

발전설비 용접구조물의 건전성 확보를 위한 계장화 압입시험법의 적용

김국환* · 이경우* · 최민재* · 김광호** · 권동일†

Application of Instrumented Indentation Technique to Integrity Assessment of Welded Structures in Power Plants

Kug-Hwan Kim*, Kyung-Woo Lee*, Min-Jae Choi*, Kwang-Ho Kim** and Dongil Kwon†

ABSTRACT

The repair and replacement of worn components in the power plants is safety-critical because they operate in severe environments involving high temperatures, high pressures, and strong neutron irradiation. In order to prevent accidents, it is thus essential both to assess accurately the materials properties in current power plant facilities and also to develop alternative materials that can enhance safety and durability. Our research focuses on establishing standards for repair/replacement and integrity assessment in welded structures of power plants. The present work adopts an instrumented indentation technique (IIT) to assess the safety based on material properties, a technique developed as a novel method for nondestructive testing of in-service structures. The tensile properties and residual stress of each component were evaluated using IIT and the results suggest the feasibility of safety assessment of power plant facilities by in-situ IIT monitoring of mechanical properties.

Key Words : Instrumented indentation technique(계장화 압입시험), Integrity assessment(건전성 평가), Tensile property(인장물성), Residual stress(잔류응력)

기호설명

h_c = contact depth
 a_c = contact radius
 A_c = contact area
 S = stiffness
 ψ = plastic constraint factor
 α = strain coefficient
 P_m = mean pressure
 σ_{UTS} = ultimate tensile strength

σ_{YS} = yield strength
 n = work-hardening exponent
 K = strength coefficient
 p = stress ratio
 σ_{res} = residual stress

1. 서론

최근 들어 발전설비 및 석유 화학공장 등의 가동기간이 오래되어 기계설비의 설계수명에 다다르고 있다. 이에 따라 노후설비의 교체 및 기존 설비의 유지 보수를 위한 건전성 평가 및 잔여수명 평가에 대한 연구가 필요하게 되었다. 이러한 건전성 평가의 목적으로는 노후 된 설비의 예기치

† 권동일, 회원, 서울대학교 재료공학부 교수
E-mail : dongilk@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7104 FAX : (02)886-4847

* 서울대학교 재료공학부

** Frontics Inc.

얇은 파괴에 따른 산업 재해를 방지하고, 정상 운전조건을 지속적으로 유지하는 한편, 명확한 설비의 건전성 평가를 통한 새 설비의 건설시기를 조절함으로써 경제적인 부담을 감소시키는 데 있다. 이에 따라 사용 중 구조물의 기계적 특성을 분석하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 용접부는 야금학적 및 역학적으로 불균질재의 대표적인 예가 될 수 있는데, 구조물의 대형화 경향에 따라 용접이 차지하는 비중이 커지면서 용접부의 재질적 불균질성에 관한 다양한 공학적 관심들이 부상되고 있다. 그러나 기존의 소재 물성 평가를 위한 표준 방법인 일축인장 시험 및 파괴역학 시험의 경우, 변형 및 파괴 거동에 대한 많은 정보를 제공하고 있지만, 일정 크기와 형태를 갖춘 표준시험편이 필요하므로 내부에 다양한 미세조직 변화 및 이에 기인한 물성 변화를 가진 용접부의 특정부위 평가에 적용하기에는 아직 많은 어려움이 있다. 특히 용접열영향부의 기계적 성질 평가는 다양한 연구 노력에도 불구하고 아직까지 규칙화되지 못하여, 구조물의 결함에 대한 사용적합성 평가 코드들에서도 열영향부에 대한 정확한 평가는 미제로 남아있다.¹⁾ 또한 기존의 표준 시험법들은 실험실적 파괴시험법들로서 현장 물성을 정확히 반영하지 못한다는 점 역시 큰 제한 사항이다.

상기 문제점에 대한 해결 방안으로 현장에서 기계적 성질을 평가하려는 많은 연구가 수행되었는데, 그 중에서도 가장 구체적으로 현실화된 것이 바로 계장화 압입시험법이다.²⁻⁵⁾ 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거하고 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 연속적으로 측정, 그 결과를 분석함으로써, 경도는 물론 일축인장시험과 같이 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 포함하는 소재의 인장물성²⁻⁴⁾과 적절한 모델링을 바탕으로 잔류응력⁴⁾, 파괴특성⁵⁾도 평가할 수 있다. 이러한 계장화 압입시험법을 활용하여 인장물성을 평가할 경우, 발전설비/용접부에 대한 사용적합성(FFS, Fitness-For-Service)을 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 고에서는, 계장화 압입시험법을 이용하여 인

장응력 및 변형률을 고려해 인장물성과 잔류응력의 측정 원리를 설명하고 실제 기계적 특성을 평가한 결과들을 소개하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 계장화 압입시험을 이용한 인장 특성 평가

