

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.6.073>

연소기 재생냉각 채널용 구리합금의 피로수명에측

이금오^{a,*} · 유철성^a · 허성찬^a · 최환석^a

Predictions of Fatigue Life of Copper Alloy for Regenerative Cooling Channel of Thrust Chamber

Keumoh Lee^{a,*} · Chulsung Ryu^a · Seongchan Heo^a · Hwanseok Choi^a

^aCombustion Chamber Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: kol@kari.re.kr

ABSTRACT

Low-cycle thermal fatigue problem resulting from multiple use of a liquid rocket engine has to be considered for the development of a reusable launch vehicle. In this study, life prediction equations suggested by previous researchers were compared as applied to various copper alloy cases to predict fatigue lives from tensile test data. The present study has revealed that among the presently considered life prediction methods, universal slopes method provides the best life prediction result for the copper alloys, and the modified Mitchell's method provides the best life prediction result for oxygen free high conductivity (OFHC) copper.

초 록

재사용 발사체용으로 개발되는 엔진은 반복 사용 조건에 따른 저사이클 열피로 문제를 고려해야 한다. 본 연구는 연소기 재생냉각채널에 사용되는 구리합금의 피로수명을 인장시험 데이터로부터 예측하기 위하여 기존의 연구자들이 제안하였던 수명예측식을 다양한 종류의 구리합금의 경우에 적용하여 비교하였다. 제안된 수명예측식 중 공통경사법은 구리합금의 수명 예측에서 가장 좋은 결과를 보여 주었으며, 수정 Mitchell 방법은 OFHC 구리의 수명 예측에서 가장 좋은 결과를 보여주었다.

Key Words: Liquid-propellant Rocket Engine(액체추진 로켓 엔진), Copper Alloy(구리 합금), Low-cycle Fatigue(저사이클 피로), Life Prediction(수명 예측)

1. 서 론

Received 8 February 2017 / Revised 6 August 2017 / Accepted 12 August 2017
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회(2016. 12. 21-23, 강원랜드 컨벤션호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

우주왕복선(Space Shuttle) 프로그램의 종료와 함께 재사용 발사체에 대한 개발 계획이 없어지다가, 최근의 민간우주기업들의 재사용 발사체에

대한 시도로 말미암아 발사체의 재사용은 다시 금 주목받고 있다. 많은 재생냉각 로켓 엔진 연소기는 한번이나 몇 번의 검증을 위해서만 고온에서 구동하는 사이클을 필요로 하였다. 그러나 재사용 발사체를 고려하여 개발되고 있는 엔진들은 재사용을 필요로 하는 현재의 요구조건에서는 저사이클 열피로의 문제를 고려해야 한다. 로켓 엔진 연소기가 높은 성능을 내기 위한 작동 조건은 심각한 열환경을 발생시킨다. 반복되는 작동과정에서 이러한 열적 조건을 잘 견디기 위해서는 연소기의 소재는 높은 열전도도와 높은 열피로 저항성을 가지고 있어야 한다[1].

구리 기반의 합금들은 이러한 성질을 가지고 있으며, 구리 기반으로 제작되는 연소실 벽면의 재생냉각 챔버(regenerative cooling chamber)는 고온의 연소가스로부터 연소실의 열손상을 방지하기 위해서 연소실 내부에서 냉각 채널을 통해 연료를 유동시켜 연소실의 벽면을 냉각시킨다. 이 때 재생냉각 챔버는 냉각채널 내부의 압력과 연소 가스에 의해 발생하는 열팽창에 따른 높은 응력으로 말미암아 얇은 채널 벽에 열적-기계적 라체팅(thermal/mechanical ratcheting) 현상이 발생한다[2]. 연소가스의 유동에 대해 수직면을 관찰하면, 초기에 사각 형태로 존재하는 재생냉각 채널이 개집(doghouse) 형태(Fig. 1)로 채널 상부가 팽창하여 연소실의 중심축 방향으로 볼록 솟아 얇은 채널 벽이 더 얇아지게 하고 파손되어 연소실 안으로 연료가 침투하게 된다. NASA에서는 스페이스 셔틀 메인 엔진(SSME) 제작을 위한 기초 자료로 다양한 종류의 구리합금에 대한 인장시험 및 저사이클 피로 시험을 수행하였으며[1], 이러한 개집 형태로 진행되는 파손을 예측하기 위한 연구들이 수행되었다[2].

