

기계적 특성 기반의 산업시설 안전성 평가를 위한 계장화 압입시험법의 응용

김국환, 김영천, 이경우, 김광호*, 권동일
서울대학교, *(주)프론틱스

Safety assessment for structures and facilities using instrumented indentation technique

Kug-Hwan Kim, Young-Cheon Kim, Kyung-Woo Lee, Kwang-Ho Kim*, Dongil Kwon
Seoul National University, *Frontics Inc.

1. 서론

우리나라의 주요 기간산업인 발전/석유화학 산업은 1970년대 급격한 경제성장과 더불어 그 규모면에서 세계수준으로 성장하였다. 현시점에서 설비의 상당부분이 표준적인 설계허용시간을 넘어섬으로써 노화 설비에 대한 폐기, 보수 또는 교체를 결정할 시기에 도달하였다. 국내를 포함해 세계 각국의 많은 고온 플랜트의 운용자들은 자신들의 설비에 대하여 경제적 관점에서 설계수명을 넘어선 장시간 운전을 희망하고 있는데, 이 경우 가능한 정량적인 열화도 평가와 이를 바탕으로 한 수명예측을 통하여 보수 및 교체시기를 결정하여야 한다.

사용 중인 설비의 재료 적합성과 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 크리프시험, 인장시험, 잔류응력시험 등 각종 파괴적인 시험법을 실시할 수밖에 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. 인장물성의 평가로서는 일축인장 시험이 전 세계적으로 표준화되어 사용되고 있으나, 표준시편의 가공을 위한 시편 채취 및 가공의 문제로 인해 운용중이거나 설치 완료된 구조물체의 적용은 불가능하다. 따라서 시편 채취의 제한이 적으며, 국소 부위의 강도 특성과 잔류응력 효과를 정확히 평가할 수 있는 새로운 시험법의 개발이 필요하게 되었다.

상기 문제점에 대한 해결 방안으로 가장 구체적으로 현실화된 것이 바로 계장화 압입시험법이다. 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거하고 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 연속적으로 측정, 그 결과를 분석함으로써, 경도는 물론 일축인장시험과 같이 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 포함하는 소재의 인장물성과 적절한 모델링을 바탕으로 잔류응력, 파괴특성도 평가할 수 있다.¹⁻⁵ 이러한 계장화 압입시험법을 활용하여 인장물성을 평가할 경우, 발전/석유화학설비에 대한 사용적합성을 평가에 필요한 주요 자료로서 활용할 수 있을 뿐 아니라, 품질관리 측면에서 사용 전 시험(pre-qualification test)으로써 구조물의 기본적인 건전성 확보가 가능하게 된다는 큰 장점이 있다.

본 연구에서는 계장화 압입시험법을 이용한 인장물성과 잔류응력의 측정 원리를 설명하고 실제 기계적 특성을 평가한 결과들을 소개하고자 한다.

2. 이 론

2.1. 계장화 압입시험을 이용한 인장물성 평가

계장화 압입시험 시, 구형 압입자와 시편 간의 접촉깊이는 그림 1에 나타나 있는 압입하중 인가/제거곡선을 분석하여 평가한다.

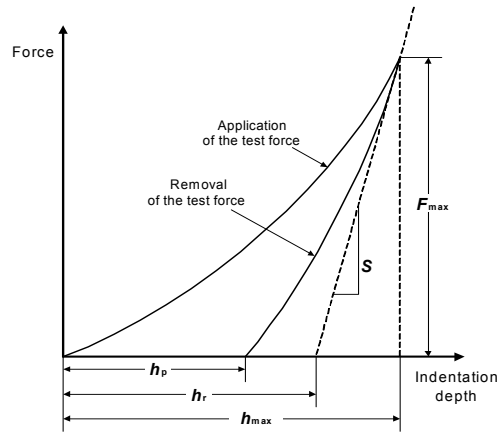


Fig. 1. The load-depth curve obtained during instrumented indentation test

이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘사한 것으로, 최근 연구에 따르면, 압입자/시편의 접촉깊이는 압흔주변의 pile-up/sink-in 양상에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이를 고려함으로써 수정된 접촉깊이 h_c 를 평가할 수 있다.³

$$h_c = h_{max} - w \frac{F}{S} + h_{pile}$$

(1)

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 평균 접촉압력과 변형률이 점차 증가하기 때문에 이로부터 일축 인장시험과 마찬가지로 인장특성을 평가하는 연구가 진행되었다. 따라서 인장특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 인장응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다.