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

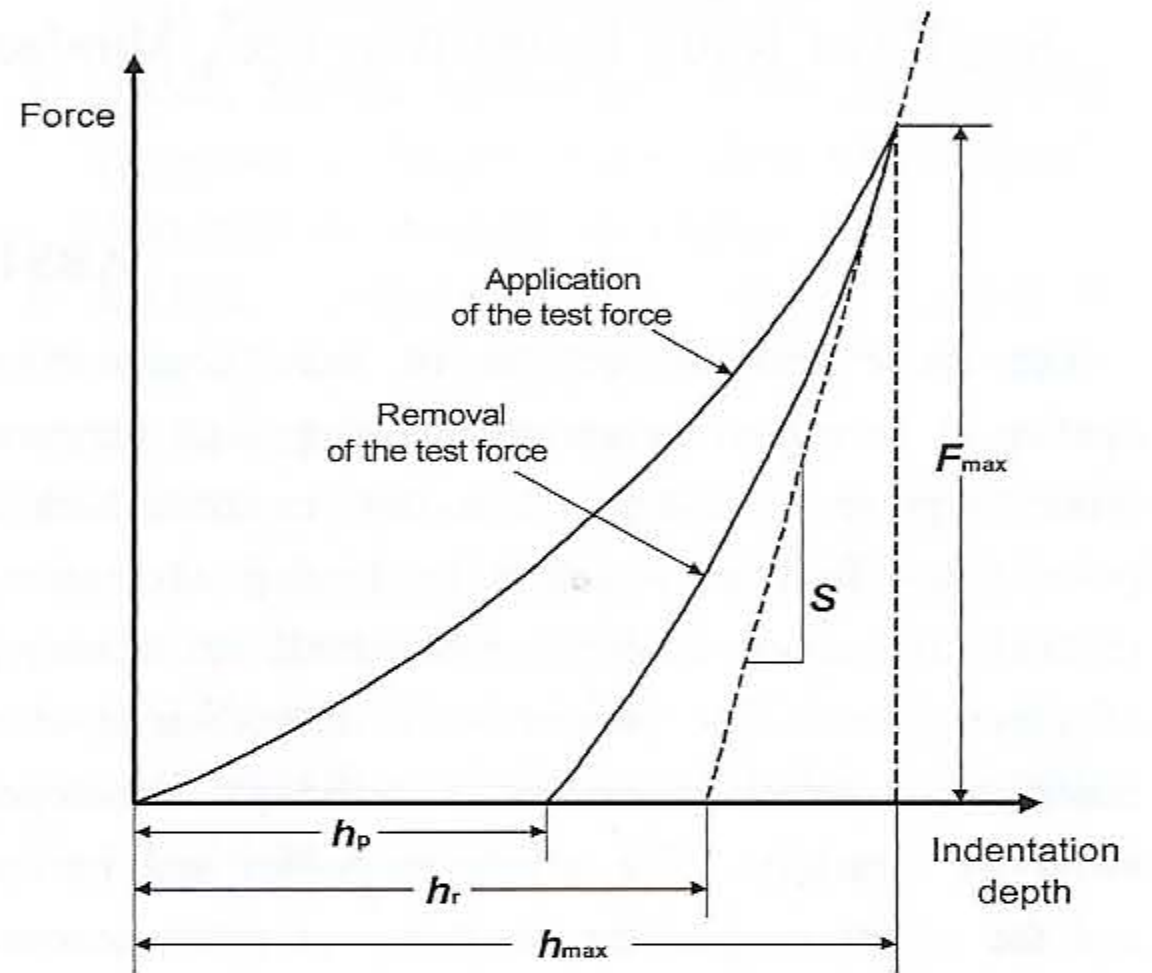


Fig. 1 The load-depth curve obtained during instrumented indentation test

이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘사한 것이며, 이에 추가적으로 탄성굽힘 및 pile-up 현상에 의한 오차가 보정되어야 실제 접촉깊이가 결정된다. 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를 w 라는 압입자 형태로 보정한 식이 제시되었다.⁶⁾ 그러나 최근 연구에 따르면, 압입자/시편의 접촉반경은 압흔주변의 pile-up/sink-in양상에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 확인되었고, 이를 고려함으로써 수정된 접촉반경 a_c 를 평가할 수 있다.²⁾

$$h_c = h_{max} - w \frac{F}{S} + h_{pile} \quad (1)$$

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 평

균 접촉압력과 변형률이 점차 증가하기 때문에 이로부터 일축 인장시험과 마찬가지로 인장특성을 평가하는 연구가 진행되었다. 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역으로 천이됨이 알려져 있다. 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.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} = \frac{1}{\psi} \frac{F_{max}}{A_c} \quad (2)$$

소성구속인자 ψ 은 Francis⁷⁾의 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.⁸⁾

변형률을 정의하는 초기 연구에서는 압입자의 형상과 소성접촉반경을 관련지어 실험적으로 압입 변형률을 $0.2a_c/R$ 로 표현하였으나, 실험적인 한계로 인해 몇 가지 강재에서만 유효한 결과를 나타내었다. 따라서 최종적으로는 압입자 반경과 압입 깊이와의 기하학적 관계를 이용하여, 압입 방향인 z축 방향의 변위를 정의하고 이를 미분하여 변형률을 얻게 된다. 이 때 압입시험시의 대표적인 변형률은 압입변형이 최대가 되는 지점으로 정의하여 최종적으로는 식 (3)과 같은 압입변형률을 정의하였다.³⁾

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a_c/R)^2}} \frac{a_c}{R} \quad (3)$$

식 (2, 3)에 의해 얻어진 대표변형률, 대표응력 값은 각 재료의 변형 속성을 나타내는 식 (4)과 같은 구성방정식에 최적화시킴으로써 인장물성을 측정할 수 있다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (4)$$

여기서 K 는 응력계수, n 은 가공경화지수이다.

