

# 국부변형률방법을 이용한 용접시험편의 피로수명 해석

## Fatigue Life Analysis of Butt-welded specimen by Local Strain Approach

이동형\*, 서정원\*, 구병춘\*, 석창성\*\*

Dong-Hyong Lee, Jung-Won Seo, Byeong-choon Goo, Chang-Sung Seok

### ABSTRACT

The residual stresses and distortions of structures by welding exert negative effect on the safety of railroad structures. This investigation performs a thermal elasto-plastic analysis using finite element techniques to evaluate residual stresses in butted-welded joint. Considering this initial residual stresses, local stress and strain at the critical location (weld toe) during the loading were analyzed by elastic plastic finite element analysis. Fatigue crack initiation life and fatigue crack propagation life of butt-welded specimen were predicted by local strain approach and Neuber's rule and Paris law. It is demonstrated that fatigue life estimates by local strain approach closely approximate the experimental results.

Keywords : local strain approach (국부변형률근사법), butt weld(맞대기 용접), residual stress(잔류응력), fatigue life(피로수명), residual stress relaxation (잔류응력 이완)

### 1. 서론

구조물의 접합방법으로 용접이 사용되면서 작업의 용이성, 구조물의 단순화, 기밀의 우수성 등의 장점 때문에 철도, 교량, 선박 등 많은 기계 구조물 제작에 이용되고 있다. 그러나, 일반적으로 용접현상은 국부적으로 단시간에 가열, 냉각 되기 때문에 용접부는 변형 수축이 발생하고, 용접한 재료에 잔류응력이 생겨 구조물의 균열 발생 또는 균열 전파에 직·간접적으로 기여하므로 안전성에 악영향을 미치게 된다. 용접시 높은 열에 의한 재료의 팽창과 냉각시 수축 변형은 용접부재에 인장 및 압축 잔류응력을 유발시키며, 발생된 인장 잔류응력은 용접 구조물의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다.

용접부 피로수명의 정확한 예측을 위하여 용접부 잔류응력을 고려하여 해석을 수행하여야 하지만, 용접부 잔류응력 해석에는 복잡한 열탄소성 과정을 해석해야 하고, 온도에 따른 비선형성인 재료의 기계적 성질이 필요하므로 대부분 초기의 잔류응력을 고려하지 않고 수명예측을 하고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

따라서, 본 연구에서는 용접시 발생하는 잔류응력을 고려하고, 용접부의 기하학적인 불연속에 의하여 발생하는 국부응력(local stress)과 국부변형률(local strain)을 탄소성 유한요소해석을 통하여 구한 후 국부변형률근사법(local strain life)을 적용하여 피로균열 발생수명을 예측하였고, 용접부 균열진전 해석을 통하여 균열진전수명을 계산하였다. 이러한 예측결과는 시험편의 피로수명 시험결과와 비교, 고찰되어 예측방법의 신뢰성을 검토하였다. 용접부 잔류응력 및 응력집중부의 탄소성 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 'ABAQUS'를 사용하였다.

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

\*\* 성균관대학교 기계공학과

## 2. 인장 피로수명시험

### 2.1 재료 및 시험편

본 피로시험에 사용된 시험편은 JIS Z 3103<sup>(3)</sup>에 따라 설계하였으며, Fig. 1 과 같이 길이 200mm, 폭 25mm, 두께 10mm 의 X형 맞대기 용접 시험편이고 개선각은 90°, 루트면은 2mm, 루트간격은 2mm이다. 시험편 재료는 철도차량 구조물에 사용하고 있는 용접구조용 압연강재(SM490A)이다. 시험편제작에 사용된 용접방법은 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 용접이고 용접조건은 Table 1 과 같이 3 pass로 수행되었다.

