대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 A pp. 231~236 KSME 01S029

Cr-Mo 강의 열화도 평가를 위한 Advanced Indentation System의 응용

장재일*· 최열*· 이윤희**· 권동일**· 김정태***

Application of Advanced Indentation System for Evaluati Tensile Property Degradation of Cr-Mo Steel

Jae-il Jang*, Yoel Choi*, Yun-Hee Lee**, Dongil Kwon**, and Jeoung Tae K

Key Words: Advanced Indentation System (최신 압입 시스템), Continious indentation test 입시험), Tensile property (인장물성), Nondestructive evaluation (비파괴적 ㅈ Time-dependent degradation (경년열화), Cr-Mo Steel(Cr-Mo 강)

Abstract

A newly developed Advanced Indentation System (AIS), which is a portable and nondestructive system for evaluating tensile properties, was used to measure mechanical behavior of materials used under high temperature and pressure conditions. This test measures indentation load-depth curve during indentation and analyzes the mechanical properties related to deformation and fracture. Aging effects of Cr-Mo and Cr-Mo-V steel at high temperature were simulated. Tensile properties including yield strength and tensile strength at various temperature are obtained from the test. For all test materials and conditions, the AIS-derived results were in good agreement with those from conventional standard test method. Examples of the test results are given and potential applications of the AIS to assess the integrity of aging structures are briefly discussed.

1. 서 론

고온 고압하에서 사용되는 내열강은 사용 온도, 시간, 부하조건, 부식환경 등의 영향에 의해 재질형 열화(연화, 취화, 침부식, 원자력에서의 조사 손상 등)와 균열형 손상(피로균열 및 부식균열의 성장 등)을 필연적으로 경험하게 된다. 이러한 열화의 원인으로는 탄화물 등의 제 2상이 생성되면서 생기는 조성의 변화나 cavity의 생성 수소취화 등 재료 및 사용환경에 따라 다른 양상을 보이고 있다.

이 중 균열형 손상, 즉 균열의 크기를 정량적으로 평가하는 비파괴적 기술은 육안검사, 방사선법, 초음파법, 자분 탐상법, 와전류 탐지법, 음향방출법 등이 있으며 평가대상에 따라 이들 기술을 적당히 활용할 경우, 비교적 정확한 균열 크기 진단이 가능하다. 이에 비하여 재질형 열화를 비파괴적으로 평가하는 기술로는 레플리카법, 경도법, 전기저항법, 초음파법, 전기화학적 분극법 등이 있으나 이들 시험법들은 경험적 비교 데이터(reference data)를 필요로 하고 경험적인 관계식을 활용함에 따른 결과의 부정확성이 평가의 어려움으로 지적되고 있다. 반면에 인장시험,

* (주) 프론틱스 연구개발부
Tel: 02-884-8025 E-mail: jijang@frontics.cc
** 서울대학교 재료공학부
*** 두산중공업 기술연구소

파괴시험, 충격시험, 크리프시험과 같이 실험실에서 수행하는 기계적 성능 시험은 그 결과치는 정확하지만 시험편 채취에 어려움이 많은 현장 설비에의 적용성은 극히 제한적이다. 이러한 시험은 설비에 사용되는 재료의 사용온도 및 환경을 모사함으로써 열화현상을 예측하고 원인을 규명할 수 있다. 하지만 모사시험 및 가속시험이 현장을 정확하게 반영한다고 보기는 어려우며 같은 재료를 같은 사용환경에서 사용했다 하더라도 부위에 따라서 다양한 물성을 나타낼 수 있다. 그러므로 현장에서 비파괴적으로 정확한 기계적 열화 물성을 평가할 수 있다면 현장 설비의 건전성 진단에 큰 전기가 마련될 수 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 연속압입시험[1,2]을 응용한 Advanced Indentation System (AIS)[3]을 통해 비파괴적으로 측정한 인장 물성을 바탕으로 열화도를 평가해 보고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 압입 탄성계수의 유도

연속압입시험을 통해 일반적으로 얻어지는 데이터는 Fig. 1과 같은 압입하중-변위곡선이다. 압입하중-변위곡선은 하중을 L_{max}까지 가할 때까지의 하중인가곡선과 그 이후에 하중을 제거할 때 얻어지는 하중제거곡선의 두 부분으로 나누어진다.

