

비파괴적 연속압입시험 기법을 응용한 구조용 강의 소성 물성 평가

장재일* · 손동일* · 최열* · 박순찬** · 권동일***

Evaluation of Flow Properties of Steel Using Advanced Indentation System

J. I. Jang, D. I. Son, Y. Choi, S. C. Park and D. I. Kwon,

Abstract

The tensile properties of materials can be obtained just in accordance with conventional tensile testing methods which are described in several standards. However, the standard testing methods cannot be applicable due to the destructive testing procedure and specimen size requirement for some cases including on-service facility materials. 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 advanced indentation system and its application fields are reviewed and discussed.

Key Words : Advanced Indentation System, Continuous Indentation System, Flow Properties
Non-destructive Evaluation, Pre-qualification Test

1. 서론

일축 인장시험은 가공부품 및 소재의 기계적 성질을 평가하기 위하여 가장 널리 사용되어온 시험법이다. 인장시험결과는 재료의 탄성 및 소성 성질 전반에 관한 자세한 정보를 제공해 주므로 재료의 강도(strength) 및 인성(toughness)과 관련한 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, 일정크기 이상의 시험편 수급이 어려운 경우나, 이종재료 접합부와 같이 미세조직이 국부적으로 급변하는 경우, 나아가서 인장 시험편 채취가 불가능한 현장 설비 소재에 대해서는 표준 인장시험을 사용할 수 없다. 그러므로 이러한 소재의 경우에는 주로 간편한 경도시험(hardness test)을 수행함으로써 또 다른 강도 기준치인 경도를 평가하여 평가 목적의 기준값과 비교하는데 만족하고 있다. 그러나 경험적인 물성치에 불과한 경도의 경우 단순히 그 자체의 비교 기준만을 제시할 수 있을 뿐 인장 시험 결과

* (주) 프론틱스 연구개발부
** 현대기아 연구개발부
*** 서울대학교 재료공학부

와 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.

이러한 인장시험의 한계 및 대안의 부재를 극복하기 위한 노력의 일환으로써, 최근에는 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거하고 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 계장화 장치를 이용하여 연속적으로 측정하는 연속 압입시험법이 개발되어 활발히 연구되고 있다[1,2]. 본 논문에서는 본 저자들 중 일부가 소속한 Frontics 사가 개발한 새로운 연속압입시험 시스템의 이론적 배경 및 얻어지는 데이터의 유용성 평가결과, 그리고 그 시스템을 활용한 응용 연구 사례를 간략히 제시하였다.

2. 실험 방법

연속압입시험을 통해 얻을 수 있는 압입하중-변위곡선은 일반적으로 다중압입 시험방식을 이용하여 곡선을 얻게 된다. 보통 압입깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변 재료의 탄성, 소성 변형에 의해 측정된 압입깊이와 달라지게 된다. 압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 재료의 탄성회복에 해당되는 압입하중제거곡선의 초기 접선의 기울기인 S값을 이용하여 구하게 된다. S는 재료의 stiffness에 해당되며, 탄성변형을 고려한 접촉깊이 h_c^* 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

L은 압입하중이며, ω 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수로 flat punch의 경우에는 1, 구형압입자의 경우에는 0.75 그리고 Vickers 압입자의 경우에는 0.72이다. 한편 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 그림 1과 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나, 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in 현상이 발생한다.

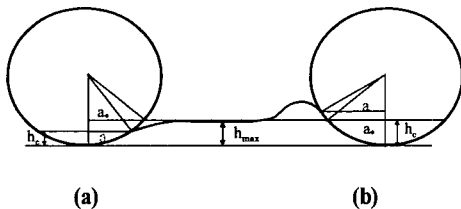


Fig. 1. The (a) sink-in and (b) pile-up phenomena.

이때 pile-up/sink-in 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 다음과 같이 나타난다.

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

여기서 n은 재료의 가공경화지수, R은 압입자 반경, a는 접촉반경이며, 식(2)를 통해 얻어진 접촉반경에서 기하학적인 관계를 이용하여 실제 접촉깊이인 h_c 를 구하게 된다.

일축인장시험을 통해 얻어지는 인장곡선의 항복이후의 영역에서 진응력과 진변형률은 일반적으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (3)$$

(σ : 진응력, K: 응력계수, ϵ : 진변형률)

구형압입자를 이용한 압입시험에서의 변형률은 재료의 깊이방향으로의 변위를 기하학적인 관계를 이용하여 구한 후 미분하여 얻어지는 변형률 값 중 최대값에 적합화 상수(α , 일반적으로 0.1)를 적용함으로써 식 (4)와 같이 접촉반경과 접촉깊이의 항으로 나타난다.

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

다음으로 압입자 하부의 응력은 압입하중과 접촉면적의 비인 평균압력(P_m)과 일정한 관계를 가지고 있는데, 일반적인 인가하중인 kgf 이상의 하중에서는 일정한 상수비(ψ , 일반적으로 3)를 가지며, 이 상수는 압입시험을 통해 결정된다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \quad (5)$$

그림 1(b)와 같이 다중하중제거 시험방식을 통해 얻어진 압입하중-변위곡선에서 각 하중제거곡선을 이용하여 접촉깊이와 접촉반경을 결정하고, 이를 통해 진응력과 진변형률을 구하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 개발중인 신합금의 인장물성 평가

경량 합금에 합금 원소를 첨가함으로써 강도를 향상시킨 신합금의 개발이 지속적으로 진행중에 있다. 이러한 신합금의 개발시에는 강도 향상을 검증하기 위한 인장물성 평가가 요구되고 있으나, 제조공정 상의 한계로 인하여 현재에는 제조시료의 크기가 표준 인장시험편규격에 미치지 못하여 인장시험을 실시하지 못하는 경우가 많다. 이와 같이 개발중인 신합금에 대하여 새로운 연속압입 시스템을 적용할 경우 좁은 면적의 재료표면에 대한 시

험만으로도 인장물성의 평가가 가능하다는 장점을 충분히 활용할 수 있다.

