

연속압입시험법을 이용한 원전구조물의 잔류응력 평가를 위한 접촉깊이의 보정

김영천* · 강승균* · 안희준* · 김광호** · 권동일†

Calibration of Contact Depth for Evaluating Residual Stress using Instrumented Indentation Testing

Young-Cheon Kim*, Seung-Kyun Kang*, Hee-Jun Ahn*, Kwang-Ho Kim** and Dongil Kwon†

(Received 22 FEB 2011, Accepted 25 FEB 2011)

ABSTRACT

Residual stress is the key parameter for reliability and lifetime assessment because it can reduce the fatigue strength and fracture properties of industrial structures. Recently, instrumented indentation testing (IIT) has been widely used for evaluating it, since it does not need specific specimen and time-consuming procedure. However, conventional Oliver-Pharr method¹⁾, which is used for calibrating contact depth to analyze indentation load-depth curve, cannot estimate plastic pile-up between indenter and surface of specimen. Here, we introduce f parameter which is the ratio of contact depth and maximum depth, to consider pile-up height. And, its application for evaluating residual stress of weldment is introduced.

Key Words : Residual stress(잔류응력), Instrumented indentation testing(연속압입시험), Contact depth(접촉깊이), Plastic pile-up(소성 쌓임)

기호설명

h_c = contact depth
 h_{max} = indentation maximum depth
 h_d = height of elastic deflection
 h_f = final indentation depth
 f = ratio of h_c and h_{max}
 σ_{res} = residual stress
 h_{pile} = height of pile-up
 L = indentation load
 S = stiffness (initial slope of unloading curve)
 p = stress ratio

A_c = contact area
 n = strain hardening exponent
 E_r = reduced elastic modulus
 ψ = plastic constraint factor

1. 서론

원자력발전은 1978년 고리원자력발전소 1호기가 건설된 이후, 현재 전력생산의 30% 이상을 차지하면서 발전 분야의 중요한 축을 담당하고 있다. 현재 원자력 발전 설비들의 운영기간이 당초 계획하였던 30년에 육박하고 있어 이와 같은 원전 구조물의 기기 건전성 및 계속 운전 여부가 중요한 사항으로 부각되고 있다.

원전의 건전성 평가는 막대한 경제적, 산업적 손실을 방지하고 예기치 않은 사고의 위험을 낮추어

† 책임저자, 회원, 서울대학교

E-mail : dongilk@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7104 FAX : (02)889-4380

* 서울대학교

** Frontics Inc.

안전한 운전을 가능하게 하기 위하여 필수적으로 연구되어야 하는 분야이다. 이와 같은 연구와 더불어, 그 기초자료로서 활용되는 소재의 기계적 특성 등의 측정에 관련된 연구 또한 많은 연구자들에 의해 이루어지고 있고, 산업상으로도 그 수요가 매우 크다.

잔류응력은 소재의 고유한 기계적 물성에 의한 역학적 거동의 예측을 왜곡시키는 요소로 해당 기기의 건전성 및 수명평가에 오류를 범하게 한다. 또한 피로 및 파괴 특성을 저하시키기 때문에 이에 대한 정량적인 평가가 반드시 이루어져야 한다. 기존의 잔류응력 평가는 크게 파괴적인 평가와 비파괴적인 평가로 나뉜다. 전자에 속하는 대표적인 기법으로는 톱질단법(saw-cutting), 천공 측정법(hole-drilling) 등이 언급된다. 이와 같은 기법은 정량적인 데이터를 정확하게 얻을 수 있고, 원하는 지역의 국부적인 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 소재를 파괴해야 하고, 잔류응력을 측정하기 위하여 시간과 노력이 많이 필요하다는 단점이 있어 이를 보완하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 반면 비파괴적인 기법의 경우는 X-선 회절법(X-ray diffraction), 곡률측정법(curvature method) 등이 있고, 이들은 정량적인 잔류응력 데이터를 비파괴적으로 측정한다는 큰 장점이 있다. 그러나 용접부와 같이 국부적인 지역의 데이터나 잔류응력의 변화추이를 미세하게 측정하기 힘들다는 부분과 적용대상이 특정 소재 및 특정 시편에 제한되어 있다는 것이 한계점으로 작용하고 있다.