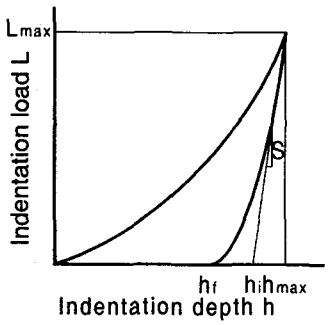


Fig. 1 The load-depth curve.

이 중 하중제거곡선은 재료의 탄성 회복을 나타내며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$L = B(h - h_f)^m \quad (1)$$

여기서 B와 m은 재료 상수이며, 하중제거곡선의 하중-변위들을 로그함수로 그래프를 그리면 구할 수 있다. 하중제거곡선의 초기부분의 접선의 기울기 S는 재료의 stiffness로 정의되며 식 (1)을 이용하면 다음과 같다.

$$S = \left(\frac{dL}{dh}\right)_{h=h_{max}} = Bm(h_{max} - h_f)^{m-1} \quad (2)$$

또한 stiffness S는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (3)$$

여기서 E_r은 환산탄성계수이며, A는 최대하중에서의 압입자와 재료의 접촉면적이다. 접촉면적은 최대하중에서의 압입깊이를 압입자의 기하학적인 관계를 사용하여 구하게 된다[1].

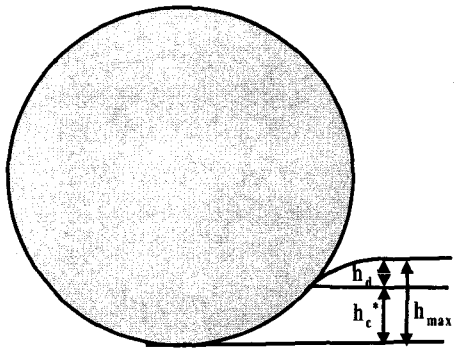


Fig. 2 A schematic diagram of elastic deflection phenomenon.

2.2 접촉 면적의 결정

접촉면적은 접촉깊이가 결정되면 압입자의 기하학적인 모양에서 얻어지는 식을 이용하여 구하게 된다. 일반적으로 압입자와 재료가 접촉하고 있는 접촉깊이는 압입자 이동거리와 같다고 하는 경우가 많으나 실제로는 압입자 주변에서 발생하는 재료의 변형양상에 의해 달라지게 된다. 변형양상은 크게 탄성적인 변형인 탄성굽힘현상과 소성적인 변형인 pile-up/sink-in 현상으로 나눌 수 있다.

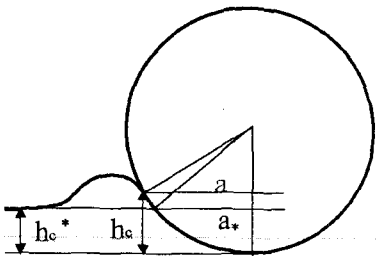
탄성굽힘 현상은 Fig. 2와 같이 압입자 주변의

재료가 탄성적으로 굽혀지게 되어 실제 접촉깊이가 압입자 이동거리보다 작아지게 되는 현상으로 식 (4)를 통해 보정할 수 있다.

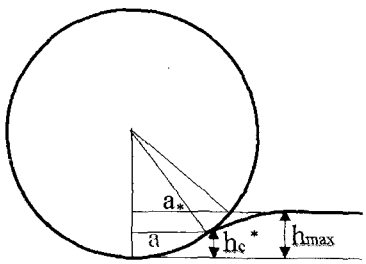
$$h_c^* = h_{max} - 0.75\frac{L_{max}}{S} \quad (4)$$

한편 pile-up 현상은 Fig. 3과 같이 소성변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이게 되어 접촉깊이가 증가하게 되며, 반대로 sink-in 현상은 압입자 아래로 밀려들어가 접촉깊이가 감소하게 된다. 이러한 현상은 식 (5)를 통해 보정하였다.

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



(a)



(b)

Fig. 3 A schematic diagram of (a) pile-up / (b) sink-in(b) phenomena.

식 (4)와 식 (5)를 통해 보정된 접촉깊이는 압입자와 재료의 실제 접촉깊이를 나타내게되며 이를 통해 실제 접촉깊이를 유도하였다.[1]

2.3 Advanced indentation system의 개발

저자들 중 일부가 소속한 Frontics 사에서는 전술한 이론적 배경을 바탕으로, Fig. 4와 같이 현장적용을 위한 이동식 연속 압입시험 시스템인 Advanced Indentation System (AIS 2000)을 개발하였다[3].