본 논문에서는 그 예로 알루미늄 합금 A2218에 합금 원소를 첨가하고 시효경화시켜 강도를 향상시킨 신탐금에 대하여 AIS 시험을 수행한 결과를 소개하였다.

시험에 사용된 재료는 상기에 기술한 바와 같은 알루미늄 합금 A2218과 이에 인의의 합금원소 α 를 첨가하여 용체화 처리 후 시효경화 시킨 A2218+ α 이며, 그림 2에서 보는 바와 같이 제조된 시편들의 크기는 지름 12mm, 두께 8mm이다. 연속압입 시험후 실험결과의 정확도 평가를 위하여 압입시험에 사용된 시편과 동일한 조성과 규격을 가진 시편에 대하여 압축시험을 행하였다. 본 합금과 같이 면심입방결정(face-centered cubic)을 가진 재료의 경우, 체심입방결정(body-centered cubic) 금속에서 관찰되는 쌍정 방향으로의 비대칭성 변형 거동이 없으므로 인장시험과 압축시험의 결과가 이론적으로는 동일하게 나타나게 된다.

그림 3에 연속압입 시험결과와 압축시험결과를 비교하였다. 그림에서 실선으로 표현한 곡선이 압축시험에서 얻어진 결과이며, 곡선위에 중첩된 점들은 압입시험을 통하여 얻은 결과로서 두 곡선이 잘 중첩되고 있음을 나타내고 있다. 이러한 결과를 토대로 개발중인 신탐금의 인장물성 평가에 새로 개발된 연속압입 시스템이 유효하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있다.

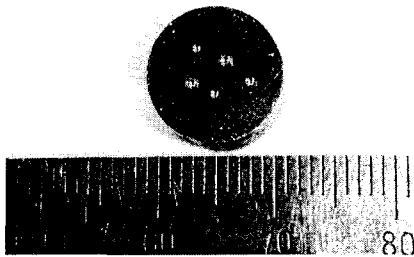


Fig. 2. A2218/10Cr specimen after testing by AIS 2000.

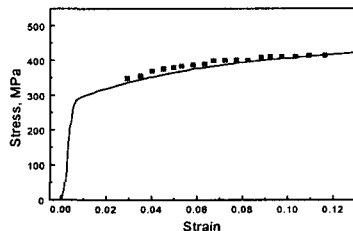


Fig. 3. Comparisons between compressive curve and tensile curve in A2218.

3.2 연속압입시험을 이용한 용접부의 강도 품질 사전 평가

용접구조물의 건설시 발생가능한 용접결함은 각종 용접기술기준에 따른 비파괴 검사 실시를 통하여 엄격히 관리되고 있으나, 용접부의 기계적 특성은 사전품질관리 기록서(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. 그림 4는 가동중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부(HAZ, heat-affected zone)/용착금속의 인장곡선 그래프이다.

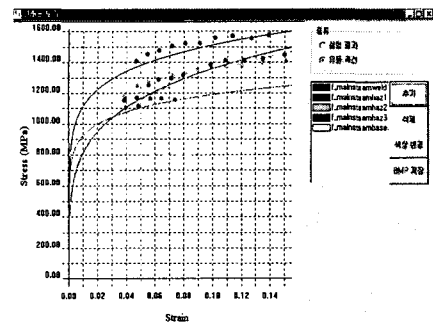


Fig. 4. Comparison of flow curves at base/HAZ/ weldment of main steam line in fossil power plant.

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

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 분포 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 이를 현장시험결과와 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 주중기관 건설 후 잔여자재를 활용하여 PQ 시험시 파단부위로 판명된 모재에 대하여 연속압입시험과 일축인장시험을 실험실적으로 수행하여 그 결과를 비교하였다. AIS 2000을 활용한 5회의 연속압입시험 결과와 Instron 5582를 사용한 인장시험 결과를 표 1에 나타내었으며, 두 결과가 정량적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3.3 기타 응용 분야

상기한 내용들 외에 AIS의 응용분야로는 설비/구조물의 사용적합성(fitness-for-service) 평가를 위한 code 구축, 자동차·선박·철도차량·항공기 등의 접 용접부 및 기타 부위에 대한 품질 관리, 이종 재료의 FEM 분석을 위한 기초 자료 제공, 철강 및 금속가공품 생산 공정시의 경제적인 품질 검사 등 다양한 분야들이 있으나 이들에 대한 자세한 내용은 지면관계상 본 논문에서 생략하였다.

4. 결 론

지금까지 연속압입 시험으로 얻은 인장 물성 데이터의 유용성과 응용분야를 소개하였다. 이러한 방법은 새로운 공정의 적용이나 가공 전후의 물성변화를 가장 빠르게 알 수 있는 데이터를 제공할 수 있을 것이고, 결과를 FEM 해석 등에 이용함으로써 새로운 공정 개발에도 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 또한 재료가 가공되며 제품화되는 동안 연속적으로 원하는 부위의 물성 변화를 예측할 수 있으므로 더욱 정확한 품질 관리가 가능해 질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) 안정훈, 최열, 권동일, 2000, "압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가", 대한금속 재료학회지, Vol. 38, No. 12, 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, pp. 188~208.