

# 계장화 압입시험을 이용한 원자력재료의 기계적 특성 평가기술

권동일, 이경우 | 서울대학교 김광호 | (주)프론틱스

## 1. 서 론

원자력발전소 재료에 많이 사용되는 탄소강, 합금강, 스테인리스 강, 지르코늄 합금, 니켈 합금 등은 일반 화력발전소와는 달리 높은 에너지의 중성자 조사를 받으며 고온, 고압의 원자력 특유의 환경에 처해 있어, 수명기간 중 부품 및 소재의 건전성이 유지되고 높은 안전성이 확보되어야 하는 특성을 가지고 있다. 이에 원전 및 원자로 재료는 최초 설계부터 재료의 물성 데이터를 기반으로 원자로 내의 특성시험과 재료설계코드, 안전기준, 제조시방요건, 원자력발전소의 운전경험 등을 바탕으로 철저한 성능분석과 안전해석을 통해 규격과 규제조건을 완성시키며 설계에 반영된다. 즉, 원자력 발전소의 설계 및 제조, 안전운전과 규제 그리고 수명연장을 위해서 설계 시 및 재료 선정 시는 물론, 가동 시에도 엄격한 관리가 필요하며, 이를 토대로 가동 시 발생하는 근본적인 손상 원인과 고유의 문제를 해결하게 된다.

원자력 재료는 사용되는 동안에 역학적, 화학적, 열적 효과에 의해 시간이 경과함에 따라 점차 재료의 질이 저하되는 경년열화 현상이 발생하여 치수, 형상 및 내부조직의 변화 등의 여러 가지 손상에 따른 사용상 지장을 초래하며, 고장이나 파손이 발생하게 된다. 특히 재료의 기계적 특성이 변하여 전체 설비의 안전성 및 건전성을 현격히 저하시키며, 그 수명을 단축한다. 이에 원자력 특유의 환경에서 구조재료의 특성과 거동을 규명하는 것이 필수적이며 재료의 건전성 데이터를 확보하기 위해 시간에 따른 재료물성 변화를 정확히 평가하는 것이 중요하다. 그러나 실제 사용 중이고, 가동 중인 설비에서 표준시편을 채취하는 것은 거의 불가능하여 기존의 파괴시험을 수행하여 재료물성을 평가하는 것은 상당한 어려움이 있다. 이에 내부 결함 및 가공, 용접상태, 재료의 조성 등에 따른 기계적 성질의 변화 및 조직특성 등에 기인하는 방사선적, 탄성적, 전자기적 및 열적 성질 등 재료의 고유성질의 미소변화를 비 파괴적으로 감지하는 특징을 이용한 X선, 초음파법 등의 비파괴평가 기술이 많이 사용되고 있다. 하지만, 이러한 방법은 건전성을 간접적으로 평가하는 기술로 정량적인 기계적 물성을 측정하는 데는 한계가 있으며, 종래의 단일조직 결정재료와는 달리 성상이 크게 다른 재료들이 대부분이고, 새로운 복합적 기능의 적용과 특수한 환경 하에서의 사용 등 종래의 표준적인 비 파괴적 특성평가 방법을 그대로 적용할 수 없는 경우가 많아 새로운 비 파괴적 특성평가 방법의 확립이 요구되고 있다.

기계적 물성변화 데이터 이외 건전성 및 안전성을 규명하는데 있어 잔류응력은 또 하나의 중요한 요소이다. 특히 용접부에 분포하는 잔류응력은 구조물의 형상 왜곡의 원인이 되며, 외부에서 부가되는 화학적, 역학적인 환경 인자들의 영향을 증가시켜 부식, 소성변형, 내피로 및 인성을 저하시키고 궁극적으로 전체 설비의 수명에 지대한

영향을 미친다. 이러한 잔류응력의 양상을 정확히 측정하는 것은 상당히 어려움이 많지만, 실제 원자력 발전설비의 건전성 확보에 지극히 중요한 문제로서, 이의 정량적인 측정을 통한 보수 및 수리가 반드시 필요하다.

