

## 전변형률 에너지밀도를 이용한 고강도 저합금강의 저주기 피로수명 예측

김재훈\*, 김덕희\*\*

### Low Cycle Fatigue Life Prediction of HSLA Steel Using Total Strain Energy Density

Jae Hoon Kim\* and Duck Hoi Kim\*\*

#### ABSTRACT

Low cycle fatigue tests are performed on the HSLA steel that be developed for a submarine material. The relation between strain energy density and numbers of cycles to failure is examined in order to predict the low cycle fatigue life of HSLA steel. The cyclic properties are determined by a least square fit techniques. The life predicted by the strain energy method is found to coincide with experimental data and results obtained from the Coffin-Manson method. Also the cyclic behavior of HSLA steel is characterized by cyclic softening with increasing number of cycle at room temperature. Especially, low cycle fatigue characteristics and microstructural changes of HSLA steel are investigated according to changing tempering temperatures. In the case of HSLA steel, the  $\epsilon$ -Cu is formed in 550°C of tempering temperature and enhances the low cycle fatigue properties.

**Key Words** : Low cycle fatigue(저주기피로), Total strain energy density(전변형률에너지밀도), Plastic strain energy density(소성변형률에너지밀도), Coffin-Manson method(Coffin-Manson법), Cyclic softening(주기적 연화)

#### 기호설명

$\Delta\epsilon$  = total strain range  
 $\Delta\epsilon/2$  = total strain amplitude  
 $\Delta W_t$  = total strain energy density  
 $\Delta W_p$  = plastic strain energy density  
 $b$  = fatigue strength exponent  
 $c$  = fatigue ductility exponent

$\sigma_f'$  = fatigue strength coefficient  
 $\epsilon_f'$  = fatigue ductility coefficient  
 $K'$  = cyclic strength coefficient  
 $n'$  = cyclic strain hardening exponent

#### 1. 서론

고강도 저합금강(high strength low alloy, HSLA)은 일반산업 분야 및 특히 방산 분야에도 널리 사

2002년 1월 2일 접수  
\* 충남대학교 기계설계공학과  
\*\* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

용되는 소재이다. 특히 방산분야에 사용하는 소재는 고성능 및 고기능성을 갖는 무기체계 개발을 위해서 강재의 고강도-고인성은 필수적이다. 현재 세계적으로 건조중인 잠수함에는 항복강도 689MPa 이상급의 강재가 요구되므로, 항복강도 689MPa급의 DS100강과 896MPa 정도의 DS130강이 적용되고 있다. 이들 강재는 모재와 용접 열 영향부(heat affected zone; HAZ)의 물성이 우수하여 강판 자체로는 문제가 없으나, 다량의 탄소 및 합금원소 함유로 인하여 용접 시 입열량에 제한이 가해지고 저온균열 방지를 위해 용접시공 조건이 엄격해지는 문제가 있어 이에 대한 개선이 요구되어 왔다. 이러한 관점에서 용접성이 획기적으로 개선되어 인장강도 490MPa급의 강재에 적용되는 용접조건으로도 용접이 가능한 심해용 고강력강의 개발의 일환으로써, DS100강과 동일한 강도와 인성 수준을 나타내며, 용접시 예열 생략이 가능한 Cu를 가하여 합금 설계된 HSLA강의 개발이 시작되었다. 본 논문에서 시험한 HSLA강은 기존 수입 소재를 대신하여 잠수함, 함정 등의 해상 무기 체계에 적용하기 위하여 국내에서 개발된 구조용 고강도 저합금강이다. 고강도 저합금강이 해상무기 체계에 사용되는 경우, 예컨대 잠수함은 실제 사용하는 과정에서 잠수와 부상을 반복적으로 하게 되고, 이로 인하여 높은 반복응력을 받게 되므로, 이런 구조물에 사용되는 고인성강은 다른 강재와는 달리 특히 저주기 피로특성이 우수해야만 한다. 일반적으로 요구되는 잠수함용 강재의 저주기 피로 특성으로는 0.8YS(yield strength)의 반복응력 하에서 약 30,000cycle 이상의 수명이 요구되고 있다<sup>(1)</sup>.