AIS는 소형· 경량성, 이동성, 구조물 적용성 및 원격 제어 가능성에 주안점을 두고 압입시험기, interface 부, 제어용 노트북 컴퓨터로 분리 제작되었다. 최적의 default 시험조건 설정과 함께 사용자 편의에 따라 시험조건의 변환도 용이하므로 현장시험 및 학술연구에의 활용에 모두 적합하도록 하였으며, 마그넷(평판 및 곡률 자석), U-블록, 기계적 결속도구 등의 다양한 부착장치를 이용하여 현장 구조물/설비에의 적용성을 극대화하였다.

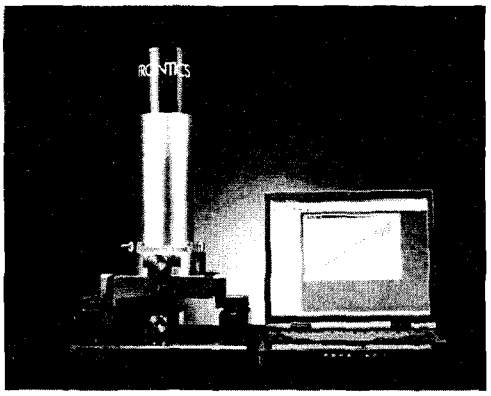


Fig. 4 Portable advanced indentation tester developed by FRONTICS, Inc.

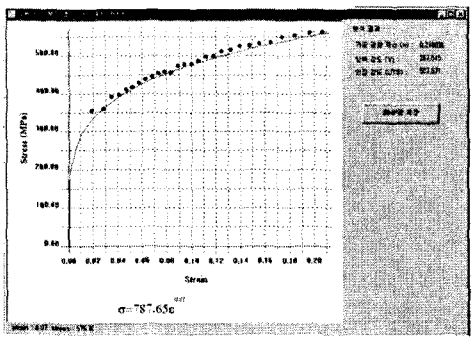


Fig. 5 Derivation of flow curve from indentation load-depth curve.

연속압입시험 결과 나타나는 하중-압입깊이 곡

선은 전술한 이론들을 기반으로 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용하여 분석함으로써 Fig. 5와 같이 시험과 동시에 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도와 같이 일축 인장시험에서 구할 수 있는 전반적인 변형관련 강도 물성을 평가하게 된다[3].

3. 결과 및 고찰

3.1 Cr-Mo-V강의 수소취화현상

앞서 설명한 AIS를 이용하여 내열강 재료의 하나인 중유정유용 반응용기의 재료로 사용되는 Cr-Mo-V강의 수소취화 관련물성을 평가하였다. 이 강은 482℃의 고온과 수소분압이200~300kgf/㎠인 고압 하에서 사용되므로 수소에 의한 취성파괴 및 손상사례가 다수 보고되고 있다[4]. 또한 수소침식에 의한 사고는 모재보다 용접부에서 빈번하게 발생한다고 보고되고 있으며, 특히 용접 열영향부의 조대한 결정립 영역에서 수소침식이 심하게 일어난다. 따라서 용접 열영향부에서의 수소침식특성 파악은 압력용기의 건전성 및 수명예측 등에 매우 중요한 자료를 제공할 수 있다. 실제 압력용기의 용접 열영향부를 모사하기 위하여 열 모사시험을 행하였으며 이를 기존의 규격화된 시험법과 AIS를 이용한 연속압입시험을 동시에 행하여 물성 값을 평가하였다. 용접 재현 열사이클 시험은 고주파 유도가열과 직접 통전가열이 가능하고, 열사이클 중에 응력/변위 제어가 가능한 고온변형 시험장치인 Thermicmaster 모델을 사용하였다. 최대 가열온도까지의 승온온도는 6초이며 3초간 유지한 후 냉각하였다. 이는 서브머지드 아크 용접하였을 때 열영향부에서 실제로 측정한 온도변화를 동일하게 재현시킨 것이다. 용접재현 열사이클을 행한 후 각 시편은

1) 690℃ 용접후처리만 수행
2) 690℃ 용접후처리후 600℃에서 수소분압 450kgf/㎠ 분위기 하에서 408시간 등온시효
3) 690℃에서 용접후처리를 행한 후 600℃에서 수소분압 450kgf/㎠ 분위기 하에서 1000시간 등온시효

의 세가지의 다른 열처리를 행하였다. 각 시험편은 20℃, 0℃, -30℃, -60℃의 온도에서 압입시험을 행하였고 각 온도별 물성을 측정하였다. 기존의 인장시험으로는 용접 열모사시험편에 대하여 본 실험과 같은 저온 물성을 구하기에는 시험편 크기면에서 많은 어려움이 있고, 또한 다수의 모사 시험편을 제작하는데 많은 시간과 비용을 요구한다. 반면, AIS는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 초저온에서의 국소부위 물성평가가 용이하며 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 10% 오차 범위 내에서 평가할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.