최근 연속압입시험을 이용하여 잔류응력을 측정하

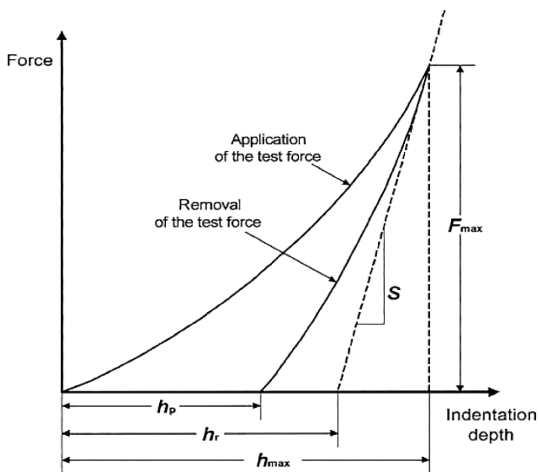


Fig. 1 Typical load-depth curve of instrumented indentation testing

는 연구가 활발히 진행되고 있다. 연속압입시험은 압입자를 이용하여 시편에 미소 하중을 가하고, 이에 대한 변형을 Fig. 1과 같이 연속적으로 측정하는 기법이다.

이는 표면에 불과 100 μ m 내외의 압흔을 남기고 소재의 기계적 특성을 평가할 수 있기 때문에 비파괴적이며, 시험 절차 및 원리가 비교적 간단하여 실시간으로 정량적인 데이터가 산출이 가능하다는 평가를 받고 있다. 따라서 운영 중인 설비에 적용이 가능하여 잔여 수명평가 및 소재 열화 정도를 평가하고자 하는 산업적 요구가 점차 늘어날 것으로 기대된다.

본 연구에서는 이와 같은 연속압입시험을 이용하여 잔류응력을 측정하는 기법에 필요한 접촉깊이를 보정하는 내용을 소개하고자 한다.

2. 연속압입시험을 이용한 잔류응력 평가

2.1 잔류응력에 따른 압입하중-변위곡선의 변화

잔류응력이 존재하지 않는 시편과 존재하는 시편에 압입실험을 하였을 때, 그 결과는 Fig. 2와 같이 압입하중-변위곡선 상에서 다르게 나타난다. 시편 표면과 평행한 방향의 잔류응력을 가정하였을 때, 인장 잔류응력은 소재 표면을 이완시켜 압입자의 압입을 용이하게 하는 요소로 작용하고, 압축 잔류응력은 소재 표면에 대한 압입자의 압입을 방해하는 요소로 작용한다. 따라서 같은 압입하중을 가하였을 때, 인장 잔류응력이 존재하게 되면 무응력 시편에 압입하였을 때보다 압입깊이가 증가한다. 반대로 압축 잔류응력이 존재하게 되면 압입깊이가 감소한다.

다시 말해서 같은 압입깊이를 유도하기 위해서 인

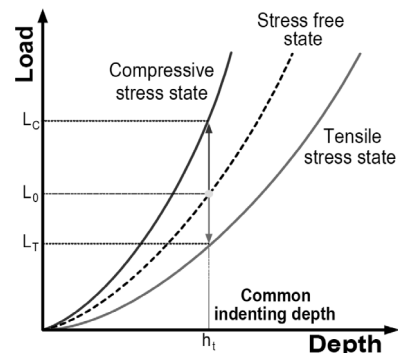


Fig. 2 Variation of indentation loading curves with changes in the stress state

장 잔류응력이 존재할 경우, 더 낮은 압입하중이 필요하고, 압축 잔류응력일 경우에는 더 높은 압입하중이 필요하다. 이와 같이 잔류응력에 따라 압입하중이 변화하게 되는 원리를 이용하여 잔류응력이 존재하는 상태와 무응력 상태를 비교하면 압입하중의 차이를 구할 수 있다. 이를 응력으로 환산하는 과정이 압입기법을 이용하여 정량적인 잔류응력을 구하는 연구의 주요 개념으로 자리잡고 있다.