지금까지 언급한 원자력 재료의 물성 데이터의 확보는 설계, 제조, 운전 및 수명연장 등 발전소의 보수 및 유지를 위해 필수 불가결한 요소로서, 많은 제약조건을 해결을 위해 전 세계적으로 연구를 수행하고 있으며 그 중 국내 유일한 기술로 계장화 압입시험이 각광을 받고 있다. 본고에서는 계장화 압입시험을 통한 재료 유동물성 평가 및 잔류응력 측정에 대한 원리와 원자력발전에서 사용되는 재료에 대한 물성측정 결과를 소개하고, 현 기술의 국제적인 동향 및 발전방향에 대해 기술한다.

## 2. 계장화 압입시험

### 2.1 시험개요

일반적으로 계장화 압입시험은 재료에 가해지는 압입 하중에 따른 압입 깊이를 연속적으로 측정하여 그림 1과 같은 압입하중-변위곡선을 얻고, 이 곡선의 분석을 통해 대상 재료의 기계적 특성을 평가하는 기법이다. 비커스, 브리넬 등의 기존 경도시험과 유사하지만 직접 압흔의 크기를 측정하지 않는다는 차이점이 있으며, 기존의 경도뿐 아니라 탄성계수, 유동특성<sup>[1,2]</sup>, 파괴인성<sup>[3]</sup> 그리고 잔류응력<sup>[4,5]</sup> 등 다양한 재료 고유의 물성을 얻어 낼 수 있는 장점이 있다.

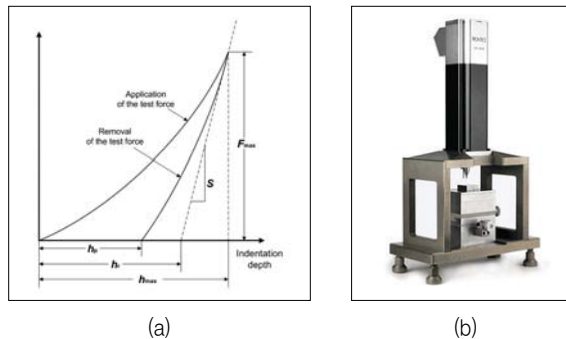


그림 1. (a) 압입 하중-변위 곡선, (b) 계장화 압입시험기

또한 최대 수백 마이크로미터 이내의 미세 영역을 평가하므로 용접부와 같은 국부적인 물성변화가 존재하는 재료에 대해서도 그 변화 양상을 평가할 수 있고, 시험 후 재료에 매우 작은 자국만을 남기기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다. 이에 표준시편의 가공을 위한 시편 채취 등의 문제로 인해 파괴시험이 불가능한 운용중이거나 설치 완료된 구조물에 직접 적용할 수 있는 큰 장점을 가진다.

### 2.2 시험기기

계장화 압입시험기는 가해지는 하중을 측정하는 하중센서와 압입깊이를 측정하는 변위센서로 구성되며 두 센서의 신호를 제어함으로써 최종 압입 하중-변위 곡선을 실시간으로 측정하는 기기이다. 일반적으로 계장화 압입

시험기는 하중 범위에 의해 나노, 마이크로, 매크로 압입시험기로 구분된다. mN 미만의 하중범위를 가지는 나노/마이크로 압입시험기는 주로 박막의 물성 평가 등에 사용되며, 측정하는 물성은 나노 경도 및 탄성계수가 주를 이룬다. 현재 시판되는 나노 압입시험장치 제조사는 MTS(미국), Hysitron(미국), Micro-materials(영국) 등이 대표적이다.

매크로 계장화 압입시험기는 kg 단위의 하중범위를 가지며, 연구적인 목적 뿐 아니라 그림 2와 같이 산업 현장 적용을 목적으로 설계되어 가볍고 운반이 편리하게 제작되고 있다. 측정되는 물성 또한 경도, 탄성계수 외에 유동 물성, 잔류응력, 파괴인성 등의 대부분의 기계적 특성 평가가 가능하다. 주요 제조사로는 Frontics(한국), ATC(미국) 등이 있다.



