

최신 압입시험기를 이용한산업설비의 비파괴 안전진단

이윤희 · 안정훈 · 최 열* · 손동일* · 장재일* · 권동일

서울대학교 재료공학부, *(주)프론틱스

1. 서론

1970년대의 급격한 경제 성장시기에 건설된 구조물들은 30년 이상의 사용으로 인해 노후화가 심각하며 대형 산업재해의 가능성을 가지고 있다. 따라서 노후 설비들의 안전한 사용을 위해서는 소재 물성의 정기적인 진단을 통한 정확한 수명예측이 필요하다. 그러나 기존의 소재 물성평가를 위한 표준 방법인 일축인장 및 파괴역학 시험의 경우, 변형 및 파괴 거동에 대한 많은 정보를 제공하고 있지만, Bulk 형태의 표준시편이 필요하여 시편을 채취하는 과정에서 설비와 구조물에 노치에 의한 손상이 가해질 수 있어 구조물의 안전성을 오히려 해치는 결과를 초래할 수 있다. 또한 채취 중의 응력완화 및 손상에 의해 표준시편도 본래 현장 구조물과 다른 물성을 가질 수 있다.

이들 문제점에 대한 해결책으로 준 비파괴적이며, 시험법이 간편하여 현장에서 직접 사용할 수도 있는 최신 압입시험법이 제안되었다[1]. 최신 압입시험법은 기존의 경도치만을 구하는 경도시험과 달리 압입시험시 연속적인 변형거동을 압입하중-변위곡선으로 구하고, 이를 바탕으로 다양한 변형 및 파괴와 관련된 기계적 물성을 평가하는 방법이다. 우선 구형 압입자의 압입변형 상황을 분석함으로써, 경도는 물론 일축인장시험과 같이 항복강도, 인장강도, 가공경화지수를 포함하는 소재의 유동특성[1]과 적절한 모델링을 바탕으로 파괴특성도 평가할 수 있다[2,3]. 또한 이들 물성 평가기법은 압입자 크기와 형태의 변화를 통해 용접부와 같은 국소 취약부 평가나 분위기 장치의 부착을 통한 여러 열화상황에서 소재거동까지도 평가할 수 있다. 이러한 필요성에서 프론틱스는 대형 구조물에 직접 부착하여 소재 물성을 평가할 수 있는 이동식 최신 압입시험기를 개발하였으며, 이를 이용해 다양한 구조용 강재의 변형 및 파괴물성을 평가하였다.

2. In-situ 현장 적용 시험

최신 압입시험 기법은 기존의 경도시험법을 개선하여 압입시험 중의 실하중과 압입자 침투변위를 초기자료로 하여, 여러 가지 기계적 물성을 평가하는 방법이다. 기존의 압입자와 동일한 형태 및 직경 1mm 정도의 미세한 경구를 사용하므로 시편 크기 및 준비에 제한이 없고, mm 수준인 미세 취약부의 구체적 물성 평가도 가능하다[1]. 따라서 대형 구조물의 안전성을 해치지 않을 수준에서 미소한 시편을 채취하여 열화 물성을 평가하는 것이 가능하다. 그러나, 최근들어 미소 시편을 채취하는 방법도 소재 표면에서부터 내부로의 미세조직적 변화가 심하거나 잔류응력이 완화되는 문제점 등으로 인하여 명확한 구조물의 물성 평가에 문제점을 나타내게 된다.

따라서 최근들어 비파괴적인 시험기를 현장 구조물에 직접 부착하여 시험함으로써, in-situ적인 소재물성 평가의 필요성이 부각되었고, 이러한 시점에서 프론틱스사에서 그림 1과 같은 현장 구조물 부착용 최신 압입시험기가 제작되었다. 최신 압입시험기 (Advanced Indentation System)는 마이크론 수준의 위치 정밀제어가 가능한 모터로 구동이 되며, 하중 및 변위센서를 갖추고 있다. 따라서 압입시험시 모터 구동에 따른 하중과 변위 신호를 동시에 받아들여 그림 2와 같은 초기 시험결과를 나타내게 된다.