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 피로수명과의 관계에 대한 체계적인 연구가 수행되어 왔다<sup>(2,3)</sup>. 일반적으로 높은 변형률 하에서 피로 손상은 반복소성변형률에 의하여 발생하며 회복되지 않은 소성변형률은 변형 에너지를 소비하므로 소성변형에너지는 손상과정에서 중요한 역할을 하게 된다. Morrow<sup>(4)</sup>는 소성변형 에너지를 이용하여 피로수명을 예측하는 개념을 제시하였으며, 이를 근거로 하여 Ellyin<sup>(5)~(7)</sup>은 소성 변형에너지 손상법칙을 기초로 피로파손 기준을 제안하였다. 기 발표된 논문<sup>(8)~(10)</sup>을 통하여 HSLA강

의 저주기 피로 특성에 소성 변형 에너지 손상법칙을 적용하여 발표하였다. 이 결과에 의하면 비교적 소성변형률이 지배적인 저주기 피로영역에서는 정확하게 피로수명을 예측하였으나, 소성변형률밀도가 작은 긴 수명영역으로 갈수록 오차가 커짐을 알 수 있었다. 따라서, 에너지 파라미터를 이용하여 저주기 피로수명 영역 뿐 만 아니라 긴 수명 영역의 변형률제어피로 시험 결과들도 정확히 예측할 수 있는 피로수명 예측방법의 필요성이 대두되었고, 이에 전변형률에너지법을 적용하게 되었다. 전변형률에너지(total strain energy)는 소성변형률에너지와 탄성변형률에너지의 합으로 표현되는 파라미터로, 변형률제어시험 결과 중 소성변형률에너지가 상대적으로 작은 긴 수명 영역에서의 피로시험 결과들도 잘 예측할 수 있는 장점이 있다<sup>(11,12)</sup>.

따라서 본 논문에서는 잠수함용 고강도저합금의 변형률제어 저주기 피로시험 결과를 소성변형률에너지법 및 전변형률에너지법을 이용하여 피로 수명 예측식을 구하였고, 기존에 널리 사용되는 Coffin-Manson법 및 시험결과와 비교 평가하였다. 특히 템퍼링 온도 변화에 따라 Cu 석출경화에 의한 HSLA강의 저주기 피로 특성을 평가하여 고강도 저합금강을 실제 구조물에 적용하는데 필요한 데이터를 획득하였다.

## 2. 재료 및 시험 방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 잠수함용 소재로 국내에서 개발된 HSLA강이다. Table 1에 재료의 화학적 조성을 나타내었다. Table 1과 같은 화학적 조성의 Cu를 함유한 고강도 저합금강(HSLA)은 일정한 템퍼링 온도에서 석출경화가 발생한다. 따라서 재료를 무기체계에 적용하기 위해서는, Cu의 석출경화가 발생되리라 예측되는 450°C ~ 650°C 온도구간에서 소재를 템퍼링 한 후 재료의 거동을 평가하여야 한다<sup>(13)</sup>. 따라서, 본 논문은 Table 1과 같은 조성을 갖는 HSLA강의 석출경화에 따른 저주기 피로 특성 변화를 살펴보기 위하여, 다양한 템퍼링 온도 하에서 재료를 제작하였다. 참고로 본 연구에서는 소재를 잠수함 재료로 사용 시 용접 단계에서 발생하는 온도영향은 고려하지 않았다.

본 시험에 사용된 재료의 제작과정은 다음과 같다. 100톤 전로를 이용하여 제강한 후 보조 정련 과

Table 1 Chemical compositions of HSLA steel (wt.%)

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

Table 2 Mechanical properties for HSLA steel tempered at various temperatures

Temper temperature (°C)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
450	218.57	942.65	981.26	13.08
550	242.51	858.14	895.51	14.06
650	241.50	814.91	858.47	14.00

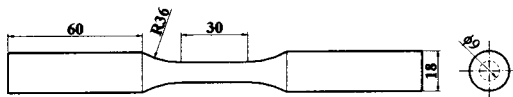


Fig. 1 Shape and dimension of specimen

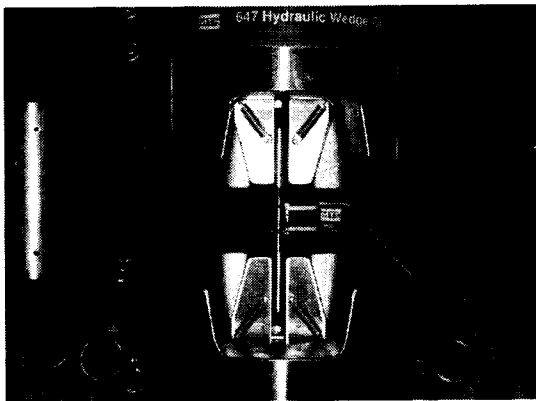


Fig. 2 Photo of low cycle fatigue test

정을 거쳐 연속주조에 의해 220mm slab로 제조하였다. 제조된 slab의 표면에 존재하는 산화층을 scarfing 공정에 의해 제거한 후 1150°C에서 재가열처리 및 sizing 압연, scarfing 공정을 거쳐 25mm의 판재로 제조하였다. 압연강은 900°C에서 용체화 처리 후 급냉시킨 뒤, 450°C, 550°C 혹은 650°C에서 1시간씩 템퍼링한 후 공냉시켰다. Table 2는 각각의 온도에서 템퍼링 열처리 한 후 인장시험을 통하여

얻은 기계적 특성값이다. 시험편은 세가지 템퍼링 온도의 총 3가지로, ASTM E 606<sup>(14)</sup>에 준하여 Fig. 1과 같은 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% 사이의 전변형률 진폭(total strain amplitude)에서 수행된다는 점을 감안하여<sup>(14)</sup>, 피로 시험은 주파수를 1Hz로 일정하게 하고, 전변형률 진폭이 0.2% ~ 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<sup>(16)</sup>.