우선 인장응력은 식 (2)과 같이 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 인장응력의 비인 소성구속인자 ψ 를 결정함으로써 평가한다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} = \frac{1}{\psi} \frac{F_{max}}{A_c}$$

(2)

소성구속인자 ψ 는 Francis⁶의 연구와 압입자 하부 변형상황의 모델링을 통해 제시된 탄성, 탄/소성, 완전소성의 각 단계 별 모델링 결과가 제시되어 있으나, 완전소성변형 영역까지의 천이 속도가 빨라서 현재 인장응력의 분석에는 주로 ψ 값을 3으로 하는 식을 사용한다.⁷

압입변형률은 압입자 반경과 압입깊이와의 기하학적 관계를 이용하여 구할 수 있다. 이 때 압입시험시의 대표적인 변형률은 압입변형이 최대가 되는 지점으로 정의하여 최종적으로는 식 (3)과 같은 압입변형률을 정의하였다.¹

$$\varepsilon = \frac{a}{\sqrt{1 - (a_c/R)^2}} \frac{a_c}{R}$$

(3)

식 (2, 3)에 의해 얻어진 대표변형률, 대표응력 값은 각 재료의 변형 속성을 나타내는 식 (4)과 같은 구성방정식에 최적화시킴으로써 인장물성을 측정할 수 있다. 여기서 K 는 응력계수, n 은 가공경화지수이다.

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

(4)

