

**Advanced Indentation System을 이용한
현장에서의 구조강도 건전성 평가
In-field Evaluation of Structural Strength and Reliability
Using Advanced Indentation System**

최열¹⁾ 손동일²⁾ 강제일³⁾ 권동일⁴⁾
Choi, Yeol Son, Dongil Jang, Jae-il Kwon, Dongil

ABSTRACT

For the structural integrity of large and complex structures such as railway vehicle, the in-field diagnosis of mechanical properties of the structures is needed, and especially, the mechanical characteristics of the weldment must be carefully evaluated. But, conventional standard testing methods having destructive procedures are not applicable to in-field assessment of mechanical property variations within weldment because they needs the limitations of specimen size and geometry. In this paper, to overcome this problems, the advanced indentation technique (AIS) is introduced for simple and non-destructive/in-field testing of weldment of industrial structures. This test measures indentation load-depth curve during indentation and analyzes the mechanical properties related to deformation and fracture. First of all, flow properties such as yield strength, tensile strength and work hardening index can be evaluated through the analysis of the deformation behavior beneath the spherical indenter. Additionally, case studies of advanced indentation techniques are introduced.

1. 서론

산업의 발달에 따라 고성능, 고기능에 관한 사회적 요구를 만족하기 위하여 구조물들은 점차 복잡화, 대형화되어 가는 경향에 놓여 있는데, 이러한 복합적인 대형 구조물의 불균질 이음부는 취성적인 특성을 나타내는 경우가 많아 불균질 재료의 기계적 특성에 대한 연구의 필요성이 증가되는 추세이다. 강의 용접부는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 야금학적 및 역학적으로 불균질체의 대표적인 예가 될수 있는데, 구조물의 대형화 경향에 따라 용접이 차지하는 비중이 커지면서 80년대 중반부터는 용접부의 재질적 불균질성에 관한 다양한 공학적 관심들이 부상되고 있고, 특히 용접부의 기계적 성질의 변화를 정확히 규명하려는 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 기존의 소재 물성 평가를 위한 표준 방법인 일축인장 시험 및 파괴역학 시험의 경우, 변형 및 파괴 거동에 대한 많

-
- 1) (주)프론틱스 선임연구원, 정회원
 - 2) (주)프론틱스 선임연구원, 정회원
 - 3) (주)프론틱스 책임연구원, 정회원
 - 4) 서울대학교 교수, 정회원

은 정보를 제공하고 있지만, 일정 크기와 형태를 갖춘 표준시험편이 필요하므로 내부에 다양한 미세조직 기울기 및 이에 기인한 물성 변화를 가진 용접부의 특정부위 평가에 적용하기에는 아직 많은 어려움이 있다. 특히 용접열영향부의 기계적 성질 평가는 다양한 연구 노력에도 불구하고 아직까지 구체화되지 못하여 최근 발표된 용접구조물의 결함에 대한 사용적합성 (fitness-for-service) 평가 코드들[1-2]에서도 열영향부에 대한 정확한 평가는 미제로 남아있다. 또한 기존의 표준 시험법들은 실험실적 파괴시험법들로서 현장 물성을 정확히 반영하지 못한다는 점 역시 큰 제한 사항이다.

상기 문제점에 대한 해결 방안으로 현장에서 용접부에 대해 기계적 성질을 평가하려는 많은 연구가 수행되었는데, 그 중에서도 가장 구체적으로 현실화된 것이 바로 연속 압입시험법 (continuous indentation test)이다[3-5]. 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거(multiple loading and unloading)하고 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 계장화 장치를 이용하여 연속적으로 측정, 그 결과를 해석하여 최종적으로 인장 물성을 포함한 기계적 성질을 평가하는 연속 압입시험법은 구형 압입자의 압입 하중-변형 상황을 분석함으로써, 경도는 물론 일축인장시험과 같이 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 포함하는 소재의 인장물성[3-4]과 적절한 모델링을 바탕으로 파괴특성도 평가할 수 있다[4-5]. 이러한 연속압입시험법을 활용하여 인장물성을 평가할 경우, 용접부에 대한 사용적합성(fitness-for-purpose) 평가에 필요한 주요 자료로서 활용할 수 있을 뿐 아니라 용접부 품질관리 측면에서 사용전 시험(pre-qualification test)으로써 구조물/설비의 기본적인 건전성 확보가 가능하게 된다는 큰 장점이 있다. 본 발표에서는, 연속 압입시험법의 이론적 배경과 함께, 저자들 중 일부가 소속한 Frontics 사가 개발한 연속압입시험 시스템인 Advanced Indentation System (이하 AIS)을 활용하여 발전설비 등 대형 설비의 용접부 현장 물성 평가에 적용한 예를 간단히 정리하여 소개하였다.

