액체로켓 연소기 재생냉각 챔버용 구리합금의 피로수명 예측식 비교

이금오*, 류철성**, 최환석***

Comparisons of Life Prediction Method of Copper Alloy of Regenerative Cooling Chamber for Thrust Chamber

Keum-Oh Lee*, Chul-Sung Ryu**, Hwan-Seok Choi***

Abstract

A study about the fatigue life of copper alloy which is used in inner jacket of regenerative cooling chamber of liquid rocket engine has been performed. Mechanical properties of the material and fatigue life have been taken from tensile tests and low-cycle fatigue tests at room temperature and several elevated temperatures. Original universal slopes method, modified universal slopes method, Mitchell's method, Baumel and Seeger's method, and Ong's method have been used for predicting the fatigue data. It was found that the novel life prediction method should be developed for the copper alloys since almost all data have not been predicted well with the widely used methods.

초 록

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버 내피에 사용되는 구리합금의 가동 수명을 예측하기 위해서 피로 수명에 대한 연구를 수행하였다. 재료의 기계적인 특징과 피로 수명을 얻기 위하여 인장 시험 및 저사이클 피로 시험이 상온 및 고온에서 수행되었다. 수명을 예측하기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 주기울기법, 수정 주기울기법, Mitchell의 방법, Baumel과 Seeger의 방법, Ong의 방법들이 사용되었으며, 거의 모든 데이터가 현재 널리 사용되는 방법들로 예측이 잘 되지 않아 구리합금을 위한 새로운 수명식을 개발해야 할 필요성을 발견하게 되었다.

키워드 : 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber), 구리합금(copper alloy), 피로 수명(fatigue life), 고온(elevated temperature)

1. 피로 수명 예측의 필요성

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber)는 구조적인 역할을 수행하는 스테인리스강과 열전달을 수행하는 구리합금으로 이루어져 있다. 이 중 냉각 채널이 있는 내피

접수일(2010년 1월 8일), 수정일(1차 : 2010년 4월 2일, 2차 : 2010년 6월 22일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)
* 연소기팀/kol@kari.re.kr ** 연소기팀/csryu@kari.re.kr *** 연소기팀/hschoi@kari.re.kr

(inner jacket)의 재료로 사용되는 구리합금은 연소과정에서 높은 온도 구배에 따른 열충격, 연소실 내압에 따른 압력 등을 받고 있고, 연소 시험이 지속될수록 반복되는 열-기계적 하중에 노출되게 된다. 따라서 안정적으로 연소시험을 진행하기 위해서는 연소실이 반복되는 열-기계적 하중에서도 파괴(fracture)되지 않아야 하며, 이를 위해 기계적 강도 예측과 피로 수명 예측은 무엇보다 중요하다.

연소실의 기계적 강도 예측을 위해서는 상온 및 고온에서의 인장시험을 통한 재료의 기계적 물성치를 확보하고, 이후에 이 데이터베이스를 FEM을 사용하여 실제 구조물의 취약점을 분석하는 것이 일반적으로 많이 사용되는 방법이다. 많은 연구자들은 일반적으로 항복을 일으키지 않는 구조물로 설계하지만, 온도가 급격하게 증가하는 구조물은 재료의 열팽창으로 인해서 국부적인 소성변형이 가해질 수 밖에 없기 때문에, 반드시 소성 영역을 고려하여 해석하고 이를 바탕으로 설계가 이루어져야 한다.

또한, 연소 시험이 구조적으로 문제가 없이 수행되더라도 이를 반복하는 과정에서 내부에 발생할 수 있는 결함이 연소시험을 반복함에 따라서 진전하게 되어, 최종적으로 파괴될 수 있는 피로 문제가 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 반복 연소 시험의 경우에 있어서는 연소실의 피로 강도를 예측하는 것도 역시 중요하다고 할 수 있다. 연소실의 피로 강도를 예측하기 위해서는 고온에서 피로 시험을 통하여 반복 재료 거동과 피로 수명을 얻어야 한다. 이러한 피로 데이터를 통하여 연소실의 안정적 연소 실험 횟수 및 총 연소 가능 시간을 예측할 수 있다.

