대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 A pp. 483~488 KSME 01S072

Advanced Indentation System을 이용한 천연가스배관 용접열영향부의 응력-변형률 변화 특성 분석

장재일*· 손동일*· 권동일**· 김우식***, 박주승****

Evaluation of Stress-Strain Characteristics of Weldment in Natural Gas Pipeline Using Advanced Indentation System

Jae-il Jang*, Dongil Son*, Dongil Kwon**, Woo-sik Kim***, and Joo Seung Park****

Key Words: Advanced Indentation System(최신 압입 시스템), Continious indentation test(연속압입 시험), Tensile property(인장물성), Nondestructive evaluation(비파괴적 평가), Weldment Property(용접부 물성), Time-dependent degradation(경년열화)

Abstract

Until now, the tensile properties of materials can be obtained just in accordance with conventional tensile testing methods which are described in several standards such as ASTM (American Society for Testing and Materials) standard and BS (British Standard). For some cases including on-service facility materials, however, the standard testing methods cannot be applicable due to the destructive testing procedure and specimen size requirement. Therefore, simple, non-destructive and advanced indentation technique was proposed. This test measures indentation load-depth curve during indentation and analyzes the mechanical properties related to deformation and fracture. In this paper, the research trend of non-destructive evaluation of tensile properties using AIS (advanced indentation system) and its application fields are reviewed and discussed.

1. 서 론

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 국내외 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 평가 목표 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

* (주) 프론틱스 연구개발부
Tel: 02-884-8025 E-mail: jijang@frontics.com
** 서울대학교 재료공학부
*** 한국가스공사 연구개발원
**** 산업자원부 기술표준원

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 다중인가 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) 평가[4]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. 실험방법

2.1 AIS를 이용한 인장물성 평가의 이론적 배경

다중 압입시험 방식을 사용하는 연속 압입시험법은 일회 시험을 통하여 그림 1에 나타낸 압입하중-변위곡선을 여러 단계에 걸쳐 얻게 된다. 압입깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변의 탄성, 소성 변형 양상에 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 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 또는 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in현상이 발생하므로[5], 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 접촉깊이인 h_c를 구하게 되며, 이를 후속적인 평균 접촉압력 및 압입 변형률 등의 평가에 이용하게 된다.

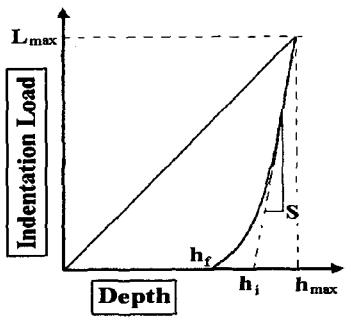


Fig. 1 Schematic illustration of indentation load-depth curve.

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하는데, 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역의 세 단계로 천이됨이 보고되었다[6]. 유동특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요한데, AIS 시험에서 유동응력은 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자 Ψ를 결정함으로써 평가하고, 실제 압입변위를 미분하여 평가한 변형률 개념으로부터 압입변형률을 정의하였다[3]. 이를 바탕으로 유동곡선을 Hollomon 식에 따라 적합화하거나, 연속체 이론을 사용함에 따라 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 최종적으로 구할 수 있다.

2.2 시험편 제작 및 실험 조건

실험에 사용된 시험편은 천연가스 주배관으로 사용되고 있는 직경 30인치, 두께 17.5mm의 API 5L X65 강으로 표 1에 그 화학적 조성을 나타내었다.

우선 용접부의 거시적 인장물성 변화를 평가하기 위하여 국내 천연가스 배관 건설시와 동일한 현장용접조건으로 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) 및 SMAW (Shielded Metal Arc Welding) 방식에 의해 원주 용접을 수행하였고, 시험후 비파괴검사를 통해 결함이 없는 부위에 대해서만 시험편을 채취하여 사용하였다.