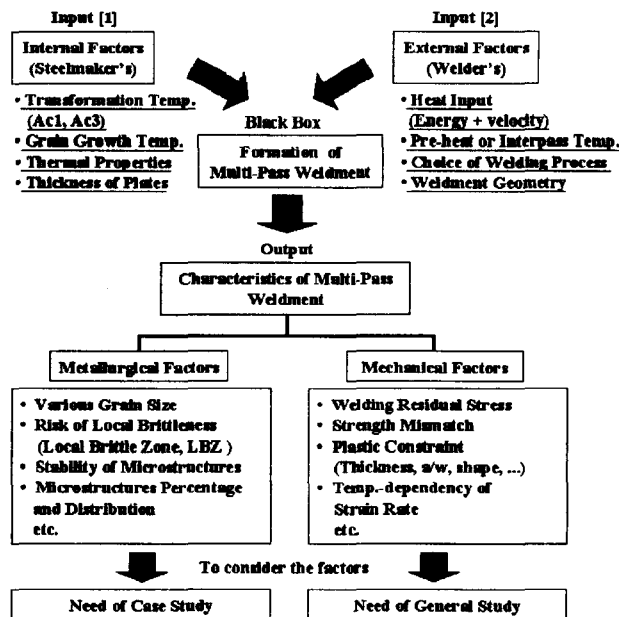


Fig. 1. Classification of various weldment characteristics affecting mechanical properties in steel weldment.

2. 본론

2-1. 연속 압입시험법을 이용한 재료의 기계적 물성 평가

연속 압입시험 시, 구형 압입자/시편 간의 접촉깊이는 그림 2에 나타나 있는 압입하중 제거곡선을 분석하여 평가한다. 이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘사한 것이며, 이에 추가적으로 탄성급침 및 pile-up 현상에 의한 오차가 보정되어야 실제 접촉깊이가 결정된다. 우선 하중제거 곡선을 멱함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분함으로써 기울기 S를 평가한다. 압입자와 시편의 접촉깊이 h_c^* 는 elastic flat punch 이론을 이용하여 앞서 결정된 기울기를 따르는 직선을 압입하중 L이 0인 상태까지 외삽하여 평가하게 된다[6]. 그러나 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를 ω 라는 압입자 형태상수로 보정한 식 (1)이 제시되었다[7].

$$h_c^* = h_{\max} - \omega \frac{L}{S} \quad (1)$$

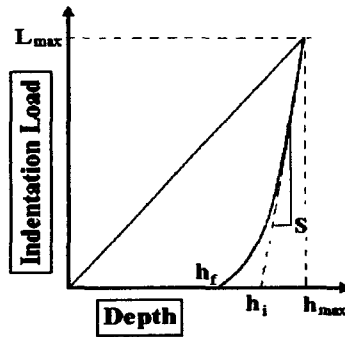


Fig. 2. Analysis of indentation load-depth curve.

구형 압입자의 형태상수인 0.75를 대입하고, 압입자의 기하학적 형상을 고려하면 압입자/시편의 접촉반경 a_c 를 평가할 수 있다. 그러나 최근 연구에 따르면, 그림 3과 같이 압입자/시편의 접촉반경은 가공경화지수 n 과 직접적인 관계를 갖는 압흔 주변의 pile-up/sink-in 양상에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 확인되었고, 이로부터 식 (2)의 수정된 접촉반경 a_c 를 평가할 수 있다[8].

$$a_c^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_*^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (2)$$

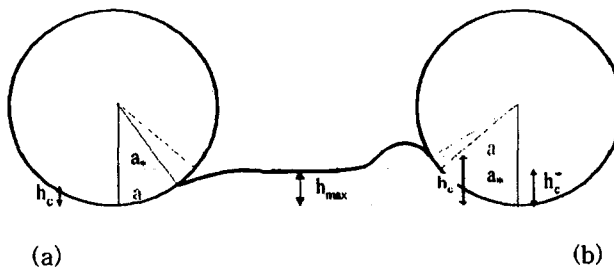


Fig. 3. The schematic diagram of indentation (a) sink-in and (b) pile-up phenomena.