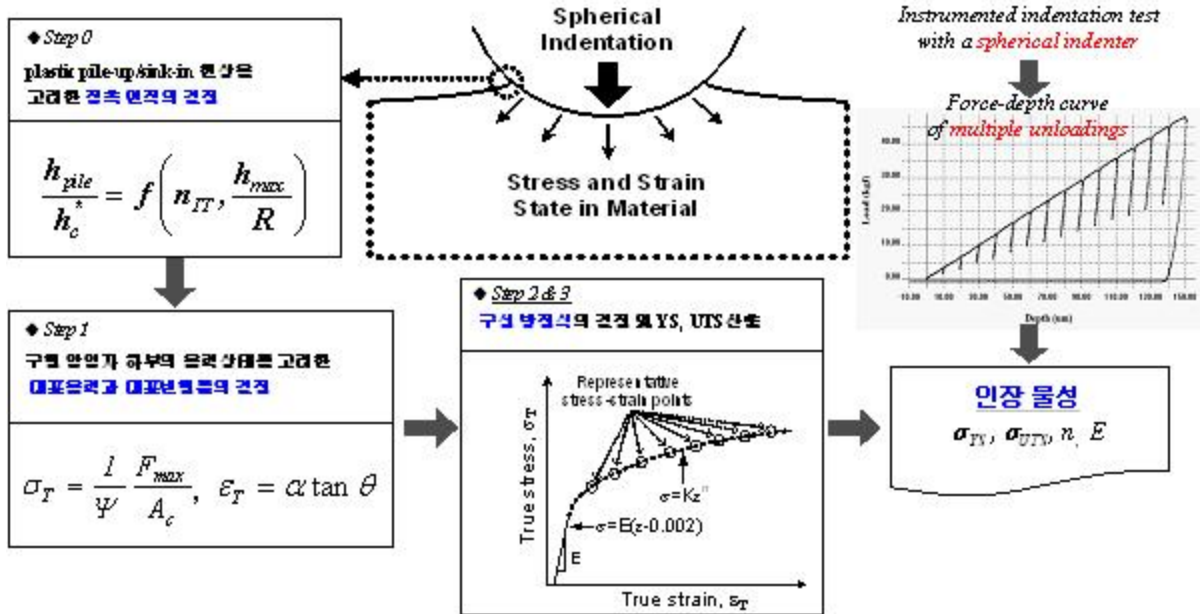


Fig. 2. Schematic flow for measuring tensile properties using IIT

2.2. 계장화 압입시험을 이용한 잔류응력 평가

시험편 표면에 평행하게 2축 인장/압축 잔류응력이 존재하면 그림 3과 같이 압입하중 인가곡선의 기울기가 변화한다. 동일한 최대압입깊이에 도달하기 위해 인장 잔류응력을 갖는 시험편은 무응력상태에 비해 낮은 압입하중이 필요하고, 이와 반대로 압축 잔류응력을 갖는 시험편은 높은 압입하중이 필요하다. 이러한 압입하중의 감소 및 증가분은 잔류응력의 영향으로 판단할 수 있다. 그러므로 계장화 압입시험으로 측정된 무응력 및 잔류응력 상태의 압입하중 인가곡선의 비교를 통해 측정되는 잔류응력 유도 수직하중을 분석하여 정량적인 잔류응력을 평가할 수 있다.

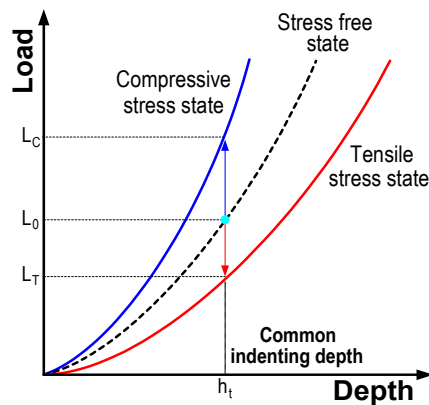


Fig. 3. Variation of indentation loading curves with changes in the stress state

본 연구에서는 잔류응력에 의한 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 정의하였다. 여기서 F_{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 압

입하중 차이가 발생한다.

$$\frac{1}{\psi} \frac{F_{res}}{A_c} = \frac{-(1+\nu)}{3} \sigma_{res}$$

(5)

3. 실험

인장물성의 측정을 위해 5개의 철강 재료(SCM21, SKD61, S45C, SUS420, API X70)를 3×3×2cm 크기의 시편으로 가공하여 압입시험을 수행하고, 그 결과와 비교하기 위하여 일축인장시험을 수행하였다. 사용 중 설비의 인장물성 측정을 위해 원자력발전설비의 보조냉각수 계통 배관(외경 12인치)에 대하여 압입시험을 수행하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 계장화 압입시험기를 부착하여 배관 용접부의 용착금속과 용접열영향부(HAZ), 모재의 각 부분별 실험을 진행하였다. 용착금속은 AWS E7016이며, 모재는 ASTM A106B로 이루어져 있다. 압입시험은 Frontics Inc.에서 제작된 계장화 압입시험기인 Advanced Indentation System 3000 (AIS3000)을 이용하였다.

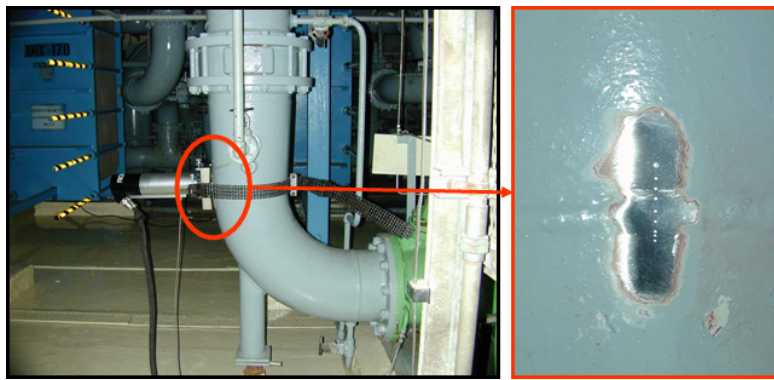


Fig. 4. Test for power plant

4. 결과 및 고찰

일축인장시험과 계장화 압입시험을 통해서 얻는 인장물성을 표 1에 정리하였다. 인장강도와 항복강도 모두 10% 내외의 오차 범위 안에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 계장화 압입시험을 통해 얻어진 인장곡선과 일축인장곡선이 잘 일치하고 있음을 그림 5에서 확인할 수 있다. 이로부터 계장화 압입시험은 일축인장시험의 훌륭한 대체자로 볼 수 있다.