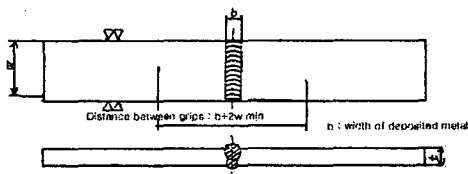


Fig. 1 Geometry of the butt-welded specimen  
( $t=10\text{mm}$ ,  $w=25\text{mm}$ ,  $L=200\text{mm}$ )

Table 1. Welding conditions

Welding Method	GMAW		
Plate Thickness	10 mm		
Material	SM490A		
Wire Size	$\phi$ 1.2		
	Pass 1	Pass 2	Pass 3
Welding Speed (cm/min)	29	18	18
Voltage (V)	103	105	105
Amperage (A)	150	190	180

### 2.2 시험방법 및 시험결과

피로시험은 ASTM E 466<sup>(4)</sup>에 따라 시험을 실시하였다. 시험 장비로는 Fig. 2와 같이 dynamic 만능 시험기 Instron model 8802 (25ton) 과 Instron model 8503 (50ton)을 사용하였고, 시험은  $2 \times 10^6$  cycle까지에서 미파단 시험편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가며 시험을 수행하였다. 시험에는 일정진폭 반복하중을 이용하였고, 하중비(R)는 0.1, 20Hz로 시험을 수행하였다.

Table 2. 는 피로시험결과를 정리한 표이며, 파단이 용접부가 아닌 그립부위 등에서 일어난 시험편은 제외된 결과이다. 시험결과를 최소자승법으로 커브피팅하여 하중과 피로수명과의 관계를 나타내면  $S = 10^{3.654} N^{-0.222}$  이다.  $2 \times 10^6$  cycle까지 수명에 해당하는 응력을 피로한도라 하였을 때 본 피로시험편의 피로한도는 최대 공칭응력으로 약 179.9 MPa 이다. 용접시험편의 인장시험결과 항복강도는 평균 378MPa 이고, 인장강도는 평균 520 MPa이며, 피로한도는 인장강도의 약 0.35배에 해당된다.

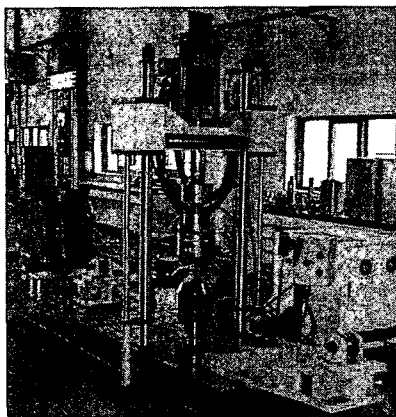


Fig. 2 The fatigue test apparatus

Table 2 Fatigue test results

Specimen No.	Max. Load(kN)	Max. Stress(MPa)	Fatigue Life(Cycle)
AAN-16	109	449.4	$2.6 \times 10^9$
AAN-05	104	428	$4.6 \times 10^9$
AAN-09	93	385.2	$6.6 \times 10^9$
AAN-03	83	342.4	$2.2 \times 10^9$
AAN-02	73	299.6	$2.3 \times 10^9$
AAN-04	62	256.8	$6.3 \times 10^9$
AAN-10	58	239.7	$3.8 \times 10^9$
AAN-11	56	231.1	$4.8 \times 10^9$
AAN-13	56	231.1	$4.9 \times 10^9$
AAN-14	54	222.5	$4.8 \times 10^9$
AAN-08	52	214	$1.2 \times 10^9$
AAN-17	48	199.4	$1.4 \times 10^9$
AAN-18	44	195	$7.6 \times 10^9$
AAN-19	43	190	$8.1 \times 10^9$

### 3. 피로수명 해석

#### 3.1 해석모델

용접부 해석을 수행하기 위한 시편은 피로시험 시편과 동일한 형상이 되도록 하였고, 용접비드의 형상에 따라 응력집중이 발생하여 피로수명에 많은 영향을 미치므로 시험편 제작 후 비드형상을 측정하여 평균적으로 나타나는 비드의 용접각도( $\theta$ )  $40^\circ$  와 비드에 접하는 원의 반지름( $\rho$ ) 2mm 를 고려하여 모델링 하였다. 시험편의 용접후 잔류응력 해석을 위한 열유동해석 및 열응력 해석에 사용한 모델은 이 용접시편이 좌우 대칭이므로 시편의 1/2을 해석대상으로 선정하였다. 또한, 용접부의 정확한 해석을 수행하기 위하여 3차원 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 모델은 Fig. 3 과 같이 20절점 2차 블럭 요소(20-node quadratic brick element)를 사용하였으며, 용접부 및 열영향부, 모재부로 나누어 모델링 하였다. 높은 온도구배 및 응력집중을 가지는 영역은 조밀하게 구성하였으며, 최종 모델은 절점 10,034개, 요소는 2,020개이다. 해석에 사용된 용접방법은 GMAW용접이고 용접조건은 시편제작과 동일하게 3 pass로 수행하였으며, 용접몰에 전달된 입열량은 잔류응력 계산의 정확성을 위하여 실제 용접시 온도 측정결과와 유사하도록 하였다.