각 시험편에 대해서 적당한 사이클마다 변형률, 하중 및 응력 등을 자동 저장하였다. Fig. 2는 저주기 피로 시험 모습을 보여주고 있다.

## 3. 전변형률 에너지 밀도

저주기 피로시험 동안 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,  $\Delta W_p$ 는 Massing 형태의 재료 거동을 보이는 경우 Fig. 3과 같은 히스테리시스 선도(hysteresis loop)의 면적과 같다. 본 연구에서 사용한 HSLA강의 경우, 안정화된 수명 사이클인 반 수명(half life)에서 반복적인 히스테리시스 선도를 관찰한 결과 인장과 압축에서 대칭 되는 거동을 보이는 있어 Massing 형태의 재료이므로 본 이론을 적용하는데 적합함을 알 수 있었다<sup>(1)</sup>. 소비되는 총 에너지는 히스테리시스 선도의 면적의 합으로 나타낼 수 있으며, 재료에 따라 에너지를 흡수할 수 있는 일정용량을 가지고 있어 이 한계치에

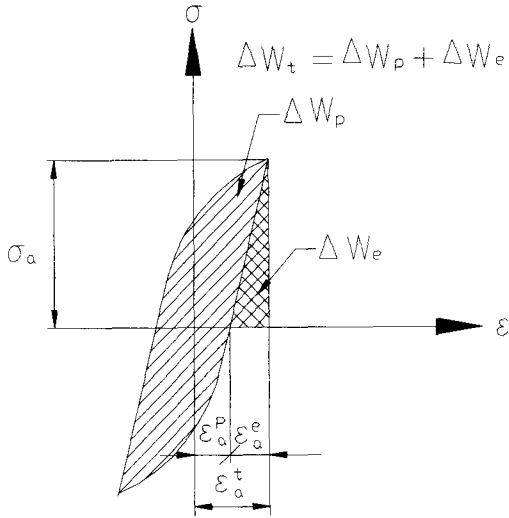


Fig. 3 Plastic and elastic strain density definition

도달하면 재료는 파손된다. Fig. 3과 같이 재료가 피로하중을 받게되어 한 사이클 당 소비되는 소성 변형에너지는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(17,18)</sup>

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

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

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

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

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 대입하면,

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

이다. 여기서,  $n''$ 을 응력-변형률 관계의 경화 지수 (cyclic strain hardening exponent)  $n'$ 과 같다고 가정하고,

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

이므로, 식 (8)과 같은 소성변형에너지식을 얻을 수

있다.

$$\Delta W_p = 4K''^{(-1/n')} \sigma_a^{\frac{1+n'}{n'}} \frac{1-n'}{1+n'} \quad (8)$$

따라서, 식 (8)의 소성변형률에너지를 이용한 재료의 저주기 피로수명예측식은 식 (9)와 같다. 이 개념은 소성변형률에너지는 과단반복수의 1/2 사이클에서 이력곡선의 면적으로 식 (9)와 같이 과단반복수와의 관계로 표현될 수 있다는 개념을 기초로 한다.

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

여기서,  $\Delta W_p$ 는 과단수명의 1/2 사이클에서 소성변형률에너지량이며,  $N_f$ 는 과단까지의 반복사이클 (cycles to failure)이고,  $A$ 와  $m$ 은 실험 상수이다. 그런데 소성변형률에너지법을 적용 시 반복하중에 의한 변형률 진폭이 작아질수록 소성변형률 진폭도 작아지므로 따라서 소성변형률 에너지밀도는 매우 작고 이를 측정하는 것은 어려워진다. 그러나 낮은 하중 수준에서의 피로, 즉 고사이클 피로에서 소성변형률은 매우 중요한 역할을 하므로 이에 대한 고려가 필수적이다.