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하기 때문에 이로부터 일축 인장시험과 마찬가지로 유동특성을 평가하는 연구가 진행되었다. 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역으로 천이됨이 보고되었다[9]. 유동특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다. 우선 유동응력은 식 (3)과 같이 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자 ψ 를 결정함으로써 평가한다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (3)$$

소성구속인자 ψ 는 Francis의 연구[9]와 압입자 하부 변형상황의 모델링을 통해 제시된 탄성, 탄소성, 완전소성의 각 단계 별 모델링 결과[10]가 제시되어 있으나, 소성변형 영역까지의 천이 속도가 빨라서 현재 유동응력의 분석에는 주로 ψ 값을 3으로 하는 식을 사용하고 있다[3].

다음으로 구형 압입자 하부의 변형률을 정의하는 초기연구에서는 우선 압입자의 형상과 소성 접촉반경을 관련지어 실험적으로 압입 변형률을 $0.2a/R$ 로 표현하였으나, 실험적인 한계로 인해 몇 가지 강제에서만 유효한 결과를 나타내었다. 따라서 최종적으로는 압입자 반경가 압입깊이와의 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 (4)와 같은 압입변형률을 정의하였으며, 이때 요구되는 상수 α 는 재료에 상관없이 0.1로 정의하였다[3].

$$\epsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (4)$$

이를 바탕으로 다양한 재료에 대해 시험을 행하였으며, 일축인장 시험결과와 비교할 때 완전 소성 영역에서 유동특성을 정확하게 평가함을 확인할 수 있었다. 또한 유동곡선은 Hollomon 식을 이용하고, 적합화와 외삽, 연속체 이론을 통해 항복강도, 가공경화지수, 인장강도와 같은 다양한 물성 평가에 이용할 수 있다. 아래 그림 4에는 구조용 강으로 자주 사용되는 SM490과 원자로 압력용기 강인 SA508 cl. 3에 대해 시험한 유동곡선[3]과 기존의 연구에서 용접부에 적용한 결과[4]를 나타낸다.

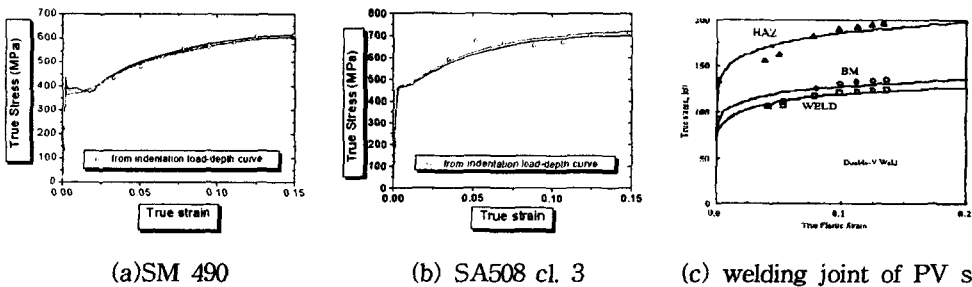


Fig. 4. Comparisons between flow properties calculated from advanced indentation(dot) and those from standard tensile tests(solid line).

2-2. Advanced Indentation System의 개발 및 현장 적용에

연속 압입시험법은 전술한 바와 같이 기존의 경도시험법을 개선하여 압입시험 중의 실하중과

압입자 침투변위를 초기자료로 하여, 여러 가지 기계적 물성을 평가하는 방법이다. 직경 1mm 정도의 미세한 경구를 사용하여 mm 수준의 취약부 물성 평가가 가능하고, 간단한 표면연마 처리를 통해서 시편을 준비할 수 있으므로, 일축 표준 인장시편의 채취없이 대형 구조물의 항복강도, 가공경화지수, 인장강도를 평가 가능하며, 기존에 현장에서 주로 사용되던 표면 경도기(superficial hardness tester)를 대체할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 관점에서 본 저자들중 일부가 소속한 Frontics 사에서는 현장적용을 위한 이동식 연속 압입시험기 Advanced Indentation System 2000 (AIS 2000)을 개발하였다. 그림 5에 나타낸 Advanced Indentation System은 소형·경량성, 이동성, 구조물 적용성 및 원격 제어 가능성에 주안점을 두고 압입시험기, interface 부, 제어용 노트북 컴퓨터로 분리 제작되었다. 하중/변위 센서에서 나온 출력신호는 interface부를 거치면서 증폭 및 디지털 신호로 변환되어 노트북에 입력되고 동시에 그림 6과 같은 하중-압입깊이 곡선을 실시간으로 형성한다. 반대로 노트북에서 발생된 서보모터 구동 신호는 interface부에 내장된 모터드라이브로 전달되어 모터를 움직인다. 또, 상부의 압입모듈을 지지하는 지그의 변화를 통하여 다양한 구조물에 대한 활용도를 증가시켰다. 기본적으로 고강도 평판 및 곡률 전자석 지그를 채용하여, 평판 및 파이프 구조물에 고정할 수 있으며, 기계적 체인과 곡률 블록을 이용하여 불규칙한 형상과 직경이 작은 튜브 소재의 기계적 물성 평가를 가능케 하였다.

