

용접부의 사전 품질 관리를 위한 연속압입시험의 현장 적용

손동일 · 장재일 · 전은채* · 권동일* · 박주승**

(주) 프론틱스 · *서울대학교 재료공학부 · **산업자원부 기술표준원

1. 서 론

경제규모의 증대와 사용부지의 제한으로 인하여 용접구조물들은 복합화, 대형화 추세에 있고, 이러한 경향에 따라 구조물에서 용접부가 차지하는 비중 역시 증가하고 있다. 용접과정을 통해 다양한 금속학적, 역학적 변화를 경험하게 되는 용접부는 대형 강 용접 구조물/설비의 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의를 기울여야 하는 평가 대상 부위임에 분명하다. 실구조물의 용접부에 대한 건전성 평가는 크게 결함에 주목하는 방법과 기계적 성질에 주목하는 방법으로 나눌 수 있는데, RT, UT, PT 등 다양한 현장 비파괴시험법의 개발이 이루어져있는 전자에 비하여 후자에 대한 평가법은 아직 현장에서 평가가 이루어지지 못한 채 실험실적 수준에 머물고 있다. 이는 기존의 소재 물성 평가를 위한 표준 시험법인 일축인장 시험 및 파괴역학 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 연속 압입시험법(continuous indentation test)이다. 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 인장물성을 평가할 수 있으므로 현장 구조물의 건전성 확보를 위해 진일보한 정보를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

구조물 용접부의 기계적 성질 평가가 필요한 경우는 구조물 가동전에 용접부의 사전 품질관리(pre-qualification)를 위한 경우와 가동중인 구조물에 대하여 수행하는 사용적합성 평가(fitness-for-service assessment) 및 수명 예측(life-time prediction)을 위한 경우로 분류할 수 있는데, 본 연구에서는 이중 품질관리에 연속 압입시험을 적용한 예를 소개하고 이로부터 연속 압입시험이 용접구조물의 건전성 평가 결과의 정확도를 높이는 데 유용함을 살펴보았다.

2. 연속압입 시험법

연속압입시험을 통해 얻을 수 있는 압입하중-변위곡선은 그림 1(a)와 같으며, 일반적으로는 다중압입 시험방식을 이용하여 그림 1(b)와 같은 곡선을 얻게 된다. 보통 압입 깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변 재료의 탄성, 소성 변형에 의해 측정된 압입깊이와 달라지게 된다.

압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 재료의 탄성회복에 해당되는 압입하중제거곡선의 초기 접선의 기울기인 S값을 이용하여 구하게 된다. 그림 1(a)에서의 S는 재료의 stiffness에 해당되며, 탄성변형을 고려한 접촉깊이 h_c^* 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

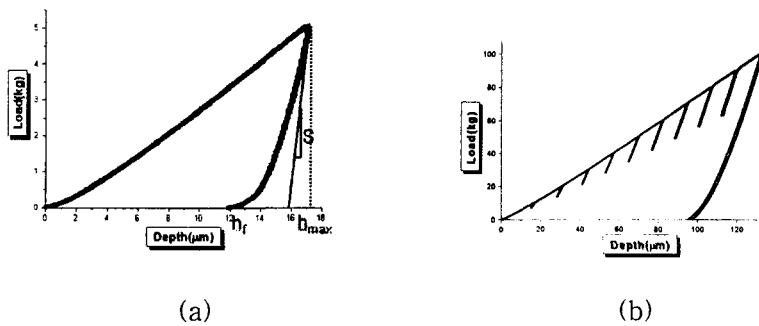


Fig. 1. The load-depth curves obtained from continuous indentation tests.

L은 압입하중이며, ω 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수로 flat punch의 경우에는 1, 구형압입자의 경우에는 0.75 그리고 Vickers 압입자의 경우에는 0.72이다.

한편 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 그림 2와 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나, 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in 현상이 발생한다.

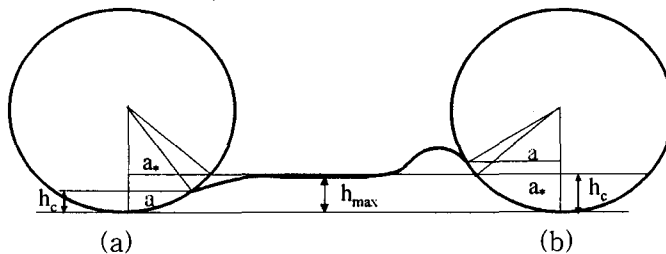


Fig. 2. The (a) sink-in and (b) pile-up phenomena.

이때 pile-up/sink-in 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 다음과 같이 나타난다[3].

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

여기서 n은 재료의 가공경화지수, R은 압입자 반경, a는 접촉반경이며, 식(2)를 통해 얻어진 접촉반경에서 기하학적인 관계를 이용하여 실제 접촉깊이인 h_c를 구하게 된다.

일축인장시험을 통해 얻어지는 인장곡선의 항복이후의 영역에서 진응력과 진변형률은 일반적으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (3)$$

(σ : 진응력, K : 응력계수, ε : 진변형률)

구형압입자를 이용한 압입시험에서의 변형률은 재료의 깊이방향으로의 변위를 기하학적인 관계를 이용하여 구한 후 미분하여 얻어지는 변형률 값 중 최대값에 적합화 상수(α, 일반적으로 0.1)를 적용함으로써 식 (4)와 같이 접촉반경과 접촉깊이의 항으로 나타난다.