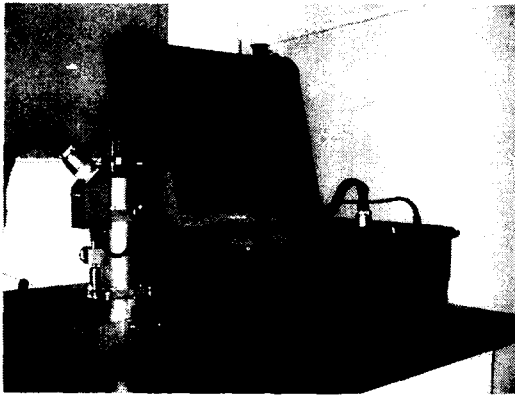


Fig. 1. Portable advanced indentation system developed by FRONTICS.

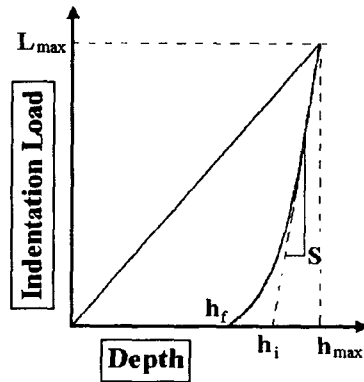


Fig. 2. Analysis of indentation load-depth curve.

이러한 시험결과를 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용하여 분석함으로써 변형관련 강도 물성을 평가하게 된다. 또 최신 압입시험기는 소형·저중량화 및 현장적용성에 중점을 두어 시험자가 전체 시스템을 간단히 운반할 수 있도록 제작하였고, 시험기의 원격 조정도 고려하였다. 시험기의 경량화를 위하여 저비중 고강도 합금을 프레임에 사용하였고, 인터페이스 관련 보드 및 드라이버는 따로 콘트롤 상자를 이용하여 시험기와 분리하였다. 특히 현장에서 시험 자료를 축적하고 분석할 수 있는 고성능 노트북을 탑재

하였고, 파이프와 판상 등 다양한 현장 구조물에 공고히 부착하여 시험할 수 있도록 V 블록과 고강도 자석 및 물리적 체인을 이용하는 방법을 적용하였다.

3. 다양한 기계적 물성 평가

접촉물성 평가

구형 압입자/시편 간의 접촉깊이는 그림 2에 나타나 있는 압입하중 제거곡선을 분석하여 평가한다. 하중제거 곡선을 멱함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분함으로써 기울기 S 를 평가한다. 우선 압입자와 시편의 접촉깊이 h_c^* 는 elastic flat punch 이론을 이용하여 앞서 결정된 기울기를 따르는 직선을 압입하중 L 이 0인 상태까지 외삽하여 평가하게 된다[4]. 그러나 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를 ω 라는 압입자 형태상수로 보정한 식 (1)이 제시되었다[5].

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

구형 압입자의 형태상수인 0.75를 대입하고, 압입자의 기하학적 형상을 고려하면 압입자/시편의 접촉반경 a 를 평가할 수 있다. 그러나 최근 연구에 따르면, 압입자/시편의 접촉반경은 가공경화지수 n 과 직접적인 관계를 갖는 압흔주변의 pile-up/sink-in 양상에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 확인되었고, 이로부터 식 (2)의 수정된 접촉반경을 평가할 수 있다[6].

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

유동특성

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하기 때문에 이로부터 일축 인장시험과 마찬가지로 유동특성을 평가하는 연구가 진행되었다. 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역으로 천이됨이 보고되었다[7]. 유동특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다. 우선 유동응력은 식 (3)과 같이 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자 ψ 를 결정함으로써 평가한다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (3)$$

우선 이 비 값은 Francis의 연구[7]와 프론틱스사에서 압입자 하부 변형상황의 모델링을 통해 제시된 단계 별로 모델링 식[1]이 있으나, 소성변형 영역까지의 천이 속도가 빨라서 현재 유동응력의 분석에는 주로 μ 값을 3으로 하는 식을 사용하고 있다[8]. 다음으로 구형 압입자 하부의 변형률을 정의하는 초기연구에서는 우선 압입자의 형상과 소성 접촉반경을 관련지어 실험적으로 압입 변형률을 $0.2a/R$ 로 표현하였으나, 실험적인 한계로 인해 몇가지 강재에서만 유효한 결과를 나타내었다. 따라서 프론틱스사에서는 실제적인 압입변위를 미분하여 평가한 변형률 개념에서 식 (4)을 이용하여 압입 변형률을 정의하였고, α 는 0.1로 지정하였다[8].

