

용접구조물의 건전성 확보를 위한 연속 압입시험의 적용

Application of Continuous Indentation Technique to Integrity Assessment of Welded Structures

장재일, 최열, 손동일, 권동일*, 김우식**, 박상기***

(주) 프론틱스, *서울대학교 재료공학부, **한국가스공사 연구개발원, ***한전 전력연구원

1. 서론

경제규모의 증대와 사용부지의 제한으로 인하여 용접구조물들은 복합화, 대형화 추세에 있고, 이러한 경향에 따라 구조물에서 용접부가 차지하는 비중 역시 증가하고 있다. 용접과정을 통해 다양한 급속학적, 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 현장에서의 평가가 이루어지지 못한 채 실험실적 수준에 머물고 있다. 이는 기존의 소재 물성평가를 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 표준시험법을 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[1-2]. 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 이러한 경우들에 대하여 연속 압입시험을 적용한 예들을 소개하고 이로부터 연속 압입시험이 용접구조물의 건전성 평가 결과의 정확도를 높이는데 유용함을 살펴보았다.

2. 운용전 용접구조물의 PQ시험을 위한 연속 압입시험의 적용

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 연속압입시험기는 저자등중 일부가 소속한 프론틱스 사가 개발한 최대하중 300Kgf의 AIS 2000 모델 시험기이다. 그림 1과 같이 건설중인 주증기관의 용접부에 직접 부착하여 실험을 수행하였고, 연속 압입시험 결과 나타나는 하중-압입깊이 곡선은 압입시험 이론을 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용·분석함으로써 시험과 동시

에 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도를 얻을 수 있었다. 그림 2는 가동 중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부(HAZ, heat-affected zone)/용착금속의 인장곡선 그래프이다.

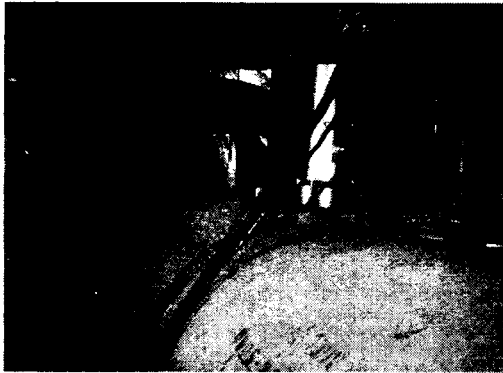


Fig. 1. Advanced Indentation System 2000 attached to main steam line in fossil power plant.

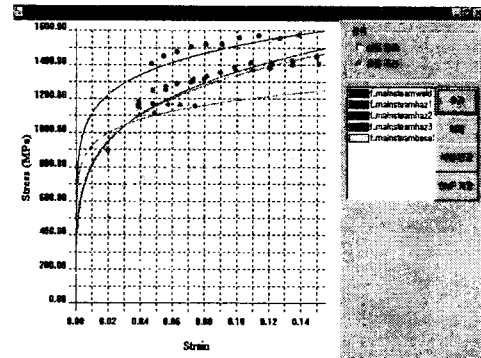


Fig. 2. Comparison of flow curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

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.

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

3. 운용 중인 용접구조물의 사용적합성 평가를 위한 연속 압입시험의 적용

용접 구조물/설비의 운용중에는 하중 또는 온도 변화 사이클에 의한 결함, 수소유기균열이나 황화물 응력부식균열 등의 부식환경에 의한 결함, 매설배관에서 발생하는 타공사 또는 지반침하 등 외력에 의한 결함 등이 발생하여 건전성을 위협할 가능성이 존재한다. 이러한 결함에 대하여 사용적합성 (FFS, Fitness-For-Service)을 평가하는 대표적인 방법중 하나는 손상평가도(FAD, Failure

Assessment Diagram)를 활용하는 방법이다. 최근에는 BS 7910(1999년) [3], SINTAP(1999년) [4], API 579(2000년) [5] 등의 다양한 FAD 관련 규격들이 등장하여 FAD의 활용범위를 넓혀가고 있다. 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 단계중 가장 정확도가 높은 단계에서는 결함발생 부위의 소재에 대하여 인장곡선 전부를 요구하게 된다. 하지만 용접공정동안 열이력에 의한 미세조직 변화를 경험하게 되는 HAZ에는 서로 다른 기계적 성질을 나타내는 복잡한 미세조직들이 혼재하기 때문에 모재나 용착금속과는 달리 표준 시험법을 통해 HAZ의 대표 물성을 얻는데는 많은 어려움이 있다. 따라서, 기존 FAD 규격의 3 단계에서는 용착금속과 모재에 관한 인장물성만을 FAD 구축에 사용하고 있고, HAZ 영역에 결함이 존재할 때는 용착금속과 모재의 물성 중 더 낮은 물성치를 적용하여 평가하고 있는 실정이다. 그러나, HAZ는 각종 결함이 집중적으로 발생 가능한 취약부위이므로 결함평가의 주요 대상임은 분명하므로, HAZ에 발생한 결함에 대하여 정확한 허용 여부를 평가하기 위해서는 HAZ의 물성 변화가 고려된 FAD를 사용하여야 한다. 예를 들어 API 579 [5]에서는 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, 용착금속의 물성을 이용하게 되면 그림 3과 같이 실제 HAZ의 물성을 이용한 평가와는 차이를 보인다. 이는 사용적합성 평가에 치명적 오류를 범할 우려가 있으므로 HAZ의 정확한 인장물성의 평가가 요구되고 이에 연속 압입시험을 이용한 HAZ 물성의 평가 및 FAD 구축에의 반영이 절실히 요구된다.