하지만, 피로 실험은 인장 시험에 비해 시간이 매우 오래 걸리며 안정적으로 실험을 수행하는데 많은 어려움을 겪는다. 따라서 피로 수명이나 피로 거동을 인장 시험의 파라미터를 가지고 구할 수 있는 여러 가지 방법들이 제안되어 왔다. 본 연구에서는 연소실 내부에 사용되는 구리합금을 상온 및 고온에서 인장 시험 및 피로 실험을 수행하여 데이터를 획득하고, 인장 시험의 결과로 피로 실험을 예측할 수 있는 기존에 제시된 많은 방법들을 통하여 예측하였고, 서로 비교하였다

2. 기존의 피로 수명 예측 모델

재료의 신뢰성을 위해서 필요한 피로 수명식은 피로 실험을 통해 얻을 수 있다. 그러나 피로 시험은 매우 많은 시간과 노력을 요구하기 때문에, 간단한 인장 데이터로서 피로 특성을 측정하기 위한 많은 시도들이 있어왔다. Manson[1]은 4점 연관법(four-point correlation method)과 주기울기(universal slope) 방법을 제안하였으며, 후에 Muralidharan과 Manson[2]은 이를 수정하여 수정 주기울기법(modified universal slope method)을 제안하였다. Mitchell은 강에 초점을 맞추어 다른 방법으로 제안하였고[3], Baumel과 Seeger는 균일 재료법(uniform material law)이라고 하는 방법을 개발하였다[4]. Ong[5]은 세 가지 많이 사용되는 방법, 4점 연관법와 초기 주기울기법(original universal slopes method), 그리고 Mitchell의 방법을 서로 비교, 계산하였다. 그리고 4점 연관법와 초기 주기울기법이 충분한 결과를 준다는 것을 발견하였다. 이를 통해 Ong은 수정된 4점 연관법을 제안하였다.

Park과 Song[6]은 JSME data book, Materials Data for Cyclic Loading, SAE data 등에서 2700여개의 데이터 점(point)을 통하여 비합금 강, 저합금 강, 고합금 강, 알루미늄 합금, 티타늄 합금의 피로 수명에 대한 예측법의 평가를 시도하였으며, 수정 주기울기법, Seeger와 Ong의 방법은 납득할만한 좋은 수명 예측을 보여주었다고 하였다. 이것들 중에서 수정 주기울기법이 가장 좋은 결과들을 보여 주었다고 발표하였다. 그리고 이 중, 4점 연관법은 수명 평가(life estimation) 정도가 좋지 않았다.

Manson이 제시한 주기울기법(Universal slopes method)[1]은 소성(plastic)과 탄성(elastic선(line)들을 -0.6과 -0.12로 고정하여(universalized) 대부분의 재료에 대해서 사용하였으며, 이것은 그것의 단순함과 적용의 용이성으로 인해 매우 널리 사용되어 왔다. 이 식은 다음과 같다.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p = 3.5\frac{\sigma_B}{E}N_f^{-0.12} + \sigma_f^{0.6}N_f^{-0.6} \quad (1)$$

여기에서 $\Delta\epsilon$, $\Delta\epsilon_e$, 그리고 $\Delta\epsilon_p$는 각각 총(total), 탄성(elastic), 소성(plastic) 변형률이다. 그리고 N_f는 파손시까지의 사이클 수이다.

진 파괴 응력 σ_f, 인장 강도 σ_B, 그리고 파괴 인성(fracture ductility) ϵ_f이다. 진 파괴 응력 σ_f는 언제나 문헌상에 주어지지 않기 때문에, Manson은 다음과 같은 가정을 제시하였다.

$$\sigma_f = \sigma_B(1+\varepsilon_f) \quad (2)$$

그러나 이 방법은 매우 높은 사이클의 수명 범위에서는 큰 과대 예측(overconservative estimation)을 하게 되는 경향이 있다. 초기 주기울기법을 수정하여, 후에 Muralidharan과 Manson[2]은 변형률-수명 관계를 다음과 같이 표현하였다.

$$\Delta\varepsilon = 1.17\left(\frac{\sigma_B}{E}\right)^{0.832}N_f^{-0.09} + 0.0266\varepsilon_f^{0.155}\left(\frac{\sigma_B}{E}\right)^{-0.53}N_f^{-0.56} \quad (3)$$

