

용접부의 강도 성능 평가를 위한 연속압입시험법의 응용

장재일 · 손동일 · 최 열 · 권동일 · 박상기 · 김우식

Application of Continuous Indentation Testing Method for Evaluating the Strength Performances of Weldments

Jae-il Jang, Dongil Son, Yeol Choi, Dongil Kwon, Sang Ki Park and Woo-sik Kim

1. 서 론

경제규모의 증대와 사용부지의 제한으로 인하여 산업 구조물/설비들은 복합화, 대형화 추세에 있고, 이러한 경향에 따라 구조물/설비에서 용접부가 차지하는 비중 역시 증가하고 있다. 용접공정을 통해 다양한 금속학적, 역학적 변화를 경험하게 되는 용접부는 대형 강 용접 구조물/설비의 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의될 기울여야 하는 평가 대상 부위임에 분명하고, 국내외 제강 기술의 수준으로 보아서도 모재의 기계적 성질보다는 용접부의 기계적 성질을 적절하고 합리적으로 평가하는 것이 훨씬 더 중요하다.

실구조물의 용접부에 대한 건전성 평가는 크게 결함에 주목하는 방법과 기계적 성질에 주목하는 방법으로 나눌 수 있는데, RT, UT, PT 등 다양한 현장 비파괴 시험법의 개발이 이루어져있는 전자에 비하여 후자에 대한 평가법은 아직 현장에서의 평가가 이루어지지 못한 채 실험실적 수준에 머물고 있다. 이는 기존의 소재 불성평가를 위한 표준 시험법인 일축인장 시험의 경우, 일정 크기와 형태를 갖춘 표준시험편의 채취가 필요하고, 채취가 가능하다 하더라도 용접부의 경우 내부에 다양한 미세조직 기울기 및 이에 기인한 물성 변화를 가지므로 표준시험편을 적용하기 어렵다는 단점이 있기 때문이다. 상기 문제점에 대한 해결 방안으로 현장에서 용접부에 대해 기계적 성질을 평가하려는 많은 연구가 수행되었는데, 그 중에서도 가장 구체적으로 현장에서 적용되고 있는 시험법이 바로 연속압입시험법(continuous indentation test)이다¹⁻²⁾. 평가 대상 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거(multiple loading and unloading)하고 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 제장화 장치를 이용하여 연속적으로 측정, 그 결과로 얻어지는 구형 압입자 하부의 압입 하중-변형 상황을

해석하는 연속압입시험법은 경도는 물론 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 포함하는 소재의 인장물성의 비파괴적 현장 평가가 가능하므로 현장 구조물의 건전성 확보를 위해 진일보한 정보를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 시험법의 특성 상 압입시험 이후 발생한 압흔의 직경이 0.5mm 이내로서 매우 작으므로 용착금속, 열영향부 등의 국소영역과 모재에 대한 선별적인 압입시험을 통하여 각 영역에서의 독립적인 기계적 물성을 평가할 수 있다.

구조물 용접부의 기계적 성질 평가가 필요한 경우는 구조물 가동전에 용접부의 사전 품질관리를 위한 PQ 시험(pre-qualification test) 시와 가동중인 구조물에 대하여 수행하는 사용적합성(fitness-for-service, FFS) 평가 및 수명 예측(life-time prediction)을 위한 경우로 분류할 수 있는데, 본 고에서는 이 중 사용적합성 평가 및 PQ 시험에 연속압입시험을 적용한 예들을 소개하고 이로부터 연속압입시험이 용접부의 강도성능 평가 및 이를 바탕으로 한 용접구조물의 건전성 평가 결과의 정확도 향상에 대한 유용함을 살펴보았다.

2 연속압입시험법을 이용한 인장물성 평가의 이론적 배경

구형압입 시 재료는 압입하중이 증가함에 따라 Fig. 1과 같이 탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며³⁾, 압입자와 시편의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다. 따라서, 구형압입의 경우에는 압입깊이가 증가함에 따라 재료의 변형이 증가하여, 압입하중-변위곡선으로부터 일축인장에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 한편, 이와는 달리 원추형 압입자와 같이 앞입깊이에 따른 기하학적인 유사성이 유지되는 경우에는 압입초기부터 소성역이 발생

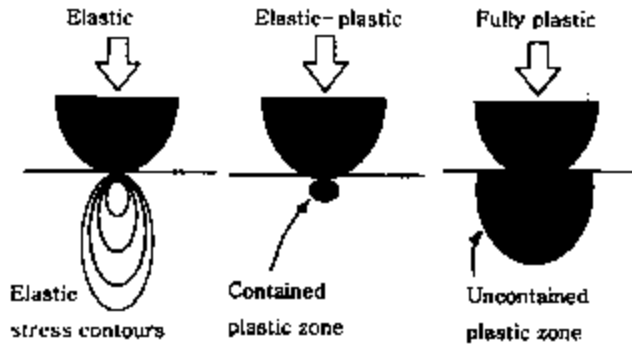


Fig. 1 Schematic representation of plastic zone expansion during spherical indentation: elastic, elastic-plastic and fully plastic stages⁴⁾

하며, 압입하중 증가에 상관없이 일정한 평균접촉압력이 얻어지게 된다. 일례로 Vickers 압입자의 경우 압입자 첨단부의 무뎠음 현상(tip blunting)이 없다고 가정하면 항상 일정한 평균접촉압력이 얻어지며, 이를 경도 값으로 정의하여 상대적인 강도 비교에 널리 이용하고 있다.

