

## 원전 구조물의 가동 중 건전성 평가를 위한 연속압입시험법의 활용에 관한 연구

### A Study on Utilizing Instrumented Indentation Technique for Evaluating In-field Integrity of Nuclear Structures

송원석\*, 김승규\*, 안희준\*, 김광호\*\*, 권동일\*†

Won-Seok Song\*, Seung-Gyu Kim\*, Hee-Jun Ahn\*, Kwang-Ho Kim\*\* and Dongil Kwon\*†

**초 록** 발전설비 구조물은 기대 수명동안의 안전성을 확보하기 위하여 정해진 규격에 부합하도록 설계하여 건설된다. 하지만 가동 중 다양한 복합 환경에 노출됨에 따라 구조물을 이루고 있는 재료의 열화 현상이 가속화 되어 예상하지 못한 파손이 발생할 수 있기 때문에, 용접부와 같은 구조물의 취약부에 대하여 기계적 물성을 정확하게 측정하는 기술은 안전과 직결되는 필수적인 연구 분야이다. 인장시험 등의 기존의 역학물성 측정 시험법들은 특정 크기의 시편을 요구하고 파괴적인 시험이기 때문에 가동 중 구조물에 적용하는 것이 불가능하였다. 이러한 한계점을 극복하고자 비파괴적이고 간편한 방법으로 다양한 역학물성 평가가 가능한 연속압입시험법이 각광받는 시험법으로서 연구되고 있다. 본 연구에서는 연속압입시험에서 압입자 하부에 발생하는 응력장 해석을 기반으로 하여 인장물성 및 잔류응력을 평가할 수 있는 최신 기법을 소개한다. 또한, 원전 구조물의 취약부로 알려진 용접부에 대하여 실험을 수행하여 산업상에서 연속압입시험이 건전성 평가에 유용하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

**주요용어:** 연속압입시험법, 잔류응력, 인장물성, 건전성 평가, 용접부

**Abstract** Power generating unit structures are designed and built to meet standard to secure its safety for expected life time. As the structures have been exposed to combined environment, degradation of structure material is accelerated and it can cause unexpected damage; evaluating precise mechanical properties of weak site like welded area is an essential research area as it is directly connected to safety issues. Existing measuring technique like tensile test requires specific size in testing specimen yet it is destructive method which is hard to apply on running structures. To overcome above mentioned limitation, IIT is getting limelight as it is non-destructive and simple method. In this study, latest technique is introduced to evaluate tensile property and residual stress by analyzing stress field occurs under the indenter while IIT is performed. Test on welded area, the weak site of nuclear structures have been practiced and confirmed that IIT can be usefully applied to evaluate integrity in industry.

**Keywords:** Instrumented Indentation Technique, Tensile Property, Residual Stress, Integrity Assessment, Weldments

#### 1. 서 론

발전설비 구조물은 파손으로 인한 안전사고의 인적·물적 피해 규모가 타 분야에 비해 월등히 크기 때문에 발전설비 구조물의 공사는 설계에서

부터 건설까지 엄격한 규격에 따라 진행된다. 하지만, 실제 구조물의 역학적, 화학적 환경 인자를 완벽하게 예측할 수 없기 때문에 안전성 확보를 위해서는 필수적으로 가동 중 건전성 모니터링이 진행되어야 한다.

[접수일: 2013. 3. 18, 수정일: 2013. 4. 9, 게재확정일: 2013. 4. 12] \*서울대학교 재료공학부, \*\*Frontics Inc.  
†Corresponding Author: Department of Materials & Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744 Korea (E-mail: dongilk@snu.ac.kr)  
© 2013, Korean Society for Nondestructive Testing

