한국철도학회논문집
제7권 제2호 2004년 | pp.142-148

# 계장화 압입시험에 의한 용접부의 물성 측정 및 피로수명 예측

# Evaluation of Mechanical Properties of Welded Joints by an Instrumented Indentation Test and Fatigue Life Evaluation

구병춘[1] · 이동형[1] · 권동일[2] · 최 열[3]
Byeong-Choon Goo · Dong-Hyung Lee · Dong-Il Kwon · Yeol Choi

## 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 is investigated. Finally the fatigue life of butt welded specimens are evaluated by the local strain approach. To calculate local strains and stresses, elasto-plastic finite element analysis is conducted using the measured properties.

***Keywords*** : Fatigue life(피로수명), Instrumented indentation test(계장화 압입시험), Mechanical Properties(기계적 설질), Tensile test(인장시험), Welded Joints(용접이음)

## 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. 이러한 비파괴적 재료의 물성 측정은 배관의 열화측정용으로 개발이 시작되어[1], 발전을 거듭하여 현재 인장시험 결과와 유사한 신뢰성 있는 항복강도, 인장강도, 스트레스-스트레인의 관계를 주는 단계까지 발전하여[2-11] ISO 14577-1, 14577-2 혹은 KS B 0950[12]는 이러한 시험 방법을 규정하고 있다. KS B 0950에서 규정하고 있는 계장화 압입시험은 구형의 연마된 초경합금 누르개를 사용하는 계장화 압입시험기로 압입하중 F(=2N～3KN)와 압입깊이 h를 동시에 측정하여 얻은 Fig. 1과 같은 압입 하중-압입깊이 곡선을 분석하여 압입 물성을 측정하는 방법이다. 시험은 압입 깊이 제어 방식 혹은 압입 하중제어방식으로 할 수 있으나 깊이 제어방식이 권장되고 있다.

본 연구에서는 KS B 0950의 방법에 따라 맞대기 용접부의 모재, 열영향부 및 용접금속의 물성을 측정하고 이 데이터를 이용하여 용접부의 탄소성 유한요소해석을 수행하여 국부변형률법으로 맞대기 용접시편의 피로수명을 예측하였다.

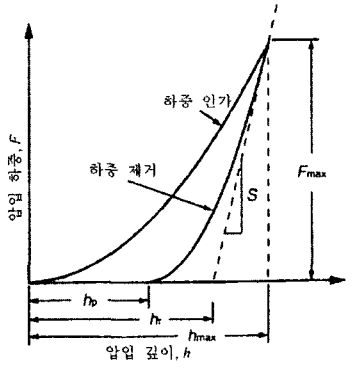



**Fig. 1.** Load vs. depth

1 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
2 서울대학교 재료공학부, 부교수
3 (주)프론틱스, 기술이사

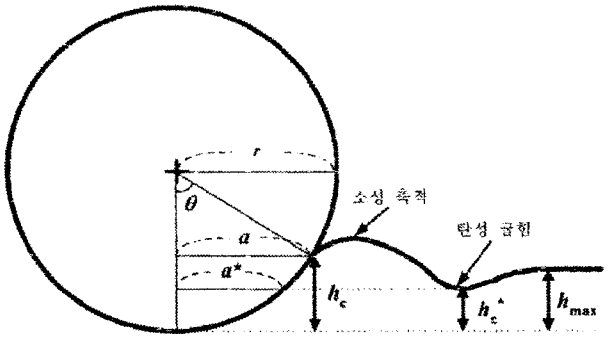



Fig. 2. Deformation

## 2. 계장화 압입시험의 기본 이론

### 2.1 진 변형률

압입시험에서 구형 누르개 하부의 변형이 Fig. 2와 같이 주어지는 경우 전단변형률을 계산하면, 진 변형률 $\varepsilon$은 다음과 같이 주어진다[12].

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

여기서, $\zeta$는 적합화 상수로 0.12이다.