구형압입자를 이용하여 시편에 하중을 가했을 때 압입자와 시편이 접촉하고 있는 깊이를 h_c 라고 정의하면, 먼저 Fig. 2(a)와 같이 압입하중 증가곡선과 제거곡선이 일치하는, 즉 압입 후 압입흔적이 남지 않는 완전탄성 반응의 경우에는 h_c 가 최대압입깊이 h_{max} 의 1/2이 된다⁶⁾. 이와는 반대로 Fig. 2(c)와 같이 압입하중 제거 시 탄성회복이 없는, 즉 시편이 소성 반응만을 보이는 경우에는 h_c 가 h_{max} 와 같게 된다. 그러나, 실제 압입시에는 Fig. 2(b)와 같이 탄소성 반응을 보이게 되며, 이 경우에는 탄성회복에 해당하는 하중제거곡선의 이론적인 분석을 통해 접촉깊이 h_c 를 구하게 된다.

Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 압입하중 제거곡선의 초기 부분에서 접선의 기울기는 재료의 stiffness S 에 해당하며, 이 접선을 하중 0까지 외삽한 지점은 intercept 길이 h_i 로 정의할 수 있다. 이때, flat punch로 압입을

할 경우, 즉 압입하중 제거 시 접촉면적의 변화가 없다고 가정하여 $h_c = h_i$ 라고 정의하는 경우도 있으나⁷⁾, 압입자의 형태를 고려하는 보다 일반적인 식을 이용하면 접촉깊이는 다음과 같이 구할 수 있다⁸⁾.

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

여기서 ω 는 압입자 형태 관련 상수로서 flat punch의 경우 1, conical indenter의 경우 0.72, paraboloid of revolution일 경우 0.75이며, 기호 *는 이후에 고려하게 될 pile-up 및 sink-in의 영향을 반영하지 않은 경우의 값을 뜻한다. 접촉깊이 h_c^* 로부터 압입자와 시편이 접촉하고 있는 반경 a^* 를 압입자의 기하학적 형태를 이용하여 구할 수 있다.

실제의 압입상황에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 압입시 소성역의 확장 정도에 따라 압흔 주위에 pile-up 또는 sink-in이 발생하여, 실제 접촉반경 a 는 pile-up 또는 sink-in을 고려하지 않은 접촉반경인에 비하여 각각 증가 또는 감소하게 된다^{9,10)}. 따라서 이들 pile-up 또는 sink-in 현상을 보정할 경우, 더욱 정확한 인장물성을 구할 수 있게 된다.

이때, 접촉반경의 증가 또는 감소 정도는 일반적으로 금속의 경우에는 무차원 상수 c 를 이용하여 나타낼 수 있다^{9,10)}.

$$c^2 = \frac{a^2}{a^{*2}} = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} \quad (2)$$

식에서 n 은 재료의 가공경화지수이다. 위 식으로부터 pile-up 또는 sink-in을 고려한 실제 접촉반경 a 는 압입하중-변위곡선의 해석으로부터 얻어지는 h_c^* 와 다음의 식(3)의 관계를 이루게 된다.

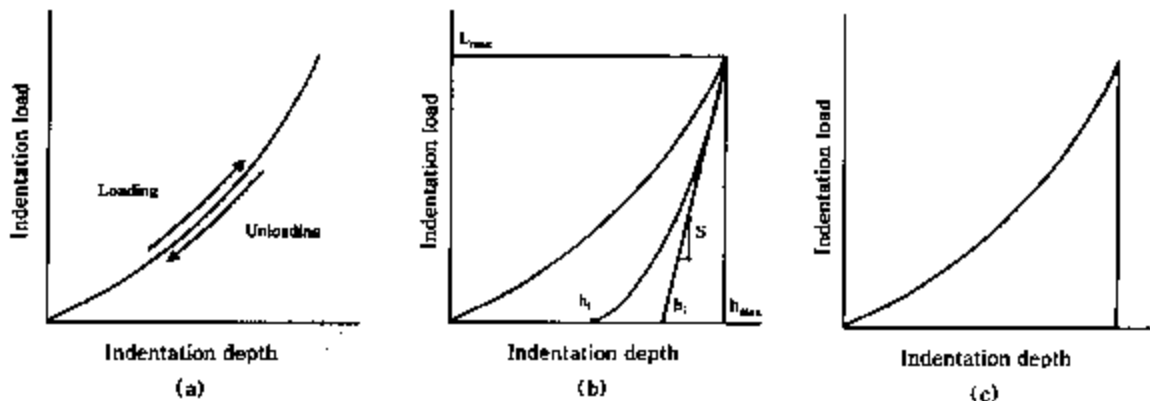


Fig. 2 Typical indentation load-depth curves for (a) elastic, (b) elastic-plastic and (c) plastic materials