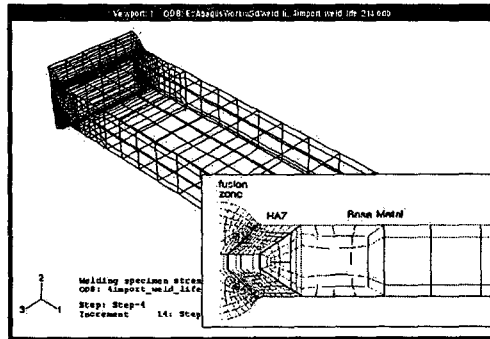


Fig. 3 FEM model for butt welded specimen

#### 3.2 열전달 및 잔류응력 해석

용접현상의 열전달 해석에 사용한 열원의 형태는 요소에 균일하게 작용하는 열원(body flux)를 사용하였고, 용접시 고온에서 용융부의 고상과 액상의 상변화 효과를 반영하기 위하여 잠열(latent heat)을 고려하였다. 열전달 해석시 정확한 재료의 물성치는 기존 연구자료의 연강 재료 물성치<sup>(5)</sup>를 이용하였고, 표면의 경계조건으로 자연대류경계조건  $20W/m^2K$ 를 적용하였으며, 주위온도는  $20^\circ C$ 로 설정하였다.

열전달 해석을 통하여 열원이 이동하는 동안의 온도분포를 각 시간단계에서 계산한 후, 이 과도 온도분포를 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 용접 후 발생하는 잔류응력을 계산하였다. 열탄소성 해석에 사용되는 온도에 따른 재료 물성치는 기존 연구자료의 연강 재료 물성치<sup>(5)</sup>를 이용하였다. 경계조건으로는 좌우 대칭면에 대칭조건 및 용접부 중심에 회전을 방지하기 위하여 y, z방향으로의 변위를 고정하였다.

#### 3.3 피로수명 해석

용접부의 피로파손은 용접 결함이나 기하학적인 불연속부에 발생하는 응력집중에 의한 것으로 알려져 있다. 이와 같은 용접부 노치 부분에 하중을 받게 되는 경우 국부적으로 소성변형을 일으키며 이 영역에서 균열이 발생한다. 따라서, 용접부의 균열발생수명을 예측하기 위하여 용접부 노치부분의 응력과 변형률을 정확히 계산하여야 하며, 이를 이용하여 여러 가지 수명예측 방법을 적용하고 있다. 본 논문에서는 잔류응력의 영향을 고려하여 균열발생수명을 예측하기 위하여 국부변형률근사법(local strain life)을 적용하였다. 국부변형률근사법(local strain life)에 의한 피로수명 예측시 반복 응력-변형률 특성치가 필요하며, 정적 인장하중 해석결과 기하학적 불연속에 의해 취약부위인 열영향부(HAZ)부의 반복 응력-변형률 특성치를 사용하였다. 열영향부의 반복응력-변형률 특성치는 실제 실험결과로부터 구할 수 있으나, 용접 시험편 제작후 용접부를 중심으로 15mm까지 경도를 측정하여 경도시험결과로부터 반복 응력-변형률 특성치를 참고문헌의 시험결과<sup>(6)</sup>를 이용하여 추정하였다. 해석에 적용한 열영향부의 반

복 응력-변형을 특성치는 평균 경도 167HB를 적용하여 추정하였다. 계산에 사용한 반복응력-변형을 특성치는  $\sigma_f'$ (피로강도계수(fatigue strength coefficient))=934.75 MPa,  $\epsilon_f'$  (피로연성계수(fatigue ductility coefficient))=0.573, b(피로강도지수(fatigue strength exponent))=-0.09, c(피로연성지수(fatigue ductility exponent))=-0.56,  $K'$ (반복 강도계수(cyclic strength coefficient))=1022.2MPa, n'(반복변형률경화계수(cyclic strain hardening exponent))=0.1607 이다.