이 방법은 초기 방법에 비해서 탄성과 소성 선에 대하여 더 낮은 주기울기를 제공한다. σ_B/E 항은 소성선에 대한 계수로서 새롭게 제시되었는데, 재료의 인장강도를 쓰는 것은 저사이클 피로에 있어서 수명에 대해서 두드러진 영향을 보여주고 있다.

log-log 선에 소성 변형률-수명관계 (plastic line)의 경사가 거의 대부분의 재료에서 거의 상수라는 것은 상대적으로 잘 인정되는 가정이다. 그러나 탄성 변형률-수명 관계(elastic line)의 경사는 종종 매우 넓은 범위 내에 위치하게 되고 재료 의존적인 값이다. 이러한 재료 의존성을 고려하여 Mitchell[3]은 탄성선의 경사를 재료의 인장강도로부터 계산하는 방법을 제안하였다.

이 방법에서, 변형률-수명 관계는 변형률 범위 $\Delta\epsilon/2$와 되풀이수(reversals)의 $2N_f$로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \quad (4)$$

여기에서 σ_f'는 피로강도계수(fatigue strength coefficient)이고, b는 피로강도지수(fatigue strength exponent)이다. ϵ_f'는 피로연성계수(fatigue ductility coefficient)이며, c는 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다. Mitchell은 500 BHN 이하의 경도를 가지고 있는 강(steel)에 대해서,

$$\sigma'_f \cong \sigma_f = \sigma_B + 345 \ \text{(MPa)} \quad (5)$$

$$b = \frac{\log(\sigma'_f/E) - \log(\sigma_B/2E)}{\log(10^0) - \log(10^6)} = -\frac{1}{6}\log\left(\frac{2\sigma_f}{\sigma_B}\right) = -\frac{1}{6}\log\left[\frac{2(\sigma_B+345)}{\sigma_B}\right] \quad (6)$$

$$\varepsilon'_f \cong \varepsilon_f = \ln\left(\frac{100}{100-RA}\right) \quad (7)$$

라고 제시하였으며, 여기에서 RA는 단면수축률(percentage reduction in area)이다.

그는 후에 소성선(plastic line)을 특별한 값 c를 쓰는 대신에 경도(hardness)와 천이 피로 수명(transition fatigue life) $2N_t$를 경험적인 대표값을 가지고 구성하는 것을 제안하였다. 그러나 경도-천이수명 데이터는 언제나 유용한 것이 아니며, 따라서 대부분의 재료에서 사용되는 평균값 c인 $c=-0.6$의 일반적인 값을 사용하는 것이 편리함을 위하여 소성선(plastic line)의 기울기로서 지정된다.

결과적으로 식은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{(\sigma_B+345)}{E}(2N_f)^{-\frac{1}{6}\log\left[\frac{2(\sigma_B+345)}{\sigma_B}\right]} + \varepsilon_f(2N_f)^{-0.6} \quad (8)$$

Baumel과 Seeger에 의해서 제안된 균일 재료법[4]은 그들로부터 수집된 많은 양의 데이터를 토대로 구해졌다. 이 방법은 주기울기법의 하나의 종류로서 알려질 수 있다. 이것은 다른 비합금(unalloyed)와 저합금(low-alloy) 강(steel)에 대해서와 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서 각각 다른 기울기를 제시하였다.

이 방법의 이점은 다른 방법들과 비교해서 오직 재료의 인장강도(tensile strength)만이 변형률-수명 곡선에서 예측하는데 필요하다는 것이다. 다른 방법들은 재료의 단면 수축률이나 피로 연성등도 필요했었다. 그들에 의해서 수집된 fatigue data를 가지고 그들은 균일 재료법과 수정 주기울기법을 예측하는 정도(capability)를 측정하였다. 그들은 두 가지 방법들이 알루미늄과 티타늄 합금들에 대해서와 고합금 강에 대해서 예측치와 실험치의 결과들이 비합금과 저합금 강들보다 더 큰 편차(deviation)를 가지고 있음을 발견하였다.

이 방법에서는 비합금과 저합금 강에 대해서와 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서 두 가지 다른 식들이 사용되었다.