### 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.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} = \frac{1}{\psi} \frac{F}{\pi d^2} \tag{2}$$

여기서 소성 구속인자 $\psi$=3.5이다.

### 2.3 실제 접촉 반지름 $a$

식 (1), (2)에서 보는 바와 같이 진 변형률과 진 응력을 구하기 위해서는 구형 누르개 주변에서 발생하는 탄성 굽힘과 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.

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

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.

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

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.

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{5}$$

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 $\varepsilon_y$=0.01로 하여 $\sigma_y$는 식 (6)과 같이 구한다.

$$\sigma_y = K\varepsilon_y^n \tag{6}$$

압입 인장 강도 $\sigma_u$는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\sigma_u = K\varepsilon_u^n \tag{7}$$

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

## 3. 측정 결과

### 3.1 용접시편의 제작

용접시편은 Fig. 3과 같이 100×300×10t인 두개의 판을 맞대기 용접한 후 폭 25mm가 되게 가공하여 제작하였다.

CO2 GMAW 로봇 용접기에서 전류=150~190 Ampere, 전압≈105 V 조건으로 자동 용접하였다. 용접봉은 AWS ER 70S-G 1.2 $\phi$를 사용하였다. 용접 후열처리 온도는 Fig.

Fig. 3. Welding of two plates

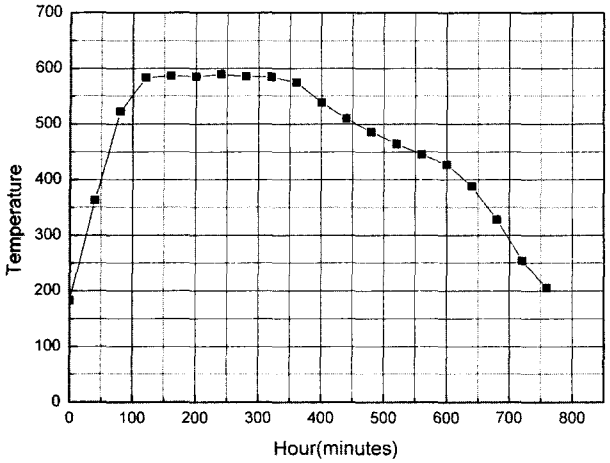



**Fig. 4.** Post-weld heat treatment

4와 같다.

### 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 AIS 2000 전용 액세서리인 마이크로 포지셔닝 스테이지를 사용해서 시편의 용접부, 열영향부 및 모재에 대한 실험을 수행하였다. 압입 시험은 모재부의 경우 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㎛, 하중 인가, 제거 반복회수=15회로 하였다.

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(Fig. 5).

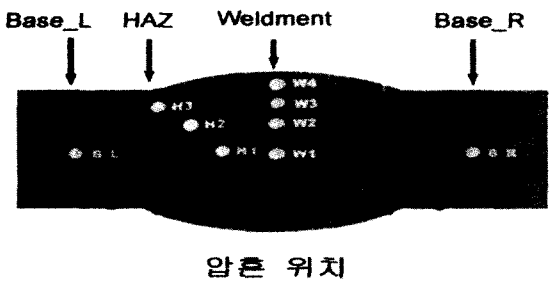
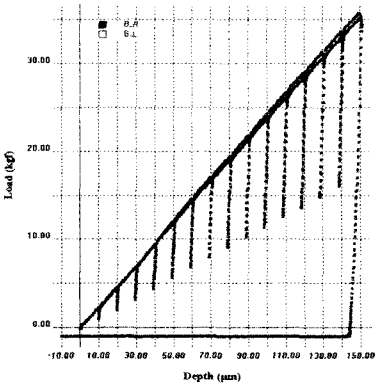
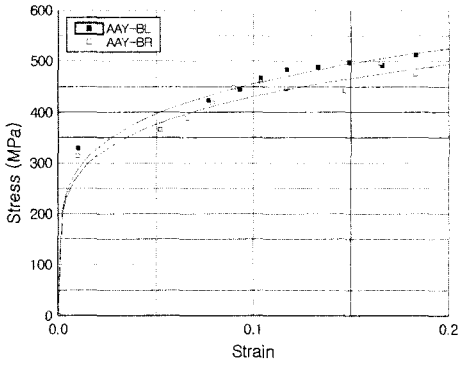