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

이를 바탕으로 다양한 재료에 대해 시험을 행하였으며, 일축인장 시험결과와 비교할 때 완전 소성영역에서 유동특성을 정확하게 평가함을 확인할 수 있었다. 또한 유동곡선은 Hollomon 식을 이용하고, 적합화와 외삽을 통해 항복강도, 가공경화지수, 인장강도와 같은 다양한 물성 평가에 이용할 수 있다. 아래 그림 3에는 프론틱스사에서 구조용 강으로 자주 사용되는 SM50과 압력용기강인 SA508 cl. 3에 대해 시험한 유동곡선[8]과 기존의 연구에서 용접부에 적용한 결과[2]를 나타낸다.

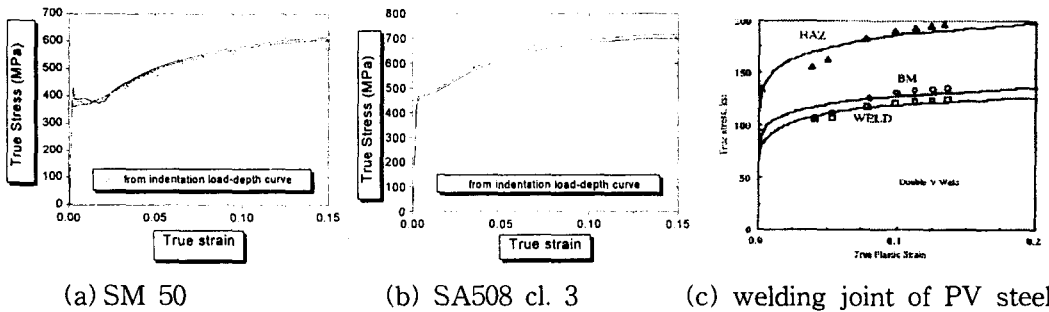


Fig. 3. Comparisons between flow properties calculated from advanced indentation(dot) and those from standard tensile tests(solid line).

항복강도

압입시험을 통해 항복강도를 평가하는 연구는 압입경도와 항복강도의 비를 3정도로 가정하여 수행하는 간단한 방법과 구형 압입시험에서 평가된 유동곡선을 이용하는 방법이 있다. 즉 압입시험 결과를 Meyer 식으로 나타냄으로써 구해진 상수 M과 일축 인장 시험에서 얻어지는 상수 β 를 이용하여 항복강도를 식 (5)와 같이 계산하였다[2].

$$\sigma_y = \beta M \quad (5)$$

그러나 여러 탄소강에서 적절한 항복강도를 얻었으나 인장시험이 부가적으로 필요한 문제점이 있다. 따라서 프론틱스사에서는 앞서 구해진 유동곡선을 항복지점까지 외삽하고, 일반 소재의 항복변형률이라 볼 수 있는 변형률 1%에서 교차점을 얻어서 항복강도를 평가하였다.

가공경화지수

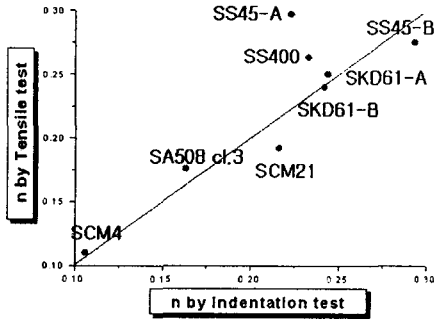


Fig. 4. Comparison of work hardening exponents from advanced indentation and from tensile tests.

양한 강재에서 일축인장 시험과 일치하는 가공경화지수를 평가하였다[10].

$$L = A \frac{(h^c)^n}{a^{n-2}} \quad (7)$$

인장강도

유동곡선이 평가된 경우 일축 인장강도의 평가는 가공경화지수와 균일연신율 ϵ_u 이 동일하다는 연속체 이론을 사용하여 식 (8)과 같이 평가할 수 있다.

$$\sigma_t = K \epsilon_u^n = K n^n \quad (8)$$

불균일 연신율

일부 강재에서 항복 직후에 발생하는 불균일 변형은 소재의 가공성과 연신율을 떨어뜨리게 된다. 따라서 압입시험에서 이들 변형 정도를 평가하고자 하였으며, 프론틱스