본 연구에서는 연소실 소재로 많이 사용하는 구리합금에 대한 고온 수명 예측을 인장시험 데이터로 예측할 수 있는지 확인하기 위하여 기존의 강(steel) 및 알루미늄(aluminum) 등에서 사용하였던 저사이클 피로 수명 예측 연구식[3-9]을 사용하여 비교하였으며, 이를 위해 NASA의 저사이클 피로시험 연구 데이터[1]와 KARI의 저사이클 피로시험 연구 데이터[10]를 이용하여,

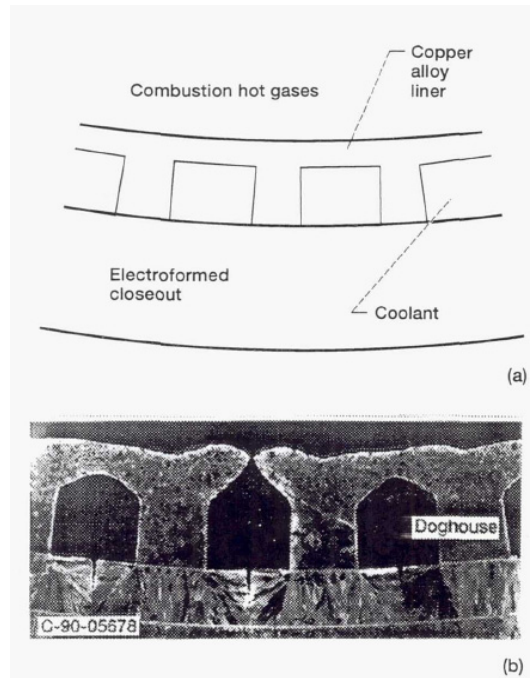


Fig. 1 Example of doghouse failure of coolant channels before and after deformation[2].

기존의 모델들의 예측 정확도를 비교 검증하였다.

2. 수명식 비교를 위해 사용한 데이터

기존의 피로 수명식들을 비교하기 위해 사용된 구리합금 소재들과 인장시험 데이터는 Table 1과 같다. NASA에서 시험에 사용했던 소재[1]는 Zr-Cu, Te-Cu, Cr-Cu, OFHC (Oxygen Free High Conductivity) Cu, Zr-Cr-MgCu, Electroformed Cu, Co-Be-Zr-Cu 이었으며, 여러 열처리 조건 (Annealed, Hardened, Solution Annealed (SA), Cold Worked, Aged)을 가지고 있다. 은(Ag)은 구리합금과의 비교를 위해 추가로 시험을 한 것으로 보인다. 주로 538°C(1000°F)의 아르곤 분위기에서 시험을 수행하여 각 소재의 인장 물성치 및 피로 물성치를 비교하였다. 구리합금 노즐에 외피를 전기주조(Electroforming)하는 NASA와는 달리 KARI[10]에서는 크롬 구리합금(Cr-Cu)을 브레이징하여 외피와 접합하기 때문에 브레이징

열처리를 수행한 구리합금 소재에 대해 400°C와 500°C에서 인장시험 및 피로시험을 수행하였다. 고온에서 인장시험 및 변형률 제어 피로 시험을 수행하기 위해서 고온 챔버 안에서 온도를 제어한 이후, 인장계(extensometer)를 사용하여 총 변형률 제어 피로시험(total strain controlled fatigue test)을 총 변형률 범위 0.5%에서 3%까지 수행하였다. 각각의 소재 이름과 재료 상태를 그림에 간략하게 표기하기 위해서 각 소재의 약어를 Table 1에 정리하였다.

Fig. 2와 Fig. 3에서는 각각 NASA에서 수행한 저사이클 피로 시험 데이터와 KARI에서 수행한

저사이클 피로 시험 데이터를 총 변형률 범위에 대해서 나타내고 있다. 주어진 총 변형률 범위에서는 Zr2H와 Zr4H가 가장 높은 수명을 가지고 있는 것을 알 수 있으며, 전기주조소재(Elfm)와 OF4H가 가장 낮은 수명을 가지고 있다.

3. 인장시험 결과를 통한 피로시험 예측 결과 비교

Manson이 제시한 공통경사법(Universal slopes method)[3]은 수명-변형률 그래프에서 소성선과 탄성선의 기울기를 -0.6과 -0.12로 공통화

Table 1. Tensile test results of various copper alloys including silver at elevated temperature.

Material	Temp	Environ	Material Condition	0.2%	UTS	RA	Abbreviation	Ref.
	(°C)	ment		offset YS	(MPa)	(%)		
Zr-Cu	538	Argon	Annealed	33.05	85.8	95.5	ZrAn	[1]
Zr-Cu	538	Argon	1/4 Hard	194.7	197.8	85	Zr4H	
Zr-Cu	538	Argon	1/2 Hard	212.5	216.5	84	Zr2H	
Te-Cu	538	Argon	1/2 Hard	24.75	74.15	28	Te2H	
Cr-Cu	538	Argon	SA & Aged	254.5	262	17.5	CrSA	
OFHC Cu	538	Argon	Hard	23.45	70.3	65	OF-H	
OFHC Cu	538	Argon	1/4 Hard	16.6	67.9	28	OF4H	
OFHC Cu	538	Argon	Annealed	23.45	61.05	51	OFAn	
Ag	538	Argon	As Drawn	16.9	34.2	99	AgDr	
Zr-Cr-MgCu	538	Argon	SA, CW & Aged	295.5	308.5	40.5	ZCMC	
Electroformed Cu	538	Argon	30-35 ksi	34.3	45.5	5	Elfm	
Co-Be-Zr-Cu	538	Argon	SA & Aged	243	260.5	8	CBZC	
Cr-Cu	400	Air	Brazed	31.3	113.6	$\epsilon_f=10.17$	CrB4	
Cr-Cu	500	Air	Brazed	28.95	73.9	$\epsilon_f=8.95$	CrB5	