그림 2. 계장화 압입시험기의 산업 현장 및 발전설비 사용 예

### 3. 계장화 압입시험을 이용한 기계적 특성 평가원리

#### 3.1 유동특성 평가를 위한 기본원리

구형 압입자를 이용한 계장화 압입시험 시 재료는 압입하중이 증가함에 따라 그림 3과 같이 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며, 압입자와 시편의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다<sup>[6]</sup>. 따라서 구형압입의 경우에는 압입깊이가 증가함에 따라 재료의 변형이 증가하여, 압입 하중-변위 곡선으로부터 일축인장시험에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다.

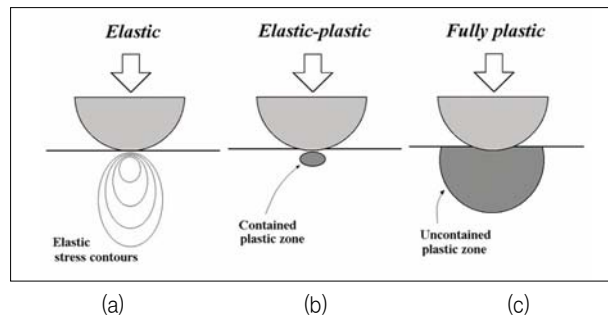


그림 3. 구형 압입자 하부의 소성영역 변화 양상: (a) 완전탄성, (b) 탄소성, (c) 완전소성

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 기하학적 관계에 의해 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

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

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.

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

여기서  $\alpha$ 는 상수이다.

또한, 재료가 나타내는 대표적인 진응력 ( $\sigma$ )은 평균압력 ( $P_m$ )과 식 (3)과 같은 관계가 있음이 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

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

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), (5)와 같은 구성방정식에 최적화시킴으로써 재료의 전체 변형속성 및 유동물성을 측정할 수 있다.

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

$$\sigma = A + E_T \varepsilon \quad (5)$$

여기서  $K$ 는 응력계수,  $n$ 은 가공경화지수이며,  $A$ 와  $E_T$ 는 상수이다. 전체적인 계장화 압입시험을 이용한 유동물성 평가 원리를 정리하면 그림 4와 같다.

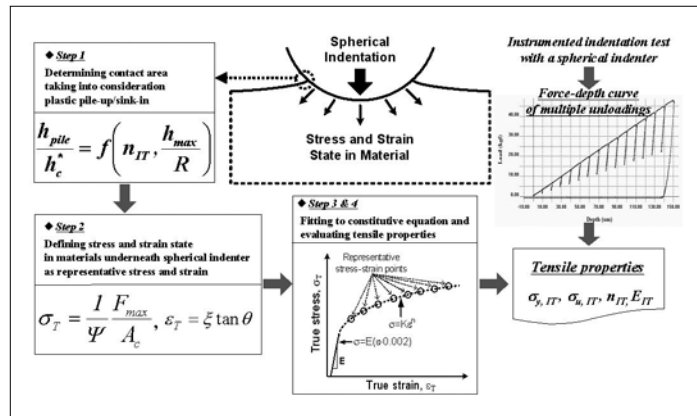


그림 4. 계장화 압입시험을 이용한 유동물성 평가 원리

### 3.2 잔류응력 유도를 위한 기본원리

시험편 표면에 평행하게 2축 인장/압축 잔류응력이 존재하면 그림 5와 같이 압입 하중-변위 곡선의 기울기가 변화한다<sup>[4,5]</sup>. 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 증가는 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.

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  $-2\sigma_y/3$ 로 결정하였다<sup>[8]</sup>. 여기서  $\sigma_y$ 는 재료의 항복강도를 의미한다.

