

研究論文

연소실 구리합금의 피로수명 예측

이금오* · 유철성** · 최환석*

Life Prediction of Copper Alloy of Combustion Chamber

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

ABSTRACT

A study of the fatigue life of copper alloy which was used in inner jacket of regenerative cooling chamber of liquid rocket engine has been performed. Generally used life prediction methods -original universal slopes method, modified universal slopes method, Mitchell's method, Bäümel 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 which was modified from Ong's method was suggested since almost all data have not been predicted well with the widely used methods. The suggested modified Ong's method predicted well within 3X scatterbands.

초 록

액체로켓 연소기 재생냉각 챔버 내피에 사용되는 구리합금의 가동 수명을 예측하기 위해서 피로 수명에 대한 연구를 수행하였다. 수명을 예측하기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 공통 경사법, 수정 공통 경사법, Mitchell의 방법, Bäümel 과 Seeger의 방법, Ong의 방법들이 사용되었으며, 거의 모든 데이터가 현재 널리 사용되는 방법들로 예측이 잘 되지 않아 Ong의 방법을 수정한 새로운 수명식을 제안하였다. 제안된 수정 Ong의 방법은 3X 흩어짐 범위에서 수명을 잘 예측하였다.

Key Words: Regenerative Cooling Chamber(재생냉각 챔버), Copper Alloy(구리합금), Fatigue Life(피로 수명), Elevated Temperature(고온)

1. 서 론

액체로켓 연소기는 연소 시에 연소실 내의 고온 고압의 가스로 인해 높은 온도가 발생한다. 이러한 고온의 환경으로 인하여 연소실이 파손되는 것을 막기 위해서 연료를 통해 열을 외부로 방출시키는 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber) 형태의 연소실이 사용된다 [1,2]. 이 때 챔버 내부에서는 고온의 열을 빠른 속도로 전달해 주기 위해 열전도성이 좋고 강도

접수일 2010. 12. 4, 수정완료일 2011. 2. 13, 게재확정일 2011. 2. 19

* 종신회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

** 정회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

† 교신저자, E-mail: kol@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

가 뛰어난 구리합금을 사용한다[1,2]. 원활한 열 전달을 위해 채널이 있는 내피(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 매우 중요하다.

본 연구에서는 연소실에서 발생될 수 있는 열 피로 수명을 예측하기 위하여 연소실 내부에 사용되는 구리합금의 상온 및 고온에서 인장 시험 및 피로 실험을 수행하여 데이터를 획득하고, 인장 시험의 결과로 피로 실험을 예측할 수 있는 기준에 제시된 많은 방법들을 통하여 예측하였고, 수명 예측을 정확히 할 수 있는 새로운 수명식을 제시하였다.

2. 기존의 피로 수명 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 있었다. Manson[3]은 4점 연관법(four-point correlation method)과 공통 경사(universal slope) 방법을 제안하였으며, 후에 Muralidharan과 Manson[4]은 이를 수정하여 수정 공통 경사법(modified universal slope method)을 제안하였다. Mitchell은 강에 초점을 맞추어 다른 방법으로 제안하였고[5], Bäuml과 Seeger는 균일 재료법(uniform material law)이라고 하는 방법을 개발하였다[6]. Ong[7]은 세 가지 많이 사용되는 방법, 4점 연관법과 초기 공통 경사법(original universal slopes method), 그리고 Mitchell의 방법을 서로 비교, 계산하였다. 그리고 4점 연관법과 초기 공통 경사법이 충분한 결과를 준다는 것을 발견하였다. 이를 통해 Ong은 수정된 4점 연관법을 제안하였다.

Park과 Song[8]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 공통 경사법, Seeger와 Ong의 방법은 납득할만한 좋은 수명 예측을 보여주었다고 하였다. 이것들 중에서 수정 공통 경사법이 가장 좋은 결과들을 보여 주었다고 발표하였다. 그리고 이 중, 4점 연관법은 수명 평가(life estimation) 정도가 좋지 않았다.

Lee 등[9]은 니켈 기반의 HIP 초합금의 고온 저사이클 피로 시험 데이터를 통하여 Mitchell의 방법으로 예측한 결과가 가장 좋다고 나타났으며, 이를 수정한 수정 Mitchell의 방법으로 대부분의 데이터를 예측할 수 있다는 결론을 얻었다.