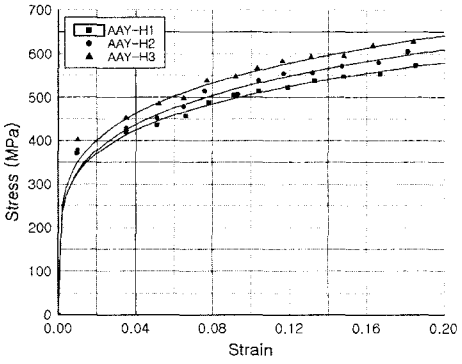

**Fig. 5.** Measuring points



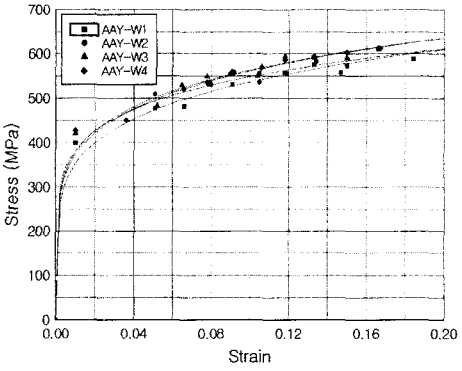

(a) Load vs. depth; base metal




(b) Base metal; Stress vs. strain




(c) HAZ

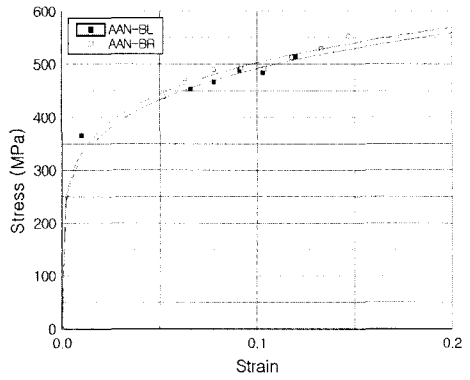



(d) Weld metal

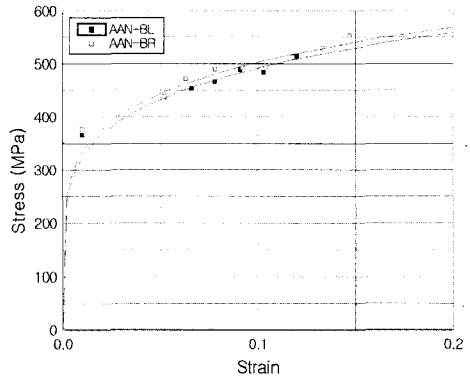
**Fig. 6.** Stress-strain curves for AAY

Fig. 6은 후열처리를 한 시편(AAY)에 대한 응력-변형률 곡선이다. 그림 (a)는 하중 인가, 제거를 반복할 때의 하중과 압입깊이의 관계를 보여주고 있다. 하중 인가, 제거 데이터로부터 (b)와 같은 응력-변형률 관계를 얻는다. 그림 (c), (d)는 각각 열영향부와 용접금속의 응력-변형률 관계를 나타낸다. Fig. 7은 후열처리를 하지 않은 시편(AAN)에 대한 응력-변형률 곡선이다.

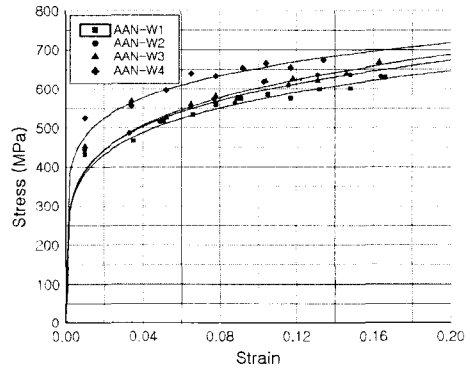
후열처리 전후 시편에 대해 항복강도, 인장강도, 가공경화계수 $K$와 지수 $n$의 측정된 값을 정리하면 Table 1, 2와 같다.