사에서는 그림 5와 같이 불균일 압입변형시 나타나는 pile-up 양상으로부터 불균일 연신율을 정량화 하였다. 즉 구형 압입시험후 발생하는 압흔 주변 pile-up 높이 h_m 을 표면조도 측정기를 이용하여 측정하였고, pile-up 면적을 재료 물성인 탄성계수 E 와 경도 값 H_v 의 비로 관련지음으로써 그림 6과 같이 대다수의 강재에서 발생하는 불균일 연신율의 정도를 식 (9)로 정량화하였다[11].

$$\epsilon_L(\%) = x \frac{h_m}{h_f} \sqrt{\frac{E}{H_v}} \quad (9)$$

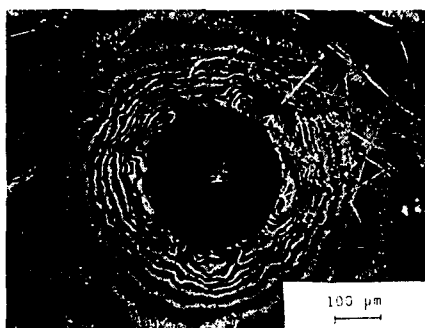


Fig. 5. Crown-like fringe pattern for 13-3-11 Ti alloy with Lüders strain.

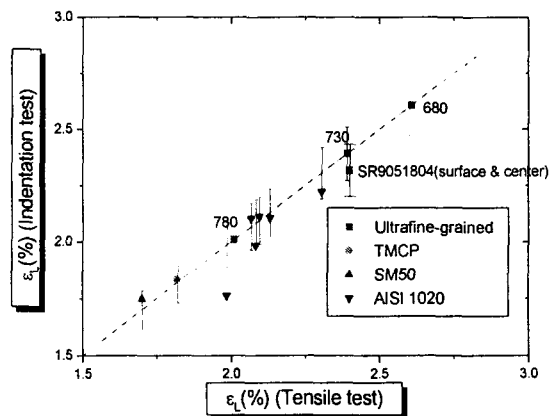


Fig. 6. Comparison of Lüders strain from advanced indentation and from tensile tests.

파괴인성

미세한 균열의 존재는 구조물의 경우 급격한 파괴가 유발되는 문제점이 있으며, 이에 따라 파괴관련 특성의 평가를 위해서 파괴인성(J_{IC}) 평가 시험이 필요하다. 그러나 기존의 경우, 시편 채취 문제와 시험과정의 복잡성으로 인해 간단한 충격시험으로 구조물의 안전성을 평가해 왔다. 그러나 충격시험도 동적물성 평가 결과임으로 정적 파괴인성과의 관계 수립은 미약한 상황이다. 따라서 이러한 문제점의 해결책으로 최신 압입시험 기술을 응용하려는 연구가 진행되었으며, 취성적인 성격이 강한 lower self energy 영역과 천이구간에 적용하여 파괴인성을 평가하는 모델링이 수립되었다. 강재와 용접부의 파괴 인성은 임계 파괴변형률 모델에 따라 식 (10)의 변형관련 물성과 미세조직의 항으로 표현된다[2].

$$K_{JC} = C\sqrt{\epsilon_f^* \cdot l_0^* \cdot E \cdot \sigma_y} = C_0\sqrt{n \cdot l_0^* \cdot E \cdot \sigma_y} \quad (10)$$

여기서 ϵ_f^* 는 파괴변형률, l_0^* 는 결정립 정도 크기인 미세조직 특성거리, E는 탄성계수, σ_y 는 항복강도이다.