Manson이 제시한 공통 경사법(Universal slopes method)[3]은 소성(plastic)과 탄성(elastic) 선(line)들을 -0.6 과 -0.12 의 공통값으로 가정한 후, 대부분의 재료에 대해서 사용하였으며, 이 방법은 단순성과 적용의 용이함으로 인해 지금까지 널리 사용되어 왔다. 이 식은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p = 3.5 \frac{\sigma_B}{E} N_f^{-0.12} + \sigma_f^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (1)$$

여기에서 $\Delta\epsilon$, $\Delta\epsilon_e$, 그리고 $\Delta\epsilon_p$ 는 각각 총(total), 탄성(elastic), 소성(plastic) 변형률이다. 그리고 N_f 는 파손까지의 사이클 수이며, σ_f 는 진 파괴 강도, σ_B 는 인장 강도, 그리고 ϵ_f 는 진 파괴 인성(fracture ductility)이다. 진 파괴 강도 σ_f 는 언제나 문헌상에 주어지지 않기 때문에, Manson은 다음과 같은 가정을 제시하였다.

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

그러나 이 방법은 매우 높은 사이클의 수명 범위에서는 과대 예측을 하게 되는 경향이 있다. 따라서 초기 공통 경사법을 수정하여, 후에 Muralidharan과 Manson은 변형률-수명 관계를

다음과 같이 표현하였다[4].

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

이 방법은 초기 방법에 비해서 탄성과 소성 기울기에 대하여 더 낮은 공통 경사를 주어 예측한 식이다. σ_B/E 항은 초기 공통경사법과는 달리 소성 변형률에 대한 계수로서 새롭게 제시되었는데, 재료의 인장강도를 사용하여 저사이클 피로에 있어서 수명에 대해 두드러진 영향을 보여주고 있다.

log-log 선에 소성 변형률-수명선(plastic line)의 경사가 거의 대부분의 재료에서 상수에 가깝다는 것은 일반적으로 잘 인정되는 가정이다. 그러나 탄성 변형률-수명선(elastic line)의 경사는 종종 매우 넓은 범위에 위치하게 되고 재료의 종적인 값인 경우가 많다. 따라서, 이러한 재료의존성을 고려하여 Mitchell[5]은 탄성선의 경사를 재료의 인장강도로부터 계산하는 방법을 제안하였다.

이 방법에서, 변형률-수명 관계는 변형률 범위 $\Delta\varepsilon/2$ 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, b 는 피로강도지수(fatigue strength exponent)이다. ε_f' 는 피로연성계수(fatigue ductility coefficient)이며, c 는 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다. Mitchell은 500 BHN 이하의 경도를 가지고 있는 강(steel)에 대해서,

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

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

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

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

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

결과적으로 식은 다음과 같이 나타난다.

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

Bäumel과 Seeger에 의해서 제안된 균일 재료법[6]은 그들이 수집한 많은 양의 데이터를 토대로 개발되었다. 이 방법은 공통 경사법의 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 단면수축률이나 피로 연성정도 필요했었다. 그들에 의해서 수집된 피로 데이터를 가지고 그들은 균일 재료법과 수정 공통 경사법이 어느 정도 예

측하는지를 측정하였다. 그들은 두 가지 방법들이 알루미늄과 티타늄 합금들에 대해서와 고합금강에 대해서 예측치와 실험치의 결과들이 비합금강과 저합금강들보다 더 큰 편차를 가지고 있음을 발견하였다.

따라서 그들의 균일 재료법은 비합금과 저합금 강에 대해서와 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서 두 가지 다른 식들이 사용되었다.

비합금강과 저합금강에 대해서:

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

여기에서,

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_B}{E} &\leq 0.003, \psi = 1 \\ \frac{\sigma_B}{E} &> 0.003, \psi = 1.375 - 125.0 \frac{\sigma_B}{E} \end{aligned}$$

알루미늄과 티타늄 합금에 대해서는,

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

으로 제시하였다.

강에 대해서는 탄성선과 소성선의 경사가 -0.087과 -0.58로서 수정 공통 경사법의 -0.09와 -0.56의 값들과 매우 비슷하다. 그러나 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서는 -0.69로서 매우 가파르다.

이후에 Ong[7]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 방

법은 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

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{6} \left\{ \log \left[0.16 \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{0.81} \right] - \log \left(\frac{\sigma_f}{E} \right) \right\} \\ c &= \frac{1}{4} \left[\log \left(\frac{0.00737 - \Delta \varepsilon_e^* / 2}{2.074} \right) - \log(\varepsilon_f) \right] \end{aligned}$$

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

이다.

