

고강도 저합금강의 저주기 피로특성

김재훈, 김덕회*· 이종현, 조성석, 전병환**

Low Cycle Fatigue Characteristics of High Strength Low Alloy Steel

Jae-Hoon Kim, Duck-Hoi Kim,

Jong-Hyun Lee, Seong-Seock Cho and Byoung-Hwan Jeon

Key Words: Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Plastic Strain Energy(소성변형에너지), Tempering Temperature(템퍼링 온도), ϵ -Cu(ϵ -구리), Cyclic Softening(주기적 연화)

Abstract

Low cycle fatigue tests are performed on high strength low alloy steels that be developed for submarine material. The relation between absorbed plastic strain energy and numbers of cycle to failure is examined in order to predict the low cycle fatigue life of structural steels by using plastic strain energy method. The cyclic properties are determined by a least square fit techniques. The life predicted by the plastic strain energy method is found to coincide with experiment data and results obtained from the Coffin-Manson method. Also the cyclic behavior of structural steels is characterized by cyclic softening with increasing number of cycle at room temperature. Especially, low cycle fatigue characteristics and microstructural changes of structural steels are investigated according to changing tempering temperatures. In the case of PFS steels, the ϵ -Cu is formed in 550C of tempering temperature and enhances the low cycle fatigue properties

1. 서 론

고강도 저합금강은 일반 산업분야 및 특히 잠수함, 함정 등의 방산 분야에도 널리 사용되는 재료이다. 고강도 저합금강이 무기체계에 사용되는 경우, 예컨대 잠수함은 실제 사용하는 과정에서 잠수와 부상을 반복적으로 하게되고 이로 인하여 높은 반복응력을 받게 되므로, 이런 구조물에 사용되는 고인성강은 다른 강재와는 달리 특히 저 주기 피로특성이 우수해야만 한다⁽¹⁾.

저주기 피로 특성인 변형률-수명에 의한 시험평가는 재료의 반응이 대부분 부재에 있어 변형률이나 변위에 의존한다는 관찰에 근거를 둔다.

일반적으로 하중이 작은 영역에서는 응력과 변형률이 선형적이다. 따라서 이 영역에서는 하중제어와 변형률 제어에 의한 시험결과는 동일하다. 그러나, 저 사이클 영역 즉 하중이 큰 범위에서의 반복 응력-변형률 반응과 재료의 거동은 변형률 제어 조건 하에서 가장 잘 모델화 시킬 수 있다⁽²⁾.

저사이클 피로에 대한 연구는 Coffin과 Manson이 피로손상 중 발생하는 반복 소성 변형률(cyclic plastic strain)에 대한 중요성을 인식하고, 이를 정리하여 Coffin-Manson법을 만든 것을 출발로 하여, 그 후 반복 소성 변형률과 피로수명과 의 관계에 대한 체계적인 연구가 수행되어 왔다⁽³⁾. 일반적으로 높은 변형률하에서 피로 손상은 반복소성변형률에 의하여 발생하며 회복되지 않은 소성변형률은 변형에너지를 소비하므로 소성 변형에너지는 손상과정에서 중요한 역할을 하게 된다. Morrow⁽⁴⁾는 소성변형에너지를 이용하여 피

* 충남대학교 기계설계공학과

E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr

TEL:(042)821-6645 FAX:(042)822-7366

** 충남대학교 금속공학과

로수명을 예측하는 개념을 제시하였으며, 이를 근거로 하여 Eyrin^{(5),(7)}은 소성변형에너지 손상법칙을 기초로 피로파손 기준을 제안하였고, Gilgo와 Vergani⁽⁸⁾등은 이 에너지 기준을 이용하여 노치를 가진 시험편의 피로수명예측에 적용하여 피로수명을 계산하였다.

본 연구에서는 잠수함용 소재로 개발된 고강도 저합금강에 대하여 저주기 피로시험을 수행하여 피로수명을 평가하였다. 피로 수명식은 기존에 널리 사용되는 Coffin-Manson법과 소성변형에너지법을 이용하여 예측하였다. 특히 템퍼링 온도에 따른 저주기 피로 특성을 평가하여 고강도 저합금강을 실제 구조물에 적용하는데 필요한 데이터를 획득하였다.