강 용접부의 최고 취약부위라고 알려진 결정립 조대화 영역(Coarse-grained HAZ, 이하 CGHAZ)내의 인장물성 변화를 미시적으로 평가하기 위하여 통전방식에 의한 열사이클 장치인 Gleeble 1500을 이용하여 용접 열모사 시험편을 제작하였다. 용접 열모사시 가장 중요한 조건중 하나인 1073K에서 773K까지의 냉각속도($\Delta t_{8/5}$)는 실용접부의 평균입열량인 19kJ/cm과 두께 17.5mm를 반영하여 계산한 37.7초로 설정하였다. 1차 열사이클로서 최고가열온도(T_{P1})를 1623K로 고정하여 급속가열한 다음 동온도에서 3초간 유지 후 설정된 냉각속도($\Delta t_{8/5}$)로 냉각하였고, 2차 열사이클에서는 재가열온도(T_{P2})를 1473K에서 773K까지 변화시켰다. 이때, 사용된 재료의 A_{C1}과 A_{C3} 변태점을 찾기 위하여 dilatometry test를 추가로 실시하여 CGHAZ내 영역 분류에 활용하였다.

이상과 같이 준비된 시험편에 대하여 그림 2에 나타낸 Frontics 사의 AIS 2000 모델을 이용하여 연속압입 시험을 수행하여 인장물성 변화를 평가하였다. 시험조건은 최대변위 0.3mm까지 압입하게 되는 변위제어 압입시험으로서, 압입속도는 0.3mm/min, 15회 다중압입을 수행하도록 설정하였다. AIS 시험의 결과는 그림 3에 나타낸 바와 같이 유동곡선, 항복강도, 인장강도, 가공경화지수, Hollomon 식에 대하여 별도의 분석없이 시험 즉시 얻을 수 있다. 실용접부에 대하여 거시적 인장물성 변화를 평가하기 위하여 원주용접부의 모재, 용착금속, 열영향부에 대하여 각각 시험을 수행하였고 모재에 대해서는 배관의 중심부에서 게이지 길이 25mm, 두께 4mm인 subsize 인장시험편을 채취하여 일축인장시험을 수행한 후 그 결과를 AIS 시험 결과와 비교하였다. 또 용접 열모사 시험편에 대해서는 작은 압흔만을 남기는 비파괴적 시험방법이라는 연속압입시험의 장점을 활용하여 샬피 충격시험편 크기의 모사시험편 한 개에 대하여 다양한 저온 영역에 대한 인장물성을 구하였다. 측정한 시험편의 예를 그림 4에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of API 5L X65 pipeline steel used in this study.

	C	Mn	P
Composition (%)	0.08	1.45	0.019
	S	Si	Fe
	0.003	0.31	Bal.

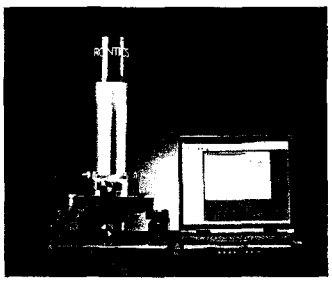


Fig. 2 Portable advanced indentation system (developed by FRONTICS, Inc).

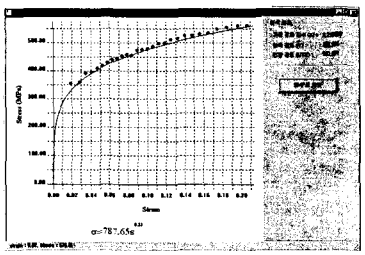


Fig. 3 An example of flow curve derivation from load-depth curve.

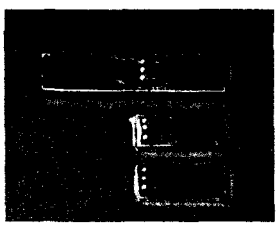


Fig. 4 Actual view of tested specimen.

3. 결과 및 고찰

3.1 천연가스 배관 원주 용접부의 거시적 인장물성 변화

우선 AIS 시험 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 먼저 배관 두께 중앙부에서 채취한 모재에 대한 일축인장 시험을 수행하여 그 결과를 인접 위치에 대해 수행한 AIS 시험결과와 비교하였다. 인장 시험 결과, 원주방향 및 길이방향에 있어서 방향성에 따른 인장물성의 차이는 극히 미미하였으며, 표 2에서 나타낸 바와 같이 일축인장 시험결과와 AIS 시험결과가 잘 일치하였으므로 본 AIS 시험결과가 상당한 신뢰성을 가짐을 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 예를 표 2와 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) 현상[7]을 정량적으로 나타내고 있다. 연화현상은 TMCP 공정에 따른 기지(matrix) 강화 효과가 용접 열사이클에 의해 제거되면서 나타나는 결과이다.