2.2 잔류응력 유도 수직하중의 분석

시편 표면과 평행한 잔류응력이 존재하는 상태에서 압입을 수행하게 되면 압입자 하부에는 복잡한 형태의 응력장이 형성된다. 이를 단순화하고, 표면에 평행한 잔류응력이 표면과 수직인 방향의 압입하중에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 구형 공동모델(spherical cavity model)을 가정하였다.

압입자 하부에는 코어(core)가 형성되고, 이러한 부분은 정수압 상태(hydrostatic stress)의 응력이 발생하게 된다. Suresh와 Giannakopoulos⁶⁾는 상기 모델을 이용하여 등방 2축 잔류응력 상태에 따른 압입하중의 변화에 주목하였다. 정수압 응력은 소재의 소성변형에 무관하므로 소재에 존재하는 응력에서 정수압 응력을 제거한 상태의 z축 응력이 압입하중이 변화하는 원인으로 작용한다고 주장하였다. 그러나 이러한 주장은 구형 공동모델 내부의 정수압 응력 요소를 완벽히 배제하지 못한다는 한계점이 있어 실제 적용하기 어려운 측면이 있었다.

Lee와 Kwon³⁾은 비등방 잔류응력을 등방 잔류응력으로 나타내어 잔류응력에 의하여 발생하는 수직하중을 계산하는 시도를 하였다. 거의 모든 산업 구조물에서는 비등방 잔류응력 상태가 존재하므로, 응력

비(stress ratio) p 를 도입하여 x 와 y 축의 잔류응력을 각각 σ_{res} , $p\sigma_{res}$ 와 같이 나타내었다. 등방 2축 잔류응력이 인가되면 구형 공동모델에서의 코어 지역에 전단응력 성분이 추가적으로 발생한다. 모든 응력은 정수압과 편차응력으로 분해가 가능하므로⁴⁾ 코어 내부의 정수압과 등방 2축 잔류응력의 합 또한 이 두 성분으로 다시 분해될 수 있다. 상기 언급한 바와 같이 압입하중에 영향을 미칠 수 있는 부분은 편차응력이기 때문에 zz -방향의 성분이 잔류응력과 직접적인 관련이 있다고 설명할 수 있다.

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

식 (1)에서 $-(1+p)\sigma_{res}/3$ 성분이 잔류응력에 의하여 유도된 수직하중이라 정의할 수 있고, Fig. 2에서 잔류응력에 대한 증가분을 이와 동일하다고 보면 식 (2)와 같이 정리된다.

$$\sigma_{res,x} = \frac{3(L_0 - L_T)}{(1+p) \cdot A_c^T} \tag{2}$$

$$\sigma_{res,y} = p\sigma_{res,x} = \frac{3(L_0 - L_T)}{(1+p) \cdot A_c^T}$$

L_{res} 는 잔류응력에 의하여 변화된 압입하중을 의미하며 A_c 는 접촉면적을 의미한다. ψ 는 소성구속계수(plastic constraint factor)를 나타내고 본 연구에서는 Tabor⁴⁾가 제시한 바와 같이 3으로 가정한다.

3. 접촉깊이의 보정

식 (2)에서의 변수는 L_{res} 와 A_c 이므로 이들을 구하는 것이 잔류응력을 측정하는 데 결정적인 요소로 볼 수 있다. L_{res} 는 실험상에서 측정하여 결정되는 수치이므로 추가적인 분석이 불필요하지만 A_c 는 압입실

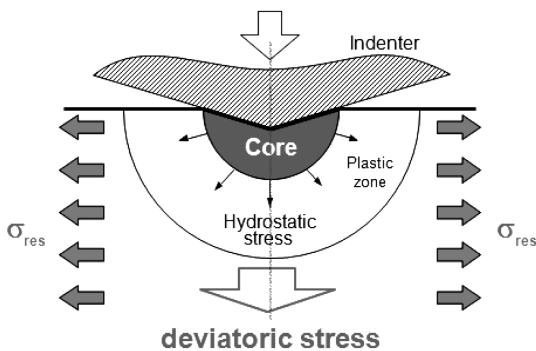


Fig. 3 Schematic diagram of spherical cavity model

험 중에 직접적으로 측정이 불가능하기 때문에 접촉 깊이를 통하여 산출하는 과정이 필요하다.