2. 시험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 450℃, 550℃, 650℃에서 템퍼링한 PFS강, HY 100강, HSLA 100강이다. PFS강은 기존 수입에 의존하던 HY 100강 및 HSLA 100강을 대신하여 국내에서 제조된 강이다. HY 100강 및 HSLA 100강의 템퍼링 온도는 650℃이다.

각 재료의 화학적 조성은 Table 1~3에 기계적 특성은 Table 4에 보여주고 있다.

Table 1 Chemical composition of PFS steel

C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mo	Na
0.054	0.202	0.5	0.006	1.32	3.48	0.58	0.48	0.036

Table 2 Chemical composition of HY100 steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.18	0.27	0.40	0.016	0.013	2.39	1.76	0.42	0.04

Table 3 Chemical composition of HSLA 100 steel

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb
0.075	0.26	1.08	0.017	1.67	0.98	0.44	1.03	0.02

Table 4 Mechanical properties of test materials

Materials	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
PFS 450	218.57	942.65	981.26	13.08
PFS 550	242.51	858.14	895.51	14.06
PFS 650	241.50	814.91	858.47	14.00
HY 100	218.02	775.25	865.60	14.94
HSLA 100	217.49	680.11	728.94	13.60

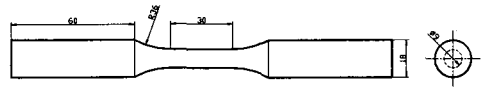


Fig. 1 Shape and dimension of specimen

Fig. 1은 저주기 피로 시험편의 형상을 보여주고 있다. 시험편은 ASTM E 606⁽⁹⁾에 준하여 uniform gage type으로 제작하였다.

2.2 시험방법

시험에 사용한 피로시험기는 유압서보 피로 시험기(model : MTS 810)로 최대 용량은 25톤이며, 상온 중에서 시험하였다. 시험편의 평행부를 잡아 25mm의 변위측정기(extensometer)를 부착하여 변형을 일정상태에서 시험하였다. 대부분 금속에서의 저사이클 피로 시험이 ± 0.2%~2.0% 사이에서 수행된다는 점을 감안하여⁽¹⁰⁾, 피로 시험은 주파수를 1Hz로 일정하게 하고, 전변형률 범위(total strain range)가 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.3%, 1.5%, 2.0% 하에서 삼각파형 연속 저사이클 피로 실험을 수행하였다. 피로수명은 시험편의 파면 보호를 위하여 20% 응력 감소 시점으로 하는 것이 적당하다는 연구도 있으나, 본 연구에 사용된 재료인 고강도 저합금강은 연신율이 상당히 큰 점을 감안하여 인장하중이 98.1N(10kgf) 이하로 거의 작용하지 않는 시점을 피로 수명으로 간주하였다⁽¹¹⁾. 각 시험편에 대해서 적당한 사이클마다 변형률 및 하중값을 자동 저장하였다. Fig. 2는 저주기 피로 시험 사진을 보여주고 있다.

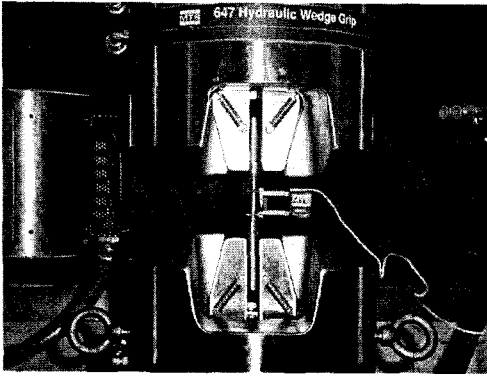


Fig. 2 Photo of low cycle fatigue test

3. 소성변형에너지법

저주기 피로시험동안 발생하는 소성변형에너지는 대부분 열로 소비되며, 나머지는 재료에 흡수된다. 따라서, 피로 손상은 주기적 소성 변형률에 의하여 발생하며, 소성변형에너지는 손상의 진전에 중요한 역할을 한다.

