

# 잔류응력을 고려한 피로수명평가법의 적용성 검토(I)

- 다양한 용접연결부에 대한 적용 -

한정우\* · 이탁기\* · 한승호\* · 김재훈\*\*

\*한국기계연구원 구조시스템연구부

\*\*충남대학교 기계설계공학과

## Application of Fatigue Life Assessment considering Residual Stresses for Various Welded Details

JEONG-WOO HAN\*, TAK-KEE LEE\*, SEUNG-HO HAN\*, JAE-HOON KIM\*\*

\*Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

\*\*Chungnam National Univ., Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Prediction of Fatigue Life 피로수명예측, Residual Stress Relaxation 잔류응력이완, Welded Details 용접이음, Hot-Spot Stress 핫 스폿 응력, Equivalent Stress Method 등가응력법

**ABSTRACT:** Authors had developed the model for the fatigue life assessment of welded details considering residual stress and its relaxation. The model consists of three ingredients; a hot-spot stress approach, a residual stress relaxation, and an equivalent stress. The equivalent stress is induced by stress ranges and the ratios between the applied mean stresses and the ultimate stress of material. Once being tuned with two specific fatigue tests by using load carrying cruciform joint, this model can be applied to many kinds of welded details which structural stress concentration factors are different from each other. This paper reports the application of the proposed model for various welded details including cover plate, longitudinal stiffener, gusset and side attachment. From the investigation of predicted results by using the proposed model it was shown that the ambiguous fatigue characteristics of the various details influenced widely by the welding residual stress are clarified, and also the model could be applied to assess fatigue life of general welded structures.

### 1. 서 론

선박이나 해양구조물은 대표적인 용접구조물이며, 이러한 용접구조물은 일반적으로 피로에 취약한 것으로 알려져 있다. 용접구조물의 피로특성은 아직 완전히 밝혀져 있지 않으며, 특히 용접잔류응력의 피로강도에 대한 영향은 매우 복잡한 문제로 인식되어 있다<sup>(1,2)</sup>. 지금까지 용접 잔류응력의 피로강도에 대한 영향은 평균응력과 유사하게 취급되어져 왔다<sup>(1-4)</sup>. 그리고, 용접 잔류응력은 하중이 작용함에 따라 이완되는 특징이 있어, 외하중이 일정한 경우에도 잔류응력의 이완현상으로 용접재에 작용하는 평균응력은 변하게 된다<sup>(5,6)</sup>.

한편, 초기 잔류응력을 고려하여 피로강도를 평가하는 모델은 여러 가지가 개발되어 있으나<sup>(7)</sup>, 잔류응력의 이완을 고려하여 용접 구조상세의 평균응력이 변하는 경우 피로수명을 합리적으로 평가할 수 있는 모델은 전무하다. 저

자 등<sup>(8)</sup>은 잔류응력을 고려한 피로수명평가 모델을 개발한 바 있는데, 여기서 잔류응력에 의한 효과를 평균응력 영향으로 간주하고, 응력진폭을 평균응력을 파라메타로 하여 수정된 응력 즉, 등가응력을 구상하였으며, 이를 이용한 피로수명 평가절차를 정립하였다.

본 연구에서는 Hot-spot 응력평가시 기준이 되는 하중 전달형 십자형 플랫 용접이음부(cruciform joint)의 피로특성 자료를 바탕으로 4가지 대표적인 용접이음부에 대하여 용접 잔류응력 이완 및 피로강도평가 모델을 적용하여 피로수명을 계산하고, Hot-spot 응력기준 피로시험결과와의 비교를 통하여 개발된 모델의 성능을 검증하였다.

### 2. 통합 피로강도평가 모델

#### 2.1 용접 잔류응력 이완 모델

용접 잔류응력 이완을 고려하여 용접부 피로강도를 평가하려면 용접 잔류응력 이완을 정량적으로 평가할 수 있는 모델이 필수적이다. 본 연구에 적용된 용접 잔류응력 이완 모델은 한승호 등<sup>(9)</sup>이 제안한 것으로 피로하중하 용접 잔류응력 이완량을 부하사이클수 및 작용응력과 초기 잔

제1저자 한정우 연락처: 대전시 유성구 장동 171

042-868-7432 jwhan@kimm.re.kr

잔류응력을 증첩한 응력진폭의 함수로 표현하였다. 작용응력에 따른  $i+1$ 번째의 이완된 잔류응력 크기는 다음과 같이 주어진다.