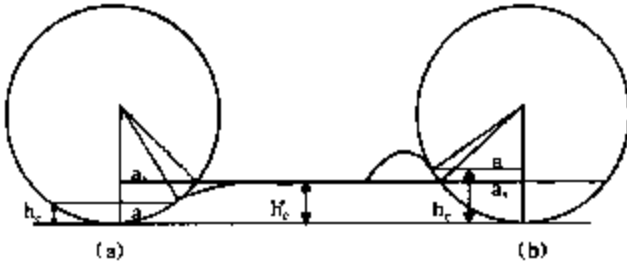


Fig. 3 The schematic diagram of indentation: (a) sink-in and (b) pile-up phenomena

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (3)$$

식(3)에서 R 은 구형압입자의 반경을 나타낸다.

이상의 결과는 기존의 이론과는 달리 최대압입하중에서 압입자와 시편의 접촉반경 a 를 결정하는데 있어 압입하중-변위곡선에 대한 이론적 해석 외에도 재료의 가공경화지수에 대한 고려가 필요하다는 것을 의미한다.

구형압입시의 탄성, 탄소성, 완전소성의 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, Fig. 1에서와 같이 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 천천히 증가하게 된다. 따라서, 이러한 변화양상의 분석을 통해 다음과 같이 재료의 유동특성을 압입시험으로부터 예측할 수 있다.

구형압입시 발생하는 재료의 변형율은 일반적으로 압입변형양상을 분석함으로써 얻어지며, 기존의 이론을 살펴보면 먼저 다음의 실험적인 관계식이 있다³⁾.

$$\epsilon_R = K_1 \frac{a}{R} = K_1 \sin \gamma \quad (4)$$

여기서 K_1 은 상수로서 약 0.2의 값을 지니게 되며, γ 는 압입자의 시편의 접촉각을 의미한다.

한편, Vickers 압입자의 경우에는 구형압입자의 경우와는 달리 $\epsilon_R = -\ln \cos \gamma \approx 0.076$ 의 관계가 성립하여, 압입깊이에 상관없이 일정한 변형율을 가지게 된다¹¹⁾.

다음으로 깊이 방향(z 방향)의 변위 u_z 를 압입자의 기하학적인 형태를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_z = h - (R - \sqrt{R^2 - r^2}) \quad (5)$$

이 변위를 반지름 방향의 변위 r 에 대해 미분하게 되면, 각 부분에서의 변형율은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial u_z}{\partial r} = -\frac{1}{\sqrt{1-(r/R)^2}} \frac{r}{R} \quad (6)$$

압입시험시 재료가 나타내는 대표적인 변형율 ϵ_R 은 변형율이 최대인 부분($r=a$)에서의 값에 상수 α 를 곱하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\epsilon_R = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} = \alpha \tan \gamma \quad (7)$$

재료가 나타내는 대표적인 유동응력 σ_R 은 평균접촉압력 P_m 으로부터 구할 수 있다. 먼저 탄성단계에서는 P_m/σ_R 비가 선형적으로 증가하게 된다. 다음으로, 소성 변형이 발생하는 시점은 P_m/σ_R 비가 약 1.1일 때이며, 이후의 탄소성 단계에서는 P_m/σ_R 비의 값이 일정 값까지 증가하는데 이때 증가속도는 감소하게 된다. 마지막으로 완전소성 단계에서는 다음과 같이 P_m/σ_R 비는 일정한 값을 유지한다^{3,4)}.

$$\frac{P_m}{\sigma_R} = \psi \quad (8)$$

여기서 ψ 는 재료의 소성역 확장, 즉 재료의 항복변형률과 가공경화지수와 밀접한 관련이 있을 것으로 예측되며, 본 연구에서는 압입변형과 관련된 상수 α 와 ψ 에 대하여, 먼저 α 의 경우에는 압입시의 변형양상과 관련되므로 재료에 상관없이 0.1을 적용하였고, ψ 의 경우에는 구조용 강에 있어서 약 3.0의 값을 가지는 것으로 판단하여, 이를 유동곡선 분석에 사용하였다.

유동곡선을 유도하기 위해서는 Fig. 4와 같이 한번의 하중인가 및 제거가 아닌 다중압입시험을 실시하여야 하며, 각각의 하중제거곡선의 분석을 통하여 용력, 변형률 값들을 얻을 수 있다. 따라서 압입시험을 통하여 평가된 용력, 변형률 값들을 Hollomon 식에 적합화하여 유동곡선을 유도하였으며, 이후 유동곡선의 외삽 및 연속체 이론의 적용을 통해 항복강도, 가공경화지수, 인장강도와 같은 다양한 물성을 평가할 수 있다.