사이클 당 소성변형에너지, ΔW_p 는 Fig. 3과 같은 히스테리시스 선도(hysteresis loop)의 면적과 같다. 소비되는 총 에너지는 이들 선도의 면적의 합으로 나타낼 수 있으며, 재료에 따라 에너지를 흡수할 수 있는 일정용량을 가지고 있어 이 한계치에 도달하면 재료는 파손된다. Fig. 3과 같이 재료가 피로하중을 받게되어 한 사이클 당 소비되는 소성변형에너지는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.^{(12),(13)}

$$\Delta W_p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

식 (1)에 식 (2)와 같은 경계조건을 대입하여 다시 정리하면, 식 (3)과 같다.

$$\sigma = 2\sigma_a, \quad \epsilon = 2\epsilon_p \quad (2)$$

$$\Delta W_p = 4\sigma_a \epsilon_a^b - 2 \int_0^{2\sigma_a} \epsilon_p d\sigma \quad (3)$$

Morrow는 응력-변형률 관계가 식 (4)와 같은 power law를 따른다고 가정하여,

$$\sigma = K'' (\epsilon^p)^{n''} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{2\sigma_a}{(2\epsilon_a^p)^{n''}} (\epsilon_p)^{n''} \quad (5)$$

식 (5)를 (3)에 대입하며,

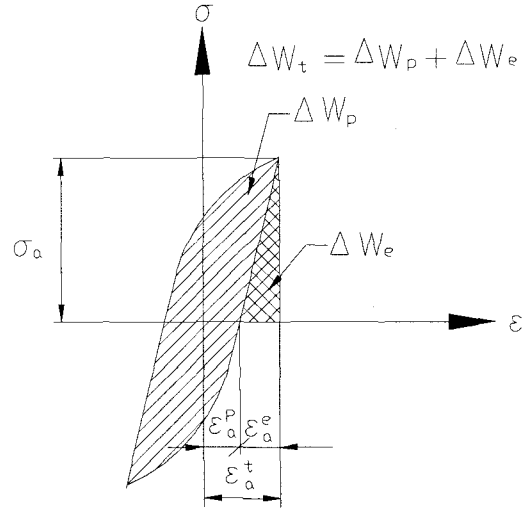


Fig. 3 Plastic and elastic strain density definition

$$\Delta W_p = 4\sigma_a \epsilon_a^b \frac{1-n''}{1+n''} \quad (6)$$

이다. 여기서, n'' 을 응력-변형률 관계의 경화 지수 n' 과 같다고 가정하고,

$$\epsilon_a^b = \left(\frac{\sigma_a}{K''} \right)^{1/n''} \quad (7)$$

이므로, 식 (7)과 같은 소성변형에너지식을 얻을 수 있다.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 시험 재료의 저주기 피로 수명 비교

Fig. 4에 각 재료의 변형률-수명 선도를 나타낸 것이다. 550°C 템퍼링한 PFS강의 저주기 피로 수명 다른 재료에 비하여 약간 우수한 것을 볼 수 있다.

PFS강과 같은 고강도 고인성강은 Cu를 첨가하면 대기 중 또는 해수 중에서 내식성이 향상되고 석출경화로 인하여 항복강도가 상승하는 것으로 알려져 있다. 또한 Cu는 오스테나이트 페라이트 변태 온도를 낮추어 변태속도를 느리게 하거나 주로 석출경화를 목적으로 첨가된다.⁽¹⁴⁾ 따라서, 본 연구에서도 Cu의 석출경화가 발생하리라고 예측되는 템퍼링 온도 구간에 대하여 저주기 피로 특성을 평가한 것이다.

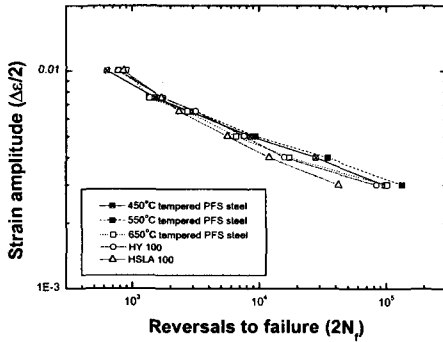


Fig. 4 Strain-life curves of test materials

각각의 온도에서 열처리한 PFS강의 경우, 최대 경도(peak hardness)는 450°C에서 템퍼링한 PFS강에서 발생하였고, TEM 및 고분해능 전자현미경을 이용하여 관찰한 결과 Cu-clusters가 경화를 촉진한 것으로 판단된다. 템퍼링 시간 및 온도가 최대 경도 이상으로 증가할수록, ε-Cu가 생성되고 인성은 증가하고 경도는 감소하였다. 그러나, 650°C의 템퍼링 온도하에서는 과시효(over aging)로 인하여 인성 및 피로 수명은 저하되었다⁽¹⁾.