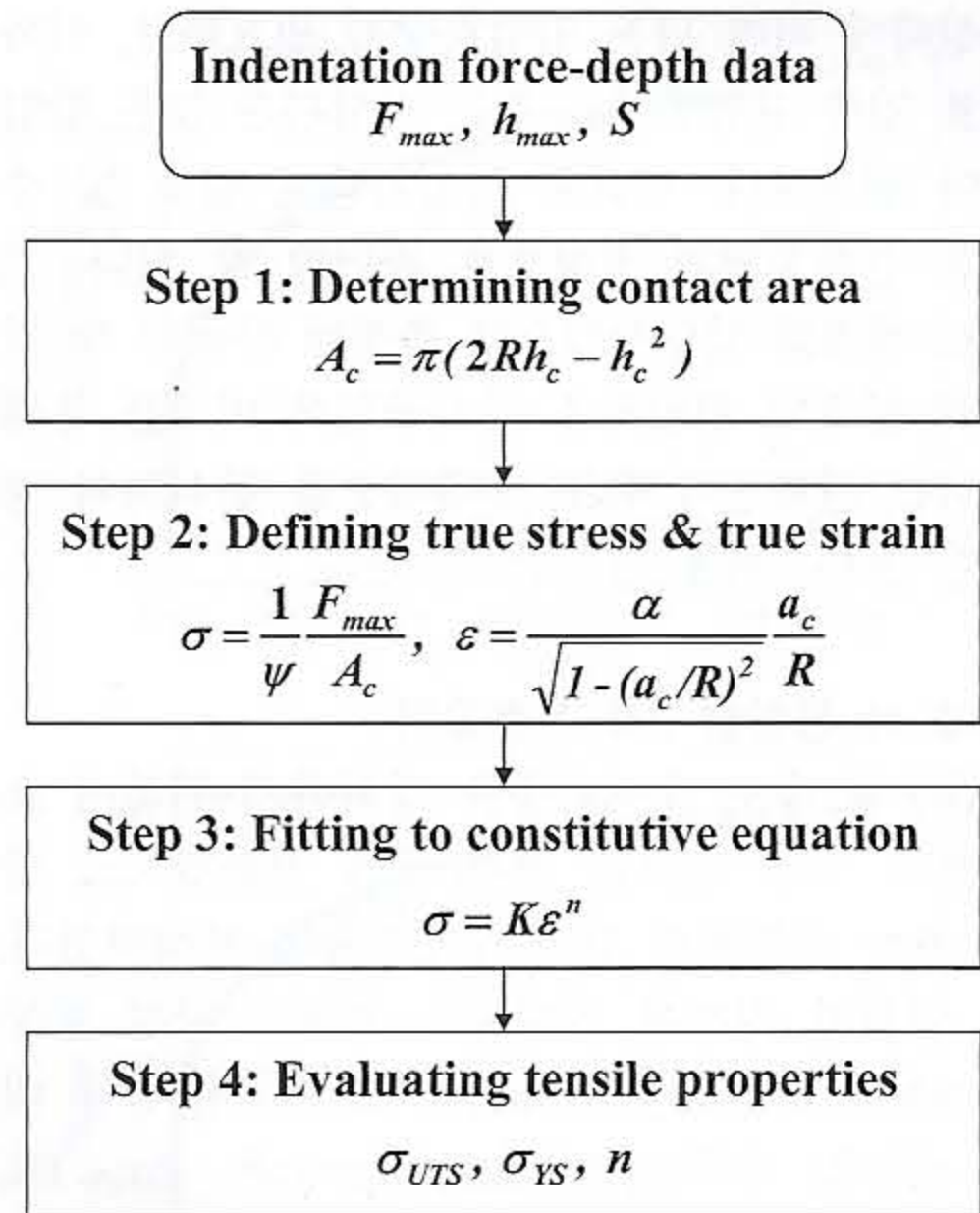


Fig. 2 Schematic flow for measuring tensile properties using IIT

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.^{9,10)} 동일한 최대압입깊이에 도달하기 위해 인장 잔류응력을 갖는 시험편은 무