본 교에서 소개한 사례들에 대하여 사용된 연속압입시험기는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 본 저자들 중 일부가 소속한 Frontics 사의 Advanced Indentation System 2000 (AIS 2000)이다. 이는 전술한 재료의 pile-up/sink-in 현상을 고려하여 결과의 정확도를 높인 새로운 방식의 연속압입시험기이다. 연속압입시험을

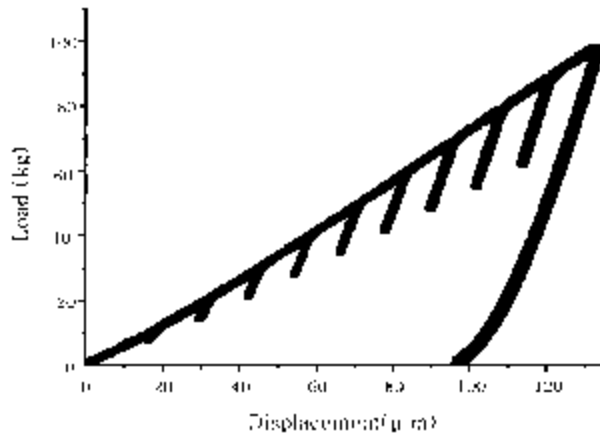


Fig. 4 The multiple load displacement curves obtained from continuous indentation tests



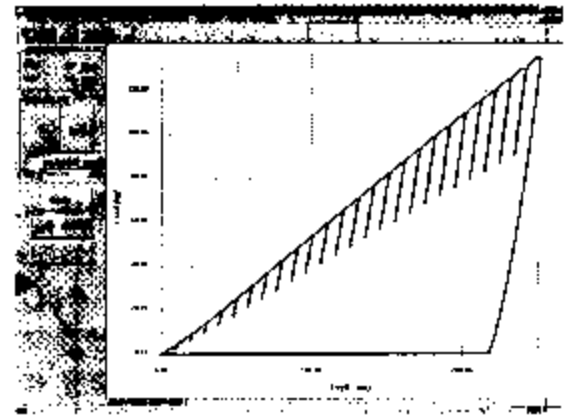
Fig. 5 Portable advanced indentation system developed by FRONTICS, Inc.

통하여 얻어지는 Fig. 6(a)와 같은 압입하중-변위곡선에 대하여 상기 이론을 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용하여 분석함으로써, 압입시험의 종료와 동시에 Fig. 6(b)와 같이 인장 유동곡선을 얻고, 이를 통하여 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도와 같은 일축 인장시험에서 구할 수 있는 전반적인 변형관련 강도 물성을 평가하게 된다.

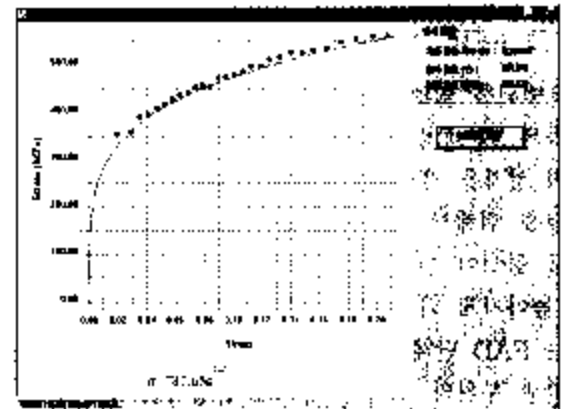
3. 연속압입시험법을 이용한 용접부 결함의 사용적합성 평가

용접 구조물/설비의 운용 중에는 하중 또는 온도 변화 사이클에 의한 결함, 수소유기균열이나 황화물 응력 부식균열 등의 부식환경에 의한 결함, 배설배관에서 발생하는 타공사 또는 지반침하 등 외력에 의한 결함 등이 발생하여 안전성을 위협할 가능성이 존재한다. 이러한 결함에 대하여 사용적합성(FPS)을 평가하는 대표적인 방법중 하나는 손상평가도(Failure Assessment Diagram, FAD)를 활용하는 방법이다¹²⁻¹⁵⁾.