HY 100강 및 PFS강, HSLA강의 가장 주된 차이는 탄소의 함유량이다. 일반적으로 강에 탄소의 함유량이 증가하면, 강도는 증가하지만 인성은 감소하므로, 저주기 피로 특성이 저하되는 것으로 판단된다.

4.2 저주기 피로수명 예측식

일반적으로 많이 사용되는 저 사이클 피로 수명식은 Coffin-Manson⁽³⁾식으로, 식 (8)과 같다.

$$\frac{\Delta \epsilon_f}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (8)$$

여기서,

σ_f : 피로강도계수 (fatigue strength coefficient)

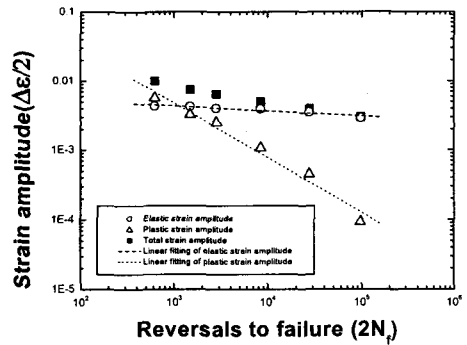
ϵ_f' : 피로연성계수 (fatigue ductility coefficient)

b : 피로강도지수 (fatigue strength exponent)

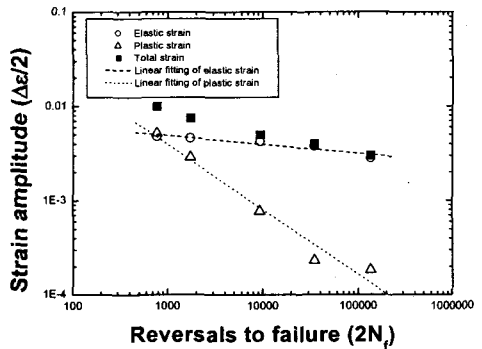
c : 피로연성지수 (fatigue ductility exponent)

$2N_f$: 파단까지의 반복수 (reversal to failure)

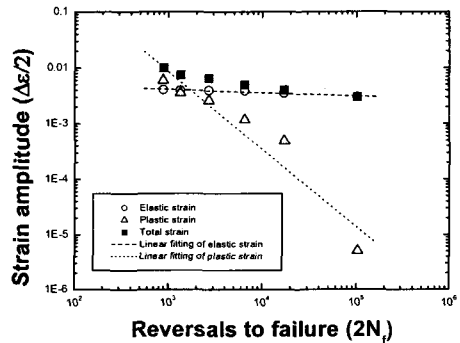
이다. Fig. 5 및 Table 5는 식 (8)을 이용하여 얻은 결과를 나타낸 것이다.