특히, 취약부의 역학물성 및 잔류응력은 설비 구조물의 파괴를 유발할 수 있는 중요한 영향인자로서 열화에 따른 지속적인 평가가 필요하다. 하지만, 기존의 시험방법인 인장시험의 경우 전세계적으로 표준화되어 활발하게 사용되고 있지만 특정 크기의 시편을 요구하고 파괴적인 시험이기 때문에 가동 중 구조물에 적용하는 것이 불가능하다. 또한, 기존의 잔류응력 평가는 크게 파괴적인 평가와 비파괴적인 평가로 나누어 볼 수 있는데 전자에 속하는 톱질단법(saw-cutting), 천공측정법(hole-drilling) 등은 정량적인 데이터를 얻을 수 있으나 소재를 파괴해야 하고, 잔류응력을 측정하기 위하여 시간과 노력이 많이 필요하다는 단점이 있다. 비파괴적인 기법의 경우는 X-선회절법(X-ray diffraction), 곡률측정법(curvature method) 등이 있으나 용접부와 같이 국부적인 지역의 데이터나 잔류응력의 변화 추이를 미세하게 측정하기 힘들고 적용 대상이 특정 소재 및 특정 시편에 제한되어 있다는 것이 가동 중 구조물의 적용을 현실적으로 어렵게 한다. 이러한 한계점을 극복하고자 비파괴적이고 간편한 방법으로 다양한 역학물성 평가가 가능한 연속압입시험법이 최근 각광받는 시험법으로서 활발하게 연구되고 있다.

연속압입시험은 기존의 경도시험을 한 차원 발전시킨 시험법으로서 뾰족한 침 형태의 압입자를 통해 대상물에 압입하중을 인가하고 실시간으로 장비 내 센서를 통하여 Fig. 1에서와 같이 변위와 하중을 측정한다. 소재의 탄·소성 변형을 함축적으로 표현하고 있는 압입하중-변위 곡선을 분석함으로써 인장물성, 파괴인성, 잔류응력 등의 다양한 기계적 물성을 평가할 수 있다. 특히, 대표응력-변형률을 이용한 인장물성 평가 알고리즘은 ISO TC164/SC3 (hardness testing) 분과의 기술문서인 TR 29381로 등재되어 그 우수성이 국제적으로 입증되고 있으며, 표준뿐만 아니라 ASME를 비롯한 규격에 연속압입시험을 활용하기 위한 시도가 활발히 이루어지고 있는 상황이다.

본 연구에서는 연속압입시험에서 압입자 하부에 발생하는 응력장 해석을 기반으로 하여 인장물성 및 잔류응력을 평가할 수 있는 최신 기법을 소개한다. 또한, 원전 구조물의 취약부 중 하나로 알려진 STS304 동종 소재 용접부에 대하여 실험을 수행하여 산업상에서 연속압입시험이 건전성

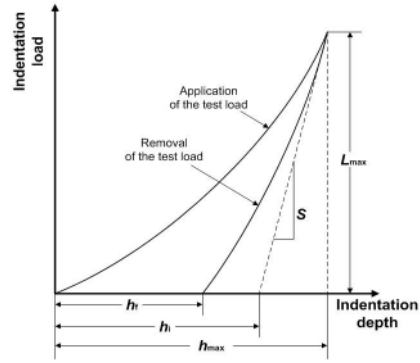


Fig. 1 Schematic load-depth curve obtained from instrumented indentation testing

평가에 유용하게 적용할 수 있음을 확인하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1. 연속압입시험 및 응력장 해석을 통한 인장 특성 평가

#### 2.1.1. 압입물성과 유동응력/변형률 간의 상관관계

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 평균 응력과 변형률이 증가하기 때문에 압입시험으로부터 인장특성을 평가하는 연구가 진행되었다. 압입하중이 증가함에 따라, 압입자 하부에서의 소재변형은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역으로 천이된다고 알려져 있다.

Tabor(1951)의 연구에 따르면, 금속 소재에서 구형 압입자를 활용한 압입시험인자와 일축인장의 유동응력-변형률 곡선 사이의 관계는 평균 접촉압력과 인장응력의 비인 소성구속계수와 압입자 반경과 압입깊이 사이의 기하학적 관계를 이용하여 얻어진 변형률을 통해 나타내어진다[1].

$$\sigma_t = \frac{p_m}{\psi} = \frac{1}{\psi} \cdot \frac{L}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon_t = 0.2 \frac{a}{R} \quad (2)$$

$\sigma_t$ 와  $\epsilon_t$ 는 일축인장곡선의 유동응력-변형률의 의미하며,  $p_m$ 은 평균압력,  $\psi$ 는 소성구속계수,  $L$ 은 압입하중,  $a$ 와  $A$ 는 접촉 반경 및 면적,  $R$ 은 구형 압입자의 반경을 의미한다.