그러나 Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같이 실제 압입자와 시편 표면이 맞닿는 접촉깊이를 정확히 산출하기 위해서는 시편 표면에서 발생하는 탄성 변형, 소성 쌓임 현상을 반영해야 한다. 탄성 변형(elastic deflection)은 하중이 제거된 후에 회복하는 양이고, 소성 쌓임(plastic pile-up) 현상은 하중이 제거된 후에도 존재하기 때문에 전자와 후자는 각각 압입깊이를 과대평가 및 과소평가하게 만드는 작용을 한다. 이를 반영한 실제 접촉깊이는 식 (3)과 같이 정의된다.

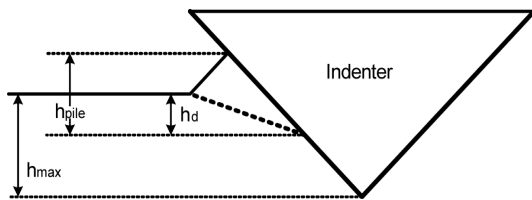


Fig. 4 Schematic diagram of plastic pile-up between indenter and surface of specimen

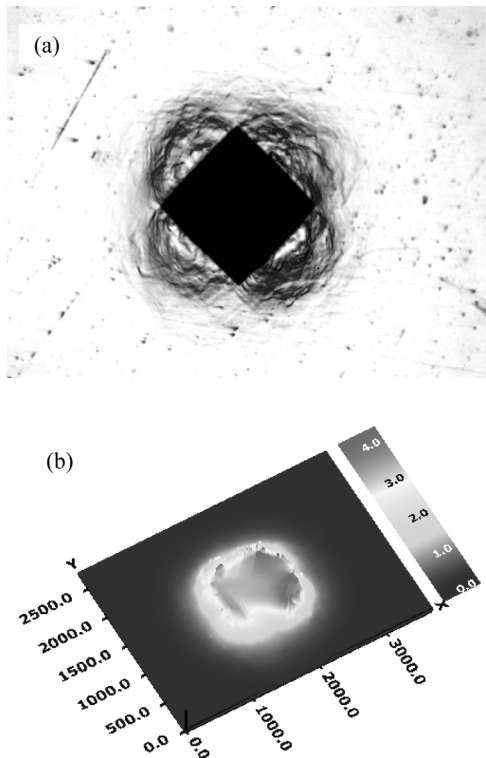


Fig. 5 Optical image of residual indentation mark (a) and its 3D profile (b) for API X20

$$h_c = h_{max} - h_d + h_{pile} \quad (3)$$

접촉깊이를 보정하는 기법 중 가장 널리 쓰이고 있는 Oliver-Pharr 기법¹⁾은 Hertz가 정리한 접촉역학(contact mechanics)로부터 유도되어 식 (4)와 같이 탄성 변형에 대한 접촉깊이의 왜곡된 정도를 보정한 다. 그러나 소성 쌓임에 대한 고려가 이루어지지 못하고 있다.

$$h_c = h_{max} - h_d = h_{max} - \epsilon \cdot \frac{L}{S} \quad (4)$$

Choi 등²⁾은 압입하중-변위곡선에 영향을 미칠 수 있는 기계적 물성을 고려한 차원해석 및 가상의 소재에 대한 유한요소 해석을 통하여 소성 쌓임에 관계있는 인자를 고려하여 식 (5)와 같은 관계식을 유도하였다.

$$f = 1.2445(1 - 0.6n) \left(1 - 7.2 \frac{\sigma_{ys}}{E_r} \right) \quad (5)$$

그러나 위 식은 경험적인 실험식으로 도출되어 그 물리적 근거가 부족하다는 한계점이 지적되어 왔다. 또한 접촉깊이를 보정하기 위하여 소재의 기계적 물성은 가공경화지수(Strain-hardening exponent), 항복 연신율(Yield strain) 등을 미리 알아야 한다는 단점이 있어 환경적인 요인 등에 의하여 열화되어 물성이 바뀌는 상황에서는 적용하기가 어렵다.