비합금 와 저합금 강에 대해서:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2}=\frac{\Delta\varepsilon_e}{2}+\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$$
$$=1.50\frac{\sigma_B}{E}(2N_f)^{-0.087}+0.59\psi(2N_f)^{-0.58} \quad (9)$$

여기에서,

$$\frac{\sigma_B}{E}\le 0.003,\ \psi=1$$
$$\frac{\sigma_B}{E}>0.003,\ \psi=1.375-125.0\frac{\sigma_B}{E}$$

알루미늄과 티타늄 합금에 대해서는,

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2}=\frac{\Delta\varepsilon_e}{2}+\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$$
$$=1.67\frac{\sigma_B}{E}(2N_f)^{-0.095}+0.35(2N_f)^{-0.69} \quad (10)$$

으로 제시하였다.

강에 대해서는 elastic 과 plastic lines의 slope이 -0.087과 -0.58로서 수정 주기울기법의 -0.09와 -0.56의 값들과 매우 비슷하다. 그러나 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서는 -0.69로서 매우 가파르다. 구리합금의 수명 예측에 대해서는 알루미늄과 티타늄합금을 사용하여 예측하였다.

이후에 Ong[5]은 새로운 수정 4점 연관법을 제시하였고, 이것은 초기 4점 연관법(original four-point correlation)을 개선한 것이었다. 그러나 계산을 위해서 사용된 데이터들은 실제 데이터가 아닌, ASM Metals Handbook에서 제공된 재료들의 피로 특성을 통해서 계산된 값들이었다.

Original 4점 연관법을 향상시키기 위해서 이 방법은 4점을 다시 바꾼 것이다. 변형률-수명 관계에서는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2}=\frac{\Delta\varepsilon_e}{2}+\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}=\frac{\sigma_f}{E}(2N_f)^b+\varepsilon_f(2N_f)^c \quad (11)$$

여기에서

$$b=\frac{1}{6}\left\{\log\left[0.16\left(\frac{\sigma_B}{E}\right)^{0.81}\right]-\log\left(\frac{\sigma_f}{E}\right)\right\}$$

$$c=\frac{1}{4}\left[\log\left(\frac{0.00737-\Delta\varepsilon_e^*/2}{2.074}\right)-\log(\varepsilon_f)\right]$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_e^*}{2}=\frac{\sigma_f}{E}\left[10^{\frac{2}{3}\left\{\log\left[0.16\left(\frac{\sigma_B}{E}\right)^{0.81}\right]-\log\left(\frac{\sigma_f}{E}\right)\right\}}\right]$$

이다.

이 방법에서 σ_f값은 초기 주기울기법과 같이 필요하다. Ong은 이 σ_f값을 식(2)와 같이 근사할 수 있다고 언급하였다.

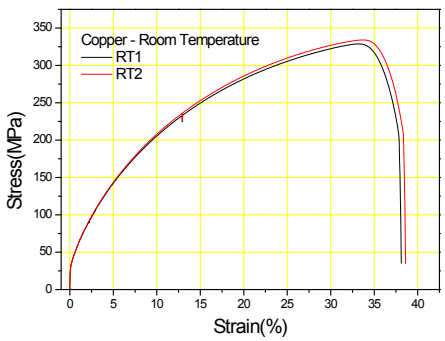

그림 1. 상온 인장 시험 결과

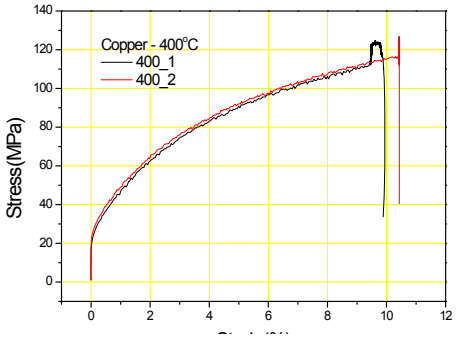

그림 2. 400℃ 인장 시험 결과

3. 시험 및 결과

3.1 인장 시험 결과

구리합금의 상온 인장시험과 400℃와 500℃의 고온에서의 인장시험의 결과는 그림 1-3까지 나타나 있으며, 네킹이 시작하기 전까지 다음과 같은 식을 통해 진응력-진변형률 곡선(true stress-true strain curve)으로 인장 곡선을 구성하였다.