2.1.2. 확장공극모델(Expanding Cavity Model) 기  
반의 응력장 해석을 통한 대표유동응력/변  
형율의 결정

Gao(2006)는 식(3)의 소성경화거동을 따르는 소  
재에 대하여 압입자 하부의 응력분포를 수식으로  
나타내었다[2].

$$\sigma = K\epsilon^n \tag{3}$$

K는 강도 상수, n은 가공경화지수를 의미한다.  
이때 r = a(코어 경계)에서의 응력과 변형률은  
다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{rr}|_{r=a} = -\frac{2\sigma_y}{3} \left[ 1 + \frac{1}{n} \left\{ \left( \frac{1}{4} \frac{E}{\sigma_y} \frac{a}{R} \right)^n - 1 \right\} \right] = p_i \tag{4}$$

$$\epsilon_{rr}|_{r=a} = -\frac{\sigma_y}{E} \frac{c^3}{r^3} = -\frac{1}{4} \frac{a}{R} = -0.25 \sin \gamma \tag{5}$$

$\sigma_y$ 는 항복강도, E는 탄성계수, r은 반구의 중  
심으로부터 거리를 의미하며,  $p_i$ 는 코어 경계  
에서의 압력을,  $\gamma$ 는 압입자와 시편의 표면 사이의  
접촉각을 의미한다.

Johnson(1985)과 Studman(1977)은 실제 평균압력  
과 코어 경계에서의 압력에 차이가 있다고 하였  
으며, 그 차이를  $\sigma_y$ 의 실수배로 표현하였다[4,5].

Johnson과 Studman의 연구는 완전소성이 나타  
나는 소재를 대상으로 하였으므로, 김국환 박사  
(2011)의 연구에서는 이를 소성경화현상이 나타  
나는 소재로 확장시키기 위해 코어경화계수 k를  
도입하여 다음과 같은 관계식을 제안하였으며[6].

$$p_m = p_i + k\sigma_y \tag{6}$$

위의 코어경화계수를 통해 확장공극모델 기  
반의 소성구속계수는 다음과 같이 표현하였다.

$$\psi = \frac{p_m}{\sigma_t} = \frac{p_i + k\sigma_t}{K\epsilon^n} = \frac{2}{3} \left[ \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( \frac{1}{4} \frac{E}{\sigma_y} \frac{a}{R} \right)^{-n} + \left( \frac{1}{n} + \frac{3}{2} k \right) \right] \tag{7}$$

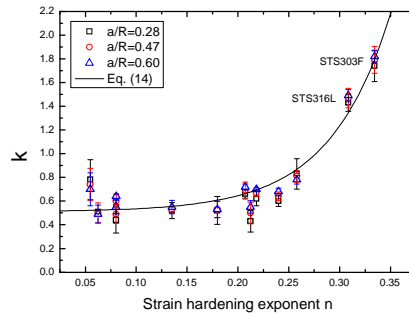


Fig. 2 Scaling factor k as a function of strain-hardening exponent n [6]

Fig. 2의 그래프와 같이 13개 금속소재에 대해  
코어경화계수는 가공경화지수의 지수함수 형태  
로 나타내어진다.

$$k = f(n) \tag{8}$$

2.1.3. 가공경화지수 및 항복강도의 평가

구형 압입자를 이용하여 응력-변형률 곡선을  
나타내기 위해서는 선행적으로 항복강도와 가공  
경화지수를 결정해야 한다.

압입시험에서 압입하중곡선의 형태는 소재의  
소성 거동을 반영한다. 따라서 이를 분석하여 인  
장곡선의 가공경화지수를 결정할 수 있다[5].