그림 6에는 두께 방면의 시험편에 대하여 상부, 중심부, 하부에 대하여 항복강도의 변화를 연속적으로 나타내었다. 두께내의 평가 위치와 상관없이 동일한 변화경향성을 나타냄을 확인할 수 있다. 이와 같이 기존의 연구에서는 경도값의 감소만을 확인할 수 있었던 강도변화경향을 AIS 시험을 통하여 정확한 값을 나타낼 수 있게 된 것은 공학적 유용성 측면에서 크게 개선된 점이라 하겠다.

Table 2 Results of strength measurement using AIS test and uniaxial tensile test.

분류	시험법 (시험편방향)	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
모재	인장시험	453	601
모재	AIS 시험	450	607
용착금속	AIS 시험	575	830
용접열영향부	AIS 시험	398	636

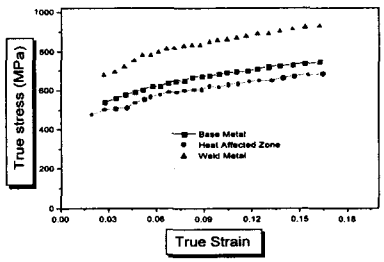


Fig. 5 An example showing difference in flow curves with the variation of microstructure in API X65 steel.

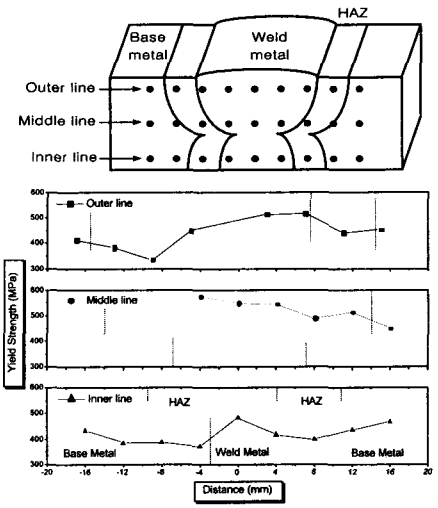


Fig. 6 Macroscopic variation of the yield strength within girth weldment.

3.2 천연가스 배관 원주용접부 LBZ내의 미시적 인장물성 변화

일반적으로 용접열영향부내에서 가장 취약하므로 공학적 측면에서 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})을 변화시킨 모사시험편을 제작하여 AIS 시험과 광학현미경 관찰을 수행하였다. Dilatation 시험 결과 A_{c1} 및 A_{c3}온도는 각각 1093K와 1103K로 결정됨에 따라 CGHAZ는 다시 표 3의 미세영역으로 분류할 수 있다. 그림 7에 광학현미경 관찰 결과를 나타내었는데, T_{P2}가 결정립 조대화 영역을 지나거나, 거의 영향을 미치지 않는 UA CGHAZ (unaltered CGHAZ)의 경우, 조대한 크기의 페라이트와 상부 베이나이트로 구성되어 있음을 알 수 있고, T_{P2}가 페라이트와 오스테나이트의 이상 영역에 존재하는 IC CGHAZ (intercritically reheated CGHAZ)는 페라이트 입내에 많은 저온 변태 생성물을 가지고 있으며, T_{P2}가 A_{C1}온도 이하에 존재하는 SC CGHAZ (sub-critically reheated CGHAZ)는 2차 열사이클에 따른 템퍼링 효과로 UA CGHAZ와 마찬가지로 조대한 결정립을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 반면 T_{P2}가 재결정 영역에 위치한 SCR CGHAZ (supercritically reheated CGHAZ)는 재결정의 영향으로 모재보다도 미세한 페라이트와 펄라이트 결정립을 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 8에 T_{P2}에 따른 항복강도와 가공경화지수의 변화를 AIS 실험결과로부터 나타내었다. T_{P2}가 1473K인 영역, 즉 UA CGHAZ과 773K인 영역, 즉 SC CGHAZ가 가장 낮은 항복강도와 가장 높은 가공경화지수를 나타내었고, T_{P2}가 1273K인 영역, 즉 재결정에 의해 미세한 결정립을 가진 SCR CGHAZ과 1073K인 영역, 즉 IC CGHAZ 순으로 갈수록 항복강도가 증가하고 가공경화지수가 감소하였다. 이러한 미시적 강도변화는 전술한 미세조직의 변화로 설명할 수 있는데, 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 연구결과[8]로 해석할 수 있다.