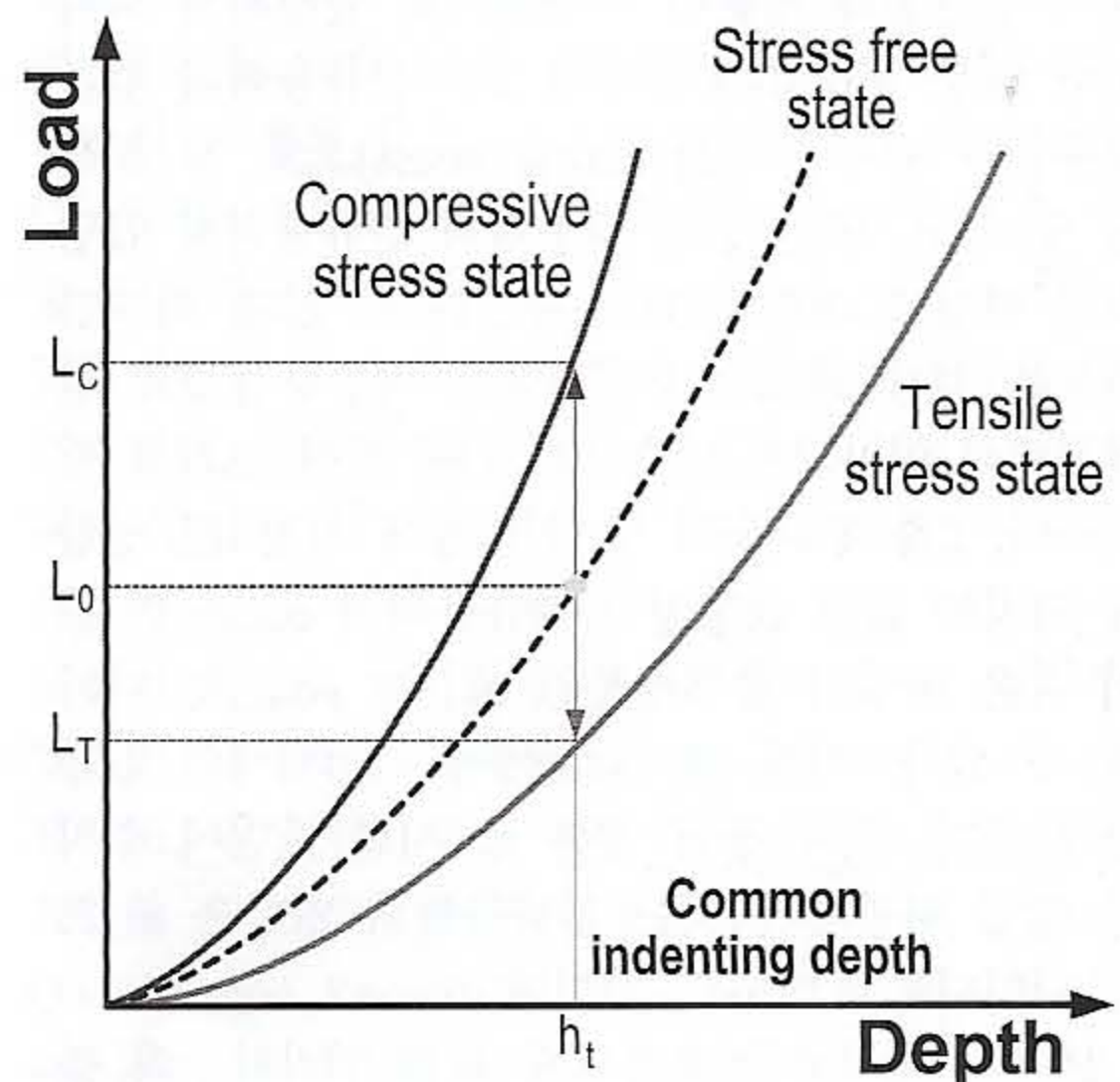


Fig. 3 Variation of indentation loading curves with changes in the stress state

응력상태에 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.

2.2.2 비 등방향 2축 잔류응력

잔류응력 유도 수직하중을 정의하기 위하여 소성변형과 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 $-2\sigma_{ys}/3$ 로 결정하였다. 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. 11 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 복잡한 압입변형 응력장 중 코어 내부의 응력($-2\sigma_{ys}/3$)과 외부에서 인가되는 등방향 2축 잔류응력, $\sigma_{res}(\sigma_{res,x}=\sigma_{res,y}, \sigma_{res,z}=0)$ 와의 상호중첩을 고려하였다. 등방향 2축 잔류응력을 코어에 인가하면 내부의 정수압은 변화되어 전단응력 성분이 부가적으로 발생하게 되며 코어 내부 정수압과 등방향 2축 잔류응력의 합은 정수압과 편차응력(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 큰방향의 잔류응력이 $\sigma_{res,x}$ 이면 값이 작은 방향의 응력성분인 $\sigma_{res,y}$ 는 $p\sigma_{res,x}$ 로 나타낼 수 있다. 이때 p 는 -1.0 에서 $+1.0$ 사이의 값을 갖게 된다. 편차 응력 성분 중 시편 표면에 수직인 압입 하중에 미치는 잔류응력의 영향은 σ_{33} 으로 나타나는 $-(1+p)\sigma_{res,x}/3$ 이다.

본 연구에서는 잔류응력에 의한 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 새롭게 정의하였다.