압입하중을 접촉반경에 대한 함수로 표현하면  
다음과 같다.

$$L = \Pi_1 \Pi_2 \cdot a^2 + \Pi_1 \Pi_3 \cdot a^{n+2}$$

$$\Pi_1 = \frac{\pi K}{4^n R^n}$$

$$\Pi_2 = \frac{2}{3} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( \frac{1}{4} \frac{E}{\sigma_y} \frac{1}{R} \right)^{-n}$$

$$\Pi_3 = \frac{2}{3} \left( \frac{1}{n} + \frac{3}{2} k \right) \tag{9}$$

이를 통해 가공경화지수를 결정하기 위해 두  
개의 임의의 접촉 깊이에서 구해진 곡선 기울기  
의 비를 다음과 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$p = \left( \frac{a_2}{a_1} \right)^{n+1} \tag{10}$$

Hoyt의 연구에서 Meyer 식의 재료상수  $A$ 는 금속의 초기 압입에 대한 저항성을 나타낸다고 제안하였다[6].

$$\frac{P}{d^2} = A \left( \frac{d}{D} \right)^{m-2} \quad (11)$$

또한 George는 항복강도를 Meyer 식의 재료상수  $A$ 와 실험적 관계로 나타내었다[7].

$$\sigma_y = c \cdot A \quad (12)$$

## 2.2. 연속압입시험을 이용한 잔류응력 평가

### 2.2.1. 압입하중과 잔류응력 간의 상관관계

시편 표면과 평행하게 2축 인장/압축 잔류응력이 분포하는 시편에 압축시험을 수행하는 경우, 압입하중과 압입 깊이의 관계는 Fig. 3과 같이 나타난다[8,9]. 동일한 최대 압입 깊이에 대해 인장 잔류응력 상태의 시편은 무응력 상태의 시편에 비해 낮은 압축 하중을 필요로 하고, 압축 잔류응력 상태의 시편은 높은 압축 하중을 필요로 한다. 인장 잔류응력 상태의 시편에서는 잔류응력에 의해 유발된 수직 하중이 외부 압입 하중과 더해지면서 무응력 상태에 비해 적은 외부 하중만으로도 정해진 최대 압입 깊이에 도달할 수 있다. 반면에 압축 잔류응력 상태의 시편의 경우에는 잔류응력에 의해 유발된 내부 수직 하중이 외부 하중 방향과 반대방향으로 작용하기 때문에 보다 높은 인가 하중이 필요하게 된다. 따라서, 무응력 상태에서의 압입하중인가 곡선과 잔류응

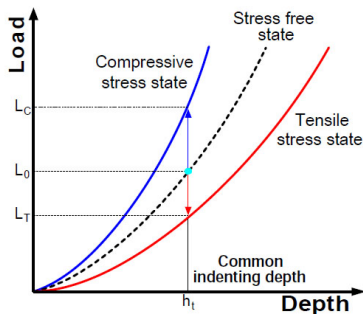


Fig. 3 Variation of indentation loading curves with changes in the stress state

력 상태의 압입하중-변위곡선을 비교하여 연속압입시험을 통한 잔류응력 평가가 가능하다.

### 2.2.2. 비 등방향 2축 잔류응력 평가

잔류응력 유도 수직 하중을 정의하기 위해서 소성변형과 직접 연관된 편차응력 성분만으로 압입 변형과 잔류응력 간의 상호작용을 분석하였다. 이론적인 행렬식 계산을 통해 소성변형에 무관한 정수압응력(hydrostatic stress part)과 소성변형에 민감하게 반응하는 편차응력 부분(deviatoric stress part)으로 분해할 수 있다. 비 등방향 2축 잔류응력 성분 중 절대값이 큰  $\sigma_{res,x}$ 를  $\sigma_{res}$ 로 나타내면  $\sigma_{res,y}$ 는 응력비례인자인  $p$ 를 도입하여  $p \cdot \sigma_{res}$ 로 표현할 수 있다.  $p$ 인자를  $-1.0$ 에서  $+1.0$  사이에서 변화한다면, 다양한 비 등방향 2축 잔류응력을 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Biaxial stress} \\ & \begin{pmatrix} \sigma_{res,x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res,y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{res,x} & 0 & 0 \\ 0 & p\sigma_{res,x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ & \text{Mean stress} \\ & = \begin{pmatrix} \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x \end{pmatrix} \\ & \text{Deviatoric stress} \\ & + \begin{pmatrix} \frac{(2-p)}{3}\sigma_{res}^x & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(2p+1)}{3}\sigma_{res}^x & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^x \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