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

다음으로 압입자 하부의 응력은 압입하중과 접촉면적의 비인 평균압력(P_m)과 일정한 관계를 가지고 있는데, 일반적인 인가하중인 kgf 이상의 하중에서는 일정한 상수비(ψ, 일반적으로 3)를 가지며, 이 상수는 압입시험을 통해 결정된다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (5)$$

그림 1(b)와 같이 다중하중제거 시험방식을 통해 얻어진 압입하중-변위곡선에서 각 하중제거곡선을 이용하여 접촉깊이와 접촉반경을 결정하고, 이를 통해 진응력과 진변형률을 구하게 된다.

3. 연속압입시험을 이용한 발전설비 용접부의 품질관리 사례

용접구조물의 건설시 발생가능한 용접결함은 각종 용접기술기준에 따른 비파괴 검사 실시를 통하여 엄격히 관리되고 있으나, 용접부의 기계적 특성은 사전품질관리기록서(PQR, Pre-Qualification Record)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 반영하는데에는 한계가 있다. 그러므로 만일 연속 압입시험을 통하여 현장에서 각 용접부의 인장물성을 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. 실험에 사용된 연속

압입시험기는 저자들중 일부가 소속한 프론틱스 사가 개발한 최대하중 300Kgf의 AIS 2000 모델 시험기이다. 그림 3과 같이 건설중인 주증기관의 용접부에 직접 부착하여 실험을 수행하였고, 연속 압입시험 결과 나타나는 하중-압입깊이 곡선은 압입시험 이론을 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용·분석함으로써 시험과 동시에 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도를 얻을 수 있었다. 그림 4와 5는 가동중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부(HAZ, heat-affected zone)/용착금속의 하중-변형깊이 곡선 및 그로부터 구한 인장곡선 그래프이다.



Fig. 3. Advanced Indentation System 2000 attached to main steam line in fossil power plant.

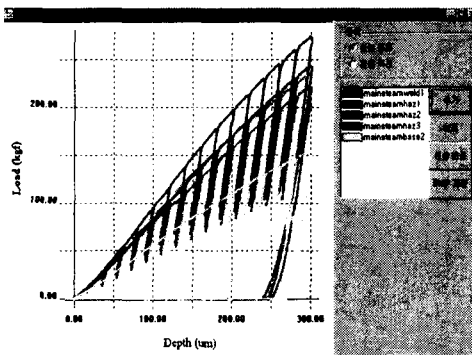


Fig. 4. Comparison of indentation load - depth curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

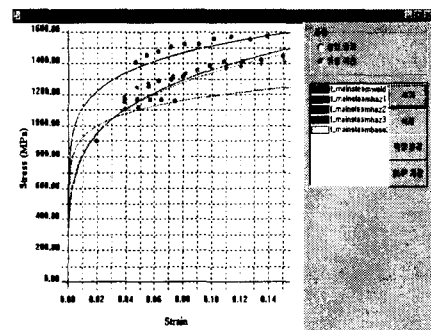


Fig. 5. Comparison of flow curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

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

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. 이를 현장실험결과와 PQR (pre-qualification record)에 기록된 물성을 비교한 결과, 거의 유사함을 확인하였고 이에 따라 새로운 PQ 시험의 한 가지 방법으로 연속압입시험이 사용될 수 있다고 판단되었다. 한편 현장에서 수행된 압입시험의 신뢰성을 재확인하기 위하여 주증기관 건설 후 잔여자재를 활용하여 PQ 시험시 파단부위로 판명된 모재에 대하여 연속압입시험과 일축인장시험을 실험실적으로 수행하여 그 결과를 비교하였다. AIS 2000을 활용한 5회의 연속 압입시험 결과와 Instron 5582를 사용한 인장시험 결과를 표 1에 나타내었으며, 두 결과가 정량적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 고에서는 연속 압입시험을 활용하여 실 구조물 용접부의 품질관리를 수행한 사례를 소개하였다. 국내에서도 다양한 인프라 구조물/설비의 복합화, 대형화추세에 따라 초대형 구조물/설비의 다양한 용접부에 대한 품질 관리 요구가 급증할 것으로 예상되는 만큼 연속 압입시험의 현장 적용 범위가 넓어질 것으로 예측된다.

후기

본 논문에서 소개한 연구사례는 한국전력공사 전력연구원 소속 발전연구실의 지원아래 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., ASTM STP 1092, pp. 188-208 (1990).
2. 안정훈, 최열, 권동일, 대한금속재료학회지, vol. 38, pp. 1606-1611 (2000).
3. Yamamoto, T., Kurishita, H., MATsushima, T., and Kayano, H., J. Nuclear Mater., vol. 239, pp.219-227 (1996).
4. 장재일, 최열, 권동일, 박주승, 2001년도 대한기계학회 제1차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, 한국기계연구원, pp. 58-66 (2001).
5. 전은채, 장재일, 최열, 박주승, 권동일, 한국산업안전학회 2001 춘계학술발표회, 아산 전기안전기술교육원, 경기도 가평, pp. 26-31 (2001).