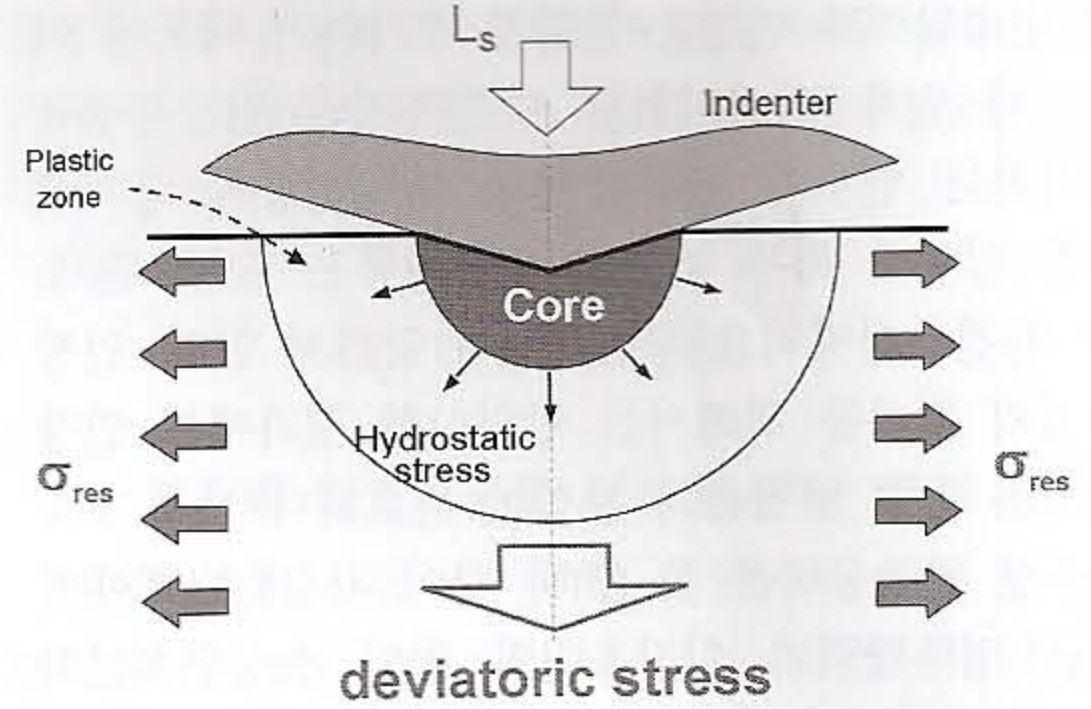


Fig. 4 Stress interaction between residual stress and hydrostatic stress in the incompressible core of an elastic/plastic indentation

$$\frac{1}{\psi} \frac{F_{res}}{A_c} = \frac{(1+p)}{3} \sigma_{res} \quad (5)$$

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 압입하중 차이가 발생한다. p 는 비등방 2축 응력 계수로서 본 연구에서는 $1/3$ 로 가정한다.

3. 실험

인장물성의 측정을 위해 5개의 철강 재료(SCM21, SKD61, S45C, SUS420, API X70)를 $3 \times 3 \times 2$ cm 크기의 시편으로 가공, emery paper 2000번까지 연마를 하여 압입시험을 수행하고, 그 결과와 비교하기 위하여 일축인장시험을 수행하였다. 사용 중 설비의 인장물성 측정을 위해 원자력발전설비의 보조냉각수 계통 배관(외경 12인치)에 대하여 압입시험을 수행하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 계장화 압입시험기를 부착하여 배관 용접부의 용착금속과 용접열영향부(HAZ), 모재의 각 부분 별 실험을 진행하였다. 용착금속은 AWS E7016이며, 모재는 ASTM A106B로 이루어져 있다. 또한 직경 600mm, 두께 7mm의 규격을 갖는 일반구조용 강재STS316L 용접배관 일부를 채취하여 계장화 압입시험을 통하여 잔류응력을 분석하였다.

압입시험은 Frontics Inc.에서 제작된 계장화 압입시험기인 Advanced Indentation System 3000 (AIS3000)을 이용하였다. 이 계장화 압입시험기는