연속 압입시험 결과 나타나는 그림 6의 하중-압입깊이 곡선은 앞 절에서 언급된 압입시험 이론을 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용하여 분석함으로써 그림 7과 같이 시험과 동시에 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도와 같은 일축 인장시험에서 구할 수 있는 전반적인 변형관련 강도 물성을 평가하게 된다. 다양한 소재 및 열화정도의 변형거동에 대한 직접적인 비교를 위해서는 그림 8과 같이 하중-압입깊이 그래프의 중첩을 통해 가능하다.



Fig. 5. Portable advanced indentation system developed by FRONTICS, Inc.

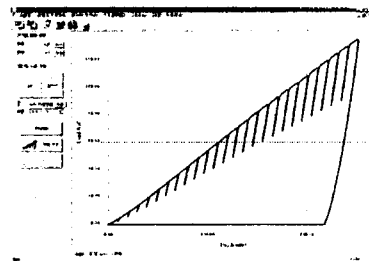


Fig. 6. Analysis of indentation load-depth curve.

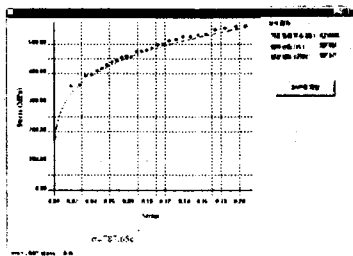


Fig. 7. Derivation of flow curve from indentation load-depth curve.

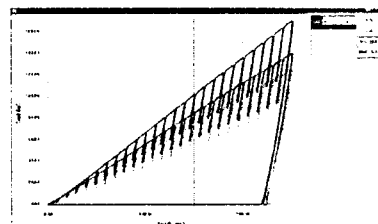


Fig. 8. Graphs superposition for the comparison of degraded materials properties.

그림 9에 나타난 바와 같이 천연가스 배관용 API 5L X65 강제 원주 용접부의 두께방향에 대해 외각, 내각 중심선을 따라서 다중 압입시험을 행하고, 용착금속, 모재 및 열영향부의 인장물성 변화 양상을 살펴보았다. 동일한 압입깊이에 대해서 소재가 나타내는 압입자 침투에 대한 저항성으로 볼 때 용착금속이 가장 높은 저항을 나타내었고, 열영향부가 가장 낮은 하중을 나타내었다. 이로부터 열영향부가 가장 낮은 변형 저항성을 가짐을 확인할 수 있었다. 각각의 하중-변위곡선은 유동곡선 평가 소프트웨어를 구동하여 각 부분의 유동곡선 그림 10과 같이 평가하였다. 평가 결과 열영향부에서 가장 낮은 항복강도 및 인장강도를 나타냄을 확인할 수 있었는데 이는 TMCP (thermo-mechanically controlled process) 공정에 의해 제조된 강 of 용접열영향부에서 일반적으로 관찰되는 연화현상에 기인한 결과이다. 또한 모재만의 항복강도를 비교해 본 결과 외각 및 내각에서 분석된 결과가 중심선에 비해 높은 항복강도를 나타냄을 확인할 수 있었고, 이 결과는 일반적으로 압연강재의 특징을 나타냄을 확인할 수 있었다.

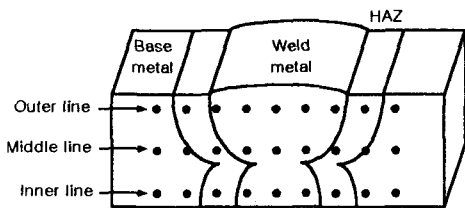


Fig. 9. Indentation arrays in the girth weld joint of API X65 steel.

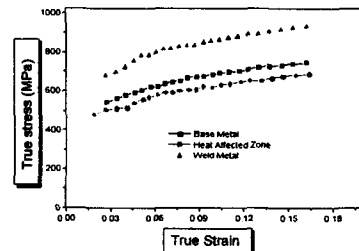


Fig. 10. The difference of flow curves with the variation of microstructure in API X65 steel.