$\sigma_{ref} < 1$  일 때,

$$(\sigma_r)_{i+1} = (\sigma_r)_{ini} \cdot N_i^{-k}$$

$\sigma_{ref} \geq 1$  일 때,

$$(\sigma_r)_{i+1} = (\sigma_r)_i \cdot (-1.6\sigma_{ref} + 2.6) \cdot N_i^{-k} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{ref} = \{(\sigma_r)_i + \sigma_{app}\} / \sigma_y$

$(\sigma_r)_{ini}$ : 초기 잔류응력

$\sigma_{app}$ : 외하중에 의한 응력

$(\sigma_r)_{i+1}$ :  $i+1$ 번째의 이완된 잔류응력

$\sigma_y$ : 항복응력

$N_i$ :  $i$ 번째 부하 사이클수

$k$ : 잔류응력 이완지수 (=0.004)

이 잔류응력 이완 모델은 기계적 응력이완을 포함한 잔류응력 이완의 제반특성에 대한 면밀한 분석과 일련의 시험계측을 통하여 개발된 것이며, 잔류응력 이완을 정량적으로 제시하고 있어 공학적으로 유용한 것으로 사료된다.

## 2.2 등가응력법

용접 잔류응력 이완을 고려하여 용접부 피로강도 평가를 위해서는 잔류응력 이완 모델과 함께 잔류응력의 영향이 배제된 열처리재의 S-N선도가 필요하다. 또한, 열처리재의 S-N선도로부터 잔류응력의 영향이 포함된 용접재의 S-N선도를 구현할 수 있다면 잔류응력을 고려한 피로수명평가가 가능할 것이다.

이러한 배경 하에서 제안된 열처리재의 S-N선도로부터 용접재의 S-N선도로 변환하기 위한 최종 모델은 다음과 같다<sup>(6)</sup>.

$$N = C \cdot (a_1/a_2)^{m/a_1} \cdot \sigma^{- (a_2/a_1) m} \quad (2)$$

여기서,  $N$ : 피로수명,

$C, m$ : 열처리재 S-N선도의 실험상수

$$a_1 = 1 + C_1(\sigma_{m1}/\sigma_u)$$

$$a_2 = 1 + C_1(\sigma_{m2}/\sigma_u)$$

$$\alpha_1 = 1 - C_2(\sigma_{m1}/\sigma_u)$$

$$\alpha_2 = 1 - C_2(\sigma_{m2}/\sigma_u)$$

$\sigma_{m1}$ : 열처리재에 대한 평균응력

$\sigma_{m2}$ : 용접재에 대한 평균응력과 잔류응력의 합

$\sigma_u$ : 인장강도

$C_1, C_2$ : 미지의 상수

위의 모델을 적용하여 임의의 응력에 대한 피로수명을 계산하고자 할 경우, 우선 동일 재료 및 동일 응력비에서 구해진 열처리재와 용접재에 대한 S-N선도를 이용하여 미지 상수  $C_1, C_2$ 를 결정하고, 식 (2)에 구하고자 하는 응력에 대한  $a_2, \alpha_2$ 를 계산하여 대입하면 된다.

한편, 저자 등<sup>(8)</sup>은 cruciform joint에 대한 열처리재 및 용접재에 대한 피로시험 결과와 용접잔류응력에 대한 계측 결과를 토대로 미지 상수를 결정하였는데, 그 값은 각각  $C_1=7.461, C_2=0.25$ 이다. Cruciform joint는 구조적 응력집중계수가 1.0정도여서 용접비드 형상의 영향을 배제할 수 있고, 이 응력집중계수만을 고려하는 Hot-Spot응력을 기준응력으로 사용할 경우, cruciform joint의 S-N 선도는 용접부의 형상과 무관하게 적용가능한 장점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup> 용접이음부의 초기 잔류응력을 계측하고, 잔류응력이완식과 등가응력법을 통해 얻어진 cruciform joint의  $C_1, C_2$ 를 이용하면, 다양한 형상의 용접이음부 피로수명평가가 가능하다. 이에 대한 사항은 다음절에서 상세히 언급한다.