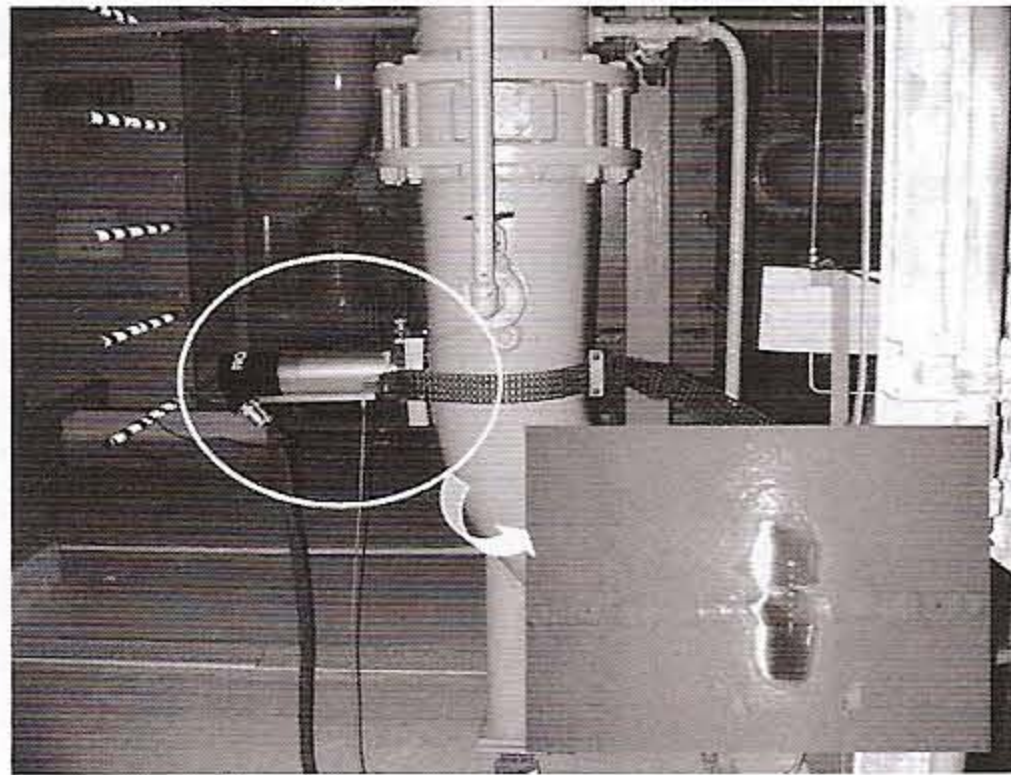


Fig. 5 Test for welded joint

최대하중 300kgf인 load cell과 0.1 μ m의 분해능을 가진 LVDT를 이용하여 제작되었고, 각종 보조 장치를 이용하여 실험실 뿐 만 아니라 실제 현장에서 적용이 가능하다. 인장물성 측정 시, 반경 0.25mm의 WC 구형압입자를 이용하였고, 최대압입깊이는 150 μ m, 압입속도는 0.3mm/min으로 수행하였다. 한편 잔류응력 측정 시, 다이아몬드 비커스 압입자를 이용, 최대하중 30kgf와 0.3mm/min의 압입속도로 시험을 수행하였다. 모든 실험은 상온에서 이루어졌다.

4. 결과 및 고찰

4.1 계장화 압입시험을 통한 인장물성 측정 결과

일축인장시험과 계장화 압입시험을 통해서 얻는 인장물성을 Table 1에 정리하였다. 인장강도와 항복강도 모두 10% 내외의 오차 범위 안에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 계장화 압입 시험을 통해 얻어진 인장곡선과 일축인장곡선이 잘 일치하고 있음을 Fig. 6에서 확인할 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 %