이런 이유로 전 수명영역에서의 변형률에너지 밀도를 피로손상변수로 사용하기 위하여 Ellyin과 Kujawski는 Fig. 3과 같이 히스테리시스 선도의 탄성 변형률 에너지(elastic strain energy)와 소성변형률 에너지(plastic strain energy)의 합으로 표현되는 전변형률에너지 밀도(total strain energy density),  $\Delta W_t$ 를 다음과 같이 표현하였다.<sup>(11,12)</sup>

$$\Delta W_t = \Delta W_p + \Delta W_e \quad (10)$$

여기서,  $\Delta W_e$ 는 아래식을 이용하여 계산할 수 있다.<sup>(11,12)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta W_e &= \frac{1}{2E} \left( \frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_m \right) = \frac{\sigma_{\max}^2}{2E} \text{ for } \sigma_{\min} \leq 0 \\ &= \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2}{2} \text{ for } \sigma_{\min} > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

즉, 총변형률 에너지 밀도,  $\Delta W_t$ 는 식 (8)과 식 (11)에 의하여  $R=-1$ 의 경우 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta W_t = 4K''^{(-1/n')} \sigma_a^{\frac{1+n'}{n'}} \frac{1-n'}{1+n'} + \frac{\sigma_{\max}^2}{2E} \quad (12)$$

식 (12)를 이용한 전변형률에너지법에 의한 피로수명예측식은 식 (13)과 같다.

$$\Delta W_t = x(N_f)^a \quad (13)$$

#### 4. 시험 결과 및 고찰

##### 4.1 템퍼링온도에 따른 HSLA강의 피로수명 비교

Fig. 4에 각 재료의 변형률-수명 선도를 나타내었다. 시험상의 오차일 가능성도 있으나, 550°C에서 템퍼링한 HSLA강의 저주기 피로 수명이 다른 재료에 비하여 약간 우수한 것을 볼 수 있다.

HSLA강과 같은 화학적 조성을 갖는 고강도 고인성강에 Cu를 첨가하면 대기 또는 해수 중에서 내식성이 향상되고 석출경화로 인하여 항복강도가 상승하는 것으로 알려져 있다. 또한 Cu는 오스테나이트 페라이트 변태온도를 낮추어 변태속도를 느리게 하거나, 석출경화의 목적으로 첨가된다<sup>(13)</sup>. 따라서 본 연구에서도 Cu의 석출경화가 발생되리라 예측되는 온도구간인 450°C ~ 650°C에 대하여 저주기 피로특성을 평가하였다. 열처리에 따른 최대경도 (peak hardness)는 450°C에서 템퍼링한 HSLA강에서 발생하였고, TEM 및 고분해능 전자현미경을 이용하여 관찰한 결과 Cu-clusters가 경화를 촉진한 것으로 판단된다. 템퍼링 시간 및 온도가 최대 경도 이상으로 증가할수록, ε-Cu가 형성되고 인성은 증가하고 경도는 감소하였다. 그러나, 650°C의 템퍼링 온도하에서는 과시효(over aging)로 인하여 인성 및 저주기 피로 수명은 저하되었다<sup>(19)</sup>.

템퍼링 온도에 따라 동일한 변형률 하에서도 다른 피로수명을 보이는 이유는 석출물의 성장과 이로 인한 전위 하부구조의 발달에 기인한다. 즉, 저온 템퍼링 시 기지조직은 여전히 내부적으로 뒤틀린 상태를 유지함으로써 작은 변형률하에서는 뒤엎긴 전위조직이 충분히 소성변형을 감당할 수 있는 반면, 큰 변형률에서는 급격한 전위이동이 일어남으로써 시편이 더 이상 응력을 감당할 수 없는 상태에 도달하게 된다. 반면 고온 템퍼링시에는 기지와 석출물이 충분히 연화되어 작은 변형률에서도 전위의 이동이 용이하여 열악한 수명을 보이지만, 큰 변형조건에서는 연화된 조직이 적절히 변형을 조절할 수 있어 수명 증가에 기여하는 차이를 보이는 것으로 판단된다<sup>(19)</sup>.

##### 4.2 저주기 피로수명 예측식

일반적으로 널리 사용되는 저 사이클 피로수명 예측식은 Coffin-Manson식으로, 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다<sup>(3)</sup>.

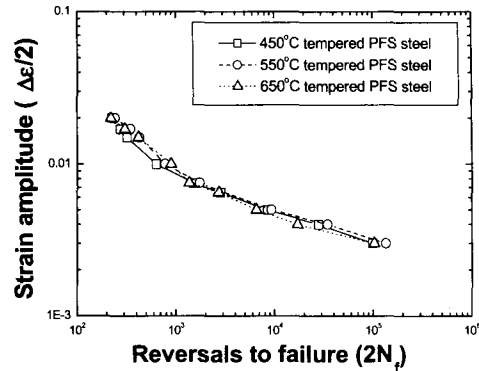


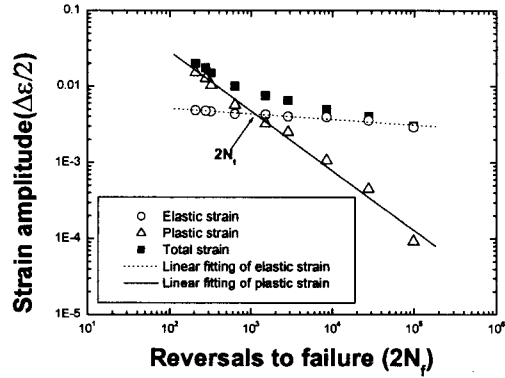
Fig. 4 Strain-life curves of HSLA steel tempered at various temperatures

$$\frac{\Delta\epsilon_f}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \quad (14)$$