손상평가도란 선형파괴역학이 성립하는 취성영역부터 균열 성장 없이 소성저동반으로 파손이 발생하는 소성



(a)



(b)

Fig. 6 The images of software for advance indentation system. (a) indentation load-displacement curve, and (b) flow curve obtained by analyzing indentation load-displacement curve

붕괴영역에 이르기까지의 모든 파괴역학적 가능성에 대하여 용력확대계수(결함의 크기 및 형상의 함수)와 작용하중의 두 변수를 대입해 균열이 존재하는 구조물의 사용적합성을 평가할 수 있는 방법이다. 실제 구조물의 손상은 일반적으로 취성파괴와 소성붕괴의 조합으로 나타나기 때문에 손상평가도에서는 Fig. 7에 나타난 예와 같이 x축에는 소성붕괴의 영향을, y축에는 취성파괴의 영향을 변수로 나타내어 두 손상모드를 고려한다. Fig. 7에서 SAFE 영역과 FAIL 영역 사이의 경계선은 파괴역학적 이론으로부터 구축된 손상 임계선(Failure Assessment Curve, 이하 FAC)을 나타낸다. 구조물이 가진 결함의 현재상태는 FAD상에서 하나의 점(Lr (또는 Sr), Kr)으로 표시될 수 있다. 이때 이 점이 FAC) 안쪽에 위치하면 평가대상 결함은 허용 가능한 것으로 평가하고, FAC 바깥쪽에 위치할 경우는 허용 불가능한 결함으로 판정하게 된다. 최근에는 BS 7910(1999년), SINTAP(1999년), API 579(2000년) 등의 다양한 FAD 관련 규격들이 등장하여 FAD의

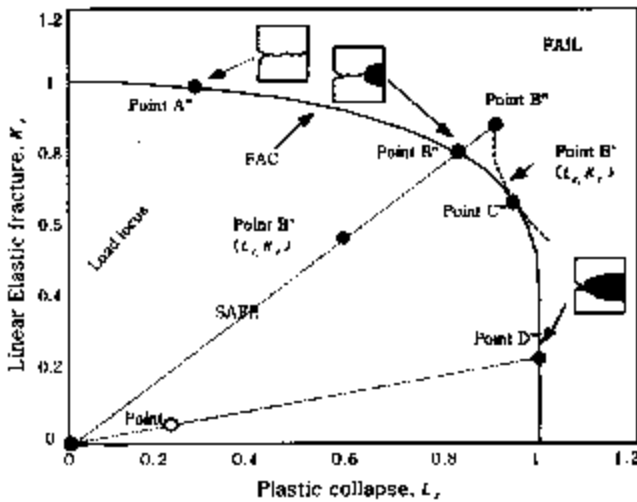


Fig. 7 Typical failure assessment diagram (FAD)⁽¹³⁾

활용범위를 넓혀가고 있다¹²⁻¹⁴⁾. 일반적으로 이러한 규격들은 3단계의 FAD로 구성되어 있는데, 스크리닝 등급의 성격을 가진 1단계로부터 3단계로 갈수록 FAD의 구성을 위해서 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 인장곡선 전부를 요구하게 된다. 하지만 용접공정동안 열이력에 의한 미세조직 변화를 경험하게 되는 용접 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에는 서로 다른 기계적 성질을 나타내는 복잡한 미세조직들이 혼재하기 때문에 모재나 용착금속과는 달리 표준 시험법을 통해 HAZ의 대표 물성을 얻는 데는 많은 어려움이 있다. 따라서, 기존 FAD 규격의 3단계에서는 용착금속과 모재에 관한 인장물성만을 FAD 구축에 사용하고 있고, HAZ 영역에 결함이 존재할 때는 용착금속과 모재의 물성 중 더 낮은 물성치를 적용하여 평가하고 있는 실정이다. 예를 들어 API 579에서는 HAZ의 재료물성이 없을 경우, 실제 HAZ에 해당하는 영역인 용착금속 중앙부터 용융선까지 거리의 2배에 해당하는 영역에 대하여 용착금속의 물성을 기준으로 결함평가를 수행하도록 추천하고 있다. 하지만, HAZ에 결함 존재 시, Fig. 8과 같이 실제 HAZ의 물성을 이용하면 허용 불가능한 결함으로 평가되지만 용착금속의 물성을 이용하게 되면 허용가능으로 오판할 가능성이 있다. 이는 안전성 평가에 오류를 범할 우려가 있으므로 HAZ의 정확한 파괴인성과 인장물성의 평가가 요구된다.

관련한 예로써 API X65재질을 사용하는 천연가스 배관의 원주용접부의 용착금속과 열영향부 및 모재에 대하여 연속압입시험을 수행하여 인장 물성의 변화를

평가하였고 그 대표적인 변화물 Fig. 9에 나타내었다. 평가 결과 열영향부에서 가장 낮은 강도를 나타내는 동시에 용착금속에서 가장 높은 강도를 나타냄을 확인 할 수 있었는데 이는 TMCP (thermo-mechanically controlled process) 공정에 의해 제조된 강에서 일반적으로 관찰되는 용접열영향부의 연화현상과 경질이음부(overmatched joint)의 특성을 잘 반영하고 있는 결과이다. 따라서 기존 규격의 경우와 같이 용착금속이나 모재의 인장물성을 HAZ 물성대신 사용할 경우, Fig. 8과 같이 결함평가의 오류를 가져올 수 있게 된다. Fig. 10에서는 천연가스 배관 원주용접부의 두께 방향에 대해 외각, 내각, 중심선을 따라서 다중 압입시험을 행하고, 용착금속, 모재 및 열영향부의 인장물성 변화 양상을 살펴본 결과의 일부를 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 각 영역에 따라 인장물성은 다양한 변화를 나타내고, 결함 또한 이와 같이 다양한 영역에서 존재할 수 있다. 따라서, 정확한 결함평가를 위해서