(a) Base metal




(b) HAZ




(c) Weld metal

**Fig. 7.** Stress-strain curves for AAN

**Table 1.** Measured values for AAY

| | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_u$ (MPa) | $K$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|
| B_R | 329 | 526 | 676.351 | 0.202 |
| B_L | 314 | 491 | 725.892 | 0.196 |
| H1 | 371 | 576 | 791.512 | 0.194 |
| H2 | 378 | 614 | 851.361 | 0.207 |
| H3 | 402 | 644 | 890.143 | 0.203 |
| W1 | 399 | 601 | 820.192 | 0.184 |
| W2 | 427 | 588 | 785.433 | 0.156 |
| W3 | 421 | 623 | 847.425 | 0.179 |
| W4 | 427 | 620 | 839.317 | 0.173 |

**Table 2.** Measured values for AAN

| | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_u$ (MPa) | $K$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|
| B_R | 365.7 | 550.1 | 758.725 | 0.184 |
| B_L | 376.7 | 557.6 | 751.109 | 0.179 |
| H1 | 420.7 | 618.8 | 840.706 | 0.177 |
| H2 | 414.6 | 619.6 | 844.903 | 0.182 |
| H3 | 418.2 | 669.5 | 925.365 | 0.203 |
| W1 | 432.0 | 634.5 | 856.722 | 0.175 |
| W2 | 444.1 | 659.5 | 897.955 | 0.180 |
| W3 | 453.0 | 668.6 | 932.542 | 0.178 |
| W4 | 525.5 | 680.0 | 891.049 | 0.135 |

## 4. 인장시험 결과와 비교

열처리 하지 않은 모재에 대해 인장시편을 JIS Z 3121-1993 No. 1A 형상으로 제작하여 ASTM E 8 규정에 따라 인스트론사의 25톤 용량의 전기유압식 재료시험기에서 시험속도 1mm/min으로 시험하였다. Fig. 8은 인장시험으로

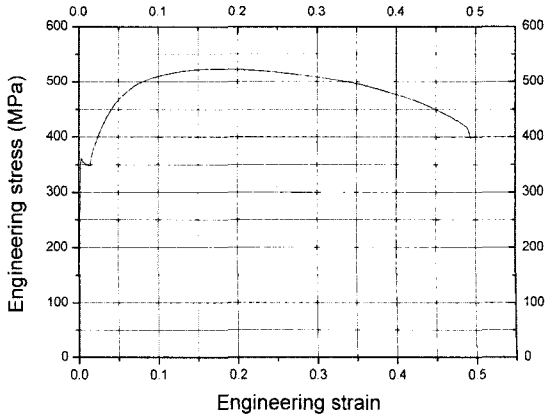



**Fig. 8.** Stress vs. strain by tensile test

얻은 스트레스와 스트레인의 관계를 보여 준다.

인장시험에 의한 응력-변형률 관계는 전형적인 탄소강의 특성을 보이며 항복강도 350MPa, 인장강도 520MPa이다. Table 2의 압입시험에 의한 결과와 비교하면 항복강도는 20MPa, 인장강도는 30MPa 정도 낮다. 그 차이는 인장시험 값을 기준으로 할 때 약 5.7%이다.

## 5. 맞대기 용접이음의 피로수명 예측

수명예측에 사용된 시편은 압입시험에 사용된 것과 동일한 방법으로 제작된 맞대기 용접시편으로 길이 200, 폭 25, 두께 10인 맞대기 용접시편이다. 국부변형률 방법(local strain approach)을 사용한 피로수명 해석을 위해 인장하중이 작용하는 경우에 대해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9는 시편의 1/2에 대한 유한요소 모델을 보여 준다.