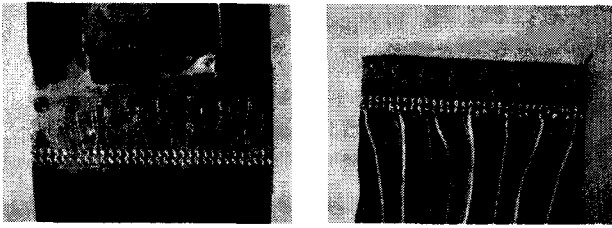
## 3. 다양한 용접이음에 대한 적용성 검토

본 절에서 몇 가지 대표적인 용접이음을 대상으로 용접비드 부근의 초기 잔류응력을 계측하고, 2절에서 제안된 피로강도평가 모델에 적용함으로써 그 성능을 검토하고자 한다.

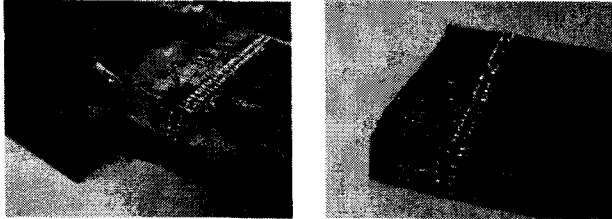
### 3.1 초기 잔류응력 계측

본 연구에 사용된 용접이음 시편은 cover plate, longitudinal stiffener, gusset, side attachment 등 4종류이고, 사용된 강재는 SM490B ( $\sigma_y=352\text{MPa}, \sigma_u=514\text{MPa}$ )이다. 상세한 시편형상과 치수는 참고문헌 (10)에 기재되어 있다. 초기 잔류응력 분포를 측정하기 위하여 절단법(sectioning method)을 이용하였다. Fig. 1은 잔류응력 계측을 위하여 2축 게이지를 부착한 시편 사진과 절단법을 적용하여 잔류응력 계측을 행한 후의 사진의 예이다.

Fig. 2는 시편폭 끝단으로부터 등간격 위치에서 측정된 잔류응력 계측결과이다. 그림에는 작용하중과 동일한 방향의 잔류응력만을 나타내었다. 계측된 결과를 살펴보면 용접비드가 위치한 곳에 높은 인장잔류응력이 작용함을 알 수 있다. Cover plate와 longitudinal stiffener의 경우 시편폭의 중앙에서 인장 잔류응력이 크게 작용하고, 이에 대해 gusset과 side attachment의 경우 시편 끝단임을 알 수 있으며, 이러한 결과는 용접이음에 대한 통상적인 잔류응력 분포<sup>(1)</sup>와 매우 유사한 것으로 판단된다.



(a) Cover plate



(b) Side attachment

Fig. 1 Measurement of residual stresses

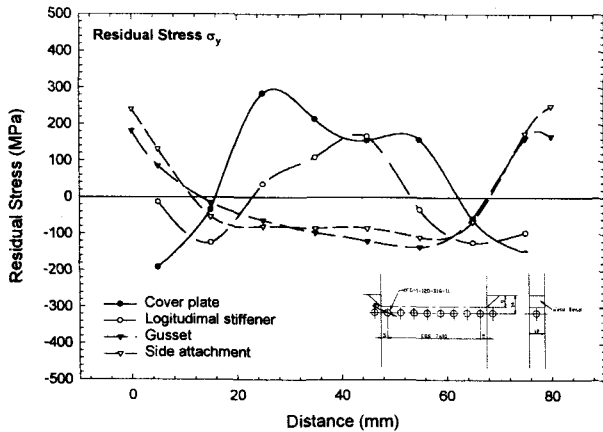


Fig. 2 Residual stress distributions in loading direction for each welded detail

통합 피로강도모델에서 피로수명을 계산하기 위해서는 상기 측정결과로부터 초기 잔류응력값  $(\sigma_r)_{ini}$ 의 입력이 필요하다. 피로균열 발생하는 위치가 인장 잔류응력이 높게 분포하는 위치와 일치하므로 cover plate와 longitudinal stiffener 경우 폭방향의 중심, side attachment와 gusset의 경우 폭방향의 끝단에서 계측된 평균값을 취하였다. 이와 같이 계산한 초기 잔류응력의 평균값을 Table 1에 정리하였다. Table 1에서  $(\sigma_r)_{ini}$ 는 gusset의 경우 133MPa( $0.38 \sigma_y$ )정도로써 cruciform을 제외한 4가지 용접이음시편 중 가장 낮으며, cover plate의 경우 184MPa ( $0.52 \sigma_y$ )로 가장 높은 수준임을 알 수 있다.