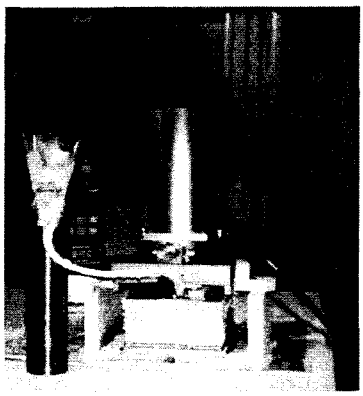
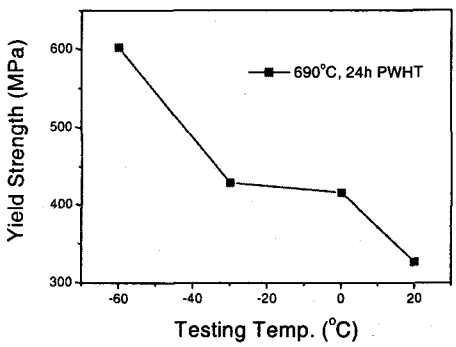
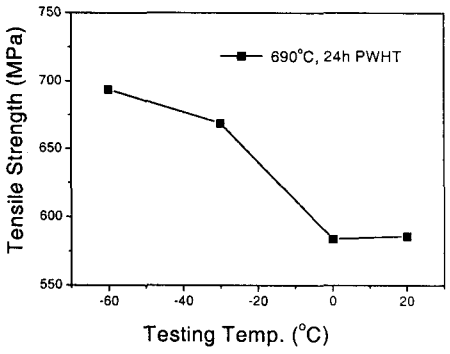


Fig. 6 Experimental setup of AIS for low temperature test.

Fig. 7은 이러한 실험 결과의 대표적인 그래프이며 온도가 감소함에 따라 항복강도와 인장강도가 증가함을 알 수 있다.



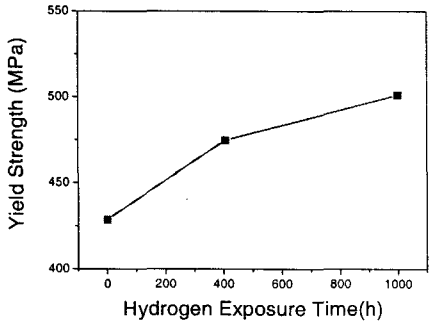
(a)



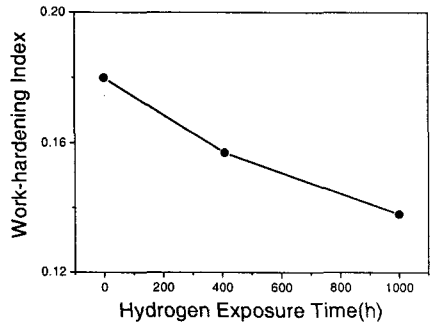
(b)

Fig. 7 Yield strength (a) and tensile strength (b) at different temperature.

각 수소폭로 시간에 따른 실험을 행하였으며 지면관계상 그 중 대표적인 -30℃에서의 실험결과를 Fig. 8에 나타내었다.



(a)



(b)

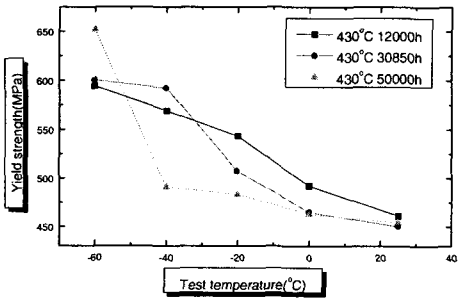
Fig. 8. (a) Yield strength and (b) work-hardening index at -30℃

그림에서 볼 수 있듯이 수소폭로시간이 증가함에 따라 항복강도가 증가하고, 연신률을 반영하는 가공경화지수는 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 연구에서 발표된 인장시험 및 충격시험의 결과[4]와 잘 일치하며 취화현상을 잘 나타내고 있다. 이러한 물성 변화 현상의 원인으로는 수소폭로 과정에서 일어나는 뜨임처리 효과와 입계에서 발생하는 메탄가스의 영향이라고 판단된다.

