

Advanced Indentation System을 이용한 API X65 강 용접부의 인장거동 변화 평가

Evaluation of Tensile Behavior Variation in API X65 Steel Weldment Using Advanced Indentation System

장재일, 김우식*, 주장복**, 권동일**, 최열, 손동일
(주)프론틱스, *한국가스공사 연구개발원, **서울대학교 재료공학부,

1. 서론

다양한 공학적 경험을 반영한 재료기술과 건축기술이 발달한 지금도 용접부는 대형 강 용접 구조물/설비의 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의를 기울여야 하는 평가 대상 부위이다. 현재의 국내의 제강 기술의 수준으로 보아서도 모재의 기계적 성질보다 용접부의 기계적 성질을 적절하고도 합리적으로 평가하는 것이 훨씬 더 중요하다. 이러한 기계적 성질 중에서도 가장 널리 활용되는 일축 인장시험(uniaxial tensile test)의 결과는 재료의 탄성 및 소성 성질 전반에 관한 자세한 정보를 제공해 주므로 설비/구조물의 역학적 안전성을 평가하기 위한 연구에는 필수적으로 인장시험이 수행되고 있다. 하지만 인장시험을 수행하기 위해서는 일정 크기와 형상을 가진 시험편이 필수적으로 요구되므로 그 시험편 요구조건을 만족하지 못하는 대상 소재의 경우에는 적용이 불가능하다는 점이 인장시험의 불가피한 제약조건으로 인식되어 왔다. 즉, 미세조직이 국부적으로 급변하는 용접열영향부(heat-affected zone)의 경우, 기존의 인장시험을 적용하여 평가목표 영역의 인장물성 평가가 거의 불가능하므로 일반적으로 마이크로 비커스 시험(micro-Vickers test)을 통하여 강도의 변화경향의 관찰, 또는 평가 목적의 기준값과 비교하는데 만족하고 있다. 그러나 경험적인 물성치에 불과한 경도의 경우 단순히 그 자체의 비교 기준만을 제시할 수 있을 뿐 인장 시험 결과와 같이 역학에 기반한 계산 및 응용에 적용할 수 없고, 제공하는 정보의 단순함으로 인하여 재료의 화학조성 및 미세조직의 변화에 의한 영향을 반영하는데 한계가 있다는 단점들이 있다. 따라서 기존의 용접구조물 건전성 평가에 있어서 용접열영향부에 대한 정량적 접근은 제한된 범위에서만 가능하였다.

이와 같이 기존의 인장시험을 적용하기 힘든 부위에 대하여 인장물성을 평가하기 위한 노력의 일환으로써, 최근에는 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 압입시험법(continuous indentation test)이 개발되어 활발히 연구되고 있다^{1, 3)}. 이러한 연속압입시험법을 활용하여 인장물성을 평가할 경우, 용접부에 대한 사용적합성(fitness-for-purpose) 평가⁴⁾에 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. 이러한 연구의 일환으로, 본 연구에서는 저자들 중 일부가 소속한 Frontics 사가 개발한 연속압입시험 시스템인 Advanced Indentation System (이하 AIS)을 활용하여 국내 천연가스 배관에 사용되는 API 5L X65 강의 용접부에 대하여 미시적 측면과 거시적측면으로 인장거동 변화를 평가하고자 하였다.

2. AIS를 이용한 인장물성 평가의 이론적 배경

다중 압입시험 방식을 사용하는 연속 압입시험법은 일회 시험을 통하여 그림 1에 나타난 압입하중-변위곡선을 여러 단계에 걸쳐 얻게 된다. 압입깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변의 탄성, 소성 변형양상에 의해서 측정된 압입깊이와 달라지게 되므로 이를 고려한 것이 AIS 시험의 특징중 하나이다. 즉, 압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화 및 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 그림 2와 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 또는 압입자 하부로 밀

려들어가는 sink-in현상이 발생하므로⁵⁾, 이를 고려할 때, 수정된 접촉반경은 식 (1)를 통하여 평가하여야 한다.