또한, 식 (1)에서  $\sigma_{ref}$ 의 외응력은 3차원 FEM해석결과로부터 잔류응력 계측점과 동일한 위치인 용접비드 선단에서 5mm 떨어진 지점의 응력집중계수를 곱하여 계산하였으며, 이는 잔류응력 이완 모델의 시험상수가 잔류응력 계

측점에서의 외응력을 사용하여 결정되었기 때문이다. Table 1은 3차원 FEM결과<sup>(11)</sup>에서 얻어진 응력집중계수를 각 시편별로 나타내었다.

Table 1 Results of residual stress measurement and stress concentration factor of 5mm position from weld bead for each welded joint

Joint Type	Cruciform	Cover plate	Logi. stiffener	Gusset	Side Attach.
$(\sigma_r)_{ini}$	92	184	137	133	152
$K_{t, 5mm}$	1.23	1.23	1.16	1.43	1.64

Unit :  $(\sigma_r)_{ini}$  (MPa)

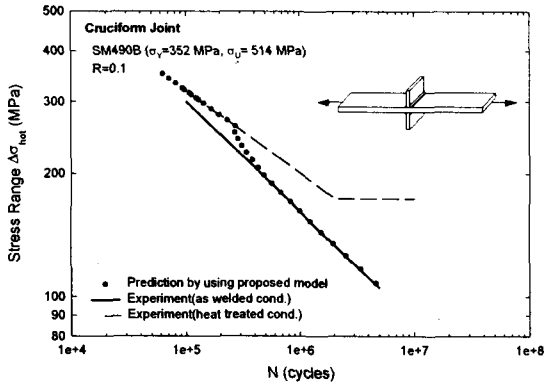
### 3.2 통합 피로강도 평가

식 (2)에서 미지의 상수값  $C_1, C_2$ 는 잔류응력을 제거한 열처리재의 S-N선도로부터 용접재 피로시험결과의 피팅을 통하여 결정되므로, 이 상수값을 구하기 위하여 각 시편별로 열처리재와 용접재에 대한 피로시험결과가 필요하다. 앞서 언급하였듯이, Hot-spot 응력을 기준으로 하는 cruciform joint에 대하여  $C_1, C_2$ 를 결정하면 동일한 재료의 다양한 형상의 용접이음시편에 대하여도 이 값을 적용할 수 있다. 따라서, 본 연구에 적용된 용접이음시편에 대한 미지 상수  $C_1, C_2$ 는 cruciform joint의 계산결과를 사용하였다.

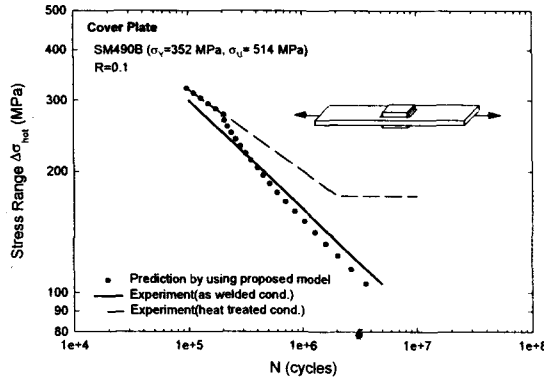
Fig. 3은 피로강도평가 모델을 적용하여 각 용접시편별로 계산한 수명예측결과와 Hot-spot 응력기준 피로시험결과를 비교한 것이다. 또한, 이 그림에 잔류응력을 제거한 열처리된 cruciform의 S-N선도도 포함하였다. 용접이음별 S-N선도 예측결과를 보면, 고응력 범위에서는 열처리재와 거의 동일한 피로거동을 보이다가 저응력 범위로 갈수록 피로강도는 점차적으로 감소하여 비열처리재의 것에 근접하는 경향을 보이고 있다. 또한, 고응력 범위에서 저응력 범위로 갈수록 뚜렷한 피로강도의 천이구간을 볼 수 있는데, 용접이음별로 약간의 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 고응력 범위에서 외하중에 의한 평균응력과 초기 잔류응력의 합(중첩 평균응력)이 항복응력을 초과하기 때문에 식 (1)의 잔류응력 이완식에서 나타낸 바와 같이 적은 하중반복수에서 초기 잔류응력이 완전히 이완된다. 그리고, 중첩 평균응력이 항복응력보다 낮은 저응력 범위에서는 잔류응력 이완량이 고응력범위에 비해 상대적으로 작거나 미소하기 때문에 이완되지 않고 남아 있어 잔류응력의 영향으로 피로강도가 저하됨을 알 수 있다.