그러나, 위의 식에서 파괴변형률 평가를 위해서는 인장시험이 필요한 상황이며, 이에 따라 파괴변형률 항을 비례하는 물성인 가공경화지수로 대체함으로써, 최신 압입시험만으로 파괴특성까지도 평가 가능하였다. 그러나 위의 식은 미세조직적 인자와 같이 복잡 다양한 물성치 정보의 필요로 인해 활용성이 떨어지므로, 단지 압입시험만으로 파괴인성을 평가하고자 하는 연구가 진행되었다[3]. 즉 인장시험에서 얻어지는 파괴응력 정도의 응력이 압입자 하부에 발생하면 가상의 파괴가 발생한다고 가정하였다. 압입자/시편 간의 마찰력을 고려하여, 파괴응력에 도달하는 가상파괴를 위한 임계하중 L_f 과 깊이 h_f 를 결정하고, 압입하중 인가곡선 하부를 적분하여 가상파괴 압입변형에너지 (W_{IEF})를 계산하였다[3]. 또한 극저온 상태의 lower shelf 영역에서는 취성적인 Griffith 에너지 수치개념을 적용할 수 있는 벽개 파괴에너지가 존재하며, 천이영역 및 upper shelf 영역에서의 파괴에너지 W_f 는 식 (11)과 같이 벽개 파괴에너지 W_0 와 함께 변형에 소요되는 에너지 W_T 가 존재한다. 또 압입에서는 균열이 발생하지 않으므로, 가상파괴 압입변형에너지는 전체 변형 에너지와 동일하게 고려하였다[3].

$$W_f = W_0 + W_T = W_0 + W_{IEF} \quad (11)$$

또 파괴에너지와 파괴인성 K_{JC} 와의 관계는 식 (12)와 같이 제시되어 있다.

$$W_f = \frac{K_{JC}^2}{2E} \quad (12)$$

따라서, 벽개 파괴에너지에 대한 정보와 가상 파괴시점까지의 압입변형에너지를 알면 최신 압입시험을 통해서 천이영역 이하 온도에서 소재의 파괴인성을 평가할 수 있다. 그러나 아직까지 소성변형이 우세한 상온 영역(upper shelf region)에서 압입시험을 통한 파괴특성 평가에 대한 연구는 미진한 상황이며, void 성장과 관련한 연성 파괴거동과 최신 압입시험기술을 관련짓는 연구를 프론틱스사에서 추진 중에 있다.

4. 결론

지금까지 최신 압입시험 기법과 적용상황에 대하여 기존의 연구 사례들을 살펴보았으며, 일축 인장시험에서 얻어질 수 있는 모든 물성들이 수 퍼센트의 오차범위에서 일치하였고, 파괴인성의 경우 취성 및 천이온도 영역에 있어서는 몇가지의 재료물성 정보와 최신 압입시험을 이용할 경우 평가 가능함을 확인하였다. 따라서 최신 압입시험 기술의 경우, 프론틱스사에서 개발한 부착 이동성이 있는 Advanced Indentation System

과 같이 정밀 제어가 가능한 하드웨어와 함께 변형 및 파괴관련 물성 평가기법의 개선을 통할 경우, 현장 구조물의 전반적인 안전 진단 및 수명평가에 적용할 수 있을 것으로 사료되며, 더 나아가 일축 인장 및 파괴역학 시험의 대체도 가능할 것이다. 또한 이외에도 현장 구조물의 진동이나 고온 열화 분위기에서의 피로 및 크리프 물성 평가에 대한 연구도 진행되고 있으며, 열화 상황의 정밀한 진단이 필수적인 발전설비 등에 부착형 압입시험기를 고정 설치하여 주기적인 진단에 응용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 이정환, 권동일, 대한금속학회지, 35권 12호, 1997, pp.1616-1625.
2. Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., ASTM 1092, 1990, pp.188-208.
3. 변택상, 김진원, 홍준화, 제 11회 재료강도 심포지움논문집, 1997, pp.467-473.
4. Doerner, M.F. and Nix, W.D., *J. Mater. Res.*, vol. 1, 1986, pp.601-607
5. Oliver, W.C. and Pharr, G.M., *J. Mater. Res.*, 1992, vol. 7, no.6, pp.1564-1583.
6. Norbury, A.L. and Samuel, T., *J. Iron steel Inst.*, vol. 117, 1928, pp.673-687.
7. Francis, H.A., *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, vol. 98, 1976, pp.272-286.
8. 안정훈, 권동일, 대한금속재료학회지, 2000, in press
9. Tirupatiaiah, Y. and Sundararajan, G., *Mater. Sci. Eng.*, vol. 91, 1987, pp.169-180.
10. 전은채, 안정훈, 권동일, 대한기계학회 추계기계학회 proceedings, 2000, in press
11. 최 열, 권동일, 대한금속재료학회지, 2000, in press