국부변형률근사법(local strain life)에 의한 피로균열 발생수명 예측에는 일반적으로 많이 이용되고 있는 다음 식(1)의 Basquin-Manson 식, 평균응력을 고려할 수 있는 식(2)의 Morrow 식과 식(3)의 Manson-Halford 식, 식(4)의 SWT(Smith, Watson, and Topper) 식을 적용하여, 수명예측의 적합성을 검토하였다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f' - \sigma_0}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f' - \sigma_0}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' \left( \frac{\sigma_f' - \sigma_0}{\sigma_f'} \right)^{cb} (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{max} \epsilon_a = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $\epsilon_a$ 는 국부변형률 진폭(local strain amplitude),  $\sigma_{max}$ 은 최대국부응력(maximum local stress),  $\sigma_0$  = 평균응력(mean stress),  $N_f$ 는 피로수명이다.

해석에 사용한 하중조건은 실험조건과 같은 R=0.1인 편진 인장하중을 사용하였으며, 용접부 노치 부분에 발생하는 국부응력 및 변형률을 평가하기 위하여 Neuber법칙을 이용한 근사해석법과 잔류응력을 고려한 탄소성 유한요소해석을 이용하여 얻어진 결과를 기반으로 피로균열개시수명을 예측하였다. Neuber 법칙은 특정한 노치 형상에 대하여 노치 부분의 응력집중계수는 노치부분의 응력과 변형률에 대한 집중 계수의 관계로 나타낼 수 있으며, 하중의 항과 노치부분의 응력, 변형률 부분으로 나누어 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{(K_t S)^2}{E} = \sigma \epsilon \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $K_t$  = 응력집중계수(stress concentration factor),  $S$  = 공칭응력(nominal stress),  $E$  = 탄성계수(elastic modulus) 이다.

노치반경이 작을 경우 Topper 등은 응력집중계수  $K_t$ 를 피로노치계수(fatigue notch factor)  $K_f$ 로 대체하는 것이 더 유용하다고 하였으므로 본 연구에서는 유한요소해석결과로부터 응력집중계수 (=1.747)를 구하고 Peterson이 제안한 식<sup>(7)</sup>으로  $K_t$ 를 계산하여 수명예측을 수행하였고 재료상수는 시험편의 인장강도로부터 추정식<sup>(7)</sup>을 이용하여 계산하였다.

유한요소해석에 사용된 재료의 경화조건은 반복하중을 받을 때 재료의 항복응력이 소성변형에 따라 선형적으로 변하고 Bauschinger 효과를 표현할 수 있는 이동성경화(kinematic hardening) 모델을 사용하였다.

최대 주변형률이 같다면 단축 및 다축조건에서 같은 수명을 나타낸다는 최대 주변형률 이론에 따라 유한요소해석을 통하여 처음 하중부과시 최대 주변형률을 나타내는 지점의 주응력과 주변형률의 변화량을 구하고 식(1)~식(4)를 적용하여 수명해석을 수행하였다. 수명해석시 많은 반복계산이 필요하므로 수치계산 프로그램을 작성하였으며, 프로그램에서 해는 Newton-Raphson Method를 사용하여 구하였다.

균열진전수명해석은 Paris 식을 사용하였고, 반복하중에 의한 잔류응력 이완이 생기기 때문에 균열진전해석에서 잔류응력의 영향은 고려하지 않았다. 균열형상은 3차원 유한요소해석결과 용접시편의 경우 폭방향으로 중간 지점에서 잔류응력이 가장 크고, 반복하중 작용시 평균하중이 다른 부분에 비하여 크므로 용접 중앙의 반원 균열(semi-circular crack)로 가정하여 식(7)을 적용하였다. 초기균열길이( $a_i$ )는 0.1mm, 최종균열길이( $a_f$ )는 폭의 반인 12.5mm로 계산하였다. 균열진전수명해석에 사용한 식은 다음 (8) 식과 같고, 재료상수인  $C$ ,  $m$ 은 용접구조용강의 실험결과<sup>(8)</sup>를 이용하였다.

$$\Delta K_I = 0.713 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (7)$$

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K_I)^m} = \frac{2}{(m-2)C(\Delta K_I)^m} \left( \frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 열전달 및 잔류응력 해석 결과, 고찰

Fig. 4는 첫 번째 용접(pass 1)이 진행될 때 용접선에서 10, 20, 30mm 위치에서 측정된 온도와 열전달 해석 결과를 비교한 그래프이다. 첫 번째 용접시 10mm 떨어진 위치에서 최고 210℃정도의 온도상승이 발생하였으며 해석결과가 실험결과보다 약간 높은 온도상승량을 나타내고 있으나, 실험시의 오차 등을 고려할 때 어느 정도 일치하는 것으로 판단하였다.