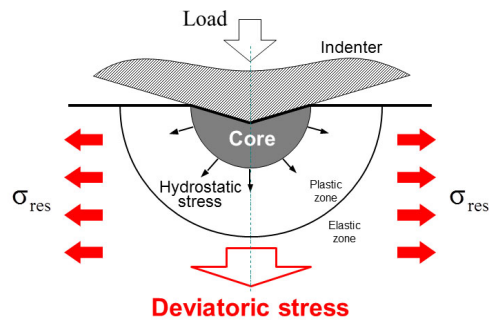


Fig. 4 Stress interaction between residual stress and hydrostatic stress in the incompressible core of an elastic/plastic indentation

편차응력 성분 중 시편 표면에 수직인 성분은  $\sigma_{zz}$ 이며, 이 값을 통해 다음과 같이 압입하중과 잔류응력 간의 상관관계를 정의하였다.

$$\sigma_{res} = \frac{3}{(1+p)} \frac{1}{\psi} \frac{L_{res}}{A_c} \quad (14)$$

### 2.2.3. 무응력 상태의 압입하중-변위곡선 유추

응력이 존재하는 시편에서 얻은 압입하중-변위 곡선과 잔류응력 존재 유/무에 영향을 받지 않는 물성(elastic modulus, hardness)[10,11]을 활용하여, 무응력 상태의 압입하중-변위곡선을 유추하였다.

잔류응력이 존재하는 시편과 무응력 시편에 동일한 압입하중으로 실험을 수행하면, 경도는 잔류응력의 존재와 관계없이 일정하기 때문에, 접촉면적 또한 동일하다. 아울러, 재료의 강성은 압입시험에서 재료의 탄성계수와 압입 실험의 접촉면적으로 표현할 수 있고, 이들 역시 잔류응력의 존재 유무와 관계없이 일정하므로, 재료의 강성 또한 일정하다. 잔류응력이 인가된 시편에 압입 시험을 수행한 후 그 압흔의 크기를 측정하면 시험한 압입자의 형상에 따라 접촉 깊이( $h_c$ )를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_c = \sqrt{\frac{A_c}{24.5}} \quad (\text{Vickers indenter}) \quad (15)$$

기존의 연구에 따라 무응력 시편에서 압입시험의 접촉 깊이( $h_c^0$ )와 최대 압입 깊이( $h_t^0$ )는 다음과 같은 관계를 보인다[12].

$$\frac{h_c^0}{h_t^0} = 9.9 \times 10^{-3} \frac{h_t^0}{h_t^0 - h_f^0} + 1.0 \quad (16)$$

또한, 잔류응력에 무관하게 재료의 강성(stiffness)이 일정하므로, 잔류응력이 존재하는 시편의 최대 압입 깊이와, 최종 압입 깊이( $h_f^T$  또는  $h_f^C$ )는 다음과 같다.

$$h_t^0 - h_f^0 = h_t^T - h_f^T = h_t^C - h_f^C \quad (17)$$

앞서 살펴본 바와 같이 접촉면적은 잔류응력의 유무에 영향을 받지 않으므로 무응력 상태의 실제 접촉 깊이  $h_c^0$ 는 응력 상태에서의 접촉깊이  $h_c$

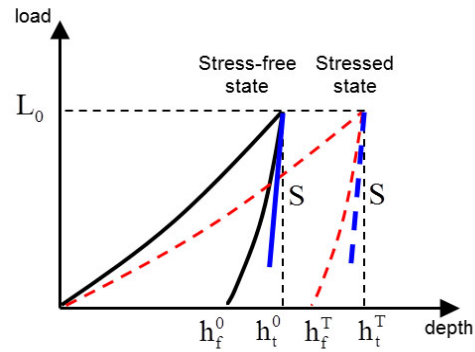


Fig. 5 Schematic indentation curve comparison between stress-free state(solid line) and stressed state(broken line)

와 같다. 따라서 식(16)를 바탕으로 무응력 상태의 최대압입깊이  $h_t^0$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{h_c}{h_t^0} = 9.9 \times 10^{-3} \frac{h_t^0}{h_t^0 - h_f} + 1.0 \quad (18)$$