### 4. 고찰

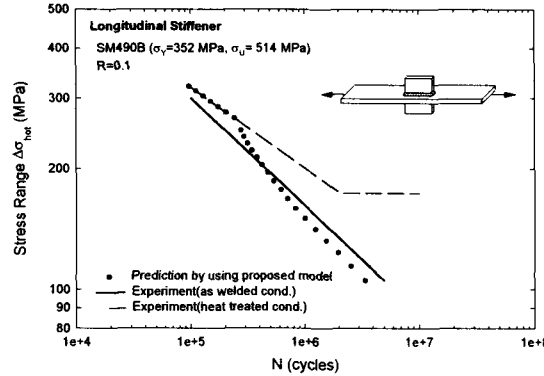
각 용접이음부에 대한 결과인 Fig.3을 살펴보면, cruciform의 경우 본 연구에서 제시한 통합 피로강도 평가



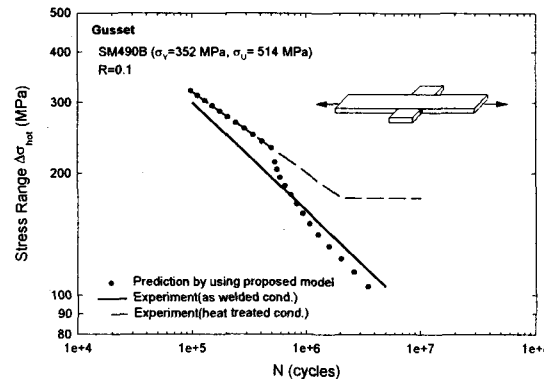
(a) Cruciform



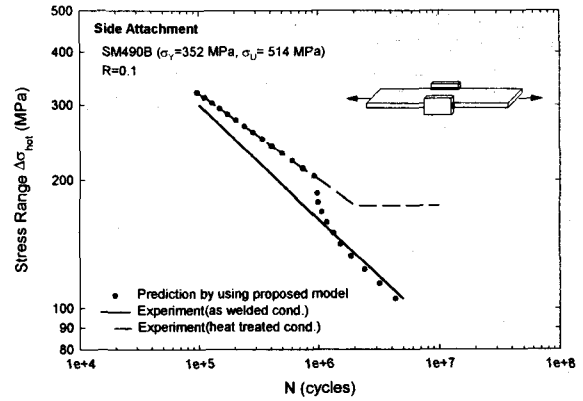
(b) Cover plate



(c) Longitudinal stiffener



(d) Gusset



(e) Side attachment

Fig. 3 Predicted S-N curves for each welded joints

모델에서  $C_1$ ,  $C_2$  를 통해 열처리된 S-N선도를 기준으로 잔류응력 이완을 고려한 비열처리 S-N선도의 예측결과는 Fig. 3 (a)와 같다. 여기서 얻어진 결과를 활용하여 나머지 용접이음부에 대한 예측결과는 대부분 실험치를 다소 과소평가하여, 피로수명평가 및 피로설계관점에서 안전측의 결과가 도출됨을 알 수 있다.

초기 잔류응력이 완전히 이완되지 못하고 외응력과 중첩되기 시작하는 천이구역은 cruciform, cover plate 및 longitudinal stiffener의 경우  $\Delta\sigma_{hot} = 252\sim 276\text{MPa}$  정도이다. 그 외 gusset과 side attachment는 각각 231MPa과 204MPa로 상대적으로 천이구역이 낮은 곳에 위치한다. 이는 gusset 및 side attachment의 초기 잔류응력이 다른 용접이음부에 비해 크지 않지만, 높은 구조적 응력집중계수 (1.43~1.64) 때문에 중첩응력값이 상대적으로 커져 낮은 외응력으로도 잔류응력 이완이 발생되었기 때문이다.