Fig. 5는 용접시험편 폭의 중심에서 용접선에 직각방향으로 용접비드의 중심으로부터 거리에 따른 용접선 길이방향의 잔류응력( $S_{33}$ ) 및 용접선에 직각인 방향의 잔류응력( $S_{11}$ )의 해석결과를 나타낸다. 잔류응력 해석결과 용접선 길이방향의 잔류응력은 용접부 중앙에 370MPa 정도의 큰 인장잔류응력이 발생하였고, 용접선 직각방향의 잔류응력은 열영향부와 모재부의 만나는 지점 근처에서 큰 인장잔류응력이 발생하였다.

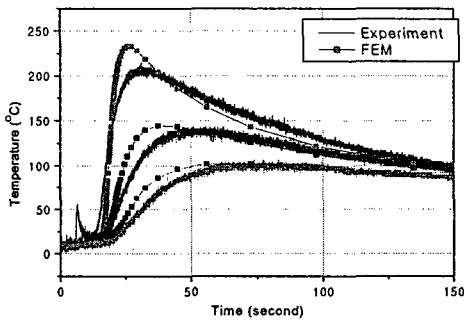


Fig. 4 Temperature change in welding process(pass 1)

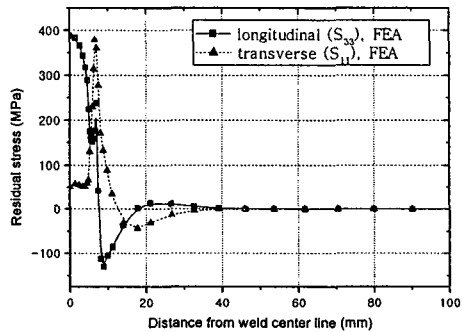


Fig. 5 Residual stress after weld

#### 3.2 피로수명 해석 결과 및 고찰

Fig. 6은 용접시험편의 탄소성 유한요소해석 및 국부변형률방법, 균열진전 해석을 이용하여 예측된 피로수명과 피로실험으로부터 얻어진 피로수명과의 관계를 직접 비교하여 나타낸 그림이다. 그림중의 일점쇄선은 오차계수 2 및 1/2을 나타내는 선으로 각각 예측수명이 실제수명의 2배 및 1/2배가 된다는 것을 의미하며 수명예측의 일치여부의 기준으로 생각하였다. 용접시험편의 실험결과와 비교하여 Morrow 식이나 Manson-Harford의 제안식에 비하여 SWT식이 약 2배 이내의 오차범위에서 더 근접한 예측결과를 나타내고 있다. Basquin-Manson 식으로부터 예측한 결과는 실험결과와 큰 차이가 있고, 이것은 잔류응력이 존재하고 인장하중이 작용하는 하중조건에서 평균하중을 고려하지 못하기 때문이다. Morrow 식으로부터 얻어진 예측결과를 살펴 볼 때 전체적으로 긴수명을 나타내고 있으며, Manson-Harford 식으로부터 얻어진 예측결과는 하중이 크게 작용하는 영역에서는 시험결과와 비교하여 짧은 수명을 나타내고 하중이 작은 영역에서는 시험결과와 비교하여 긴 수명을 나타낸다. 이에 비해 SWT 식의 경우 다른 식의 경우보다 가장 좋은 예측결과를 보이고 있다.

