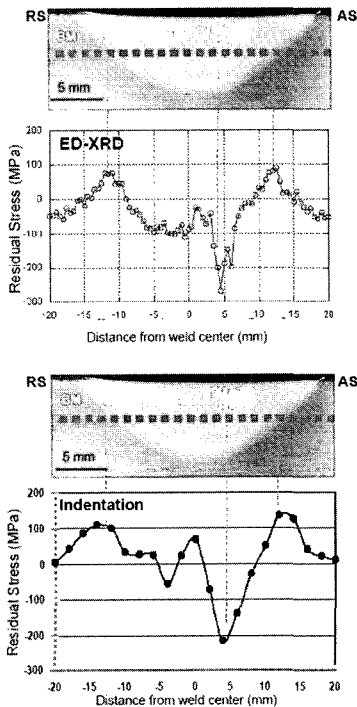


Fig. 11 Comparison of indentation test and ED-XRD for residual stress of API X80

Table 2 Comparison of the maximum tensile residual stress in a welded area

Materials	Maximum tensile residual stress (MPa)		
	Indentation	Hole-drilling	Saw cutting
API X65	175	174	159
SS400	88	99	82

5. 결론

계장화 압입시험법은 압입하중에 따른 압입깊이의 연속적인 측정을 통해 압입하중-변위곡선을 분석하여 유동특성, 잔류응력, 과과인성 등의 다양한 기계적 특성을 평가하는 신기술이다. 이는 교량, 발전설비 등의 대형구조물과 송유, 가스관 등의 배관 설비 및 철강, 자동차, 항공기 등의 다양한 분야의 기계적인 특성의 평가에 적용되어 설비의 안전성 및 경제성 증가에 큰 기여를 할 수 있다. 이에 본 고에서는 계장화 압입시험을 통해 유동특성과 잔류응력에 대한 원리와 적용 사례를 살펴보았으며, 그것을 정리하면 다음과 같다.

1. 구형압입자로 재료를 압입할 때 발생하는 재료의 변형양상을 분석하여 진응력과 진변형률을 정의하였고, 이를 구성방정식에 최적화시켜 재료의 전체 변형속성 및 유동물성을 측정할 수 있다.
2. 재료의 표면에 잔류응력이 존재하면 압입하중 인가곡선의 기울기가 변화한다. 동일한 최대압입 깊이에 도달하기 위해 인장잔류응력 시에는 무응력 상태에 비해 낮은 압입하중이 필요하며, 압축잔류응력 시에는 높은 압입하중이 필요하다. 이러한 압입하중 인가곡선의 변화를 비교하여 측정되는 잔류응력 유도 수직하중을 분석함으로써 정량적인 잔류응력을 측정할 수 있다.
3. 계장화 압입시험을 통해 유동물성을 측정하여 일축인장시험과 비교하였다. 그 결과 항복강도는 오차범위 10%내외, 인장강도는 5%내외의 정확도를 보였다. 또한 국부적인 물성 측정이 가능하며, 용접부와 같은 복잡한 물성 분포를 보이는 국소부의 유동물성 측정을 통해 물성분포를 도식화 하였다.
4. 계장화 압입시험은 용접부 잔류응력의 정량적인 평가와 그 분포의 정확한 예측이 가능하며, 가동 중인 설비에 비파괴적으로 직접 적용할 수 있는



장점이 있다. 또한 X-ray법 등의 기존 잔류응력 측정 방법과 달리 무응력 곡선을 얻기 위해 별도의 시편을 요구하지 않으며, 재료의 미세조직 또는 결정성에도 그 결과에 큰 영향이 없어 잔류응력의 측정이 요구되는 다양한 산업 및 연구 전반에 손쉽게 적용할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] C. O. Ruud, et al., "Comparison of three residual-stress measurement methods on a mild steel," *Experimental mechanics*, Vol. 25, pp. 338-343, (1985)
- [2] J. W. Joo and C. K. Park, "Determination of non-uniform residual stress by the hole drilling method," *Transaction of KSME, A*, Vol. 22, pp. 268 - 277, (1998)
- [3] J.-H. Ahn and D. Kwon, "Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentation: examination of strain definition and pileup effect," *Journal of Materials Research*, Vol. 16, pp. 3170-3178, (2001)
- [4] Haggag, F. M., "In-Situ measurements of mechanical properties using novel automated ball indentation system," *ASTM STP 1204*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 27-44, (1993)
- [5] Jung-Suk Lee and Dongil Kwon, et al., "An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: a critical indentation energy model based on continuum damage mechanics," *Acta Materialia* Vol. 54, pp. 1101-1109, (2006)
- [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," *Journal of Materials Research*, Vol. 17, pp. 901-906, (2002)
- [7] Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., "A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation," *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 5755-5767, (1998)
- [8] H. A. Francis, "Phenomenological analysis of plastic spherical indentation," *Transaction of the ASME (Series H)*, Vol. 9, pp. 272-281, (1976)
- [9] D. Tabor, "Hardness of metals," 2nd, Clarendon Press, Oxford, (1951)
- [10] Tsui, T. Y., et al., "Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: part I. experimental studies in an Aluminum alloy," *Journal of Materials Research*, Vol. 11, pp. 752-759, (1996)
- [11] R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity," Clarendon, Oxford, (1956)
- [12] K. L. Johnson, "Contact Mechanics," Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, pp. 84-106 (1985)
- [13] Y-H Lee, et al., "응력 상호작용과 연속압입 기법을 이용한 SS400 강봉의 굽힘 잔류응력 평가," *대한금속재료학회지*, 40권 10호, pp. 1042-1047, (2002)
- [14] Oliver, W. C. and Pharr, G. M., "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, pp. 1564-1583, (1992)
- [15] J. Y. Kim, "Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: representative stress and strain approach," *Surface and Coating Technology*, A(2006)
- [16] 국정환, 김덕중, 연윤모, "용접재료학," pp. 66, (2000)