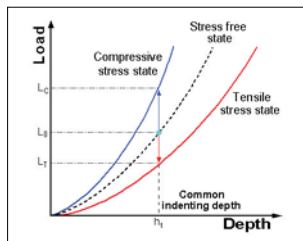


그림 5. 잔류응력 유/무에 따른 압입하중 변위곡선의 변화

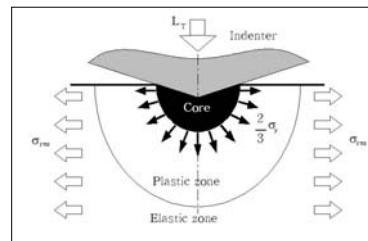


그림 6. 비 압축성 코어 내부의 정수압 응력과 잔류응력 간의 상호작용

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<sup>[9]</sup>. 그림 6에 나타난 복잡한 압입변형 응력장 중 코어 내부의 응력(-2σ<sub>y</sub>/3)과 외부에서 인가되는 등방향 2축 잔류응력, σ<sub>res</sub> (σ<sub>res,x</sub>=σ<sub>res,y</sub>, σ<sub>res,z</sub>=0)와의 상호중첩을 고려하면, 등방향 2축 잔류응력을 코어에 인가 할 때 내부의 정수압은 변화되어 전단응력 성분이 부가적으로 발생하게 되며 코어 내부 정수압과 등방향 2축 잔류응력의 합은 정수압과 편차 응력(deviatoric stress)으로 재분해될 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 잔류응력 σ<sub>res,x</sub> 이면 값이 작은 방향의 응력 성분 σ<sub>res,y</sub>는 pσ<sub>res,x</sub> 로 나타낼 수 있다. 이때 p는 -1.0에서 +1.0사이의 값을 갖게 된다. 이를 행렬식으로 표현하면 식 (6)과 같이 나타난다. 식 (6)의 편차 응력 성분 중 시편 표면에 수직인 압입 하중에 미치는 잔류응력의 영향은 σ<sub>33</sub>으로 나타나는  $-\frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^z$  이다.

$$\begin{matrix} \text{Biaxial stress} & \text{Hydrostatic stress} & \text{Deviatoric stress} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{res}^z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{res}^z & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{res}^z & 0 & 0 \\ 0 & p\sigma_{res}^z & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^z & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^z & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{(2-p)}{3}\sigma_{res}^z & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(2p-1)}{3}\sigma_{res}^z & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{(1+p)}{3}\sigma_{res}^z \end{pmatrix} \quad (6)$$

따라서 식 (7)로 표현된 인가하중의 증가분을 잔류응력 유도 수직하중으로 새롭게 정의할 수 있다.

$$\frac{1}{\psi} \frac{L_{res}}{A_c} = \frac{(1+p)}{3} \sigma_{res} \quad (7)$$

여기서 L<sub>res</sub>는 잔류응력 유도 수직하중이며 A<sub>c</sub>는 이때의 접촉 면적을 의미한다. 즉, 최대 압입 깊이가 일정하도록 압입 시험을 제어하면 잔류응력 유·무에 의해서 잔류응력 유도 수직하중만큼의 압입 하중 차이가 발생한다.

## 4. 계장화 압입시험을 이용한 기계적 특성 평가

### 4.1 유동물성 평가 결과

원자력발전소 압력용기용 재료에 주로 사용되는 단조용 SA508 Class 3, 노내 구조물 및 배관 등의 재료로 사용되는 오스테나이트 스테인리스강 303, 304, 316, 316L 등 4종과 기타 일반 구조용 강에 대한 계장화 압입시험을 이용한 인장 유동특성 결과를 일축인장시험 결과와 비교하여 표 1과 그림 7에 나타내었다. 표 1에서 보는 것과 같이 항복강도는 10% 내외, 인장강도는 5% 내외에서 일축인장 시험과 일치하는 결과를 보여주고 있다. 이처럼 상대적으로 항복강도에서의 오차가 크게 발생하는 이유는 대부분 금속재료의 항복은 0.5% 미만의 변형에서 발생하는데 비해 계장화 압입시험에서는 최초 결정되는 진 변형률이 10μm의 압입깊이에서 정의된 4%의 변형률에 해당