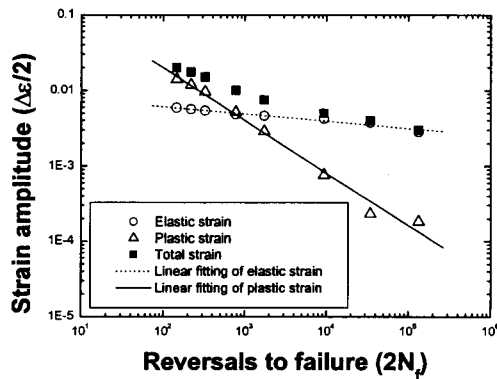
여기서,  $\sigma_f'$ 는 피로강도계수,  $\epsilon_f'$ 는 피로연성계수,  $b$ 는 피로강도지수,  $c$ 는 피로연성지수,  $2N_f$ 는 파단까지의 반복수이다.

Fig. 5는 450, 550 및 650°C에서 템퍼링한 HSLA강의 변형률-수명 선도를 나타낸 결과이다. 본 연구에서 택한 변형률진폭 범위에서 시험한 결과 저주기 피로 영역 뿐 만 아니라 고주기 영역에 걸쳐 데이터들이 분포하고 있다. Fig. 5에서 탄성변형률 성분과 소성변형률 성분이 교차하는 점을 천이수명(2N<sub>t</sub>)이라고 하며, 천이수명이 길수록 시편은 더 긴 수명을 소성변형을 받는 상태에 놓이게 된다. 본 연구에서 얻어진 천이피로수명은 450°C 템퍼링강은 1,112 reversal, 550°C 템퍼링강은 755 reversal 그리고 650°C 템퍼링강은 1,241 reversal로 템퍼링 온도 변화에 따라 특별한 경향을 나타내지 않았다.

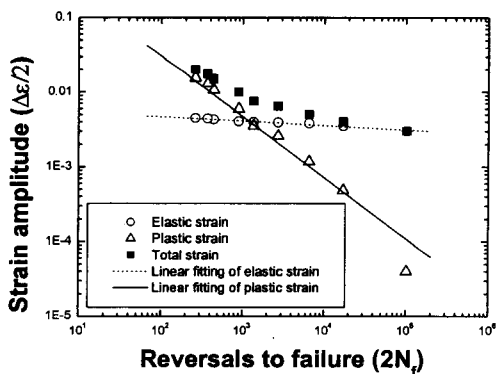
Table 3은 식 (14)의 Coffin-Manson식을 이용하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 대부분의 금속에서 피로연성지수  $c$ 는  $-0.5 < c < -0.7$  사이의 값을, 피로강도지수  $b$ 는  $-0.05 < b < -0.12$  사이의 값을 갖는데, 본 실험에서 얻어진 피로연성지수  $c$ 는 이보다 약간 높은 값을 나타내었고, 피로강도지수  $b$ 는 비슷한 값을 나타내었다. 이러한 반복 응력-변형률과 관련된 상수들의 연관성을 살펴보면, Morrow<sup>(20)</sup>는 에너지 개념으로부터 접근하여  $c = -1/(1+5n')$ ,  $b = -n'/(1+5n')$ 의 관계식을 제



(a) 450°C tempered HSLA steel



(b) 550°C tempered HSLA steel



(c) 650°C tempered PFS steel

Fig. 5 Strain amplitude and life curves of HSLA steel tempered at various temperatures

안하였고, Tomkins<sup>(19)</sup>는 파괴역학의 개념에서 균열 전파과정에 대한 연속체 모델에 바탕을 두고 이론적으로 유도된  $c = -1/(1+2n')$ ,  $b = -n'/(1+2n')$ 의 관계식을 제안하였다. 따라서 이 두 식을 이용하여 구한  $b$ ,  $c$ 값과 본 실험에서 구한 값을 Table 4와 5에 비교하여 정리하였다. 이 결과에 의하면 Tomkins 관계식으로 구한 피로연성지수는 실험값에 근사하였고, 피로강도지수도 실험결과와 비슷한 값을 나타내었다. Table 4, 5에서 볼 수 있듯이 Morrow의 관계식에 비하여 Tomkins의 관계식이 본 실험결과에 보다 더 적합한 것으로 나타났다.