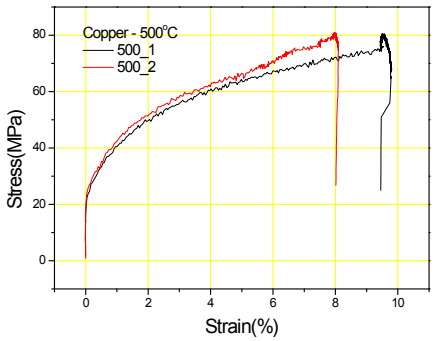

그림 3. 500℃ 인장 시험 결과

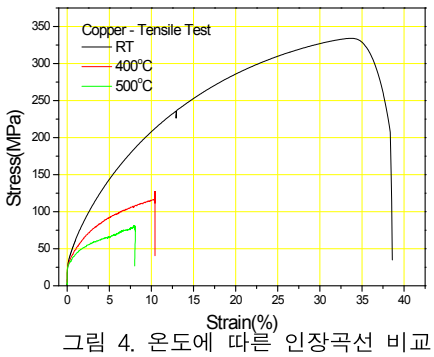

그림 4. 온도에 따른 인장곡선 비교

$$\sigma = S(1+e) \quad (12)$$

$$\epsilon = \ln(1+e) \quad (13)$$

여기에서 S와 e값은 각각 공칭응력(engineering stress), 공칭변형률(engineering strain)이며, σ와 ϵ은 각각 진응력, 진변형률이다.

그림 2와 그림 3의 고온에서는 응력-변형률 곡선이 약간씩 떨리는 것들을 관찰할 수 있는데, 이것은 이 온도상에서 발생하는 동적변형시효(Dynamic strain aging)에 의해 발생되는 세레이션(Serrated yielding)으로 생각되며, 동적 변형 시효에 의해서 재료가 취성화되어 연신율이 짧아지는 것으로 여겨진다.

그림 4는 각 온도에 대한 인장 곡선의 차이를 보여주고 있다. 그림에서 온도가 높아질수록 인장강도, 항복 강도, 및 연신율 모두 감소하는 결과를 보여주고 있다.

표 1 인장 곡선으로 얻은 주요 재료 상수

Temp (℃)	Specimen Name	σ_u (MPa)	EL (%)	E (GPa)	σ_y (MPa)
20	RT1	329	38.1	114	37.4
	RT2	334	38.6	115	36.8
400	400_1	125	9.94	102	30.1
	400_2	127	10.4	102	32.5
500	500_1	80.5	9.8	99	28
	500_2	80.9	8.09	99	29.9

표 1은 인장 곡선으로 구한 주요 재료 상수를 나타내고 있으며, 탄성 범위가 매우 짧아 탄성계수(elastic modulus, E)를 구하기 어려운 구간인 400℃와 500℃ 구간에서는 저사이클 피로 시험으로 얻을 수 있는 첫 번째 이력곡선(hysteresis loop)의 제하(unloading) 곡선의 기울기로 얻은 탄성계수의 평균치를 사용하였다.

3.2. 저사이클 피로 시험 결과

구리합금의 400℃와 500℃의 고온에서 저사이클 피로 시험 결과는 각각 그림 5와 6에 나타나 있다. 둘 다 시험 데이터의 개수가 많지는 않기 때문에 정확한 데이터의 분석은 어려웠으나, 많은 연구자들이 사용하고 있는 Coffin-Manson-Basquin의 모델을 사용하여 근사(correlation) 곡선을 그려보면 그림 5와 같이 구성할 수 있다. 그래프의 형태를 보면 400℃보다 500℃의 그래프의 흩어짐 정도가 더 적은 것들을 알 수 있으며, 이는 400℃의 시험 중 가장 짧은 시험인 $\Delta\epsilon_t = 3\%$의 시험의 수명이 다른 시험 결과에 비해서 지나치게 짧기 때문인 것으로 여겨진다. 그림 5는 400℃와 500℃에서의 피로 수명을 비교해 놓은 것이다. 앞서 언급한 400℃의 $\Delta\epsilon_t = 3\%$에서의 수명을 제외하고는 500℃의 수명이 400℃의 수명보다 거의 대부분 짧게 나타났다. 보다 정확한 그래프를 그리기 위해서는 더 많은 시험 결과가 필요하다.