한다. 따라서 0.5% 미만의 낮은 변형률 영역은 지수함수로 구성된 응력-변형률 구성방정식을 이용하여 외삽법을 통해 결정하기 때문에 항복강도가 인장강도보다는 큰 오차범위를 나타내고 있는 것이다. 또한 오스테나이트 스테인리스강의 경우 가공경화 양상이 다른 재료에 비해 높은 선형성을 가지고 있어, 식 (4)와 같은 지수함수 형태의 구성방정식을 통해 응력-변형률 곡선을 표현하는 것은 한계가 있다. 따라서 오스테나이트 스테인리스강의 경우에는 식 (5)와 같은 일차 구성방정식을 이용하여 응력-변형률 곡선을 최적화 한 후, 응력선과 교차하는 점을 항복강도로 결정한 것이 오차범위로 나타나고 있다. 그러나 전체적인 측정 결과를 미루어 볼 때 계장화 압입시험을 통한 유동물성 측정 결과의 신뢰성을 확인할 수 있으며, 인장시험이 불가할 때 또는 특정 재료의 유동물성 결과가 없을 시 등 그 대체분야로 충분히 활용 가능하다. 또한 재료 설계 뿐 아니라 손상 진단 및 안전성 해석을 위한 자료, 나아가서는 구조물의 수명예측의 기반 자료로의 활용도 가능할 것으로 기대된다.

표 1. 일축인장시험과 계장화 압입시험에 대한 유동물성 측정 결과

재료명	항복강도 [MPa]			인장강도 [MPa]		
	인장시험	계장화 압입시험	오차(%)	인장시험	계장화 압입시험	오차(%)
A335 P91	569.7	558.7	-1.9	772.0	807.5	4.6
SA508	673.0	660.2	1.9	984.0	1005.1	-2.1
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
A106 Gr.B	364.9	384.8	-4.9	675.9	646.6	3.9
A106 Gr.C	275.0	292.6	-6.4	485.0	469.5	3.2
SUS303	264.4	284.6	-7.6	1050.4	1067.1	-1.5
SUS304	389.8	396.6	-1.7	1085.2	1110.2	-2.3
SUS316	357.2	336.5	5.7	908.6	941.0	-3.5
SUS316L	397.0	431.0	-8.5	1011.0	1023.0	-1.1