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
S45C	372.9	336.4	-9.8 %	883.2	843.7	-4.5 %
SCM21	290.2	314.9	8.5 %	626.5	609.3	-2.8 %
SUS420	431.3	398.5	8.2 %	844.7	797.7	5.9 %
SKD61	348.9	361.8	3.7 %	896.5	882.2	-1.6 %
API X70	592.9	550.9	-7.1 %	782.2	770.9	-1.4 %

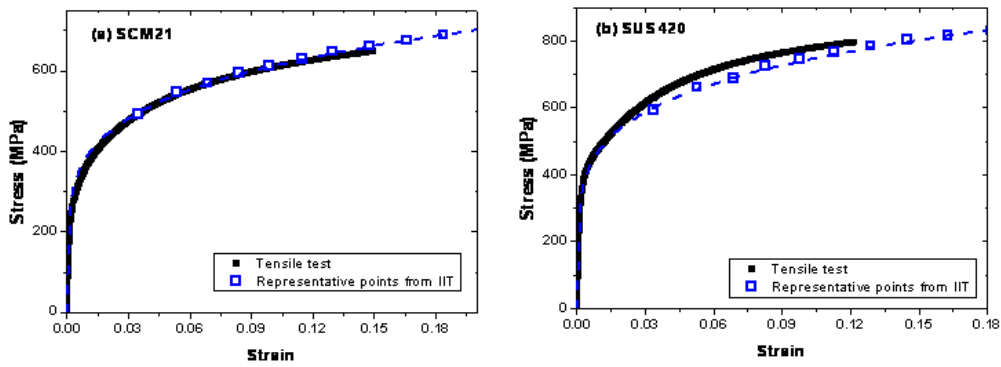


Fig. 5. Comparison between tensile curves from tensile test and instrumented indentation test

계장화 압입시험을 통한 인장물성 측정이 타당함을 일축인장시험 결과와의 비교로부터 확인하였기 때문에, 실제 사용 구조물인 원전설비 냉각수 배관의 기계적 물성 평가에 압입시험을 적용하였다. 압입시험을 수행한 위치와 각 위치별 압입하중 인가곡선은 그림 6과 같다. 표 2에 계장화 압입시험을 통해서 얻은 각 부위별 인장물성을 정리하였다. 동일한 압입깊이에 대해서 소재가 나타내는 압입 저항성에 대한 저항성으로 볼 때 용착금속이 가장 높은 저항을 나타내었고, 열영향부, 모재의 순으로 낮아짐을 알 수 있으며, 이러한 경향성과 일치하여 결과적으로 얻어진 인장곡선, 항복강도, 인장강도 등도 동일한 분포특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 이를 현장실험결과와 PQR (Pre-Qualification Record)에 기록된 물성을 비교한 결과, 거의 유사함을 확인하였다.

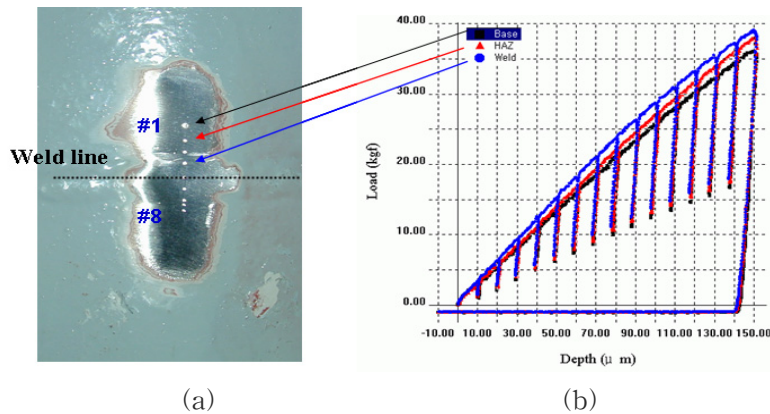


Fig. 6. (a) Test positions and (b) load-depth curves

Table 2. The results of strength distribution for weldment

Position	σ_{YS}	σ_{UTS}	n	Region
1	359	546	0.173	Base
2	398	529	0.127	HAZ
3	412	576	0.144	Weld
4	433	566	0.093	Weld
5	399	583	0.184	Weld
6	362	549	0.171	HAZ
7	367	517	0.149	HAZ
8	321	508	0.185	Base