이 방법에서 σ_f 값이 초기 공통 경사법처럼 데이터에서 구하는 것이 필요하다. Ong은 이 σ_f 값을 Eq. 2와 같이 근사할 수 있다고 언급하였다.

3. 인장시험 결과를 통한 피로시험 예측

인장 시험 및 피로 시험 결과는 참고문헌[10]을 사용하였다. 초기 공통 경사법과 수정 공통 경사법, Mitchell의 방법, Bäümel과 Seeger의 방법, Ong의 방법을 사용하여 수명 예측을 하면 Fig. 1과 같이 나타난다. 여기에서, Bäümel과 Seeger의 방법은 비철 계열의 식인 알루미늄과 티타늄 합금의 Eq. 10을 사용하였다.

Figure 1에서는 저사이클 피로 수명이 대부분 예측 방법의 경우 과소 예측하고 있으며, 수정 공통 경사법과 Ong의 방법은 과대 예측하고 있다. 대부분의 데이터가 예측이 되지 않는 이유는 위의 식들이 강 등에 의해서 구성된 식이기 때문으로 사료되며[10], 응력 증가에 따른 수명의 감소 정도가 더 적기 때문인 것으로 여겨진다.

따라서 이러한 결과들을 바탕으로 새로운 수명식을 구성해야 할 필요가 있다. Fig. 1에서 Ong의 방법을 제외하고는 다른 방법들은 수명이 긴 피로 시험 데이터일수록 원래 예측치보다 더 과소 예측되는 것들을 관찰할 수 있다. 이는 구리합금의 고온 피로 시험 결과, 피로강도 지수 (fatigue-strength exponent)와 피로연성 지수 (fatigue-ductility exponent)가 공통 경사법 등에 비해서 낮은 결과를 나타내고 있기 때문이다. Eq. 4에서 나타난 형태로 피로강도 지수와 피로연성 지수를 계산해 보면 Table 1과 같이 나타난다. Table 1에서 Ong의 모델을 제외하고는 피로강도 지수값이 -0.1 정도, 피로연성 지수값이 -0.6 정도로 고정되어 있기 때문에, 구리합금의 수명 특성을 잘 예측한다고 볼 수 없다. 그러나 Ong의 방법은 강도에 따라서 피로강도 지수값과 피로연성 지수값이 변하기 때문에 구리합금과 같이 철강이나 알루미늄과는 매우 다른 특성을 가진 합금에 사용되기에 더 적합하다고 볼 수 있다. 그러나 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 Ong의 방법이 대부분 수명을 과대 예측하고 있기 때문에 Eq. 11에 대한 보정이 필요하다.

Ong의 방법으로 과대 예측된 결과를 정확한 예측을 위해 Eq. 11을 다음과 같이 수정한 예측식을 제시하였다.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = C_f \left\{ \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \right\} \quad (12)$$

이 때, C_f 의 값은 원래 Ong의 방법에서는 1이지만, 400, 500 °C의 구리합금의 피로 수명에서는 0.8이 가장 좋은 수명 예측 결과를 보여주었다. Fig. 2는 수정된 Ong의 방법을 통하여 구리합금의 피로 수명을 예측한 결과이다. 그림에서 나타난 것과 같이 수정된 Ong의 방법은 3X 흠어짐(scatter) 범위에서 수명을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 현재 구리합금의 수명 데이터가 많지 않기 때문에 제시된 식이 정확한 수명 예측식으로 사용하기에는 무리가 있지만, 본 논문에서 제시된 수정 Ong의 방법은 대략적인 수명을

Table 1. Fatigue Strength Exponents and Fatigue Ductility Exponents about Each Model at Elevated Temperatures

	400°C		500°C	
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Original U.	-0.12	-0.6	-0.12	-0.6
Modified U.	-0.09	-0.56	-0.09	-0.56
Mitchell's	-0.1456	-0.6	-0.1705	-0.6
Seeger's	-0.095	-0.69	-0.095	-0.69
Ong's	-0.0476	-0.3782	-0.0410	-0.3590
Exponents from data	-0.0407	-0.3264	-0.0833	-0.3968