Kang 등⁷⁾은 이러한 연구의 한계점을 극복하고자 기존 연구를 바탕으로 제시된 접촉깊이의 소성 쌓임과 관련있는 인자를 선택하여 압입하중-변위곡선 상에서 나타나는 인자와 연관성을 찾는 작업을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 소성 쌓임에 주요한 영향을 미치는 인자는 여러 연구자들에 의해 가공경화지수와 항복 연신율이라는 결과가 밝혀지고 이용되고 있다. 이 두 가지 인자 중에서 지배적으로 영향을 미치는 인자를 알아보기 위해 20여 가지의 금속 소재에 대하여 압입실험을 실시하였고, 그 결과 가공경화지수보다 항복 연신율이 소성 쌓임에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

그러나 항복 연신율은 압입하중-변위곡선으로부터 직접적으로 얻을 수 없는 물성이므로 이를 다른 압입 인자로 치환하는 과정이 필요하다. 이는 압입

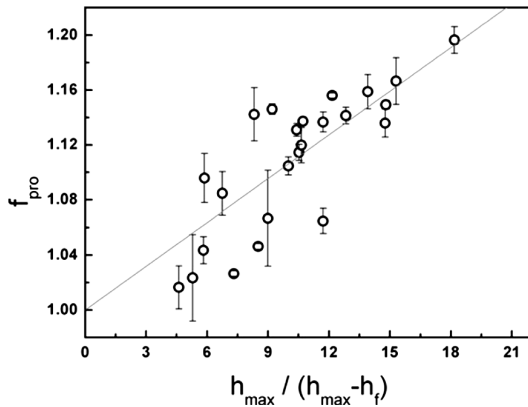


Fig. 6 Linear relation of contact depth function for projected area and normalized recovery depth

하중-변위곡선의 하부 면적을 적분하여 압입자가 시편에 가한 비가역적인 일(irreversible work)의 개념을 도입하여 해결하고자 하였으며 Fig. 6과 같이 약 20여 가지의 금속시편에 대하여 그 경향을 확인하였다. 결과적으로 h_{max} , h_f 로 이루어진 식 (6)과 같은 수식으로 정리할 수 있었다.

$$f = 1.06 \times 10^{-2} \frac{h_{max}}{h_{max} - h_f} + 1.00 \quad (6)$$

본 연구에서는 2절에서 언급한 잔류응력을 측정하는 과정에서 필요한 접촉면적을 계산하기 위하여 위 식을 이용하였다.

4. 실험적 검증 및 논의

소성 쌓임 현상을 반영한 접촉면적으로부터 잔류응력의 측정을 위해 Fig. 7과 같은 API 계열의 용접시편을 준비하였다. 용접은 교반용접기법을 사용하였고, 연마지(emery paper)를 2000번까지 적용하여, 표면조도와 표면 산화층의 효과를 최대한 배제하였다. 대상 시편의 x축 방향으로 잔류응력의 변화 추이를 함께 분석하고자 총 21개 압입실험을 수행하였고, 이에 대한 잔류응력을 평가하였다.

압입실험은 Fig. 8과 같이 Frontics Inc.에서 개발한 Advanced indentation system 3000 (AIS3000) 기기를 이용하였고, 압입속도는 0.3mm/min, 최대 압입하중은 80kgf로 실험하였다. 압입자는 첨단(tip)부분이 피라미드 형태와 같은 다이아몬드로 이루어진 상용

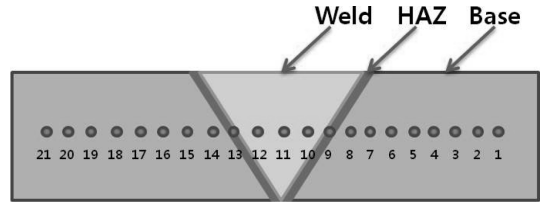


Fig. 7 Schematic diagram of weldment specimen and locations of indentation



Fig. 8 Advanced indentation system (AIS) 3000 (Frontics, Inc.)