Table 3 Constants of Coffin-Manson equation of HSLA steel tempered at various temperatures

Parameter	450°C	550°C	650°C
$\sigma_f'$	1587.6	2090.3	1525.5
$\epsilon_f'$	1.157	0.471	1.486
$b$	-0.074	-0.096	-0.062
$c$	-0.793	-0.692	-0.818
$n'$	0.094	0.139	0.075

Table 4 Experimentally observed and predicted value of the fatigue ductility exponent( $c$ )

Tempering temperature	Experimental	Morrow <sup>(20)</sup>	Tomkins <sup>(19)</sup>
450°C	-0.793	-0.680	-0.842
550°C	-0.692	-0.590	-0.783
650°C	-0.818	-0.727	-0.870

Table 5 Experimentally observed and predicted value of the fatigue strength exponent( $b$ )

Tempering temperature	Experimental	Morrow <sup>(20)</sup>	Tomkins <sup>(19)</sup>
450°C	-0.074	-0.064	-0.079
550°C	-0.096	-0.082	-0.109
650°C	-0.062	-0.055	-0.065

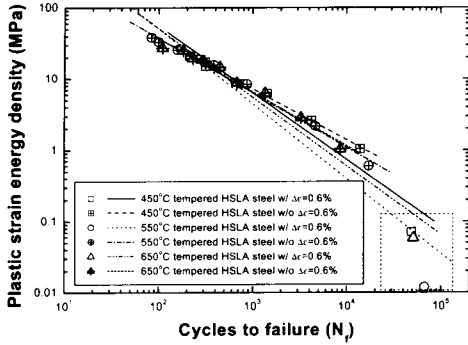


Fig. 6 Plastic strain energy versus cycles to failure of HSLA steel tempered at various temperatures

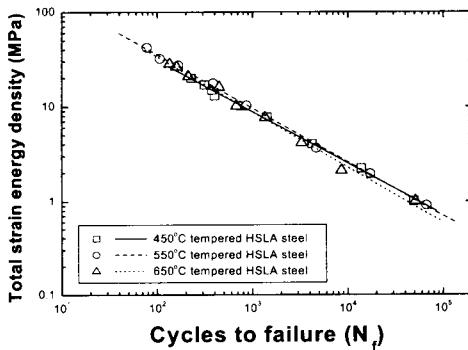


Fig. 7 Total strain energy versus cycles to failure of HSLA steel tempered at various temperatures

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

Materials	Equation
HSLA 450	$\Delta W_f = 399.20 (N_f)^{-0.549}$
HSLA 550	$\Delta W_f = 490.67 (N_f)^{-0.569}$
HSLA 650	$\Delta W_f = 492.92 (N_f)^{-0.583}$

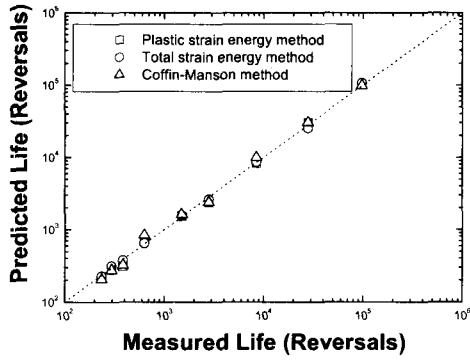
Fig. 6은 식(8)과 (9)에서 설명한 소성변형에너지법을 이용하여 저주기 피로수명식을 산출하기 위한 수명-소성변형에너지밀도 선도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 수명-소성변형에너지밀도의 관계는 저주

기 수명 영역에서는 선형적이거나, 전변형률 범위  $\Delta\epsilon=0.6\%$ 인 데이터들은 선형적 범위를 벗어나 있다. 따라서, 전변형률 범위가 0.6%인 데이터를 포함한 수명 예측식은 전 수명영역에서 오차를 발생시키며, 전변형률 범위  $\Delta\epsilon=0.6\%$ 인 데이터를 포함하지 않은 수명 예측식은 저주기 피로수명 영역에서는 시험결과와 잘 일치하나 고주기 영역으로 갈수록 큰 오차가 발생할 것을 예측할 수 있다.

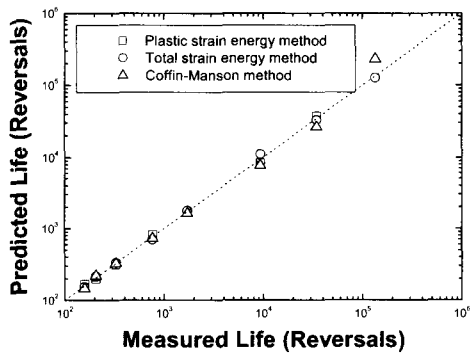
Fig. 7은 각각의 온도에서 템퍼링한 HSLA강의 총변형률에너지밀도와 파단까지의 사이클 관계를 나타낸 결과이다. 총변형률에너지밀도와 사이클 사이의 관계는 수명이 짧은 저주기 영역에서 수명이 긴 고주기 영역까지 선형적인 관계를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이 관계를 식으로 정리하면, Table 6과 같다.