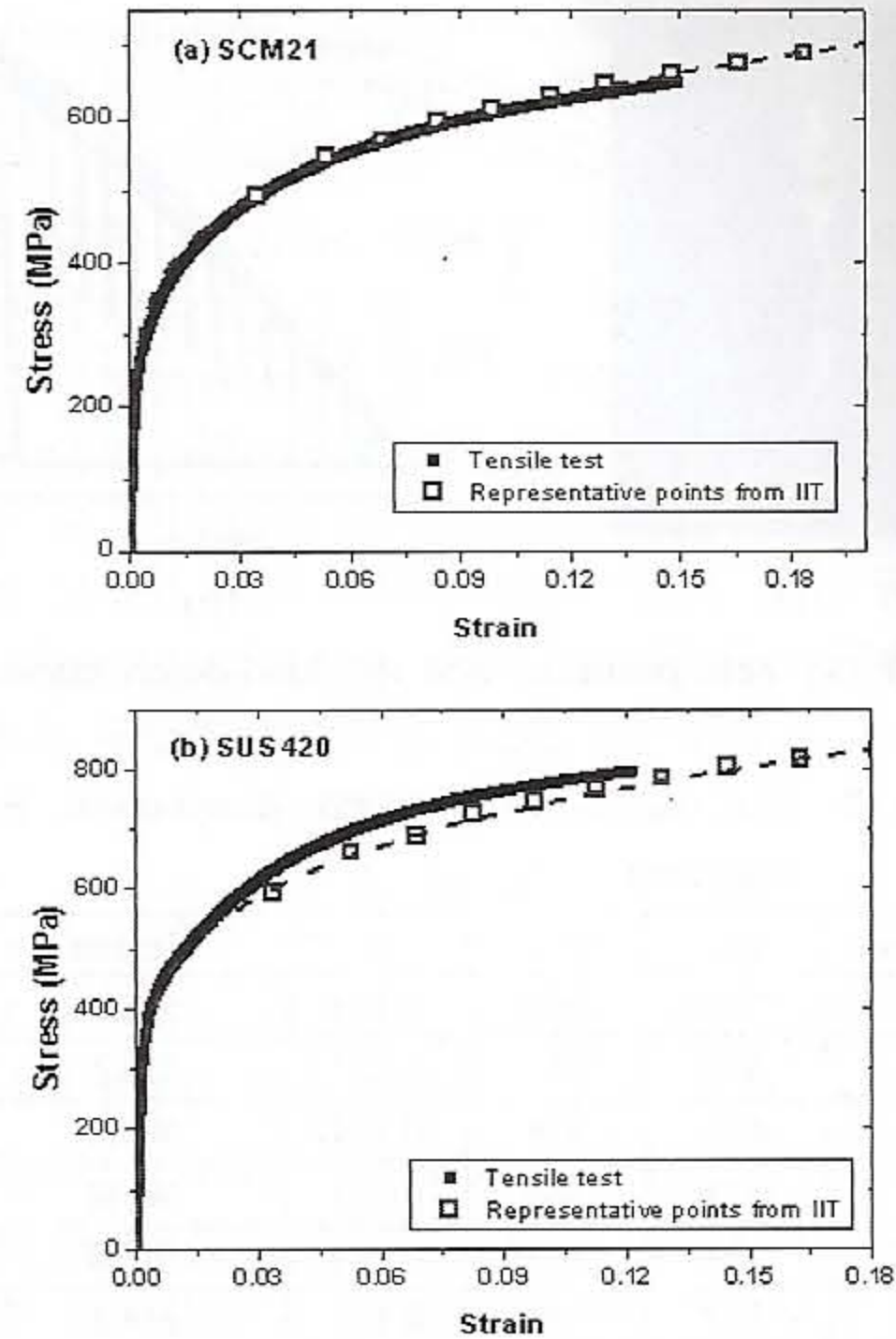


Fig. 6 Comparison between tensile curves from tensile test and instrumented indentation test for (a) SCM21 and (b) SUS420

이로부터 계장화 압입시험은 일축인장시험의 훌륭한 대체자로 볼 수 있다.

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 Fig. 7과 같다. Table 2에 계장화 압입시험을 통해서 얻은 각 부위별 인장물성을 정리하였다. 동일한 압입깊이에 대해서 소재가 나타내는 압입자 침투에 대한 저항성으로 볼 때 용착 금속이 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 확인하였고 이에 따라 새로운 PQ 시험의 한 가지 방법으로 계장화 압입시험이 사용될 수 있다고 판단되었다.

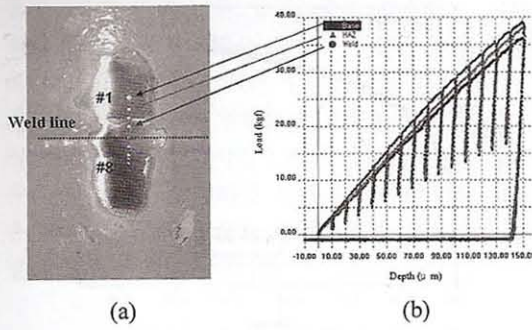


Fig. 7 (a) Test positions and (b) load-depth curves

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 이용한 국부적 물성 측정은 결함에 대한 사용적합성을 평가하는 손상평가도 (FAD; Failure Assessment Diagram)에 활용될 수 있다. BS79101 등의 다양한 FAD 관련 규격들은 일반적으로 3단계로 구성되어 있는데, 단계가 높아질수록 요구되는 물성이 많아지게 된다. 이는 이들 물성이 고려됨에 따라 보수성이 줄어들고 정확도가 높아지게 되기 때문인데, 현재 실구조물에 적용되고 있는 FAD 단계 중 가장 정확도가 높은 단계에서는 결함발생 부위의 소재에 대하여 인장 곡선 전부를 요구하게 된다. 하지만 용접과정동안 열이력에 의한 미세조직 변화를 경험하게 되는 열영향부에는 서로 다른 기계적 성질을 나타내는 복잡한 미세조직들이 혼재하기 때문에 모재나 용착 금속과는 달리 표준 시험법을 통해 열영향부의 대표 물성을 얻는 데는 많은 어려움이 있다. 따라서 기존 FAD 규격의 3단계에서는 용착금속과 모재에 관한 인장물성만을 FAD구축에 사용하고 있고, 열영향부 영역에 결함이 존재할 때는 용착금속과 모재의 물성 중 더 낮은 물성치를 적용하여 평가

하고 있는 실정이다. 그러나 열영향부는 각종 결함이 집중적으로 발생 가능한 취약부위이므로 결함평가의 주요 대상임은 분명하므로, 열영향부에 발생한 결함에 대하여 정확한 허용 여부를 평가하기 위해서는 열영향부의 물성 변화가 고려된 FAD를 사용하여야 한다. 위의 사례에서 볼 수 있듯이, 계장화 압입시험은 용착금속 및 모재의 물성 뿐만 아니라, 열영향부의 인장물성을 평가할 수 있으므로 FAD구축 및 건전성 평가에 크나큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 계장화 압입시험을 통한 잔류응력 측정 결과

계장화 압입시험을 통해 STS316L 용접배관의 잔류응력을 측정하여, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 최대인장 잔류응력은 용착금속에서 225MPa로 나타났으며, 용접선에서 멀어짐에 따라 (-)방향을 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.