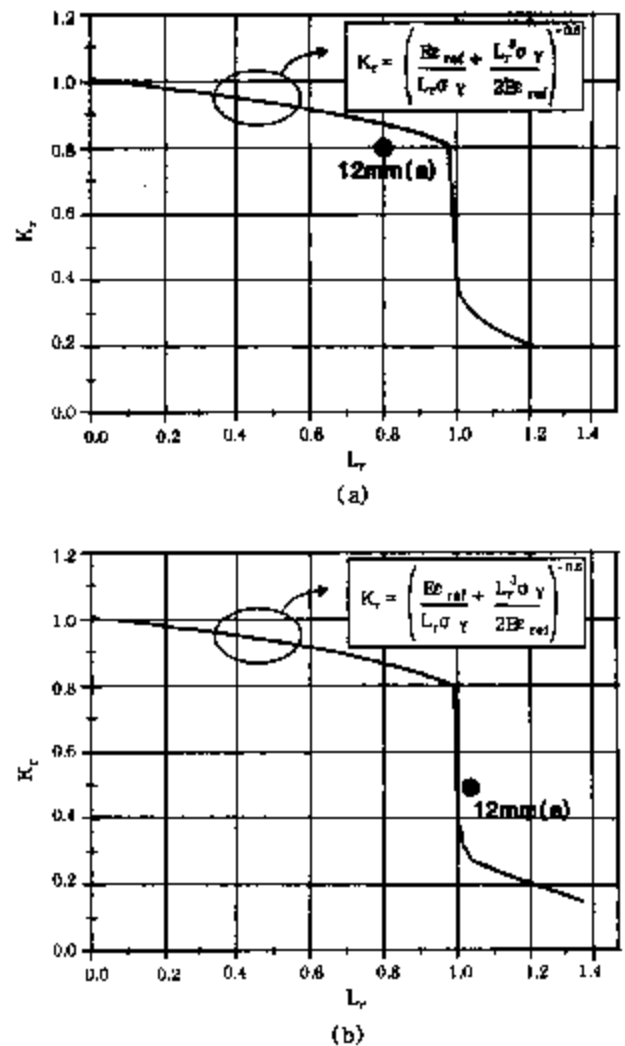


Fig. 8 Difference in fitness-for-service assessment results between (a) weld-metal-based FAD and (b) HAZ-based FAD (a: flaw depth).

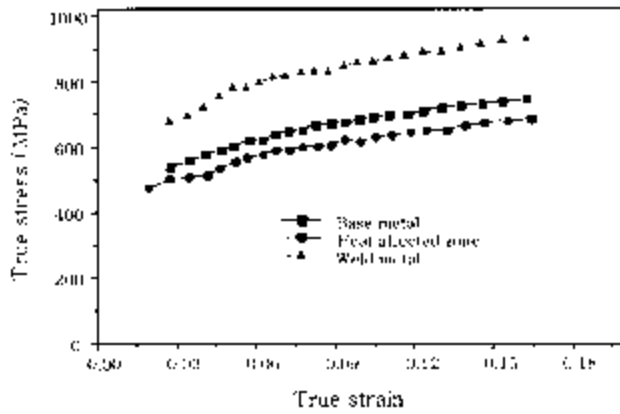


Fig. 9 The difference of flow curves with the variation of microstructure in API X65 steel

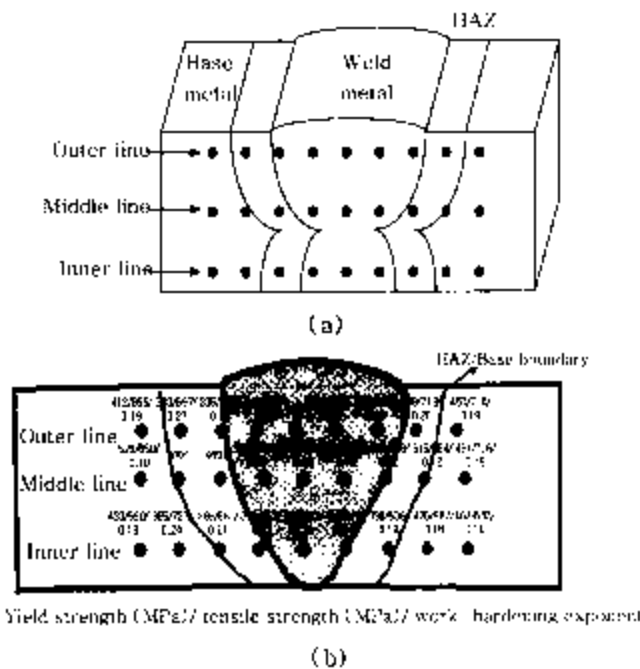


Fig. 10 Indentation arrays in the girth weld joint of API X65 steel: (a)schematic diagram of indentation arrays, and (b)distribution of tensile properties obtained by advanced indentation system

는 현장에서 결함발생 부위의 물성을 비파괴적으로 평가하기 위하여 FAI)에 반영하는 것이 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있으며, 이에 가장 적합한 비파괴 방법으로 연속압입 시험기술이 사용될 수 있다.