Fig. 8은 각각의 온도에서 템퍼링한 HSLA강의 Coffin- Manson식, 소성변형률에너지법과 전변형률에너지법에 의하여 구한 저주기 피로 수명 예측식 및 시험 결과를 비교한 그래프이다. 여기서 소성변형률에너지법에 의한 결과는 전 변형률 범위  $\Delta\epsilon=0.6\%$  데이터를 포함하지 않은 수명 평가식을 이용한 결과이다. 만일 전 변형률 범위  $\Delta\epsilon=0.6\%$  데이터를 포함한 수명 평가식을 이용하는 경우에는 전 수명영역에서 예측 수명과 시험 결과 사이에 큰 오차가 발생할 것으로 예측할 수 있다.

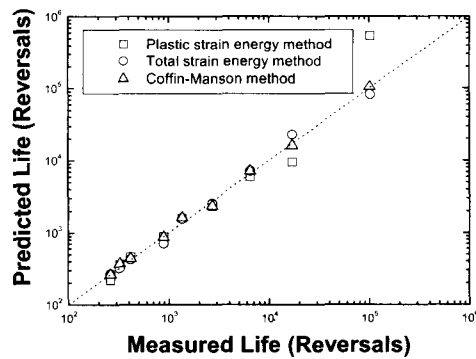
Fig. 8에서 볼 수 있듯이 대부분의 경우에서 시험결과와 수명 예측식에 의한 결과는 잘 일치하고 있다. 그러나, 소성변형률에너지법에 의한 결과를 보면, 전 변형률 범위  $\Delta\epsilon=0.6\%$ 와 같이 피로 수명이 긴 영역 즉 소성변형률이 적고 탄성변형률이 지배적인 경우에는 큰 오차를 보여 실제 그래프 영역 밖에 데이터가 위치하고 있다. 이는 이 영역이 소성변형률 보다는 탄성 변형률이 지배적인 영역으로 소성변형에너지량은 매우 작으므로 실제 수명예측식과 큰 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 그러나, 전변형률에너지법을 이용하여 구한 결과는 모든 영역에서 좋은 예측결과를 보이고 있다. 따라서 변형률 제어 저주기 피로시험을 수행하고, 에너지 파라미터를 이용하여 피로수명을 예측하고자 하며, 시험 데이터가 전 수명 영역에 걸쳐 넓게 분포하는 경우 피로수명예측식으로 전변형률에너지법을 사용하는 것이 보다 신뢰성 있는 수명예측방법이라는 것을 판단할 수 있다.



(a) 450°C tempered HSLA steel



(b) 550°C tempered HSLA steel

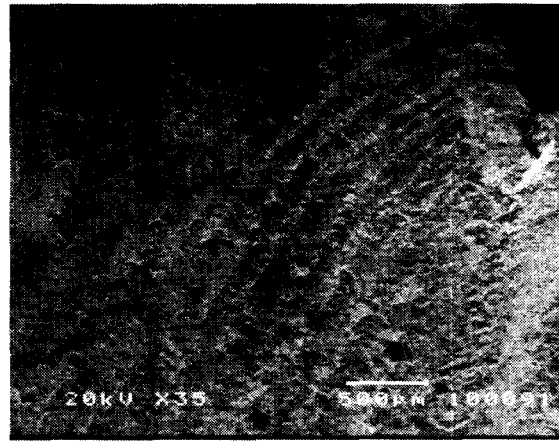


(c) 650°C tempered HSLA steel

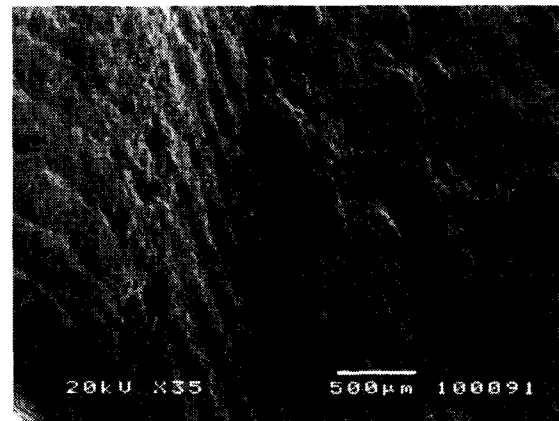
Fig. 8 Measured life versus predicted life of HSLA steel tempered at various temperatures

### 4.3. 피로파면 및 재료의 주기적 거동

Fig. 9는 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 있다. Manson<sup>(3)</sup>은 극한강도/항복강도의 비가 1.2 보다 작은 경우 재료는 주기적 연화 거동을 보일 것으로 예측하였는데, 본 시험 결과는 앞의 Manson의 예측식과 잘 일치하고 있다.