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_*^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (1)$$

여기서 n은 가공경화지수, R은 압입자 반경, a는 접촉반경, h_c^* 는 하중제거 곡선의 초기접선 기울기이자 stiffness를 의미한다. 식 (1)를 통해 얻어진 접촉반경에서 기하학적 관계를 이용하여 실제 접촉 깊이인 h_c 를 구하게 되며, 이를 후속적인 평균 접촉압력 및 압입 변형률 등의 평가에 이용하게 된다.

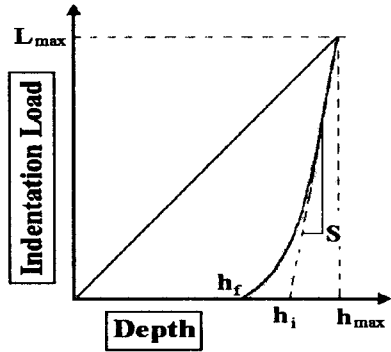


Fig. 1. Schematic illustration of indentation load-depth curve.

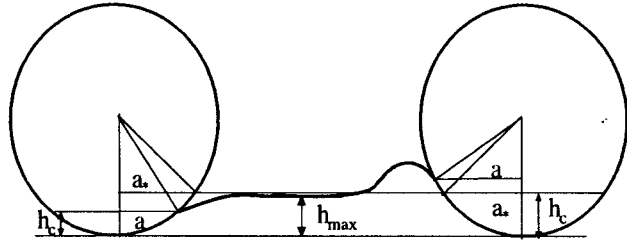


Fig. 2. Schematic diagram of surface sink-in and pile-up phenomena around spherical indenter.

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하는데, 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역의 세 단계로 천이됨이 보고되었다⁶⁾. 유동특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요한데, AIS 시험에서 유동응력은 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자 κ 를 결정함으로써 평가하고, 실제 압입변위를 미분하여 평가한 변형률 개념으로부터 압입변형률을 정의하였다³⁾. 이를 바탕으로 유동곡선을 Hollomon 식에 따라 적합화하거나, 연속체 이론을 사용함에 따라 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 최종적으로 구할 수 있다.

3. 실험방법

0.08C-1.45Mn-0.19P-0.003S-0.31Si의 화학성분을 가진 API 5L X65 강관을 사용하는 천연가스 배관의 원주용접부에 대하여 그림 3에 나타난 Frontics 사의 AIS 2000 모델을 사용하여 연속압입시험을 수행하여 인장거동 변화를 평가하였다. AIS 시험의 결과는 그림 4에 나타난 바와 같이 유동곡선, 항복강도, 인장강도, 가공경화지수, Hollomon 식에 대하여 별도의 분석없이 시험 즉시 얻을 수 있다.

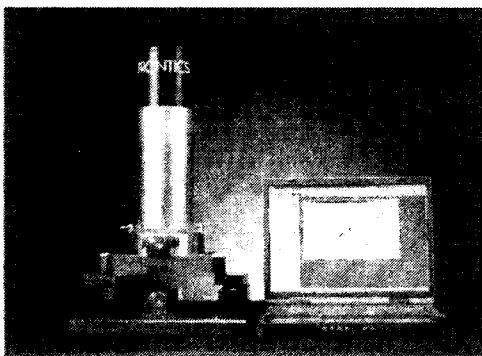


Fig. 3. Portable advanced indentation system (developed by FRONTICS, Inc.).

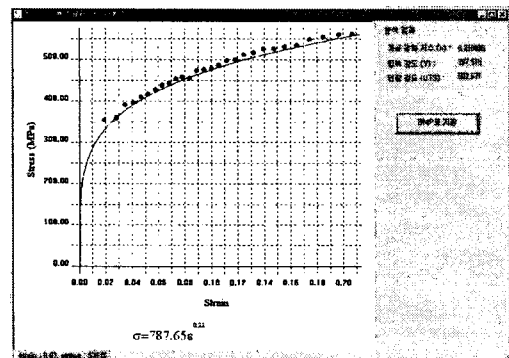


Fig. 4. An example of flow curve derivation from load-depth curve.