하지만 이러한 강도의 차이는 저온으로 갈수록 작아져서 본 강의 DBTT 영역인 213K에서 233K에 이르면 거의 비슷한 강도를 나타냄을 저온 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 그 예를 그림 9에 나타내었는데, 이에 대한 자세한 연구결과는 지면관계상 추후 소개할 예정이다.

Table 3 Classification of microstructures within HAZ for mutipass welding.

Tp1(K)	Tp2(K)	HAZ Microstructure
M.P.(Melting Point) ~ 1373 (CGHAZ)	M.P. ~ 1373	UA CGHAZ
	1373 ~ 1103	SCR CGHAZ
	1103 ~1093	IC CGHAZ
	1093 ~ 723	SC CGHAZ
	723 ~	UA CGHAZ

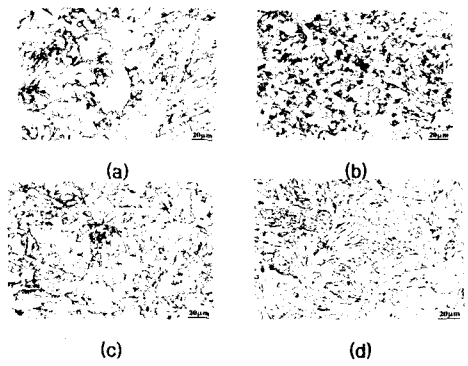
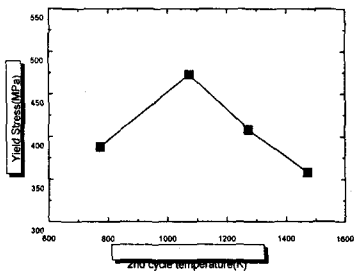
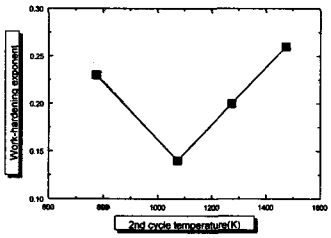


Fig. 7 Microstructures of; (a) UA CGHAZ, (b) FGHAZ, (c) IC CGHAZ, and (d) SC CGHAZ..



(a)



(b)

Fig. 8 Relation between tensile properties at room temperature and the second peak temperature: (a) yield strength, (b) work hardening exponent.

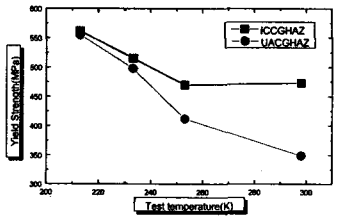


Fig. 9 Change in yield strength according to test temperature.

4. 맺음말

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 연속압입시험의 현장 적용 범위의 확대가 기대된다.

참고문헌

(1) Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., 1990, "Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials," *ASTM STP 1092* (1990) pp.188~208.

(2) 변택상, 김진원, 홍준화, 1997, "압입시험을 이용한 원자로압력용기강의 파괴인성 예측 모델," 제 11회 대한 금속학회 주최 재료강도 심포지움 논문집 pp.467~473.

(3) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, "압입하중-변위 곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가," 대한금속재료학회지, 제 38권, pp.1606~1611.

(4) British Standard 7910, 1999, "Guide and methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures," British Standards Institution.

(5) Norbury, A.L. and Samuel, T., 1928, "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.*, Vol. 117, pp.673~687.

(6) Francis, H.A., 1976, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation," *J. Eng. Mater. Technol., Trans. ASME*, Vol. 98, pp.272~286.

(7) 윤중근, 김희진, 1988, "TMCP강재의 연화현상," 대한용접학회지, 제 6권, 제 2호 pp.9~18.

(8) 장재일, 주장복, 김우식, 권동일, 2000, "초저온용강 용접열영향부의 저온 파괴특성에 관한 금속조직학적 분석 (I)," 대한금속재료학회지, 제 38권, pp.1001~1010.