(a) 450°C tempered HSLA steel



(b) 650°C tempered HSLA steel

Fig. 9 SEM images of fracture surface with  $\Delta \epsilon = 2.0\%$



## 5. 결론

잠수함용 소재로 개발한 고강도 구조용 합금강을 이용하여 변형률제어 저주기 피로시험을 수행하였다. 피로시험 데이터를 Coffin-Manson식, 소성변형률에너지법 및 전변형률에너지법을 이용하여 수명 예측식을 계산하였고 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 550℃ 템퍼링한 HSLA강의 저주기 피로특성이 가장 우수하나, 그 차이는 크지 않다. 템퍼링 온도가 550℃인 HSLA강의 저주기 피로특성은  $\epsilon$ -Cu의 형성에 의하여 향상되었다.

2) 소성변형률에너지법을 이용하여 예측된 피로수명식은 저주기 영역내에서는 정확하게 피로 수명을 예측할 수 있으나, 이 영역을 벗어나면 큰 오차를 보인다.

3) 전변형률에너지법에 의하여 예측된 저주기 피로 수명은 Coffin-Manson법 및 실험결과와 잘 일치하였다. 특히 전변형률에너지법에 의한 결과는 소성변형률에너지법이 큰 오차를 갖는 긴 수명영역에서도 정확히 피로수명을 예측하였다.

## 참고문헌

- 김재훈, 김덕희, 임동규, 김후식, PFS강 기계적 특성 평가, ADD TEDC-411-010275, 2000.
- Polak, J., Cyclic Plasticity and Low Cycle Fatigue Life of Metals, Elsevier, 1991.
- Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990.
- Feltner, C. E. and Morrow, J. D., "Micro Plastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture," Journal of Basic Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 15~22, 1961.
- Ellyin, F. and Kujawski, D., "Plastic Strain Energy in Fatigue Failure," Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 106, No. 4, pp. 342~347, 1984.
- Lefebvre, D. and Ellyin, F., "Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cycle Fatigue," International Journal of Fatigue, Vol. 6, No. 1, pp. 9~15, 1984.
- Ellyin, F., "Effect of Tensile Mean Strain on Plastic Strain Energy and Cyclic Response," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp. 119~125, 1985.
- 김재훈, 김덕희, 이종현, 조성석, 전병완, "고강도 저합금강의 저주기 피로 특성," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 169~174, 2001.
- 김덕희, 김재훈, 조성석, 전병완, 심인옥, "PFS강의 저주기 피로수명 예측," 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, Vol. I, pp. 241~244, 2001.
- Kim, D. H., Kim, J. H., Lee, J. H., Jeon, B. H. and Cho, S. S., "Low Cycle Fatigue Life Prediction of Structural Steels," Proceeding of the APCFS & ATEM'01, Vol. I, pp. 378~383, 2001.
- Ellyin, F. and Kujawski, D., "The Energy-Based Fatigue Failure Criterion," Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials, Vol. II, pp. 541~600. 1986.
- Golos, K. and Ellyin, F., "A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage," Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, pp. 36~41, 1988.
- 박태원, 심인옥, 김영우, 강창윤, "열분석법에 의한 Cu를 함유한 HSLA강의 시효거동에 관한 연구," 대한금속학회지, Vol. 33, No. 1, pp. 57~64, 1995.
- ASTM, "Tentative Recommended Practice for Constant-Amplitude Low Cycle Fatigue Testing," ASTM E 606, 1996.
- Raske, D. T. and Morrow, J. D., "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing," Manual on Low Cycle Fatigue Testing, ASTM STP 465, pp. 1~25, 1969.
- 권재도, 우승완, 박중철, 이용선, 박윤원, "주조 스테인레스강 CF8M의 430℃ 열화거동에 관한 연구(II) -저사이클 피로특성 평가,-" 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제9호, pp. 2183~2190, 2000.
- 백수곤, 현중섭, 송기욱, 홍성인, "소성변형에너지법을 이용한 1Cr0.5Mo강의 저주기피로 특성에 관한 연구," 한국재료학회지, 제7권, 제11호, pp.1007~1011, 1997.
- 현중섭, 백수곤, 송기욱, "소성변형에너지에 의한 유지시간효과를 고려한 1Cr-0.5Mo강의 저사

- 이클 크리프-피로 수명예측에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제12호, pp. 2093~2099, 1998.
19. 전병완, Cu 석출경화형 HSLA-100M강의 미세조직 및 기계적성질에 미치는 템퍼링온도의 영향, 충남대학교 대학원 박사학위논문, 2001.
  20. Morrow, J., “Cyclic Plasticity Strain Energy and Fatigue of Metals,” Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity, ASTM STP 378, pp. 45~87, 1965.