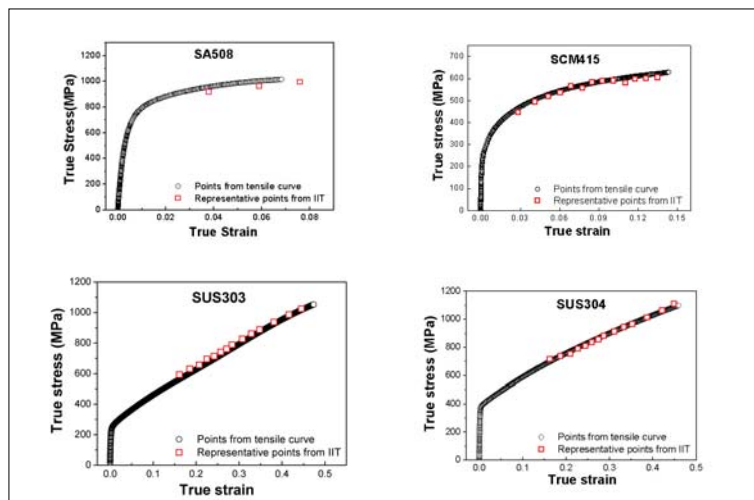


그림 7. 일축인장시험과 계장화 압입시험에 대한 응력-변형률 곡선의 비교

## 4.2 잔류응력 측정 사례

### 4.2.1 이종재료 용접 두께에 따른 잔류응력 변화

용접부 두께 변화에 따른 잔류응력의 변화를 계장화 압입시험을 통해서 정량화 하였다. 먼저 오스테나이트 스테인리스 강 304와 630을 이종금속 간 접합에 많이 사용되는 레이저 용접을 이용하여 실시하였다. 그림 8-(a)와 같이 용접부(bead)의 크기를 변화시키기 위해서 용접시 두 재료간의 간격을 0.06, 0.12, 0.2, 0.25 mm 로 변화 시키면서 용접을 한 후 용접부 중앙에서 각각 0.7, 2.0 mm 떨어진 위치에 계장화 압입시험을 수행하여 잔류응력을 각각 측정하였다. 측정된 잔류응력은 용접선과 수직 방향의 응력과 수평 방향의 응력을 구분하여 그림 8-(b)와 (c)에 나타 내었다. 측정된 잔류응력은 용접부 두께와 무관하게 SUS630 부분의 C지점에서 가장 크게 발생하는 것으로 측정되었다. 급속히 가열되었다가 순간적으로 냉각되는 레이저 용접의 특성상 상대적으로 SUS304 보다는 인장강도가 높은 SUS630에서의 잔류응력이 크게 발생한 것으로 판단할 수 있다. 또한 수직방향과 수평방향 모두 용접부 두께가 증가함에 따라 잔류응력은 감소하는 양상을 보이고 있다. 이는 용접부 잔류응력에 큰 영향을 미치는 열영향부(HAZ, heat affect zone)의 크기가 용접부의 두께가 작을수록 더욱 증가하기 때문인 것으로 예상할 수 있다. 레이저 용접이 열영향부가 작은 것으로 알려져 있으나 용접부 두께, 즉 용접재료의 간격의 차이에 따라 크기가 변하는 것으로 판단된다. 이러한 열영향부는 상대적으로 SUS630 재료에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

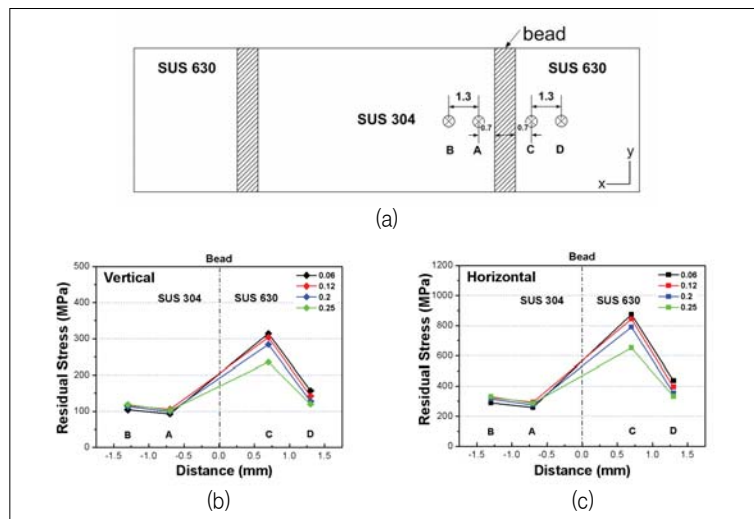


그림 8. (a) SUS304와 SUS630용접시험편의 개요, (b) 용접선에 수직방향으로 측정된 잔류응력, (c) 용접선에 수평방향으로 측정된 잔류응력

### 4.2.2 보일러 배관소재의 잔류응력 측정

실제 가동중인 보일러 배관 소재인 DIN X20(12CrMo steel)의 용접부 잔류응력을 계장화 압입시험을 이용하여 그림 9와 같이 측정한 후, 1~4번 위치에 X-ray diffraction을 이용한 잔류응력 측정 결과와 비교하여 그림 10에 도시하였다.



