

계장화 압입시험에 의한 용접부의 물성 평가

Evaluation of mechanical properties of welding materials by an instrumented indentation test

구병춘*, 권동일**, 최열***

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

** 서울대학교 재료공학부

*** (주)프론틱스

ABSTRACT: When material properties depend much on positions in a material or it is difficult to make test specimens from a material or component, an instrumented indentation test described in ISO 14577-1, 14577-2 or KS B 0950 can be used to measure material properties and damage. In this study, first of all, the principals of the instrumented indentation test, KS B 0950 are introduced and yield strengths, tensile strengths and work hardening exponents of base materials, heat affected zones and weld materials are measured. In addition, the influence of post-weld heat treatment on the material properties are investigated.

1. 서 론

재료의 물성을 측정하기 위해서는 재료로부터 인장시편을 채취하여 인장시험기에서 인장시험을 통하여 항복강도, 인장강도, 가공경화지수 등을 측정하는 것이 전통적인 방법이다. 그러나 재료의 물성이 국부적으로 변화가 심하거나 시편을 채취하기 어려운 경우 시편의 채취 없이 물성을 측정할 수 있는 방법이 요구된다. ISO 14577-1, 14577-2 혹은 KS B 0950¹⁾는 이러한 시험 방법을 설명하고 있다. KS B 0950에서 규정하고 있는 계장화 압입시험은 구형의 연마된 초경합금 누르개를 사용하는 계장화 압입시험기로 압입하중 F ($=2N \sim 3KN$)와 압입깊이 h 를 동시에 측정하여 얻은 그림 1과 같은 압입하중-압입깊이 곡선을 분석하여 압입 물성을 측정하는 방법이다. 시험은 압입 깊이 제어 방식 혹은 압입 하중제어방식으로 할 수 있으나 깊이 제어방식이 권장되고 있다.

2. 장 계장화 압입시험의 기본 이론

2.1 진 변형률

압입시험에서 구형 누르개 하부의 전단변형률을 계산하면, 진 변형률 ϵ 은 다음과 같이 주어진다^{1,2)}.

$$\epsilon = \frac{\zeta}{\sqrt{1 - (a/r)^2}} \frac{a}{r} = \zeta \tan \theta \quad (1)$$

여기서, ζ 는 적합화 상수로 0.12이다.

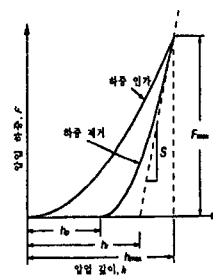


Fig. 1. Load vs. depth

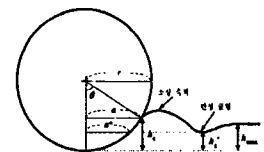


Fig. 2. Deformation

2.2 진 응력

압입시험에서 압입하중을 접촉면적으로 나눈 평균 접촉압력 P_m 은 완전 소성 영역에서 진 응력과 일정한 비가 성립하며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} = \frac{1}{\psi} \frac{F}{\pi d^2} \quad (2)$$

여기서 소성 구속인자 $\psi=3.5$ 이다.

2.3 실제 접촉 반지름 a

식 (1), (2)에서 보는 바와 같이 진 변형률과 진 응력을 구하기 위해서는 구형 누르개 주변에서 발생하는 탄성굽힘과 소성 축적 혹은 소성 함몰 현상을 고려하여 실제 접촉 반지름 a 의 정확한 값을 구하는 것이 중요하다. 최대 하중이 가해질 때 탄성 굽힘에 의해 변형된 접촉 깊이인 h_c^* 는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$h_c^* = h_{\max} - 0.75 \frac{F_{\max}}{S} \quad (3)$$

소성 축적/함몰을 고려한 실제 접촉 반지름 a 는 탄성 굽힘만을 고려한 접촉반지름 a^* 와 식 (4)의 관계를 가지므로 식 (3)에서 구한 h_c^* 로부터 최종적으로 실제 접촉 반지름을 결정할 수 있다.

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

식 (3)과 (4)를 통해 보정된 압입 깊이를 식 (1)과 (2)에 대입하여 진 변형률과 진 응력을 얻고 이를 진 변형률과 진 응력 사이의 구성 방정식인 식 (5)에 대입한다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (5)$$

식 (4)에서 필요한 재료의 가공 경화 지수는 임의의 값을 대입한 후 식 (5)에서 얻어진 가공 경화지수의 값과 비교하여 두 값이 같을 때까지 회귀분석을 수행하여 구한다.

압입 항복강도에서의 진 변형률 $\epsilon_y=0.01$ 로 하여 σ_y 는 식 (6)과 같이 구한다.

$$\sigma_y = K \epsilon_y^n \quad (6)$$

압입 인장 강도 σ_u 는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\sigma_u = K \epsilon_u^n \quad (7)$$

여기서 압입 인장 강도에서의 변형률 ϵ_u 는 가공 경화 지수의 함수로서 $\epsilon_u = K_1 n + K_2$ 로 정의하고 $K_1=0.417$, $K_2=0.043$ 으로 한다.

3. 측정 결과

3.1 용접시편의 제작

용접시편은 그림 (3)과 같이 $100 \times 300 \times 10t$ 인 두개의 판을 맞대기 용접한 후 폭 25mm가 되게 가공하여 제작하였다. CO₂ GMAW 로봇 용접기에서 전류=150~190 Ampere, 전압 $\approx 105V$ 조건으로 반자동 용접하였다. 용접봉은 AWS ER70S-G 1.2 ϕ 를 사용하였다. 용접 후열처리 온도는 그림 4와 같다.