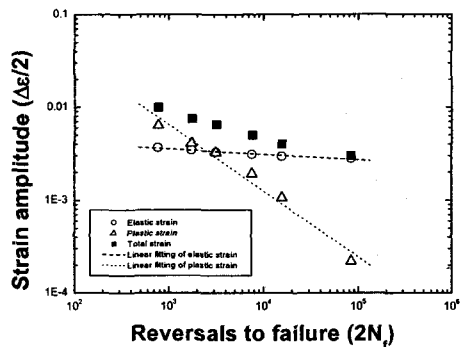
(a) 450°C tempered PFS steel



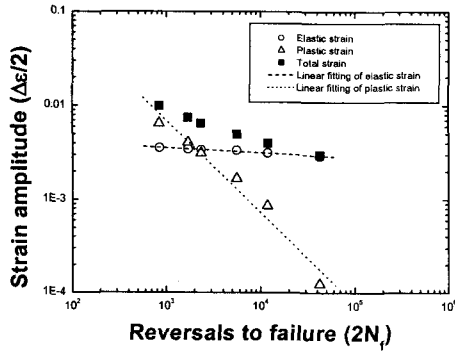
(b) 550°C tempered PFS steel



(c) 650°C tempered PFS steel



(d) HY 100 steel



(e) HSLA 100 steel

Fig. 5 Strain amplitude and life curves for test materials

Table 5 Coffin-Manson equations of test materials

Materials	Coffin-Manson formula
PFS 450	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{1589}{218792} (2N_f)^{-0.074} + 1.16 (2N_f)^{-0.792}$
PFS 550	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{2092.47}{219233} (2N_f)^{-0.096} + 0.47 (2N_f)^{-0.692}$
PFS 650	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{1527.02}{241748} (2N_f)^{-0.062} + 1.49 (2N_f)^{-0.818}$
HY 100	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{1166.80}{218233} (2N_f)^{-0.059} + 0.88 (2N_f)^{-0.711}$
HSLA 100	$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{1113.53}{217703} (2N_f)^{-0.053} + 1.14 (2N_f)^{-0.762}$

앞장에서 설명한 소성변형에너지법을 근거로 Ellyin^{(5),(7)}등은 소성변형에너지를 이용한 피로수명 예측식을 제안하였다. 이 개념은 소성변형에너지는 파단반복수의 1/2 사이클에서 이력곡선의 면적으로, 식 (9)와 같이 파단반복수와 관계로 표현될 수 있다.

$$\Delta W_p = A(N_f)^m \quad (9)$$

여기서, ΔW_p 는 파단수명의 1/2 사이클에서 소성변형에너지량이며, N_f 는 파단까지의 반복사이클(cycles to failure)이다. A 와 m 은 실험 상수이다. Table 6은 이 방법을 이용하여 구한 각 재료의 저주기 피로수명예측식이다. Fig. 6은 Coffin-Manson 및 소성변형에너지법에 의하여 구한 저주기 피로 수명 예측식 및 시험 결과를 비교한 그래프이다. 대부분의 경우에서 시험결과와 예측식에 의한 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 그

리나, 전 변형률 범위 $\Delta \epsilon = 0.6\%$ 와 같이 저주기 피로 수명이 긴 경우 즉 소성변형률이 적고 탄성 변형률이 지배적인 경우에는 소성 변형에너지법에 의한 결과들은 큰 오차를 보이는데 이는 히스테리시스의 루프의 면적이 매우 작아 소성변형에너지량이 매우 작게 계산되어 생긴 오차로, 이 영역에서는 소성변형에너지법을 이용하여 수명을 예측하는 것이 적합하지 않음을 알 수 있다.

Table 6 The predicted equation of low cycle fatigue life calculated by plastic strain energy

Materials	Plastic strain energy method
PFS 450	$\Delta W_p = 826.00 (N_f)^{-0.688}$
PFS 550	$\Delta W_p = 1760.60 (N_f)^{-0.793}$
PFS 650	$\Delta W_p = 912.43 (N_f)^{-0.712}$
HY 100	$\Delta W_p = 417.75 (N_f)^{-0.584}$
HSLA100	$\Delta W_p = 1914.41 (N_f)^{-0.797}$

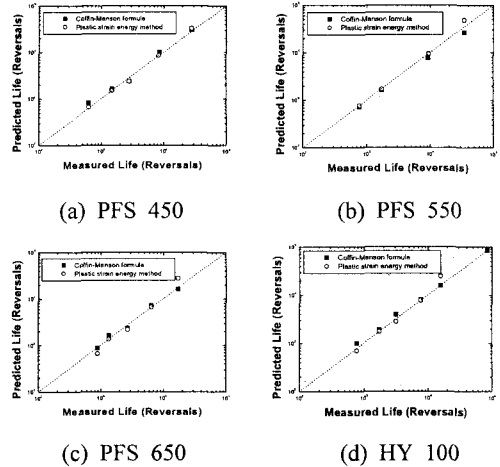


Fig. 6 Measured life versus predicted life of test materials

4.3 피로파면 및 재료의 주기적 거동

Fig. 7은 주사식 전자 현미경(SEM)을 이용하여 $\Delta \epsilon = 2.0\%$ 의 시험편의 저주기 피로파면을 관찰한 결과이다. 사진에서 볼 수 있듯이 연성파면이며, 스트라이에이션 간격은 $200\mu\text{m} - 250\mu\text{m}$ 로 거의

비슷한 것을 볼 수 있다. 모든 시험편은 주기적 연화(cyclic softening) 현상을 보이고 있어, Manson의 예측식과도 잘 일치한다.