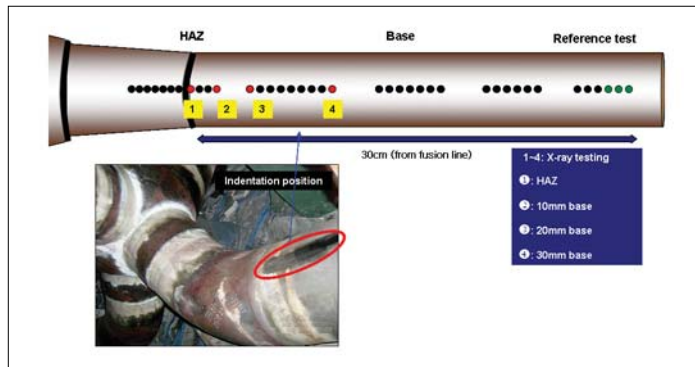


그림 9. 보일러 배관 12CrMo steel의 계장화 압입시험을 이용한 잔류응력 측정

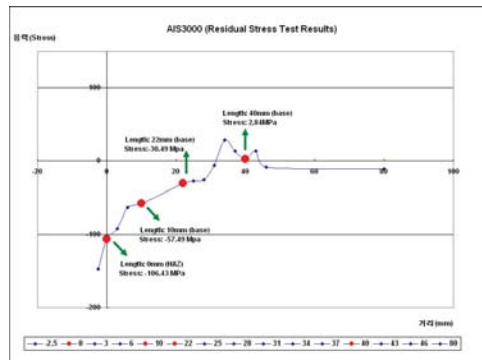


그림 10. 계장화 압입시험과 XRD를 통해 측정된 잔류응력의 비교

계장화 압입시험에서 측정된 용접부 잔류응력 분포는 XRD를 통해 측정된 것과 동일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 XRD법은 실 가동 중인 설비 주위의 환경적인 문제에 의해 많은 데이터를 얻지 못한 반면, 계장화 압입시험을 통해서 비교적 안정적인 잔류응력 분포의 획득이 가능하다. 또한 열영향부에 106.43 MPa의 압축 잔류응력이 존재하는 것으로 나타난 것으로 미루어 보아, 시험대상 설비의 잔류응력에 대한 위험도가 낮은 것을 직접적으로 판단할 수 있다.

## 5. 계장화 압입시험 기술의 표준화 및 기술 동향

계장화 압입시험을 이용한 인장물성평가 및 잔류응력 측정 기술은 순수 국내 개발기술로서 국/내외 적으로 표준화 활동이 활발히 진행 중에 있다. 지난 2002년 KS 규격인 KS B0950과 KS B0951에 제정되어 이 기술에 대한 인증을 받은 상황이며, 국제적으로 2003년 ISO/TC 164/SC3(ISO 14577-5, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 5: Measurement of indentation tensile properties)에서 인장물성 평가에 대한 표준화를 위한 논의가 처음 제안되었다. 이후 2004년에는 정식 기술문서 (TR, technical report)로 제정되어 7개의 국가를 토대로 결성한 WR(working group)을 중심으로 본격적인 표준화 작업이 시작되었으며, 한국이 WR의 의장국으로 활동하며 국제표준화 사업을 주도하고 있다. 최근 2006년 ISO

회의에서 이 기술에 대한 표준화 위원회 문서(ISO CD, committee draft) 제정을 의결하여 정식 문서로 발의하기 위한 수정작업을 현재 진행 중에 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 제정함으로써 대외적으로 기술의 우수성을 알리고, 대내적으로 자립심과 자부심을 증진시키는 계기가 되었다. 이외에 하중범위가 밀리그램 단위인 나노 계장화 압입시험을 통한 경도 측정 표준화가 영국, 독일, 한국 등을 중심으로 진행되고 있는 등 계장화 압입시험 관련 기술이 여타 분야에 비해 활발한 국제 표준제정 활동을 벌이고 있다. 이의 중심에 한국의 기술이 있다는 것에 다시 한 번 큰 의의를 찾을 수 있을 것이다. 계장화 압입시험 기술관련 국내의 표준화 동향을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 계장화 압입시험기술의 표준화 동향