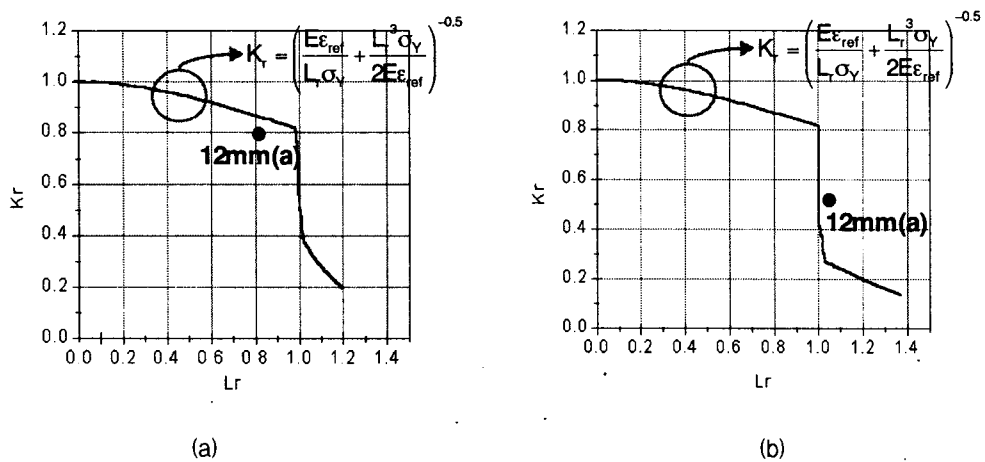


Fig. 5. Difference in FFS assessment result between (a) weld-metal-based FAD and (b) HAZ-based FAD (a: flaw depth).

또, 발전설비, 석유화학설비처럼 고온, 고압 환경에서 장시간 운용되는 경우 원자들의 확산이 쉽게 이루어지므로 미세조직의 변화 및 열화가 빈번히 발생하게 된다. 따라서 경년열화가 발생하는 구조물의 결함평가 시에 초기 물성을 바탕으로 구축된 손상평가도를 그대로 사용하는 것은 정확성 측면에서 문제를 야기할 수 있다. 그림 4는 열화에 의해 항복강도가 변화할 때, 기존 코드에서와 같이 신재의 인장물성을 사용했을 때와 실제 열화재의 인장물성을 사용했을 때의 평가 결과 차이를 일례로 보여준다. 따라서 FAD 평가법의 정확도를 높여 실 구조물 결함평가의 안전성 및 보수성을 동시에 최적화하기 위해서는 경년열화에 따른 현장에서의 인장물성 평가를 실시하여야만 하고, 이러한 관점에서 연속 압입시험의 유용성은 더욱 부각된다.

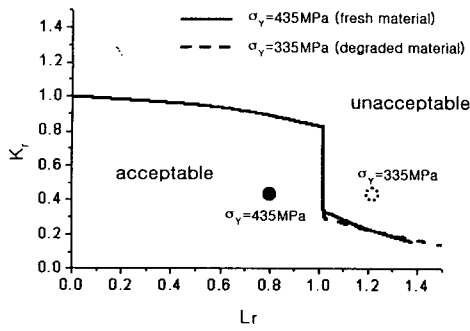


Fig. 4. Difference in assessment result between fresh-material-based FAD and degraded-material-based FAD.

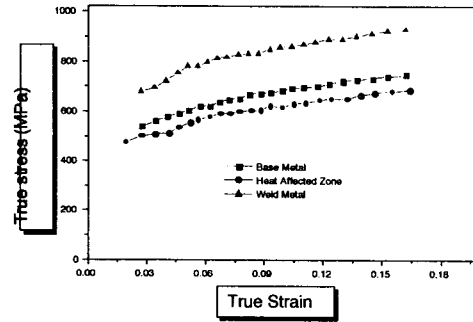


Fig. 5. An example showing difference in flow curves with the variation of microstructure in API X65 steel.

상기한 결과에서 알 수 있듯이, 연속 압입시험을 수행하여 현장 물성치를 얻고 이를 사용적합성 평가에 반영할 경우, 결함평가 결과의 정확성은 확연히 증대되고, 이에 따라 용접구조물의 건전성 확보가 가능해진다. 그림 5에서는 API X65재질을 사용하는 천연가스 배관의 원주용접부에 대하여 연속압입시험을 수행하여 얻은 결과를 예로 나타내었다. 그림에서 용접열영향부에서 가장 낮은 항복강도 및 인장강도를 나타내었고, 용착금속이 가장 높은 강도를 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 용착금속의 항복강도가 모재에 비하여 높은 본 용접부의 overmatched joint 특성과 TMCP로 제조된 강종의 HAZ에서 자주 발견되는 열영향부 연화(softening) 현상을 정량적으로 잘 나타내는 결과이다. 따라서 기존 규격의 경우와 같이 용착금속이나 모재의 인장물성을 HAZ 물성대신 사용할 경우, 그림 3과 같이 결함평가의 오류를 가져올 수 있게 된다.

4. 결론

본 고에서는 연속 압입시험을 활용하여 구조물의 건전성을 평가한 사례를 소개하였다. 국내에서도 다양한 인프라 구조물/설비의 복합화, 대형화추세에 따라 초대형 구조물/설비의 용접부에 대한 건전성 평가에 대한 요구가 급증할 것으로 예상되는 만큼 연속 압입시험의 현장 적용 범위가 넓어질 것으로 예측된다.

참고문헌

1. 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 1092 (1990) 188.
2. 안정훈, 최열, 권동일: 압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가, 대한금속재료학회지, 38 (2000) 1606.
3. BS 7910: Guide and Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, British Standards Institution, (1999).
4. SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industries, Final Procedure, Brite-Euram Project Number BE95-1426, (1999).
5. API RP 579: Recommended Practice for Fitness-for-Service, First Edition, American Petroleum Institute, (2000).