거시적 인장물성 변화를 평가하기 위하여 현장용접조건과 동일한 조건으로 GTAW 및 SMAW 방식으로 용접을 수행한 V-개선 원주용접부의 모재, 용착금속, 열영향부에 대하여 각각 시험을 수행하였고 모재에 대해서는 게이지 길이 25mm, 두께 4mm인 subsize 인장시험편을 채취하여 일축인장시험을 수행한 후 그 결과를 AIS 시험 결과와 비교하였다. 또한 미시적 인장물성 변화를 평가하기 위하여 일반적으로 강 용접부의 최고 취약부위라고 알려진 결정립 조대화 영역(Coarse-grained HAZ, 이하 CGHAZ)에 대하여 열재현한 모사 시험편을 활용하여 AIS 시험을 수행하였다. 이 경우 작은 압흔만을 남기는 비파괴적 시험방법이라는 연속압입시험의 장점을 활용하여 하나의 모사시험편에 대하여 다양한 저온 영역에 대한 인장물성을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

우선 AIS 시험 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 먼저 모재에 대한 일축인장 시험을 수행하여 그 결과를 AIS 시험결과와 비교하였고, 그 결과 일축인장 시험결과와 AIS 시험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 실용접부내의 위치에 따른 거시적 인장물성 변화를 평가하기 위하여 실용접부의 용착금속과 용접열영향부 및 인접 모재에 대하여 0.3mm의 압입 깊이로 평가를 수행하였고, 그 결과의 한 예를 표 1과 그림 5에 나타내었다. 표 및 그림에서 용접열영향부에서 가장 낮은 항복강도 및 인장강도를 나타내었고, 용착금속이 가장 높은 강도를 나타냄을 확인 할 수 있다. 이는 용착금속의 항복강도가 모재에 비하여 높은(overmatched joint) 본 용접부의 특징인 특성을 잘 반영해 주는 결과일 뿐 아니라, TMCP(thermo-mechanical controlling process)로 제조된 강종의 용접열영향부에서 자주 발견되는 열영향부 연화(softening) 현상⁷⁾을 정량적으로 나타내고 있다. 연화현상은 TMCP 공정에 따른 기지(matrix) 강화 효과가 용접 열사이클에 의해 제거되면서 나타나는 결과로서 기존의 연구에서는 경도값의 감소만을 확인할 수 있었던 것이 AIS 시험을 통하여 정확한 값을 나타낼 수 있게 된 것은 공학적 유용성 측면에서 크게 개선된 점이라 하겠다.

다음으로 공학적인 의미에서 국부적 취화영역(local brittle zone, LBZ)이라고 통칭되는 CGHAZ내의 세부 영역에 대하여 미시적인 인장물성 변화를 평가하기 위하여 1차 열사이클의 최고온도(T_{P1})를 1623K로 고정하고 2차 열사이클의 최고온도(T_{P2})를 변화시킨 모사시험편에 대하여 AIS 시험을 수행하였고 그 결과의 일부를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 T_{P2} 가 1473K인 영역, 즉 UA CGHAZ(unaltered CGHAZ)과 773K인 영역, 즉 SC CGHAZ(sub-critically reheated CGHAZ)가 가장 낮은 항복강도치를 나타내었고, T_{P2} 가 1273K인 영역, 즉 재결정에 의해 미세한 결정립을 가진 SCR CGHAZ(super-critically reheated CGHAZ)과 1073K인 영역, 즉 IC CGHAZ(inter-critically reheated CGHAZ) 순으로 갈수록 항복강도가 증가하였다. 이러한 미시적 강도변화의 원인으로서, SCR CGHAZ의 경우는 열영향부내에 용접열에 의한 연화현상이 일어나지만 결정립 미세화에 의한 강화가 연화효과를 보상함에 따라 강도가 UA CGHAZ에 비하여 증가했기 때문이고, IC CGHAZ의 경우 연화현상을 야기하는 용접 열사이클에도 불구하고 큰 항복강도를 나타내는 것은 영역내에 존재하는 M-A 조직(Martensite-Austenite constituent)의 탄소함량이 UA CGHAZ를 포함한 다른 미세영역내에 존재하는 M-A 조직의 탄소함량보다 훨씬 크다는 기존의 연구결과⁸⁾로 해석할 수 있다. 이와 더불어, 본 연구에서는 각 조건당 1개씩의 모사 시험편에 대하여 온도를 변화시키며 저온에서 인장물성의 온도의존성을 관찰하였고 그 결과를 토의하였다.