4. 연속압입시험을 이용한 용접부의 강도 품질 사전 평가

용접부의 품질은 용접 시공시에 결정되므로 구조물/설비의 건설 중 용접품질관리 정도에 따라 설비의 품질이 정해진다고 할 수 있다. 용접구조물의 건설시 발생가능한 용접결함은 각종 용접기술기준에 따른 비파괴 검사

실시를 통하여 엄격히 관리되고 있으나, 용접부의 기계적 특성은 사전품질관리기록서(Procedure Qualification Record, PQR)에만 의존하고 있다. 하지만 PQR은 시간과 비용 및 시험편 채취의 어려움으로 현장 용접조건을 재현한 하나의 시험편에 대하여 실험실적으로 인장시험을 수행한 결과를 기록한 후 동일 용접기준에 모두 적용하기 때문에, 현장 용접부의 다양한 구속조건 및 시공환경에 따른 물성변화를 반영하는 데에는 한계가 있다. 그러므로 만일 연속압입시험을 통하여 현장에서 각 용접부의 인장특성을 비파괴적으로 평가할 수 있다면, 건설중인 용접부의 품질 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 고에서는 그 사례로서 건설중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대하여 현장에서 연속압입시험을 수행한 결과를 소개하였다. 화력발전소는 수만 개소의 용접부로 이루어져 있으며 각 용접부는 전기사업법 용접기술기준에 의해 엄격히 관리되고 있으나, 기계적 성질은 대표 PQR에만 의존하고 있고 건설된 용접부에 대한 현장 물성평가는 이루어지지 않고 있는 실정이다. 본 저자들은 Fig. 11과 같이 건설중인 주증기관의 용접부에 연속압입시험기를 직접 부착하여 실험을 수행하였고, 연속압입시험 결과 Fig. 12와 같이 나타나는 압입하중 변위곡선은 압입시험 이론을 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용·분석함으로써 시험과 동시에 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도를 얻을 수 있었다. Fig. 13은 가동중인 화력발전설비의 주증기관 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부/용착금속의 인장곡선 그래프이다.

압입곡선의 분석 결과 동일한 깊이까지 압입하는데 필요한 하중이 용착금속, 열영향부, 모재의 순으로 낮아질 수 있으며, 이러한 경향성과 일치하여 결과적으로 얻어진 유동곡선, 항복강도, 인장강도 등도 동



Fig. 11 Advanced Indentation System 2000 attached to main steam line in fossil power plant

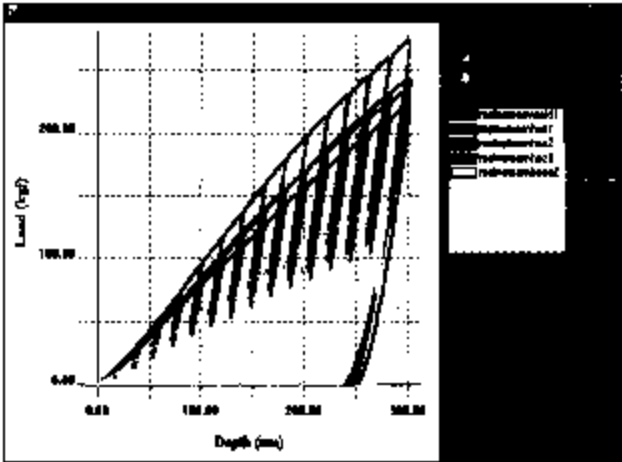


Fig. 12 Comparison of indentation load displacement curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossile power plant

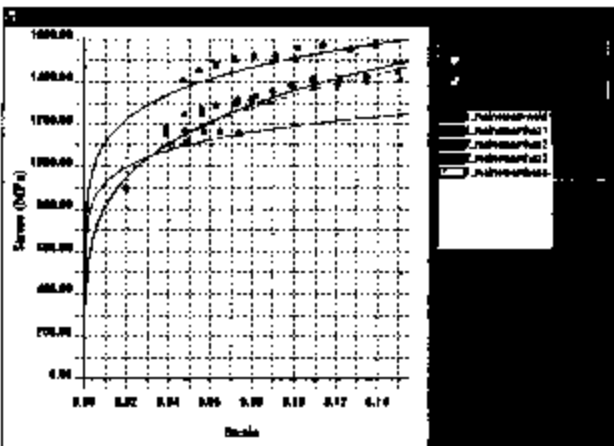


Fig. 13 Comparison of flow curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossile power plant

입한 변화경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 한편 현장에서 수행된 압입시험의 신뢰성을 재확인하기 위하여 주증기관 건설 후 남은 잔여자재에 대하여 연속압입시험과 일축인장시험을 인장시험기 Instron 5582와 연속압입시험기 AIS2000를 이용하여 시험결과를 비교하였다. 5회의 연속압입시험의 결과와 인장시험 결과를 Table 1에 나타내었으며, 압입시험결과가 인장시험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 현장시험결과와 PQR에 기록된 물성을 비교한 결과, 거의 유사함을 확인하였고 이에 따라 새로운 PQ 시험의 한 가지로 연속압입시험이 사용될 수 있다고 판단되었다.