위 식을 바탕으로 무응력 시편의 최종압입깊이를 유추하면, 응력시편으로부터 얻은 압입하중-변위곡선과 실험조건을 활용하여 최대 압입 깊이 값과 최대 하중 값을 알 수 있으며, 압입시험의 압입하중 변위곡선이 Kick's law를 따른다는 가정을 통해, 무응력 상태의 압입곡선을 다음과 같이 유추할 수 있다.

$$L_0 = k(h_t^0)^2 \quad (19)$$

## 3. 실험

### 3.1. 연속압입시험을 이용한 강도 및 잔류응력 평가 알고리즘 검증

인장물성평가 알고리즘의 정확성을 측정하기 위하여 ferrite steel 3종(SS400, S45C, SCM21)과 stainless steel 3종(STS403, STS410, STS420J2)에 대하여 비교 실험을 진행하였다. 압입시험을 위하여  $20 \times 20 \times 20$  mm 크기의 시편을 가공하고  $1 \mu\text{m}$  크기를 갖는 알루미늄 파운더를 활용하여 표면을 정교하게 연마하였다. 압입시험은 Fig. 6의 Frontics Inc.에서 제작된 연속압입시험기인 Advanced Indentation System 2100(AIS2100)을 이

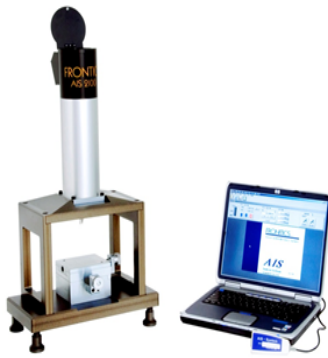


Fig. 6 AIS 2100 system for indentation

용하였으며, KS B0950에 따라 시행하였다. 압입자는 반경 0.25 mm의 WC 구형 압입자를 이용하였고, 세부 실험 조건으로서 최대 압입 깊이는 150  $\mu\text{m}$ , 압입 속도는 0.3 mm/min을 설정하였으며, 10  $\mu\text{m}$ 마다 하중을 최대 하중의 50%까지 제거하고 다시 압입하는 15회 다중압입시험을 수행하였다. 일축인장시험은 ASTM E8:09에 명시된 절차에 따라 Instron 5582 장비를 이용하여 실험을 수행하였다.

잔류응력평가 알고리즘의 정확성 확인을 위해 API 판재를 대상으로 압입시험과 톱절단법을 비교 실험하였으며, 모재부-용접부-모재부에 이르는 영역을 대상으로 하여 잔류응력의 분포를 비교하였다. 시편은 압입시험에 적합하도록 정교하게 연마하였으며, AIS2100에 다이아몬드로 제작된 비커스 압입자를 장착하여 실험을 진행하였다. 실험은 0.3 mm/min의 속도로 150  $\mu\text{m}$ 까지 단일 압입하였다.

### 3.2. 연속압입시험을 이용한 원전 구조물의 용접부 시편 물성 측정

Fig. 7에서와 같이 STS304 동종 소재 용접선을 기점으로 하여 15 mm 간격으로 압입시험을 수행하였다. 잔류응력은 파이프의 후프 방향(hoop 방향)과 축 방향(axis 방향)의 잔류응력을 모두 측정하기 위하여 비커스 압입자외에 추가적으로 누프 압입자를 이용하였고, 인장물성 측정을 위하여 구형 압입자를 사용하였다. 연속압입시험의 세부 시험 조건은 3.1에서 알고리즘 검증에서 언급한 내용과 동일하게 적용하여 실험을 진행하여

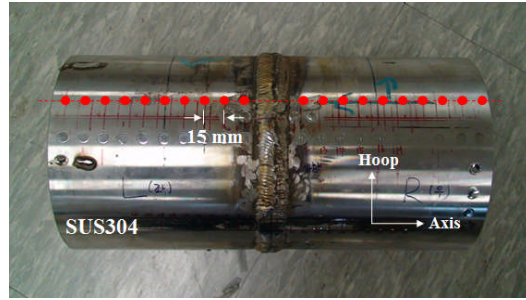


Fig. 7 Testing position of specimen STS304

용접선을 기점으로 거리에 따른 잔류응력 및 인장물성을 평가하고자 하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 연속압입시험을 이용한 인장물성 측정