구분	내용
KS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• KS B0950(2002) ;계장화 압입시험을 이용한 인장물성 평가</li> <li>• KS B0951(2005) ;계장화 압입시험을 이용한 용접부 잔류응력 평가</li> </ul>
ISO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO/TR 29831 ;Measurement of the mechanical properties by instrumented indentation test: Indentation tensile properties</li> <li>• ISO/TR 29831 annex ; Measurement of the residual stress by instrumented indnetation test</li> </ul>
KEPIC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MDF A370 부록 A1.6 ; 계장화 압입시험표 2. 계장화 압입시험기술의 표준화 동향</li> </ul>

## 6. 결론

계장화 압입시험기술은 기존의 경도 시험의 틀을 벗어나 다양한 재료의 기계적 특성을 평가 하는 최신 기술로서 국내 기술에 의해 국제 표준화 제정이 주도되고 있을 만큼 선진국 대열에 있으며 앞으로의 발전 가능성과 잠재력은 무궁하다고 할 수 있다. 서두에서 언급한 것처럼 원자력 재료의 물성 데이터의 확보는 원자력 발전소의 설계, 제조, 운전, 수명연장 및 보수, 유지를 위해 반드시 필요한 요소이다. 최근 2007년 6월 고리원자력 1호기의 가동을 중단하기로 결정된 것처럼 노후가 진행되고 있는 우리의 발전시설의 안전성 및 수명연장을 위해서라도 정확한 재료 물성 데이터 확보의 중요성을 다시금 생각해 볼 수 있다. 이러한 상황에서 계장화 압입시험기술의 높은 우수성과 편의성은 원자력 발전 뿐 아니라 화력발전 및 정유시설 등 실제 가동 중인 많은 구조물에 대한 재료물성 측정에 중추적 역할과 사회적인 기여를 할 것으로 기대된다.

최근 급변하는 사회의 근본적인 원인은 기술의 혁신적인 발전이라 할 수 있다. 기술의 발전은 당 시대의 기준과 질서를 무너뜨리고 새로운 기준을 창출하여, 또 다른 사회로 나아가는 초석이 된다. 계장화 압입시험 기술이 이 사회의 새로운 혁신을 불러일으킬 것을 조심스럽게 기대해 본다. 아울러 신기술에 대한 우리의 이해와 관심이 반드시

시 필요하며, 그것이야말로 국내 기술의 발전 및 산업의 발전의 기틀을 마련할 수 있는 밑거름이 됨을 잊지 말아야 할 것이다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] J.-H. Ahn and D. Kwon, J. Mater. Res., Vol. 16, pp. 3170-3178, 2001
- [2] Haggag, F. M., ASTM STP 1204, ASTM, Phil., pp. 27-44, 1993
- [3] Jung-Suk Lee and Dongil Kwon, Acta Mater., Vol. 54, pp. 1101-1109, 2006
- [4] Y.-H. Lee and D. Kwon, J. Mater. Res., Vol. 17, pp. 901-906, 2002
- [5] Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., Acta Mater., Vol. 46, pp. 5755-5767, 1998
- [6] H. A. Francis, Tran. of ASME (Series H), Vol. 9, pp. 272-281, 1976
- [7] D. Tabor, "Hardness of metals," 2nd, Clarendon Press, Oxford, 1951
- [8] K. L. Johnson, "Contact Mechanics," Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, pp. 84-106 1985
- [9] R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity," Clarendon, Oxford, 1956
- [10] 이병훈, 원자력발전소의 원자로 유지·보수 기술개발 동향, 기계와 재료, 18권 4호, 2006
- [11] 홍준화, 원자력재료기술개발: 원자력재료 특성평가 및 개선, 재료마당, 13권 8호, 2000



권 동 일

· 서울대학교 재료공학부 교수  
· 관심분야 : 재료물성평가 및 신뢰성구축  
· E-mail : dongilk@snu.ac.kr



이 경 우

· 서울대학교 재료공학부 박사과정  
· 관심분야 : 재료강도 및 나노계장화압입기술  
· E-mail : case77@snu.ac.kr



김 광 호

· (주)프론틱스 총괄이사  
· 관심분야 : 용접 잔류응력 및 비파괴 검사  
· E-mail : khkim@frontics.com