용접비드의 형상은 피로수명에 많은 영향을 미치므로 시험편 제작 후 형상측정기를 이용하여 비드형상을 측정하여 평균적으로 나타나는 비드의 접선각도 θ=40°와 용접 지단부의 반지름 ρ=2mm를 고려하였다. 해석에 사용된 용접방법 및 용접조건은 시편제작 조건과 동일하게 하였으며, 용접부에 전달된 입열량은 잔류응력 계산의 정확성을 위하여 실제 용접시 온도 측정결과와 유사하도록 하였다.

해석에 사용한 하중조건은 실험조건과 같은 R=0.1인 편진 인장하중을 사용하였으며, 유한요소해석에 사용된 재료의 경화조건은 반복하중을 받을 때 재료의 항복응력이 소성변형에 따라 선형적으로 변하고 Bauschinger 효과를 표현할 수 있는 이동성 경화(kinematic hardening) 모델을 사용하였다. 반복하중 하의 응력-변형률 곡선은 계장화 압입시험의 결과와 참고문헌[13,14]의 결과를 바탕으로 Fig. 10과 같이 선형화하여 유한요소 해석의 입력 자료로 사용하였다.

수명예측은 일반적으로 많이 사용되고 있는 Basquin-Manson 식 (Eq. 8), 평균응력을 고려할 수 있는 Morrow 식 (Eq. 9), Manson-Halford 식 (Eq. 10), 그리고 SWT(Smith, Watson, and Topper) 식 (Eq. 11)을 사용하였다.

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \varepsilon_f'(2N_f)^c \tag{8}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f' - \sigma_0}{E}(2N_f)^b + \varepsilon_f'(2N_f)^c \tag{9}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f' - \sigma_0}{E}(2N_f)^b + \varepsilon_f'\left(\frac{\sigma_f' - \sigma_0}{\sigma_f'}\right)^{c/b}(2N_f)^c \tag{10}$$

$$\sigma_{\max}\ \varepsilon_a = \frac{(\sigma_f')^2}{E}(2N_f)^{2b} + \sigma_f'\varepsilon_f'(2N_f)^{b+c} \tag{11}$$

여기서, $\varepsilon_a$: 국부변형률 진폭(local strain amplitude), $\sigma_{\max}$: 최대 국부응력(maximum local stress), $\sigma_0$: 평균응력(mean stress), $N_f$: 피로수명, $\sigma_f'$: 피로강도계수(fatigue strength coefficient), $\varepsilon_f'$: 피로연성계수(fatigue ductility coefficient), b: 피로강도지수(fatigue strength exponent), c: 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다.

위에서 기술한 국부 변형률 방법에 의한 피로수명 예측 시 필요한 반복 응력-변형률 특성치는 정적 인장하중 해석결과 기하학적 불연속에 의해 취약부위인 열영향부(HAZ)의 반복응력-변형률 특성치를 사용하였다. 열영향부의 반복응력-변형률 특성치는 실제 실험결과로부터 구할 수 있으나, 용접시험편 제작 후 용접부를 중심으로 15mm까지 경도를 측정하여[13] 경도 시험결과로부터 반복 응력-변형률 특성치를 참고문헌의[14] 추정방법을 이용하여 구하였다. 용접시험편 및 후열처리 시험편 모두 동일하게 적용하였다. Table 3은 피로물성치의 추정값을 보여 준다.