Vickers 압입자를 이용하였다.

Fig. 9는 압입실험 데이터 중 하나를 나타낸 그림이다. 상기 언급한 바와 같이 실험 대상 지역에서 얻은 데이터(Target)와 잔류응력이 존재하지 않는 무응력 지역에서 얻은 데이터(Reference)가 서로 같지 않음을 알 수 있다. 이를 통하여 시편 내부에 존재하는 잔류응력이 실제로 압입하중에 영향을 미침을 확인할 수 있었고, 또한 실험 대상 지역에서 얻은 데이터가 무응력 지역에서 얻은 데이터보다 같은 압입깊이에 도달하는 데 필요한 압입하중이 더 높게 평가되어 해당 지역은 압축 잔류응력이 걸려 있음을 예상할 수 있다.

상기 데이터를 앞서 2절에서 논의한 내용에 따라 분석을 진행하기 위하여 우선 각각의 압입실험 데이터에 대한 접촉깊이 분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 예상된 바와 같이 Oliver-Pharr 기법으로 계산된 압입깊이가 본 연구에서 제시된 기법으로 예측된 압입깊이보다 상대적으로 낮게 평가되고 있다. 이는 압입하중 제거 시 회복되는 탄성적인 변형만을 보정하여 회복되지 않는 소성변형인 소성 쌓임 현상을 반영하지 못했기 때문으로 설명할 수 있

고, 따라서 그 값이 낮게 평가가 되어, 본 시편에 대해서는 평균적으로 약 15% 차이를 발생하고 있었다. 또한 계산된 접촉깊이를 접촉면적으로 환산하여 평균응력(mean pressure)을 산출한 그래프는 Fig. 11과 같다.

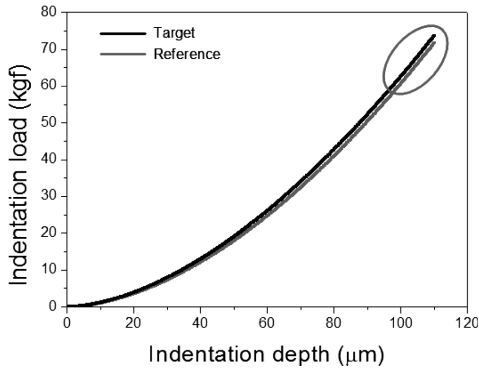


Fig. 9 Comparison of indentation load-depth curve at stressed state (target) and stress-free state (reference)

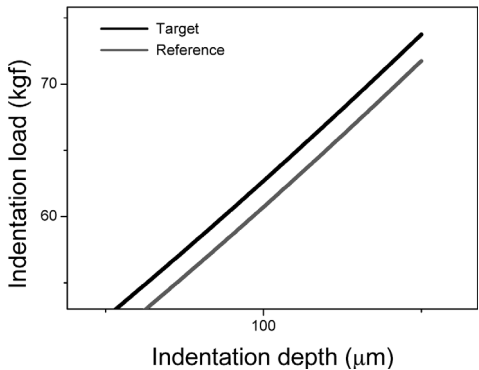
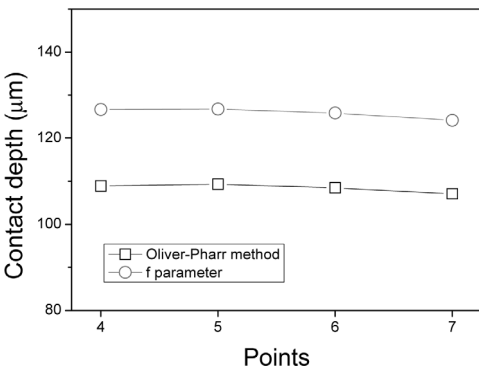


Fig. 10 Comparison of contact depths from Oliver-Pharr method and f parameter



평균응력은 접촉면적과 반비례 관계에 있으므로 접촉깊이의 오차가 그대로 반영된다. 본 시편에 대해서는 평균적으로 약 35%가 나타나고, 이는 정량적인 잔류응력 측정에 오차 요소로 작용하는 것으로 판단할 수 있다.