전술한 바와 같이 advanced indentation system은 현장 구조물에 직접 부착하여 사용함을 목적으로 제작되었으므로 그림 11과 같이 시편채취가 필요 없이 직접 시험대상에 부착하여 비파괴적으로 인장물성을 평가하게 된다. 그림 12와 13은 가동중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부/용착금속의 압입하중-변위곡선 및 유동곡선의 그래프이다. 시험조건은 최대변위 0.3mm까지 압입하게 되는 변위제어 압입시험으로서, 압입속도는 0.3mm/min, 15회 다중압입을 수행하도록 설정하여 시험하였다. 각 부위별로 3회의 압입시험을 수행한 결과 모재 및 용착금속은 균일한 강도값을 얻을 수 있었으나, 열영향부의 경우 2mm 간격의 시험위치에 따라 압입하중-변위곡선, 유동곡선 및 인장 물성의 변화를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 압입곡선의 분석 결과 동일한 깊이까지 압입하는데 필요한 하중이 용착금속, 열영향부, 모재의 순으로 낮아짐을 알 수 있으며, 이러한 경향성과 일치하여 결과적으로 얻어진 유동곡선, 항복강도, 인장강도 등도 동일한 분포특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 실험결과와 PQR (pre-qualification record)에 기록된 물성을 비교한 결과, 거의 유사함을 확인하였고 이에 따라 새로운 PQ 시험의 한 가지로 연속압입시험이 사용될 수 있다고 판단되었다.

3.결언

본 논문에서는 연속 압입시험법의 이론적 연구내용과 이를 기반으로 한 Advanced Indentation System의 개발 및 산업설비 용접부에의 적용 예를 소개하였다. 본 연구와 같이 AIS를 이용하여 용접부의 인장물성 변화를 정량적으로 평가할 경우, 첫째, 운용중인 구조물/설비의 용접부에 대한

사용적합성(fitness-for-service) 평가를 위한 손상평가도(failure assessment diagram, FAD) 구축이 용이해지고 정확도와 보수성을 최적화 시킬 수 있게 되고, 둘째, 용접부에 대한 품질관리와 수명평가가 가능하게 되고, 셋째, 용접구조물에 대한 유한요소해석(finite element method)의 정확도 높은 입력자료로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 국내에서도 용접부에 대한 건전성 요구가 증가하고 있는 만큼 연속 압입시험법의 적극적인 현장활용이 기대된다.



Fig. 11. AIS 2000 attached to pipeline for in-field test.

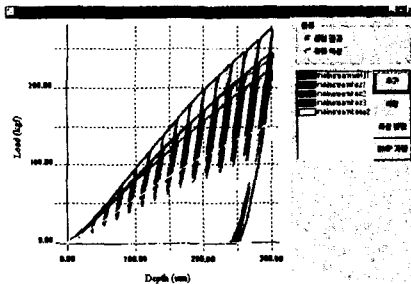


Fig. 12. Comparison of indentation load - depth curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

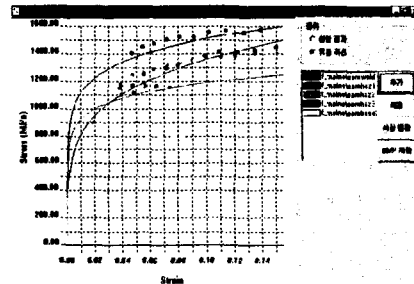


Fig. 13. Comparison of flow curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

4. 참고문헌

1. BS7910: Guide and methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures, British Standards Institution, 1999.
2. API Recommended Practice 579, First Edition, American Petroleum Institute, 2000.
3. 안정훈, 최열, 권동일, 대한금속재료학회지, 38권 12호, 2000, pp.1606-1611.
4. Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., ASTM 1092, 1990, pp.188-208.
5. 변택상, 김진원, 홍준화, 제 11회 재료강도 심포지움논문집, 1997, pp.467-473.

6. Doerner, M.F. and Nix, W.D., *J. Mater. Res.*, vol. 1, 1986, pp.601-607
7. Oliver, W.C. and Pharr, G.M., *J. Mater. Res.*, 1992, vol. 7, no.6, pp.1564-1583.
8. Norbury, A.L. and Samuel, T., *J. Iron steel Inst.*, vol. 117, 1928, pp.673-687.
9. Francis, H.A., *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, vol. 98, 1976, pp.272-286.
10. 이정환, 권동일, *대한금속재료학회지*, 35권 12호, 1997, pp.1616-1625.