

C 연구보고

금속재료의 연속 압입 시험방법 표준화 연구

(Instrumented hardness test for the determination of the tensile parameters of metallic materials)

소재과 공업연구원 박주승
 (02)509-7305 joospark@ats.go.kr

1. 연구 필요성

인장시험은 재료의 기계적 성질을 평가하기 위하여 가장 널리 사용되어온 시험법이다. 인장시험결과는 재료의 탄성 및 소성 성질 전반에 관한 자세한 정보를 제공해 주므로 재료의 강도 및 인성과 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 제약조건으로 인식되어 왔다. 즉, 일정 크기 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 수행하고 있다. 그러나 경험적인 물성에 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.

이러한 인장시험의 한계 및 대안의 부재를 극복하기

위한 노력의 일환으로써, 최근에는 소재에 압입 하중을 다중 인가 및 제거하고 압입 하중에 따른 압입 깊이의 변화를 계장화 장치를 이용하여 연속적으로 측정하는 연속 압입 시험법이 개발되어 활발히 응용되고 있다. 본 연구에서는 인장 물성을 유도하기 위한 연속 압입 시험 과정 중의 다양한 시험 변수가 결과의 재현성 및 신뢰성에 미치는 영향을 파악하고 최적 시험 조건을 확립하여 연속 압입 시험방법을 표준화하고자 한다.

2. 표준화 현황

ISO/DIS 14577 Instrumented indentation test for hardness and materials parameters 에서는 계장화된 압입 시험방법에 대한 국제 규격안을 현재 제정 중에 있다. 이 규격안은 누르개의 모양이 피라미드형인 비커스나 베르코비치 압입자를 사용하여 마르텐 경도나 크립 변형 에너지 등의 물성을 결정하는 것임에 비해 본 과제는 구형 압입자를 사용하여 인장 물성을 결정하는 차이점이 있다. 표 1에 이들의 주요 차이점을 나타내었다.

이외에도 계장화된 경도 시험법으로 하중을 mgf 단위로 낮은 nanoindentation 기법에 관한 연구가 미국, 독일, 영국, 일본 등을 중심으로 전세계적으로 활발히

진행 중에 있어 이와 관련된 박막 물성 결정 시험방법 등의 제정이 예상되고 있다.

표 1 ISO 규격안과 본 과제와의 비교

구분	ISO/DIS 14577	본 연구과제
적용 하중범위	macro: 30kN 이하 micro: 2N 이하 nano: 0.2μm 이하	macro : 2N~3000N
누르개 모양	Vickers, Berkovich	구형
재료 물성 결정	Martens hardness Indentation modulus Creep and Relaxation Indentation work	Brinell hardness Yield stress Tensile stress Work hardening index

3. 연속 압입 시험방법을 이용한 인장 물성 평가의 원리

유동특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다. 우선 유동응력은 완전 소성영역에서 식 (1)과 같이 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자 Ψ 를 결정함으로써 평가한다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\Psi} \quad (1)$$

압입변형률은 실제적인 압입변위를 미분하여 평가한 변형률 개념에서 식 (2)와 같이 적합화 상수 a 를 포함하는 압입변형률을 정의할 수 있다.

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

압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 변형된 재료 주위에는 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나, 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in 현상이 발생하

는데, 압입자 시편의 접촉반경은 가공경화지수 n 과 직접적인 관계를 갖는 압흔주변의 이러한 현상들에 의해서 크게 영향을 받으며 이를 고려한 접촉반경은 식 (3)과 같이 유도될 수 있다.

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_0^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2R h_c^- \cdot h_c^{-1}) \quad (3)$$

여기서 n 은 가공경화지수, R 은 압입자 반경, a 는 접촉반경이며, $h_c^- = h_{max} - \omega \frac{L}{S}$ 이며 L 은 압입하중, ω 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수, S 는 탄성회복에 해당하는 압입하중 제거곡선의 초기 접선의 기울기이자 stiffness 이다.

(1)과 (2)식을 Holloman 식에 따라 적합화하면서, (3)식과 비교하여 가공경화지수와 접촉반경을 결정하던 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 결정할 수 있다.

4. 인장 물성 결정에 미치는 시험변수 영향에 대한 정량적 평가

인장 물성을 유도하기 위한 연속 압입 시험에 영향을 미치는 시험 변수로는 시험편 표면 조건, 압입 속도, 최대 하중 유지 시간, 영점 설정, 압입자 지름, 압입비, 하중제거율, 하중 인가 및 제거 회수 등이 있다. 우선 시험 변수 사이에 비교적 적은 영향을 미치는 변수에 대하여는 독립적 시험 변수에 의한 영향만을 고려하였다. 시험 변수 사이에 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수에 대하여는 실험 계획법을 사용하여 변수의 영향을 고찰하였다. 시험에 사용한 재료는 범용 재료인 SCM400과 STD61 2종과 내열 재료인 A335-P12, A335-P91, A108 3종을 사용하였다.