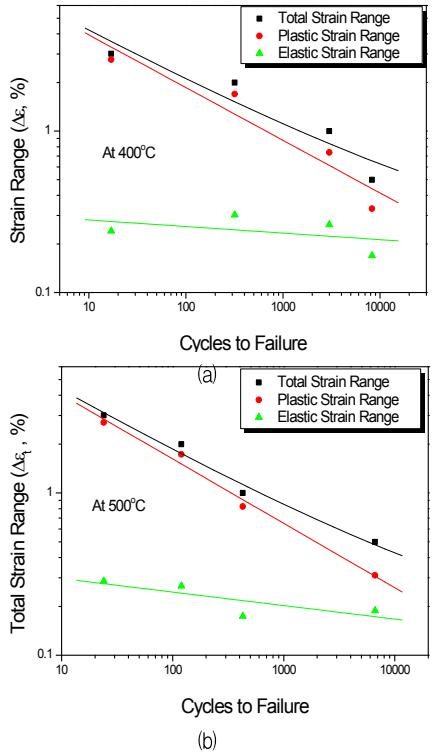

그림 5. 저사이클 피로 시험 결과 (a) 400℃, (b) 500℃

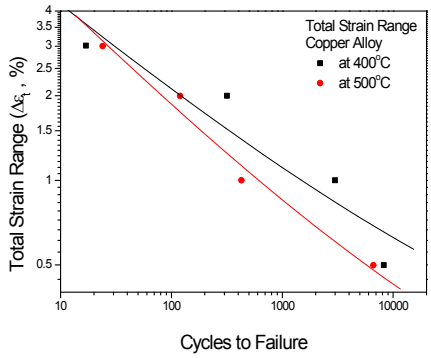

그림 6. 온도별 저사이클 피로 수명 곡선 비교

3.3. 인장 시험 데이터를 통한 저사이클 피로 시험 데이터의 예측

현재 구리 합금은 성능 향상을 위해서 계속 개발되는 중이며, 개발되는 구리합금에 대해서 모두 피로 시험을 수행할 수 없고, 특히 고온의 구리합금의 피로 시험은 시험의 난이도가 매우 높기 때문에, 인장 시험 데이터를 가지고 피로 수명을 예측하는 것은 매우 유용한 연구라고 할 수 있다. 많은 연구자들이 비합금 강, 저합금 강, 고합금 강, 알루미늄 합금, 티타늄 합금에 대해서 피로 시험 예측이 수행되었으며, 수정 주기울기법과 Seeger의 방법, Ong의 방법에 대해서 납득할만한 좋은 수명 예측 결과를 가져다주었다. 터보펌프 블레이드의 후보로서 사용되었던 Ni 기반의 초합금인 Inconel 718, MAR-M-247, Rene 95에 대해서도 피로 수명 예측을 해본 결과 Mitchell의 방법이 좋은 경향을 보여주는 것들을 발견할 수 있었다. 구리 합금에 대해서도, 많은 연구자들이 사용하는 초기 주기울기법과 수정 주기울기법, Mitchell의 방법, Baumel과 Seeger의 방법, Ong의 방법을 사용하여 수명 예측을 한 그래프가 그림 7-11에 나타나 있다.

그림 7-11에서는 저사이클 피로 수명이 대부분의 경우 과소 예측하고 있으며, 수정 주기울기법과 Ong의 방법은 과대 예측하고 있다. 대부분의 데이터가 예측이 되지 않는 이유는 위의 식들이 강 등에 의해서 구성된 식이기 때문으로 사료

되며, 응력 증가에 따른 수명의 감소 정도가 더 적기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 이러한 결과들을 바탕으로 새로운 수명식을 구성해야 할 필요가 있다.