Fig. 7은 Neuber's rule을 적용하여 국부변형률 방법 및 균열진전해석으로 예측한 결과를 시험결과와 비교한 그래프이며, 유한요소해석 결과와 비교하여 전반적으로 더 큰 수명을 나타내고 있다. 이것은 용접 잔류응력을 고려하지 않기 때문에 실제 용접 노치부에 발생하는 큰 평균응력을 효과를 나타낼 수 없기 때문이다. 이상과 같은 결과로부터 용접시험편의 반복 응력-변형률 특성치가 확보되고 탄소성 유한요소 해석과 SWT 식을 적용한 국부변형률 방법을 적용한다면 용접부의 피로수명에 대하여 더욱 정확한 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

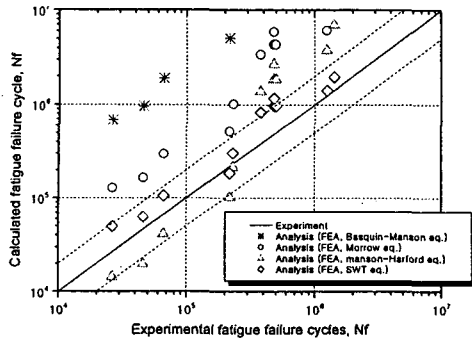


Fig. 6 Comparison of total fatigue life predictions by FEM analysis and experimental results

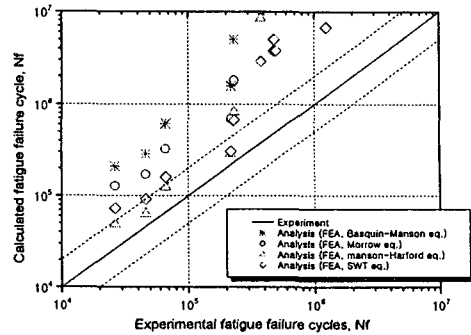


Fig. 7 Comparison of total fatigue life predictions by Neuber's rule and experimental results

#### 4. 결론

용접시 발생하는 잔류응력을 고려하고, 용접 노치부의 국부응력(local stress)과 국부변형률(local strain)을 탄소성 유한요소해석을 통하여 구한 후 국부변형률근사법(local strain life)을 적용하여 용접 시험편의 피로수명을 예측하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 예측된 피로수명들은 잔류응력을 고려하고, 탄소성 유한요소해석으로 구한 최대 주변형률의 변화량과 SWT식을 적용한 경우가 2배 이내의 적은 오차범위에서 실험수명과 적절한 상관관계를 나타낸다.
- (2) 용접부 수명예측시 잔류응력을 고려하지 않고 Neuber's rule을 적용한 경우 평균응력이 낮게 산정되어 비보수적인(nonconservative)인 결과를 나타내므로 적용시 주의할 필요가 있다.
- (3) 평균응력을 고려할 수 있는 Morrow 식의 경우 큰 소성변형이 발생하는 노치부에 적용시 수명이 길게 예측되고, Manson-Harford식의 경우 높은 하중 작용시 짧게, 낮은 하중 작용시 길게 예측된다.
- (4) 용접 시험편의 경우 반복 응력-변형률 특성치의 정확한 평가를 통하여 용접 구조물에 대한 신뢰성 있는 피로수명예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2003년도 과학기술부 국가지정연구실사업인 "철도차량 구조물의 잔존수명 평가 기술 개발"의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### [참고문헌]

1. Lawrence, F.V., Jr., Mattos, R.J., Higashida, Y., and Burk, J. D., "Estimating the fatigue crack initiation life of welds", Fatigue Testing of Weldments, ASTM STP 648, D. W. Hoepfner, Es., ASTM, 1978, pp. 134-158
2. Ning Pan, Sheri Sheppard, "Spot welds fatigue life prediction with cyclic strain range", International Journal of Fatigue 24 (2002), pp.519-528
3. JIS Z 3103, 1987, "Method of Repeated Tension Fatigue Testing for Fusion Welded Joints", JSA
4. ASTM E 466, 1996, "Standard Test Method for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", ASTM
5. Artem Pilipenko, 2001, Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques, Ph. D Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
6. Roessle, M. L., Fatemi, A., 2000, Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations, International journal of fatigue, v.22 no.6, pp.495-511
7. Bannantine, J. A., Comer, J.J., Handrock, J.L, 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice-Hall, Inc.
8. S. Han, J. Han and B. Shin, 1998, Investigation of Fatigue strength and prediction of remaining Life in the Butt Welds containing Penetration Defects, Journal of KSSC, 10-3, pp.423-435 (in Korean)