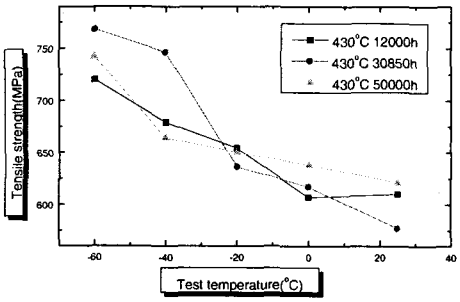
3.2 2.25-Cr-1Mo강의 등온시효시간에 따른 저온 인장물성 변화 평가

석유정제 공장의 수소화 분해, 수소 탈황 및 촉매 개질과 같은 수소화 반응기 장치에 사용되는 2.25Cr-1Mo강은 사용온도 범위 370~450℃가 템퍼취성 온도 영역과 일치하므로, 장시간 운전에 따른 템퍼취성에 의한 문제가 발생하고 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강을 템퍼취성이 발생하는 온도 구역에서 등온 열처리하여 탄화물의 거동과 P의 입계편석 등에 의하여 발생하는 템퍼취성의 정도에 따른 인장물성 변화 양상을 분석하였다.

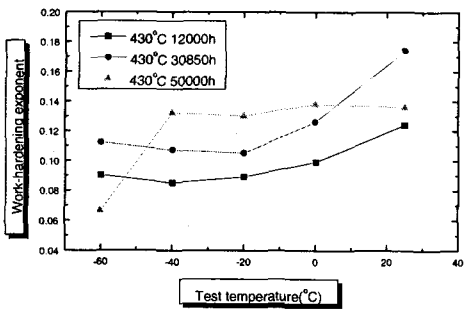
등온시효된 2.25Cr-1Mo강의 저온인장물성 평가를 수행하기 위하여 430℃에서 각각 12000시간, 30850시간, 50000시간 등온 열처리 된 재료에 대하여 상온, 0, -20, -40, -60℃에서 연속 압입시험을 행하였고, 각 온도에서 연속압입시험을 통하여 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 유도하였다. 시험재의 화학성분은 0.13C - 0.22Si - 0.49Mn - 0.007P - 0.003S - 0.19Ni - 0.99Mo - 0.03V이다. Fig. 9는 시효시간 및 시험 온도에 따른 압입 인장물성 변화 양상을 나타낸 것이다. 시효시간이 증가함에 따라 $FATT_{50}$의 증가 및 충격흡수에너지의 감소양상은 발견되지만, 상온 및 저온에서의 압입시험 결과 등온시효 시간에 따른 인장물성의 열화는 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 현재는 고온 압입시험을 통한 고온 인장물성 열화효과를 분석하고 있으며 그 결과는 추후 발표할 계획이다.



(a) yield strength.



(b) tensile strength.



(c) work- hardening index.

Fig. 9 Tensile properties variation with isothermal aging time in low temperature.

4. 결언

본 연구에서는 연속압입시스템인 Advanced Indentation System을 활용하여 Cr-Mo 강의 인장물성에 대한 열화도를 평가한 결과를 간단히 소개하였다. 국내에서도 70년대 산업화 열기와 더불어 건설된 많은 고온, 고압 구조물/설비들의 노후화와 수명연장에 대한 논의가 활발해지는 만큼, 연속압입 시험의 활발한 현장적응이 기대된다.

참고문헌

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

(2) 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.

(3) 장재일, 최열, 권동일, 박주승, 2001, "비파괴적 인장물성 평가를 위한 Advanced Indentation System의 응용 연구," 2001년도 1차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp.58~66.

(4) 김동진, 김병훈, 공병욱, 김정태, 권용형, 박화순, 강정윤, 2000, "3Cr-1Mo-V강의 재현열영향부에서 최고가열온도가 수소침식감수성에 미치는 영향," 대한용접학회지 제 18권, 2호, pp.232~238.

(5) 공병욱, 김정태, 김동진, 김병훈, 지병하, 1999, "2.25Cr-1Mo 강의 템퍼 취화에 미치는 장시간 등온시효의 효과," 대한금속학회지 제 37권, 3호, pp.281~287.