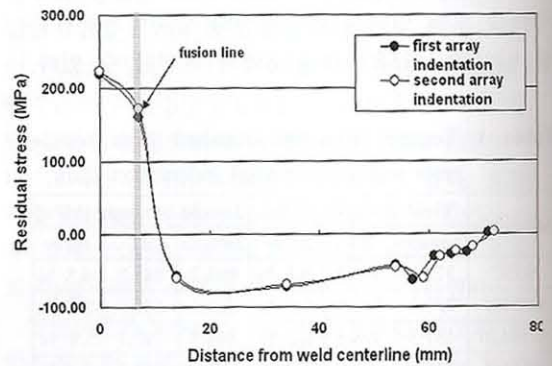


Fig. 8 Residual stresses measured by indentation test

5. 계장화 압입시험 기술의 표준화 동향

계장화 압입시험은 최근 각광받고 있는 반도체, 패키징 등의 크기가 작은 소재에서부터 시편 채취가 곤란한 교량, 화학설비 등의 사용 중인 대형구조물의 기계적 물성을 평가할 수 있는 거의 유일한 시험법으로 인식되고 있다. 특히 대형구조물의 유지, 보수를 책임지고 있는 기업, 연구소 등에서 관심이 매우 높으며, 국내에서만뿐만 아니라 일본, 미국, 유럽 등지에서도 본 기술의 활용이 이루어지고 있다. 그러나 관련 표준규격이 아직 미비하여 비전문가가 본 기술을 활용할 때 참조할 규격이 없는 것이 현실이다. 유일한 국제규격인 ISO 14577은 평가할 수 있는 기계적 특성으로 경도 및 탄성계수만 다루고 있어 재료의 정확한 기계적 특성을 평가하기에는 매우 부족하며 대형구조물의 유지, 보수에도 별반 도움이 되지 못하고 있는 실정이다. 국내에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 ‘압입인장물성’ 평가에 관한 국가규격(KS B0950)과 ‘용접부의 잔류응력’ 평가에 관한 국가규격(KS B0951)이 이미 제정되어 산업에서 활용되고 있으며, 이를 바탕으로 2003년 ISO/TC164/SC3(ISO 14577-5, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and material parameters - Part 5: Measurement of indentation tensile properties)에서 인장물성 평가에 대한 국제표준화를 위한 논의가 제안되었다. 이후 한국이 WR

(working group)의 의장국으로 활동하며 국제표준화 사업을 주도하고 있으며, 최근 2007년 ISO 회의에서 위원회 원안(CD: Committee draft)에 대한 찬성의견을 바탕으로, 2008년 최종 국제표준으로의 제정을 앞두고 있다.

또한 2006년 국내 발전 규격인 대한전기협회 규격(KEPIC)에 계장화 압입시험 기술이 반영되어 종전 미국기계학회 규격(ASME)에 의존하던 국내 발전 산업의 틀을 벗어나 국내 기술에 의한 규격을 제정하였다. 계장화 압입시험 기술관련 국내의 표준화 동향을 정리하면 Table 3과 같다.

6. 결론

본 고에서는 계장화 압입시험을 활용하여 발전설비/용접부의 건전성 평가를 위한 기계적 물성을 측정하는 사례를 소개하였다. 계장화 압입시험을 통해 인장물성을 측정하여 일축인장시험과 비교한 결과, 항복강도 및 인장강도가 10%내외의 오차를 보였으며, 이를 바탕으로 용접부와 같은 복잡한 물성 분포를 보이는 국소부의 인장물성 측정을 하였다. 또한 잔류응력의 정량적인 평가와 그 분포의 정확한 예측이 가능함을 확인하였다. 따라서 복합화, 대형화추세에 있는 국내의 발전설비 및 구조물에 대한 건전성 평가에 계장화 압입시험의 현장 적용 범위가 넓어질 것으로 예측된다.

후기

본 연구는 중소기업청 산학연 공동기술개발권소 시험사업과 산업자원부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. BS7910, 1999, "Guide and methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures," British Standards Institution
2. Kim, J. Y., Lee, K. W., Lee, J. S. and Kwon, D., 2006, "Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: representative stress and strain approach," *Surface and Coating Tech.*, Vol. 201, pp. 4278-4283
3. Ahn, J. H. and Kwon, D., 2001, "Derivation

Table 3 Standardization of instrumented indentation technique

	contents
KS	<ul style="list-style-type: none"> • KS B0950(2002) ; Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Indentation Tensile properties • KS B0951(2002) ; Instrumented Indentation tests on welds in steel-Measurement of residual stress on welded joints
ISO	<ul style="list-style-type: none"> • ISO/TR 29831 ; Measurement of the mechanical properties by instrumented indentation test: Indentation tensile properties • ISO/TR 29831 annex ; Measurement of the residual stress by instrumented indnetation test
KEPIC	<ul style="list-style-type: none"> • MDF A370 annex A1.6

- of plastic stress-strain relationship from ball indentation: examination of strain definition and pileup effect," *Journal of Materials Research*, Vol. 16, pp. 3170~3178
4. Lee, Y. H. and Kwon, D., 2004, "Estimation of Biaxial Surface Stress by Instrumented Indentation with Sharp Indenters," *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 1555~1563
 5. Lee, J. S., Jang, J.-i., Lee, B. W., Choi, Y., Lee, S. G. and Kwon, D., 2006, "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
 6. Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1992, "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
 7. Francis, H. A., 1976, "Phenomenological analysis of plastic spherical indentation," *Trans. of the ASME (Series H)*, Vol. 9, pp. 272~281
 8. Tabor, D., 1951, "Hardness of metals, 2nd Edition," *Clarendon Press*, Oxford, Chap. VII
 9. Lee, Y. H. and Kwon, D., 2002, "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
 10. Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., 1998, "A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation," *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 5755~5767
 11. Johnson, K. L., 1984, "Contact Mechanics," *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, pp. 84~106