유한요소해석을 통하여 처음 하중부과 시 최대 주변형률을 나타내는 지점의 주응력과 주변형률의 변화량을 구하고

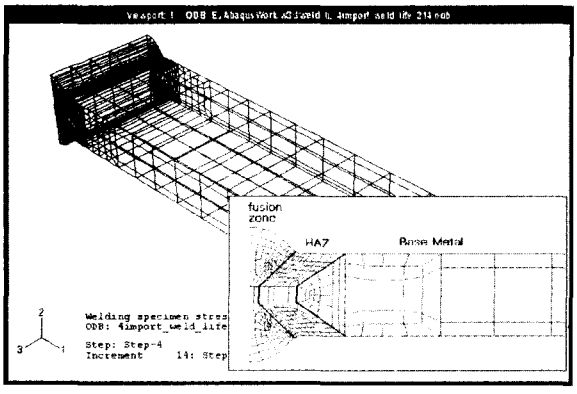



**Fig. 9.** FE model

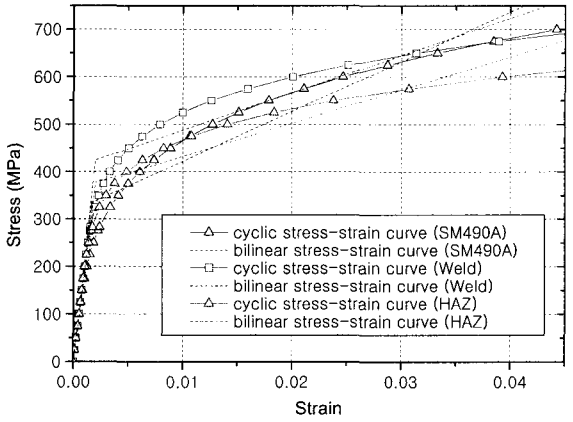



**Fig. 10.** Cyclic stress-strain curves

**Table 3.** The fatigue properties of base and heat affected materials for SM 490 A

| | $\sigma_f'$ (MPa) | $\varepsilon_f'$ | b | c |
|---|---|---|---|---|
| SM 490 A | 1003.3 | 0.178 | -0.113 | -0.458 |
| SM 490 A (HAZ) | 934.75 | 0.573 | -0.09 | -0.56 |

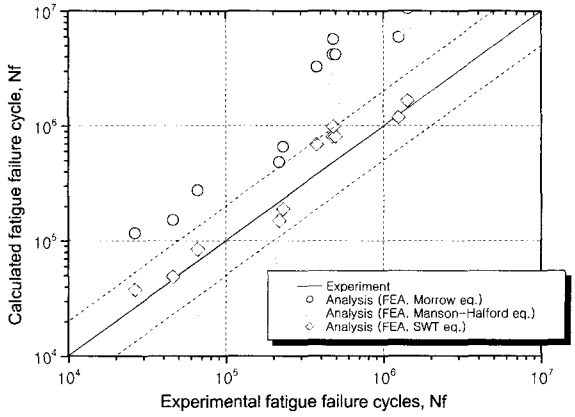



**Fig. 11.** Comparison of the predicted and experimental fatigue lives for as-welded specimens

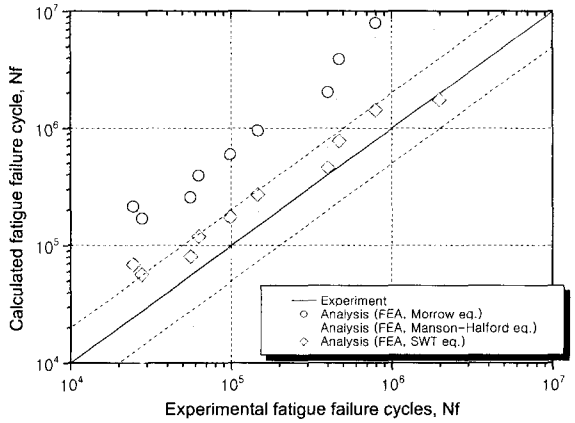



**Fig. 12.** Comparison of the predicted and experimental fatigue lives for annealed specimens

식 (8)~(11)을 적용하여 수명을 평가하였다. Fig. 11은 용접후열처리를 하지 않은 시편에 대해, Fig. 12는 후열처리를 한 시편에 대한 예측결과와 시험결과를 비교한 것이다. 그림에서 일점쇄선은 오차계수 2 및 1/2을 나타내는 선으로 각각 예측수명이 실제수명의 2배 및 1/2배가 되는 선이다. Morrow 식으로부터 얻어진 예측결과를 살펴 볼 때 전체적으로 긴 수명을 나타내고 있으며, Manson-Halford 식으로부터 얻어진 예측결과는 하중이 크게 작용하는 영역에서는 시험결과와 비교하여 짧은 수명을 나타내고 하중이 작은 영역에서는 시험결과와 비교하여 긴 수명을 나타낸다. 전반적으로 SWT 방법이 실험결과를 가장 잘 예측함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