6개의 금속 시편(SS400, S45C, SCM21, STS403, STS410, STS420J2)에 대하여 일축인장시험과 연속압입시험을 통해 측정된 인장물성을 Table 1에 나타내었다. 인장강도와 항복강도가 모두 10 % 이내의 오차 범위 이내에서 만족하고 있음을 확인할 수 있었고, 이를 통하여 연속압입시험을 통한 인장물성 측정의 타당성을 확인하였다.

연속압입시험은 국부 물성을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 인장시험과 달리 시편 가공 없이 위치에 따른 물성 변화를 확인하여 취약부만의 역학물성을 확보하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다. 이러한 활용성을 바탕으로 연속압입시험을 이용하여 실제 원전 구조물에서

Table 1 Tensile properties measured by tensile test and indentation test

Material	Yield Strength (MPa)			Ultimate Tensile Strength (MPa)		
	Tension	IIT	Error (%)	Tension	IIT	Error (%)
SS400	257.8	240.9	-6.6	508.0	512.0	0.8
S45C	362.7	358.0	-1.3	774.2	761.5	-1.6
SCM21	271.0	311.2	14.8	653.4	656.3	0.4
STS403	335.3	312.1	-6.9	671.5	661.1	-1.6
STS410	366.5	332.8	-9.2	669.0	702.2	5.0
STS420J2	398.5	384.1	-3.6	797.7	762.1	-4.5

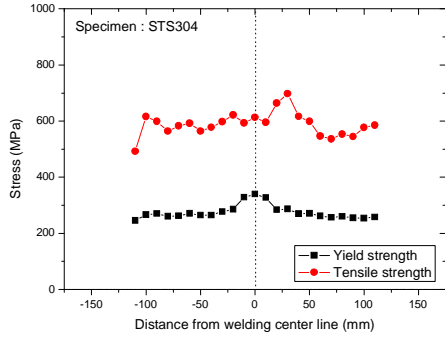


Fig. 8 Tensile properties measured by indentation test

사용되는 STS304간 동종 용접 파이프의 물성을 분석하였다.

Fig. 8는 연속압입시험을 적용하여 용접부에서부터 열 영향부, 모재부에 이르기까지 강도 분포 결과를 보여준다. 열 영향부와 모재부는 상대적으로 유사한 인장물성 분포를 보이지만, 용접부의 경우 특히 최대항복강도가 339.7 MPa로 모재부의 최소항복강도로 측정된 245.5 MPa과 비교하여 약 35 %이상의 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 용접 과정에서 취성이 강해져 외부 충격에 대하여 쉽게 파손이 발생할 수 있음을 의미한다. 추후 파손시험과의 연계성을 통하여 허용 기준 값을 설정함으로써 용접부의 건전성 여부를 판단하는 기준으로 연속압입시험이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2. 연속압입시험을 이용한 잔류응력 측정

잔류응력 측정 알고리즘은 동일한 API 관재에 대하여 톱절단법과 연속압입시험을 적용함으로써 잔류응력 측정 결과를 Fig. 9와 같이 비교하였다. 측정된 최대 인장, 압축 잔류응력은 톱절단법이 각각 86.1 MPa, -130.2 MPa, 압입시험으로부터 얻어진 잔류응력이 각각 106.8 MPa, -115.7 MPa로서 두 시험법이 매우 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 또한, 용접부에서부터 모재에 이르기까지 잔류응력의 분포 결과가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이를 통하여 연속압입시험을 이용한 잔류응력 측정 알고리즘의 정확성을 검증하였으며, 본 연구에서 대상으로 하는 원전 구조물의 STS304 동종 소재 용접부에 적용하여 시험을 진행하였다.