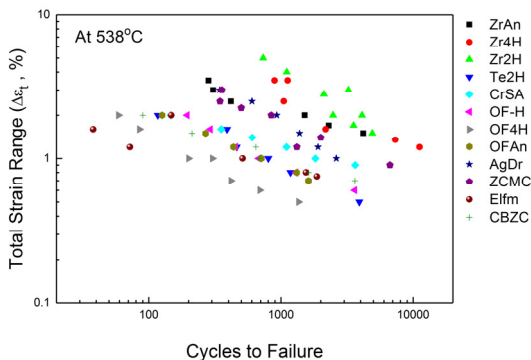


Fig. 2 Cycles to failure data with total strain range of various copper alloys tested from NASA[1].

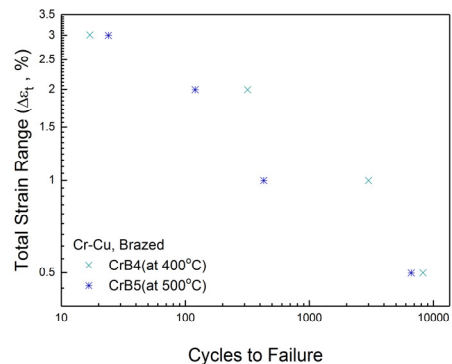


Fig. 3 Cycles to failure data with total strain range of chromium-copper alloy tested from KARI[10].

(universalized)하여 대부분의 재료에 적용하였으며, 이 식은 단순함과 적용의 용이성으로 인해 매우 널리 사용되었다. 이 식은 다음과 같다.

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

여기에서 $\Delta\epsilon$, $\Delta\epsilon_e$, 그리고 $\Delta\epsilon_p$ 는 각각 총(total), 탄성(elastic), 소성(plastic) 변형률의 변동값이다. 그리고 N_f 는 파손시까지의 사이클 수이다. 또한 σ_B 와 ϵ_f 는 각각 인장강도(ultimate tensile strength)와 재료의 파단 변형률(strain at failure)이다. Table 1의 인장시험 데이터를 사용하여 공통경사법을 이용한 수명 예측 결과와 실제 저사이클 피로시험 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4에서는 많은 데이터가 두 점선으로 표시된 것과 같이 3X 흠어짐 범위 내에 들어오는 것들을 볼 수 있으나 은(AgDr)과 OFHC 구리합금류(OF-H, OF4H, OFAn)는 대부분 과대 예측하는 경향이 있음을 알 수 있다. 저사이클 피로 시험 데이터의 흠어짐 범위가 비교적 컸던 전기주조 구리합금(Elfm)은 대부분이 과소 예측하는 결과를 가져왔으며, KARI의 크롬-구리합금도 400°C의 데이터(CrB4)가 대부분 과소 예측하는 결과가 나왔다.

진 파괴 응력 σ_f 는 NASA의 데이터를 포함하여 일반적으로 문헌상에 주어지지 않기 때문에, Manson은 다음과 같은 가정을 제시하였다[3].

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

후에 Muralidharan과 Manson[4]은 초기 공통경사법을 수정하여, 변형률-수명 관계식을 다음과 같이 표현하였다.

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

이 수정된 공통경사법(modified universal

slopes method)은 초기 방법에 비해서 탄성선과 소성선에 대하여 약간 더 낮은 값의 공통경사를 사용하였다. Fig. 5에서는 수정 공통경사법을 사용하여 구리합금들의 수명을 예측한 결과를 나타내고 있다. 구리합금에 대한 수정 공통경사법은 원래의 공통경사법에 비해 오히려 흠어짐이 증가되는 것들을 볼 수 있다. 절반 이상의 데이터들이 3X 흠어짐 범위를 벗어나 과대 예측하는 것들을 볼 수 있으며, Zr2H의 일부 데이터만 과소 예측하는 것들을 관찰할 수 있다.