(1) 용접부와 같이 물성이 국부적으로 변화는 경우 계장화 압입시험을 통해 항복강도, 인장강도, 응력-변형률 관계를 인장시험에 비해 상대적으로 쉽게 측정할 수 있었다.

(2) 인장시험과 압입시험의 항복강도와 인장강도의 차는 5.7%로 두 결과는 매우 유사하다.

(3) 용접 후열처리에 의해 SM 490 A의 항복강도와 인장강도는 모재부와 용접금속에서는 50MPa, HAZ부에서는 30MPa 정도 낮아지고, 가공경화지수는 약간 증가함을 알 수 있다.

(4) 압입시험으로 얻은 응력과 변형률의 관계는 용접부의 피로수명 평가를 위한 유한요소 해석 시 필요한 입력자료로 유용하게 활용될 수 있었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. US Federal Pipeline Safety Standard 49 CFR 192, Section IID of Appendix B.
2. F. M. Haggag, "Nondestructive Determination of Yield Strength and Stress-Strain Curves of In-Services Transmission Pipelines Using Innovative Stress-Strain Microprobe Technology", ATC Report, ATC/DOT/990901.
3. J. S. Field, and M. V. Swian, "Determining the Mechanical Properties of Small Volumes of Material from Submicrometer Spherical Indenter", Journal of Materials Research, Vol.10, pp.101-12, 1995.
4. J. P. Kirkwood, M. B. Derek, and P. Collingwood, "Georgian Pipeline Company Uprating An Old Russian Pipeline", PII Total Integrity Conference, Prague, May 20-22, 2002.
5. J. H. Ahn, Y. Choi, and D. Kwon, "Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials Through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve", Journal of the Korean Institute of Metal and Materials, Vol.38, pp.1606-11, 2000.
6. J. H. Ahn, and D. Kwon, "Derivation of Plastic Stress-Strain Relationship from Ball Indentation: Examination of Strain Definition and Pileup Effect", J. Mater. Res., Vol.16, pp.

3170-78, 2001.
7. F. A. Francis, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation", Journal of Engineering Materials and Technology Transaction ASME, Vol.98, pp.272-81, 1976.
8. W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiment", Journal of Materials Research, Vol.7, pp.1564-83, 1992.
9. A. L. Norbury, and T. Samuel, "The Recovery and Sinking-In or Piling-Up of Material in the Brinell Test, and the Effects of These Factors on the Correlation of the Brinell With Certain Other Hardness Tests", Journal of Iron and Steel Institute, Vol.117, pp.673-87, 1928.
10. 장재일, 최열, 손동일, 이윤희, 권동일, 김정태, 2002, "연속압입 시험기법을 이용한 석유화학설비 경년 손상의 새로운 평가 변수 고찰", 대한기계학회논문집 A, 제 26권 제 5호, pp.881-889, 2002.
11. Y. Choi, J. I. Jang, J. Park, D. I. Kwon, M. Gao, R. Kania, "Tests proveindentation technique for assessment of in-service Line Pipe", Oil & Gas Journal, Oct. 13, pp.66-71, 2003.
12. KS B 0950-2002, 금속재료의 계장화 압입시험-압입 인장 물성 평가.
13. 오창록, 구병춘, 김재훈, "SM 490 A 맞대기 용접부의 특성 연구", 대한용접학회 추계학술대회 개요집, Vol.41, 제 41권, pp. 204-206, 2003.
14. M. L. Roessle,, A. Fatemi, "Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations", International journal of fatigue, Vol.22, No.6, pp.495-511, 2000.