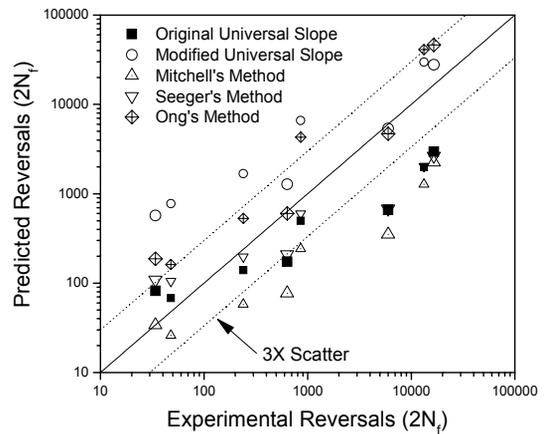


Fig. 1 Fatigue Life Prediction with Various Prediction Methods

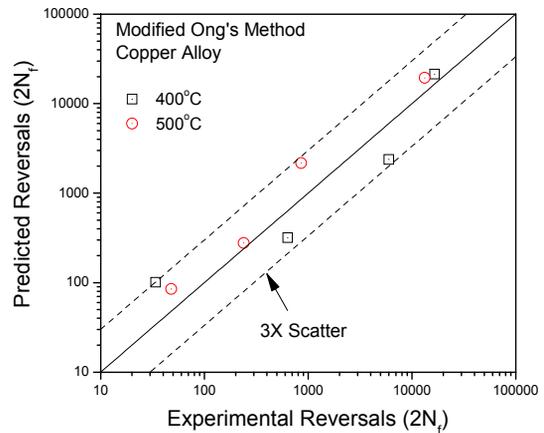


Fig. 2 Fatigue Life Prediction of Copper Alloy with Modified Ong's Method

예측하기에 좋은 식으로 보인다. 실제로 연소실을 위한 구리합금의 개발과정에서 인장 시험에 비해 피로 시험은 거의 수행되고 있지 않기 때문에 본 식을 사용하여 피로 시험을 수행하지 않고 수명 예측이 가능하게 된다. 예측된 수명식을 연소실의 열피로 수명 예측에 사용될 수 있으며, 보다 신뢰성 있는 연소기를 설계할 수 있다.

4. 결 론

연소기 내피에 사용하는 구리합금의 피로 수명을 단순 인장 시험 결과를 통해 예측하기 위하여 기존 연구자들의 모델을 사용하였으며, 기존의 피로 수명 예측 결과로서는 구리 합금의 피로 시험을 예측한 것들이 잘 맞지 않아 Ong의 방법을 수정한 구리합금을 위한 새로운 수명식을 개발하였으며, 이 수정된 Ong의 방법은 3X 흠어짐 범위에서 구리합금의 수명을 잘 예측하였다.

참 고 문 헌

1. 류철성, 정용현, 최환석, 이동주, "액체로켓 연소기 재생냉각 채널 상온 구조해석," 한국추진공학회지, 제9권, 제4호, 2005, pp.39-47
2. 류철성, 백운봉, 최환석, "Bodner-Partom 점소성 모델을 이용한 액체로켓 연소기 재생냉각 채널 구조해석," 한국추진공학회지, 제10권, 제4호, 2006, pp.69-76
3. Manson, S. S., "Fatigue - a Complex Subject," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, No. 7, 1965, pp.193-226
4. Muralidharan, U. and Manson, S.S., "A modified universal slopes equation for estimation of fatigue characteristic of metals", *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol 110, 1988, pp.55-58
5. Mitchell, M. R., "Fatigue and Microstructures," *American Society for Metals, Metals Pack, OH*, 1979, pp.385-437
6. Bäuml, A. Jr and Seeger, T., "Materials Data for Cyclic Loading, Supplement 1," Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1990
7. Ong, J. H., "An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data", *Int. J. Fatigue*, Vol. 15, 1993, pp.213-219
8. Park, J. H., Song, J. H., "Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties", *Int. J. Fatigue*, 17(5), 1995, pp.365-373
9. Lee, K. O., Bae, K. H., Lee, S. B., "Comparison of prediction methods for low-cycle fatigue life of HIP superalloys at elevated temperatures for turbopump reliability", *Mat. Sci. Engg. A*, Vol. 519, 2009, pp.112-120
10. 이금오, 류철성, 최환석, "액체로켓 연소기 재생냉각 챔버용 구리합금의 피로수명 예측," *항공우주기술*, 제9권, 제2호, 2010, pp.90-97