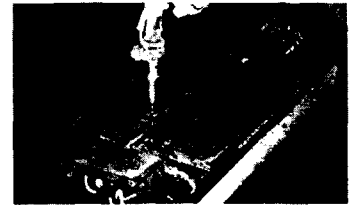


Fig. 3. Welding of two plates

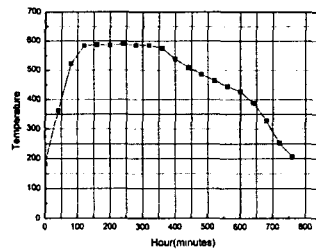


Fig. 4 Post-weld heat treatment

3.2 용접부 물성 측정

(주)프론틱스 사의 연속압입시험기 Advanced Indentation System 2000(AIS 2000)을 이용하여 용접 시편의 용접부, 열영향부, 모재의 인장 물성을 평가하였다. 실험에 앞서 샘플 단면의 평편도를 맞추기 위해 별도의 가공을 수행하였고, 실험을 위해 AIS2000 전용 액세서리인 마이크로 포지셔닝 스테이지를 사용해서 시편의 용접부, 열영향부 및 모재에 대한 실험을 수행하였다. 압입 시험은 Test Procedure에 따라 모재부는 용접부 중심을 기준으로 좌, 우측 1점, 용접부와 열영향부는 중심을 기준으로 비드 가장자리 방향으로 실험을 수행하였다. 시험 조건으로는 구형압입자 직경=0.5mm, 하중 인가속도=0.3mm/min, 최대 압입깊이=150 μ m, 하중인가-제거 반복회수=15회로 하였다.



Fig. 5 Measuring points

용접부 (Weldment)는 중심에서 2mm 간격으로 W1, W2, W3, W4에서, 열영향부 (HAZ)는 중심에서 2mm 간격으로 H1, H2, H3에서, 모재(Base metal)부는 용접부 중심라인을 기준으로 왼쪽과 오른쪽 B_L, B_R에서 측정하였다. 그림 6은 후열처리를 한 시편 (AAY)에 대한 응력-변형률 곡선이며 그림 7은 후열처리를 하지 않은 시편 (AAN)에 대한 곡선이다.

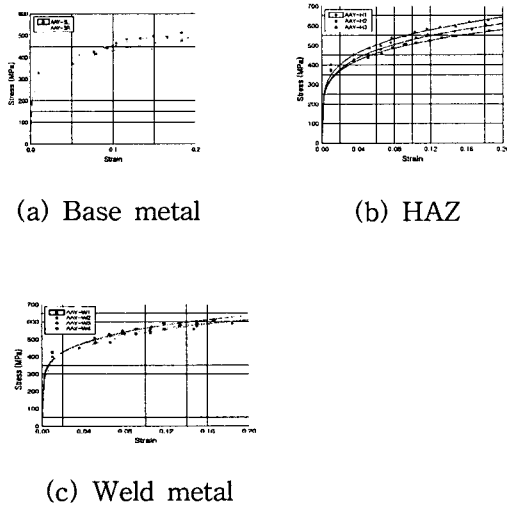


Fig. 6 Stress-strain curves for AAY

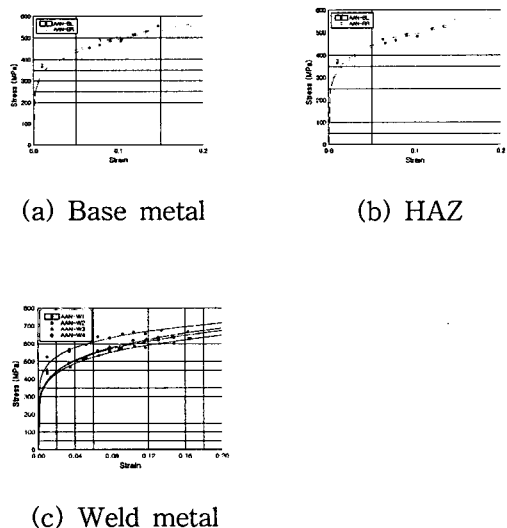


Fig. 7 Stress-strain curves for AAN

후열처리 전후 시편에 대해 항복강도, 인장강도, 가공경화지수의 측정된 값을 정리하면 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Measured values for AAY

	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	n
B_R	329	526	0.202
B_L	314	491	0.196
H1	371	576	0.194
H2	378	614	0.207
H3	402	644	0.203
W1	399	601	0.184
W2	427	588	0.156
W3	421	623	0.179
W4	427	620	0.173

Table 2. Measured values for AAN

	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	n
B_R	365.7	550.1	0.184
B_L	376.7	557.6	0.179
H1	420.7	618.8	0.177
H2	414.6	619.6	0.182
H3	418.2	669.5	0.203
W1	432.0	634.5	0.175
W2	444.1	659.5	0.180
W3	453.0	668.6	0.178
W4	525.5	680.0	0.135

4. 결 론

- 1) 압입시험은 시편의 인장시험에 비해 상대적으로 쉽게 용접부의 물성을 측정할 수 있다.
- 2) 용접 후열처리에 의해 SM490A의 항복강도와 인장강도는 10~100 MPa 정도 낮아지고, 가공경화지수는 약간 증가함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. KS B 0950-2002, 금속재료의 계장화 압입 시험-압입 인장 물성 평가
2. 장재일, 최열, 손동일, 이윤희, 권동일, 김정태, 2002, "연속압입 시험기법을 이용한 석유화학설비 경년 손상의 새로운 평가 변수고찰," 대한기계학회논문집 A, 제 26권 제 5호, pp.881~889.