4.1 독립적 시험 변수에 대한 고찰

- 시험편 표면 조건

사포 #100, #400, #800 및 알루미늄으로 최종 연마한 각 시험편마다 압입 시험한 결과 표면 연마 조건에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 다만 가장 거친 표면 조건인 #100의 경우는 초기 하중이 불안정한 경향을 나타내었다. 연속 압입 시험의 경우 로크웰 경도 시험처럼 초기 하중을 주는 시험방법이므로 비교적 표면 조건에 큰 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 따라서 일반적인 경도 시험편 준비 조건인 적당한 사포 연마로 충분한 것으로 판단된다.

- 최대 하중 유지 시간

최대 하중 유지 시간을 0.1초, 0.5초, 10초, 30초로 변화시켰다. 시험 결과 하중 유지 시간도 시험의 재현성에 큰 영향을 미치지 않았다. 다만 시험시간 단축을 위한 지나치게 짧은 하중 유지 시간은 재료의 변형상을 충분히 반영시키지 못할 확률이 있으므로 0.5초 이상의 하중 유지 시간이면 충분할 것으로 판단된다.

- 압입 속도

압입 속도를 0.1mm/min에서 2mm/min으로 변화시킨 결과 2mm/min 이상의 속도에서는 재료의 탄성 영역에서 하중 인가와 제거 곡선의 경로가 달라지는 등 재현성이 떨어지는 경향을 보였으며, 1mm/min 이하에서는 높은 재현성을 나타내었다.

- 영점 설정

영점 설정은 하중변위 곡선의 기준선으로 로크웰 경도의 초기 하중인 9.8N을 기준하중으로 해석하는 것으로 충분하였다.

4.2 종속적 시험 변수에 대한 고찰

시험 변수 사이에 서로 영향을 미칠 것으로 예상되는 변수에 대하여 실험계획법에 따라 시험 조건을 정하고 실제 인장시험의 결과와 유도된 인장물성의 오차

를 (4)식과 같은 SN(signal to noise)값으로 평가하였다.

$$SN = - 10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4)$$

이 때 시험편은 알루미늄으로 미세 연마하였으며, 압입속도 0.4mm/min, 하중유지시간 0.5초로 하고, 9.8N을 영점으로 하였다. 시험은 동일한 시험조건에서 3회씩 실시하였다.

- 압입자 지름

0.5mm, 0.75mm, 1.0mm 3조건에 대하여 5종의 재료를 시험한 후 SN값을 평가한 결과 압입자의 지름의 변화에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 용접부와 같이 국소적으로 재료의 물성이 변하는 경우에 작은 지름의 압입자를 사용하여 미소부의 물성 평가가 가능함을 시사한다.

- 하중 제거율

재료의 탄성성질을 평가하기 위해 최대 하중을 유지한 후 하중을 제거하는데 그 제거율을 30%, 50%, 100%로 변화시켰다. 시험 결과 30%하중 제거율의 경우가 가장 SN값이 양호한 것으로 나타났다. 이는 하중 제거율이 적을수록 탄성급함과 같은 시험오차를 피할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

- 압입 횟수

하중 인가 및 제거 횟수를 7회, 10회, 15회로 변화시켰다. 시험 결과 10회일 때가 최적을 나타내었는데 이는 횟수가 적으면 초기의 불안정한 압입에 대한 영향력이 커지고 너무 많으면 가공경화 등으로 인한 재료의 물성 변화가 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

- 압입비

압입비란 압입자의 지름에 대한 압입 깊이의 비율인데, 이 실험에서는 0.4, 0.5, 0.6으로 변화시켰다. 시험결과 압입비가 0.5~0.6일 때가 양호한 것으로 나타났다.

5. 확립된 시험방법의 신뢰성 검증

압입자 지름 1mm, 압입비 0.6, 압입속도 0.4mm/min, 최대 하중 유지시간 0.5초, 하중 제거율 30%, 하중 인가/ 제거 횟수 10회의 확립된 최적 시험 조건으로 시험한 결과를 실제 인장 물성과 비교한 결과 표2 에서와 같이 압입시험에 의해 결정된 항복강도 및 인장강도가 실제 물성과 10% 이내의 오차를 가짐을 확인할 수 있었다.