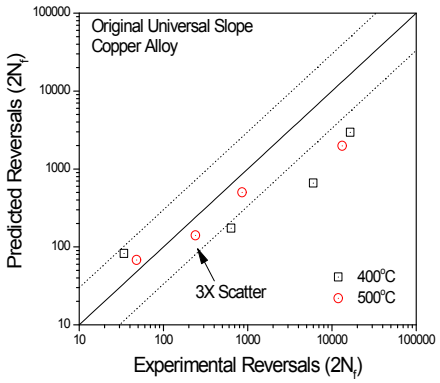

그림 7. 초기 주기울기법을 이용한 구리합금의 피로 수명 예측

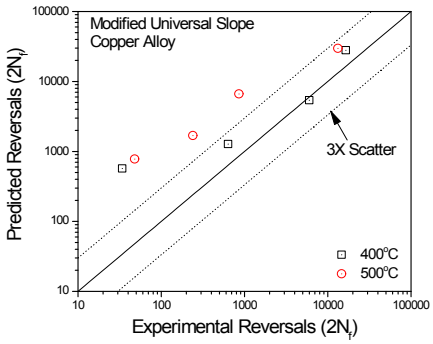

그림 8. 수정 주기울기법을 이용한 구리합금의 피로 수명 예측

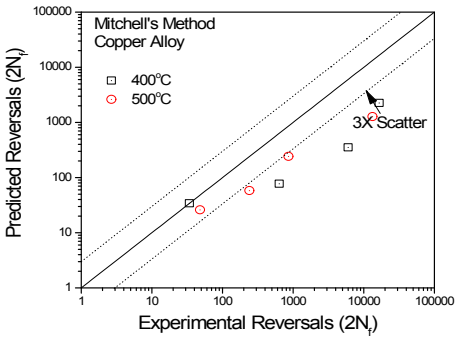

그림 9. Mitchell의 방법을 이용한 구리합금의 피로 수명 예측

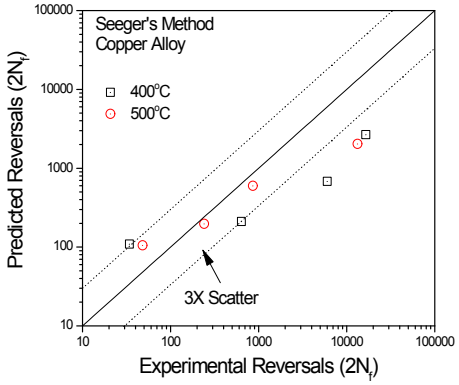

그림 10. Seeger의 방법을 이용한 구리합금의 피로 수명 예측

4. 결 론

연소기 내피에 사용하는 구리합금의 단순 인장 시험을 통한 강도 측정과 고온 피로 시험 수명을 분석해 보았으며, 인장 시험을 통한 피로 수명 예측을 기존 연구자들의 모델을 통하여 예측하였다. 구리 합금은 상온에서는 연신율이 매우 크게 나타났으나 고온에서는 동적 변형 시효의 영향 등으로 인하여 세레이션이 나타나고 연신율이 큰 폭으로 떨어진 결과를 나타내었다. 피로 시험 결과 분석을 통해서 구리합금의 피로 수명 특성을 알 수 있었으며, 기존의 피로 수명 예측 결과로서는 구리 합금의 피로 시험을 예측한 것들이 잘 맞지 않아 구리합금을 위한 새로운 수명식을 개발해야 할 필요성을 발견하게 되었다.

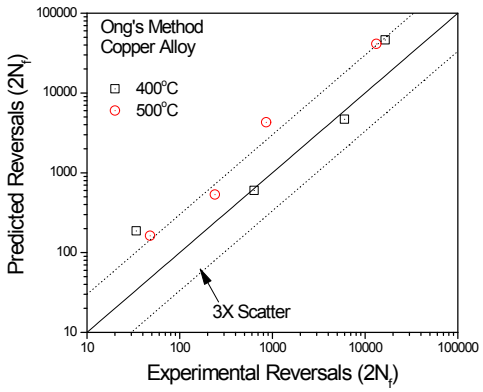

그림 11. Ong의 방법을 이용한 구리합금의 피로 수명 예측

참 고 문 헌

1. Manson, S. S., "Fatigue - a Complex Subject," Experimental Mechanics, Vol. 5, No. 7, 1965, pp. 193-226.
2. Muralidharan, U. and Manson, S.S., "A modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristic of metals", J. Eng. Mater. Technol., 1988, Vol 110, pp. 55-58.
3. Mitchell, M. R., "Fatigue and Microstructures," American Society for Metals, Metals Pack, OH, 1979, p. 385-437.
4. Baumel, A. Jr and Seeger, T., "Materials Dat a for Cyclic Loading, Supplement 1," Elsevie r Science Publishers, Amsterdam, 1990..
5. Ong, J. H., "An improvd technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data", Int. J. Fatigue, Vol. 15, 1993, pp. 213-219.
6. Park, J.H., Song, J.H, "Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties", Int. J. Fatigue, 17(5), 1995, pp. 365-373.