본 결과를 바탕으로 모든 압입실험 데이터에 대하여 잔류응력 분석을 실시하였다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 용접부의 중심부가 가장 큰 인장 잔류응력을 보였고, 중심부에서 멀어질수록 인장 잔류응력이 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 용접부의 인장 잔류응력이 완화하기 위하여 나타난 것으로 설명할 수 있다. 또한 용접 열영향부 근방에서 잔류응력의 변화가 가장 심하게 나타남을 알 수 있었고 이는 일반적인 잔류응력의 변화 추이와 일치함을 확인할 수 있었다.

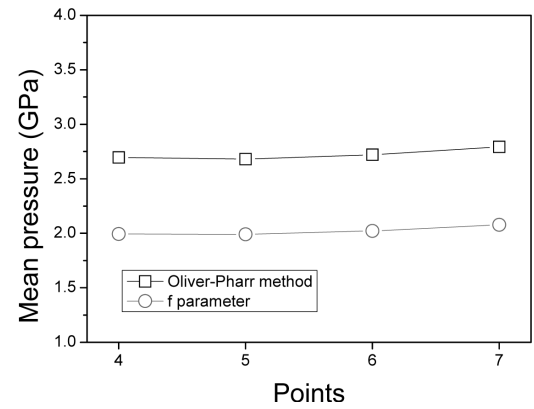


Fig. 11 Comparison of mean pressure from Oliver-Pharr method and f parameter

Fig. 12 Residual stress profile along x-axis using instrumented indentation testing

5. 결론

본 연구에서는 연속압입시험을 이용하여 원전구조물의 잔류응력을 평가하기 위한 접촉깊이의 보정에 대한 내용을 소개하였다. 실제로 가장 널리 이용되고 있는 Oliver-Pharr 기법과 비교하였을 때, 소성 쌓임 현상의 반영으로 인한 35% 정도의 오차가 보정됨을 확인할 수 있었고, 따라서 미세 용접부의 잔류응력을 산출하였다. 그 결과, 기존에 알려진 용접부의 잔류응력 변화 추이와 실험결과는 일치하였다. 이를 통하여 가동 중인 원전구조물의 잔류응력을 실시간으로 정확히 예측할 수 있는 가능성을 확인하였고, 앞으로 수명평가 및 건전성평가를 위한 잔류응력 측정이 필요한 현장에 널리 이용될 것으로 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 부품-소재기술개발사업(K00 01337) 및 교육과학기술부 나노기반 정보·에너지 사업본부-신기술융합형 성장동력사업(2010K001433)의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Oliver, W. C., Pharr, G. M., 1992, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", *Journal of material research*, Vol. 7, p. 1564.
2. Choi, Y., Lee, H. S., Kwon, D., 2004, "Analysis of Sharp-Tip-Indentation Load-Depth Curve for Contact Area Determination Taking into Account Pile-up and Sink-in Effects", *Journal of Materials Research*, Vol. 19, pp. 3307-3315.
3. 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.
4. Tabor, D., 1951. "Hardness of Metals", Clarendon Press, UK.
5. Dieter, G. E., 1986. "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill, Hightstown, NJ.
6. Suresh, S, and Giannakopoulos, AE, 1998, "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation", *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 5755-5767.
7. Kang, S. K., Kim, J. Y., Park, C. P., Kim, H. U., Kwon, D., 2010, "Conventional Vickers and true instrumented indentation hardness determined by instrumented indentation test", Vol. 25, No. 2, pp. 337-343.