표 2 → 실제 인장 물성과 유도 인장 물성의 비교

재 료	인장 물성	인장 시험	압입 시험	오 차
A335-P12	항복 강도	570 MPa	533 MPa	6.4%
	인장 강도	772 MPa	746 MPa	3.4%
	가공경화지수	0.12	0.14	-
SCM400	항복 강도	605 MPa	648 MPa	7.0%
	인장 강도	955 MPa	897 MPa	6.2%
	가공경화지수	0.18	0.14	-

6. 결 론

연속 압입시험으로 결정한 인장 물성이 실제 인장 시험 결과와 10% 이내의 양호한 오차를 보이므로 미소부의 물성 평가, 실제 사용 설비의 물성 평가 등 다양한 용도로 응용이 가능할 것으로 판단된다. 이 결과는 “인장물성 결정을 위한 계장화 압입시험방법”으로 표준화가 가능할 것으로 기대되며, 보다 다양한 금속 재료에 대한 검증을 거쳐 향후 ISO 규격으로 제안할 예정이다.

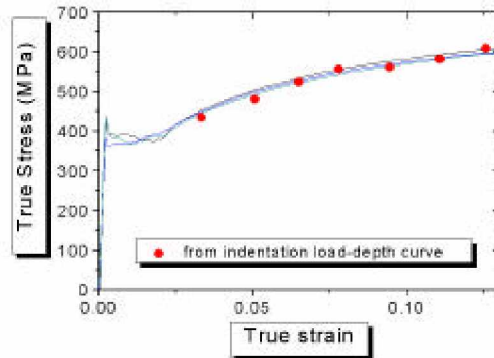


그림 1 인장물성 유도 곡선

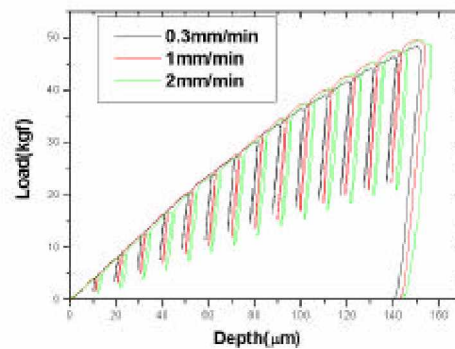


그림 2 압입 속도 변화의 영향

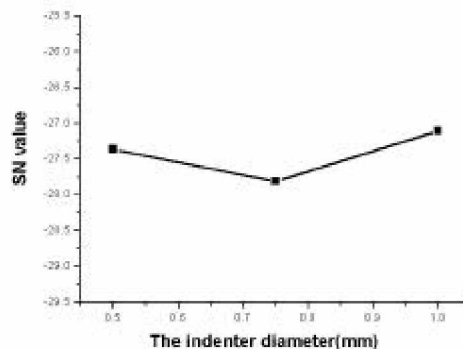


그림 3 압입자 지름의 영향

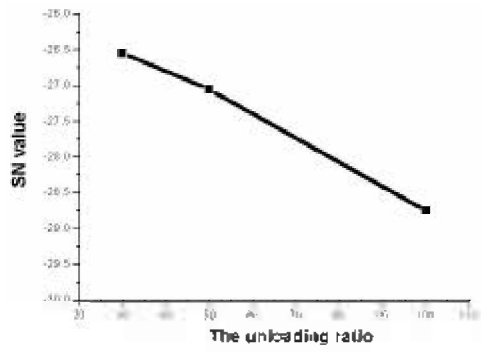


그림 4 하중 제거율의 영향

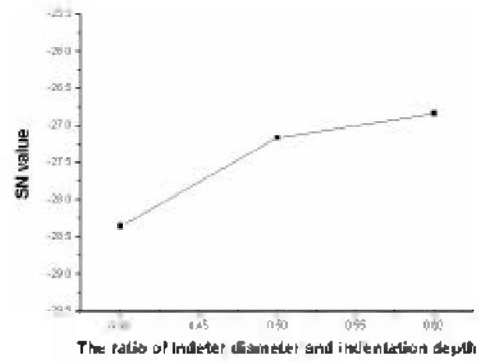


그림 6 압압비의 영향

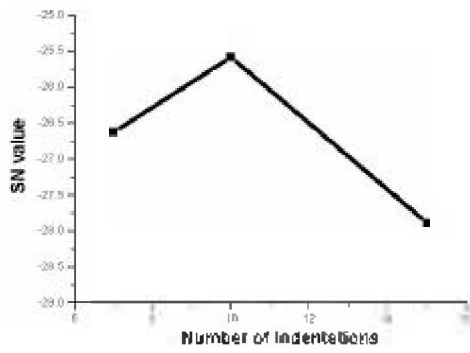


그림 5 압입 횟수의 영향