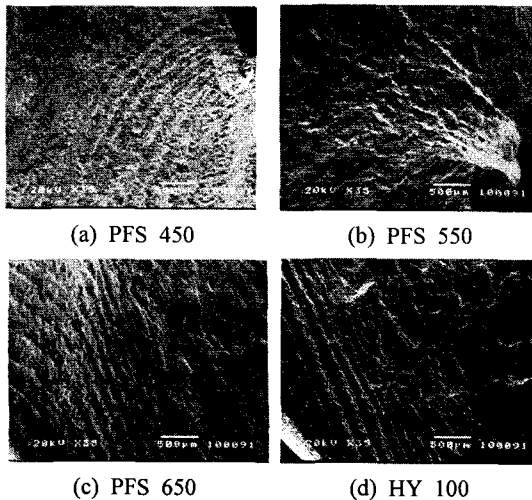


Fig. 7 SEM images of fracture surface with $\Delta \epsilon = 2.0\%$

5. 결론

- (1) 550°C 템퍼링한 PFS강의 저주기 피로특성이 가장 우수하나, 그 차이는 크지 않다. 템퍼링 온도가 550°C인 PFS강의 저주기 피로특성은 ϵ -Cu의 형성에 의하여 향상되었다.
- (2) 소성변형에너지법에 의하여 예측된 저주기 피로 수명식은 Coffin-Manson법 및 실험결과와 잘 일치하였다.
- (3) 모든 재료는 주기적 연화를 보이고 있으며, 이는 인장시험을 근거로 한 Manson의 예측식과 잘 일치한다.

참고문헌

- (1) 국방과학연구소, 2000, PFS강 기계적 특성 평가, ADD TEDC - 411 - 010275.
- (2) Polak, J., 1991, *Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals*, Elsevier.
- (3) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall.
- (4) Feltner, C. E. and Morrow, J. D., 1961, "Micro

plastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture", *Journal of Basic Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 15~22.

- (5) Ellyin, F. and Kujawski, D., 1984, "Plastic Strain Energy in Fatigue Failure", *Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, No. 4, pp. 342~347.
- (6) Lefebvre, D. and Ellyin, F., 1984, "Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cycle Fatigue", *International Journal of Fatigue*, Vol. 6, No. 1, pp. 9~15.
- (7) Ellyin, F., 1985, "Effect of Tensile Mean Strain on Plastic Strain Energy and Cyclic Response", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 119~125.
- (8) Giglio, M. and Vergani, L., 1995, "Life Prediction of Notched Component", *Trans. of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, No. 1, pp. 50~56.
- (9) ASTM, 1996, "Tentative Recommended Practice for Constant-Amplitude Low Cycle Fatigue Testing", ASTM E-606.
- (10) Raske D. T and Morrow J. D., 1969, "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing", *Manual on Low Cycle Fatigue Testing*, ASTM STP 465, pp. 1~25.
- (11) 권재도, 우승완, 박중철, 이용선, 박윤원, 2000, "주조 스테인레스강 CF8M의 430°C 열화 거동에 관한 연구(II) -저사이클 피로특성 평가-", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제9호, pp. 2183~2190.
- (12) 백수곤, 현중섭, 송기욱, 홍성인, 1997, "소성 변형에너지법을 이용한 1Cr0.5Mo강의 저주기 피로 특성에 관한 연구", 한국재료학회지, 제7권, 제11호, pp.1007~1011.
- (13) 현중섭, 백수곤, 송기욱, 1998, "소성변형에너지에 의한 유지시간효과를 고려한 1Cr-0.5Mo강의 저사이클 크리프-피로 수명예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제12호, pp. 2093~2099.
- (14) 박태원, 심인옥, 김영우, 강창윤, 1995, "열분 석법에 의한 Cu를 함유한 HSLA강의 시효거동에 관한 연구", 대한금속학회지, Vol. 33, No. 1, pp. 57~64.