5. 결 언

본 논문에서는 연속압입시험법의 이론적 연구내용과 저자들의 일부가 소속한 Frontics 사가 개발한 연속압

Table 1 Comparison of tensile properties obtained by continuous indentation and tension test

시험회수	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)
1	541	745
2	594	786
3	589	794
4	579	800
5	581	776
평균	577	780
인장시험결과	539	762

입 시험기인 Advanced Indentation System을 산업 설비 용접부의 사용적합성 평가 및 PQ 시험에 적용한 사례를 소개하였다. 본 연구와 같이 연속압입시험법을 이용하여 용접부의 인장물성 변화를 정량적으로 평가할 경우, 첫째, 제품에 대한 품질관리와 수명평가가 가능하게 되고, 둘째, 구조물/설비의 용접부에 대한 사용적합성 평가를 위한 손상평기도 구축이 용이해지고 정확도와 보수성을 최적화 시킬 수 있게 되며, 셋째, 유한 요소해석(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.

참 고 문 헌

1. 안정훈, 최 열, 권동일: 압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가. 대한금속재료학회지, 38(2000) 1606-1611.
2. Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L.: Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials, ASTM STP 1092(1990), 188-208.
3. Tabor, D.: The Hardness of Metals. Clarendon Press, Oxford, (1951)
4. Francis, H.A.: Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation, J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME, 98(1976), 272-286.
5. Field, J.S. and Swain, S.W.: Determining the mechanical properties of small volumes of material from submicrometer spherical indentations, J. Mater. Res., 10-1(1995) 101-112.
6. Johnson, K.L.: Contact Mechanics, Cambridge, (1985)
7. Doerner, M.F. and Nix, W.D.: A Method for Interpreting the Data from Depth-sensing Indentation Instruments, J. Mater. Res., 1(1986), 601-607.

8. Oliver, W.C. and Pharr, G.M.: An Improved Technique for Determination Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments., *J. Mater. Res.*, 7-6 (1992), 1564-1583.
9. Norbury, A.L. and Samuel, T.: The Recovery and Sinking in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effects of These Factors on the Correlation of the Brinell with Certain Other Hardness Tests, *J. Iron Steel Inst.*, 117(1928), 673-687.
10. Hill, R., Storåkers, B., and Zdunek, A.B.: A theoretical study of the Brinell hardness test, *Proc. R. Soc. London A*, 423(1989) 301-330.
11. Milman, Y.V., Galanov, B.A., and Chugunova, S.I.: Plasticity characteristic obtained through hardness 2523-2532.
12. BS7910: Guide and methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures, British Standards Institution, 1999.
13. API RP 579: Recommended Practice for Fitness-for-Service, First Edition, American Petroleum Institute, 2000.
14. 장세일, 이정식, 주장락, 권동일, 최열: FAD를 이용한 용접 구조물의 사용적합성 평가와 재료공학적 개선 방안, *대한용접학회지*, 19-5(2001) 474-480.
15. Balsara, M.N.: Application of Advanced Fracture Mechanics to the Assessment of Linepipe Defects, *Proceeding of the 15th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 5 (1996), 569-585.



- 장재원(張宰滢)
- 1968년생
- (주) 프론틱스 부설연구소
- 구조물 파괴 및 건전성 평가
- e-mail: jijang@frontics.com



- 최열(崔烈)
- 1975년생
- (주) 프론틱스 부설연구소
- 재료의 강도물성 및 건전성 평가
- e-mail: ychoi@frontics.com



- 손동일(孫東一)
- 1975년생
- (주) 프론틱스 부설연구소
- 재료의 강도물성 및 건전성 평가
- e-mail: dson@frontics.com



- 권동일(權東一)
- 1957년생
- 서울대학교 재료공학부
- 마이크로 신뢰성 및 나노 물성평가
- e-mail: dongilk@gong.snu.ac.kr



- 박상기(朴相基)
- 1958년생
- 한전 전력연구원 발전연구실
- 발전설비 건전성 진단 및 수명평가
- e-mail: skpak@kepri.re.kr



- 김우식(金慇植)
- 1963년생
- 한국가스공사 연구개발원
- 재료의 파괴거동 및 건전성 평가
- e-mail: wskim@kogas.re.kr