외응력에 의한 용접 잔류응력 이완을 고려한 통합 피로강도 평가 모델은 일정진폭응력이 작용하는 경우 잔류응력 이완량의 변화로 야기되는 평균응력의 변동특성을 묘사할 수 있고, 특히 하중반복수가  $2 \times 10^6$  cycles 이상인 장수명 영역에서 용접부의 경우 피로한도가 존재하지 않고, 낮은 응력준위에서도 피로파손이 일어나는 현상<sup>(1)</sup>도 설명할 수 있다. 그러나, 용접 잔류응력이 외력에 의해 완전히 이완되지 못하는 천이역에서 기존의 S-N선도와는 다르게 예측선도의 급격한 기울기 변화가 유발되는 특성이 관찰된다. 이 영역에 대한 현상학적인 검증을 위해 보다 많은 양의 피로실험 자료가 요구되므로, 추가적인 연구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 cover plate, longitudinal stiffener, gusset, side attachment 등 4가지의 대표적인 용접이음부를 대상으로 잔류응력 계측을 실시하고, 이를 통합 피로강도평가 모델에 적용하여 피로수명을 예측하여 이의 적용성을 검증하였다. 그 결

과를 Hot-spot응력 기준 피로시험결과와 비교/검토하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발된 모델에 의한 예측 결과는 시험결과와 대체로 일치하였고, 저응력 수준에서 피로수명평가 및 피로설계 관점에서 안전측의 결과가 도출되었다.

(2) 본 모델을 적용할 경우, 피로강도 모델의 미지의 상수  $C_1$ ,  $C_2$  및 초기잔류응력의 정확도가 피로수명 추정 결과에 매우 중요하다. 따라서, 보다 정도 높은 피로수명 추정을 위하여는 두 상수값을 결정할 때 이용되는 열처리 재 및 용접재의 S-N 선도를 정확히 산출하는 작업과 함께 잔류응력 계측시 높은 신뢰성을 확보하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

(3) 향후, 본 연구에서 제안된 모델의 신뢰성을 높이기 위하여 친이영역에서의 잔류응력 이완과 관련된 피로수명 변화에 대한 연구를 추진할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 한국기계연구원에서 수행한 "대형 용접구조물의 피로수명 예측기술 개발" 과제의 연구성과 중 일부이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Madox, S. J. (1991). "Fatigue strength of welded structures", Abington Publishing.
- (2) 강용구, 서창민, 박원종 (1993). "잔류응력에 의한 피로 균열면 형상변화 및 수명예측", 한국해양공학회지, 제 7권 제2호, pp. 246~256.
- (3) Vöhringer, O. (1987). "Relaxation of residual stress by annealing or mechanical treatment", Advances in Surface Treatment : Technology- Application-Effects, Vol. 4, pp. 376~396.
- (4) James, M. R. (1987). "Relaxation of residual stress an overview", Advances in Surface Treatment : Technology-Application-Effects, pp. 349~365.
- (5) Iida, K., Yamamoto, S., Takenashi, M. (1997). "Residual stress relaxation by reversed loading", Welding in the World / Le Soudage dans le Monde, Vol. 39, No. 3, pp. 138~144.
- (6) Throop et al. (1982). "Residual stress and stress relaxation", ed. E. Kula and V. Wesis, Plenum Press, pp. 205~226.
- (7) Matsuoka and Fujii (1995). "An evaluation method on fatigue crack initiation life at welded joints in steel structures", J. of SNAJ, Vol. 178, pp. 513~522.
- (8) 이탁기, 남용윤, 한승호, 신병천 (2001). "잔류응력을 고려한 용접부의 피로강도 평가 모델", 대한기계학회 2001년도 제2차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 236~241.
- (9) 한승호, 강성보, 신병천 (2001). "피로하중하 용접 잔류응력 완화의 정량적 평가", 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집 A, pp. 424~429.
- (10) Han, S. H. and Shin, B. C., "The use of hot spot stress for estimating the fatigue strength of welded components", Steel Research, Vol. 71, No. 1, pp. 46~473.
- (11) 건설교통부, 과학기술부, 산업자원부. (1999). "고속전철기술개발사업 - 대차개발", 1단계 보고서, 한국철도차량, 한국기계연구원, 98-2-1-5.