Table 1. Results of strength measurement using AIS test.

분류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
모재	450	607
용착금속	575	830
용접열영향부	398	636

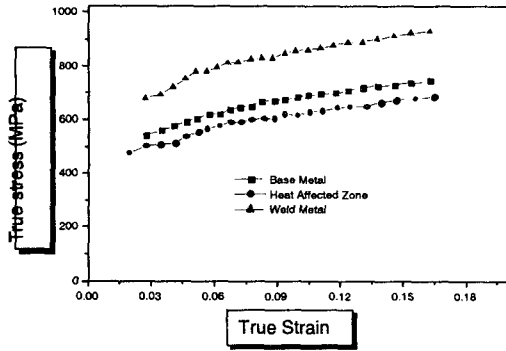


Fig. 5. An example showing difference in flow curves with the variation of microstructure in API X65 steel.

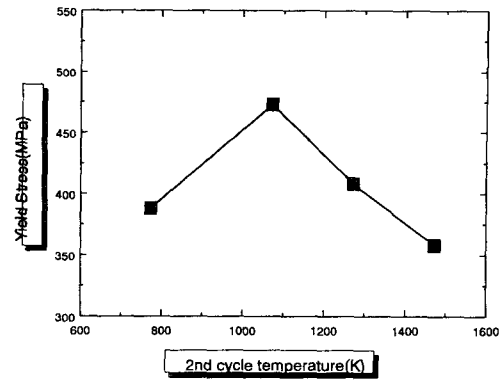


Fig. 6. Relation between yield strength at room temperature and the second peak temperature.

5. 결론

본 연구에서는 Advanced Indentation System을 활용하여 API 5L X65강을 사용한 천연가스 공급 배관의 원주용접부에 대하여 인장물성 변화를 거시적 및 미시적으로 관찰한 결과를 소개하였다. 본 연구와 같이 용접부의 인장물성 변화를 정량적으로 평가할 경우, 첫째, 운용중인 구조물/설비의 용접부에 대한 사용적합성(fitness-for-service) 평가를 위한 손상분석도 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 다양한 인프라 구조물/설비의 복합화, 대형화추세에 따라 초대형 구조물/설비의 용접부에 대한 건전성 평가에 대한 요구가 급증할 것으로 예상되는 만큼 AIS와 같이 현장에 적용 가능한 새로운 기술들의 지속적인 개발 및 실용화가 이루어지길 기대한다.

참고문헌

- 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.
- 변택상, 김진원, 홍준화: 압입시험을 이용한 원자로압력용기강의 파괴인성 예측 모델, 제 11회 재료강도 심포지움 논문집 (1997) 467.
- 안정훈, 최열, 권동일: 압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가, 대한금속재료학회지, 38 (2000) 1606.
- BS7910: Guide and methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures, British Standards Institution (1999)
- 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.
- Francis, H.A.: Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation, *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, 98 (1976) 272.
- 윤중근, 김희진: TMCP강재의 연화현상, 대한용접학회지, 6-2 (1988) 9.
- 장재일, 주장복, 김우식, 권동일: 초저온용강 용접열영향부의 저온 파괴특성에 관한 금속조직학적 분석 (I), 대한금속재료학회지, 38 (2000), 1001.