계장화 압입시험을 통해 STS316L 용접배관의 잔류응력을 측정하여, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 최대인장 잔류응력은 용착금속에서 225MPa로 나타났으며, 용접선에서 멀어짐에 따라 (-)방향

을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 용접에 의해 발생한 인장잔류응력의 완화에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 열영향부에 부근에서 모재까지는 (-)의 변형률을 나타내고, 모재부로 갈수록 잔류응력의 절대값은 감소하여 zero가 된다. 일반적으로 용접선 주변의 잔류응력값은 항복강도에 근접하는 크기를 가진 것으로 보고되어 있는데, 이와 비교하면 본 실험에서 평가된 잔류응력 값은 상대적으로 작은 크기를 가짐을 알 수 있다. STS316L의 경우 알려진 항복강도가 300MPa 정도임을 감안하면 용접 중심부에서 항복강도의 약 75% 정도의 잔류응력이 존재함을 알 수 있다.

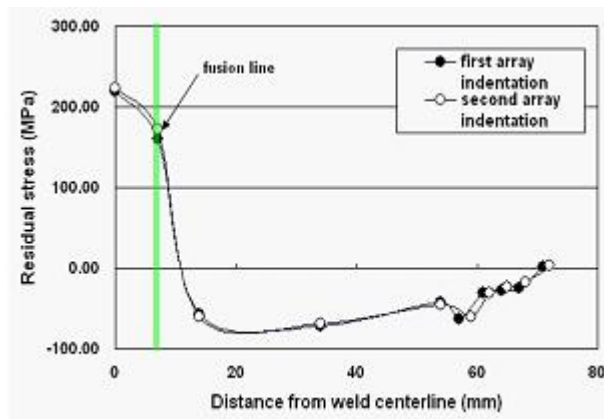


Fig. 7. Residual stresses measured by indentation test

5. 결론

본 연구에서는 계장화 압입시험을 활용하여 발전설비/산업구조물의 안전성 평가를 위한 기계적 물성을 측정하는 사례를 소개하였다. 계장화 압입시험을 통해 인장물성을 측정하여 일축인장시험과 비교한 결과, 항복강도 및 인장강도가 10%내외의 오차를 보였으며, 이를 바탕으로 실사용 원자력설비의 인장물성 측정을 하였다. 또한 잔류응력의 정량적인 평가와 그 분포의 정확한 예측이 가능함을 확인하였다. 따라서 국내외 발전설비 및 구조물에 대한 정기적인 소재 물성의 진단을 통한 건전성 평가에 계장화 압입시험의 현장 적용 범위가 넓어질 것으로 예측된다.

6. 참고문헌

1. Ahn, J. H.; Kwon, D. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentation: examination of strain definition and pileup effect, *J. Mater. Res.*, **2001**, *16*, 3170-3178
2. Oliver, W. C.; Pharr, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *J. Mater. Res.*, **1992**, *7*, 1564-1583
3. Kim, J. Y.; Lee, K. W.; Lee, J. S.; Kwon, D. Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: representative stress and strain approach, *Surf. Coat. Tech.*, **2006**, *201*, 4278-4283
4. Lee, Y. H.; Kwon, D. Estimation of Biaxial Surface Stress by Instrumented Indentation with Sharp Indenters, *Acta Mater.*, **2004**, *52*, 1555-1563

5. Lee, J. S.; Jang, J.-i.; Lee, B. W.; Choi, Y.; Lee, S. G.; Kwon, D. An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: a critical indentation energy model based on continuum damage mechanics, *Acta Mater.*, **2006**, *54*, **1101-1109**
6. Francis, H. A. Phenomenological analysis of plastic spherical indentation, *Trans. of the ASME (Series H)*, **1976**, *9*, **272-281**
7. Tabor, D. *Hardness of metals*, 2nd Edition, Clarendon Press, **1951**, **Chap. VII**