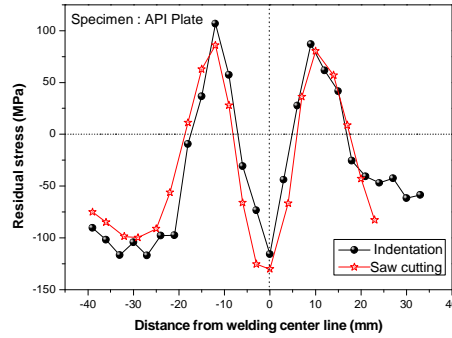


Fig. 9 Residual stresses measured by saw cutting test and indentation test

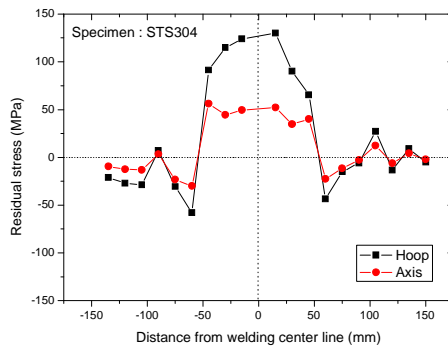


Fig. 10 Residual stresses measured by indentation test

대상물의 후프 방향과 축 방향 각각에 대하여 위치별 잔류응력을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 용접부에서 멀어져 모재로 갈수록 잔류응력은 점차 감소하여 0에 수렴함을 확인할 수 있다. STS304의 항복강도는 약 300 MPa로 알려져 있으며, 용접부에서 후프 방향의 잔류응력은 최대 약 130 MPa로서 용접 중심부에서는 항복강도의 약 45%의 잔류응력이 존재함을 확인할 수 있었다.

항복강도와 유사한 값이 측정될수록 소성 변형이 일어나기 쉽기 때문에 구조물의 취약부인 용접부의 건전성 평가에 유용한 지표로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 연속압입시험을 이용한 인장물성 및 잔류응력평가 알고리즘을 소개하고, 기존의 타 시험법과의 비교를 통하여 우수한 정확성

을 입증하였다. 원전 구조물의 취약부인 용접부에 알고리즘을 적용하여 위치에 따른 물성 변화를 측정함으로써 가동중인 원전 구조물의 강도와 잔류응력을 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 보였다. 연속압입기법의 활용을 통하여 노후된 설비의 예기치 않은 파괴에 따른 산업 재해를 방지하고, 새 설비로의 교체 시기를 정확히 결정함으로써 경제적인 비용을 감소시키는 데에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(2012-0008722) 및 신기술융합형성장동력사업(2012K001120)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] D. Tabor, "Hardness of Metals," first ed. Clarendon Press, New York (1951)
- [2] X. L. Gao, "An expanding cavity model incorporating strain-hardening and indentation size effects," *International Journal of Solids and Structures*, 43, pp. 6615-6629 (2006)
- [3] K. L. Johnson, "Contact Mechanics," first ed. Cambridge University Press, New York (1985)
- [4] C. J. Studman, M. A. Moore and S. E. Jones, "On the correlation of indentation experiments," *Journal of Physics. D: Applied Physics*. 949, pp. 949-956 (1977)
- [5] K.-H. Kim, "Evaluation of tensile properties of metallic materials using instrumented indentation technique through elastic-plastic stress field analysis," Unpublished Doctoral Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea (2011)
- [6] S. L. Hoyt, "The ball indentation hardness test," *Transactions of the American Society for Steel Treating*, 6, pp. 396-420 (1924)
- [7] R. A. George, S. Dinda and S. Kasper, "Estimating yield strength from hardness data," *Metal Progress*, 109, pp. 30-35 (1976)
- [8] 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)
- [9] S. Suresh and A. E. Giannakopoulos, "A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation," *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 5755-5767 (1998)
- [10] A. Bolshakov and G. M. Pharr, "Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques," *Journal of Materials Research*, Vol. 13, pp. 1049-1058 (1998)
- [11] J. G. Swadener, B. Taljat and G. M. Pharr, "Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters," *Journal of Materials Research*, Vol. 16, pp. 2091-2102 (2001)
- [12] S.-K. Kang, J.-Y. Kim, C.-P. Park, H.-U. Kim and D. Kwon, "Conventional Vickers and true instrumented indentation hardness determined by instrumented indentation tests," *Journal of Materials Research*, Vol. 25, pp. 337-343, (2010)