피로수명-변형률 범위의 log-log 선에 소성 변형률-수명관계선(plastic line, 소성선)의 경사가 거의 대부분의 재료에서 거의 상수라는 것은 상

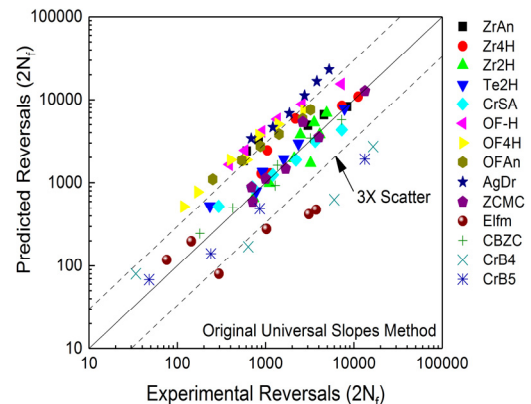


Fig. 4 Fatigue life estimation of copper alloys with original universal slopes method.

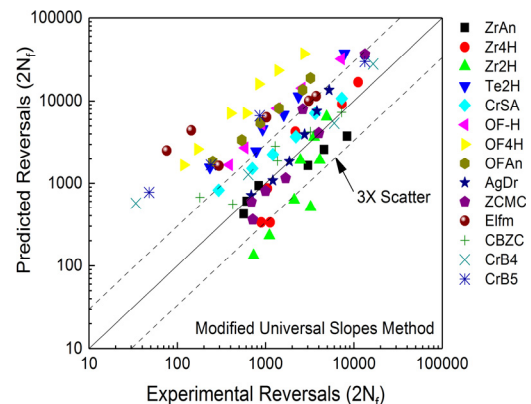


Fig. 5 Fatigue life estimation of copper alloys with modified universal slopes method.

대적으로 잘 인정되고 있는 가정이다. 그러나 탄성 변형률-수명 관계(elastic line, 탄성선)의 경사는 종종 매우 넓은 범위 내에 위치하게 되고 재료 의존적인 값이다. 이러한 재료 의존성을 고려하여 Mitchell[5]은 탄성선의 경사를 재료의 인장 강도로부터 계산하는 방법을 제안하였으며, 이 방법에서, 변형률-수명 관계는 변형률 범위 $\Delta\epsilon/2$ 와 번복수(number of reversals to failure)의 $2N_f$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

여기에서 σ_f' 는 피로강도계수(fatigue strength coefficient)이고, b 는 피로강도지수(fatigue strength exponent), ϵ_f' 는 피로연성계수(fatigue ductility coefficient)이며, c 는 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다. Mitchell은 500 BHN 이하의 경도를 가지고 있는 강에 대해서 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

$$b = \frac{\log(\sigma_f'/E) - \log(\sigma_B/2E)}{\log(10^0) - \log(10^6)} \quad (6)$$

$$= -\frac{1}{6} \log\left(\frac{2\sigma_f'}{\sigma_B}\right) = -\frac{1}{6} \log\left[\frac{2(\sigma_B + 345)}{\sigma_B}\right]$$

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

여기에서 RA 는 단면수축률(percentage reduction in area)이다.

Mitchell은 소성선을 특정한 값 c 를 쓰는 대신에 경도(hardness)와 천이 피로 수명(transition fatigue life) $2N_t$ 를 경험적으로 구할 수 있는 대푯값을 가지고 구성하는 것을 제안하였다. 그러나 경도-천이 피로 수명 데이터는 언제나 유용하게 제공되지 않기 때문에, 대부분의 재료에서 일반적으로 사용되는 평균값 c 인 $c = -0.6$ 을 소성

선(plastic line)의 기울기로 대신 사용하였다.

결과적으로 식은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \\ &= \frac{(\sigma_B + 345)}{E} (2N_f)^b - \frac{1}{6} \log\left[\frac{2(\sigma_B + 345)}{\sigma_B}\right] \\ &\quad + \epsilon_f (2N_f)^{-0.6} \end{aligned} \quad (8)$$

Mitchell의 방법을 사용하여 구리합금들의 수명을 예측한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 수정 공통경사법과 같이 데이터의 흠어짐이 매우 심한 것들을 볼 수 있으며, 흠어짐이 큰 소재들은 초기 공통경사법의 결과와 같이 은(AgDr)과 OFHC 구리합금류(OF-H, OF4H, OFAn)이 대부분 과대 예측하는 경향이 있음을 알 수 있으며, Zr-Cu 합금류(ZrAn, Zr4H, Zr2H)도 유사한 경향이 있음을 알 수 있다. 초기 공통경사법의 경향과 비슷하게 전기주조 구리합금(Elfm)과 KARI의 크롬-구리합금 400°C의 데이터(CrB4)가 대부분 과소예측하는 결과가 나왔다.

Lee등[6]은 니켈 기반 초합금의 고온 피로 수명 평가에서 Mitchell의 방법을 수정하여 좋은 결과를 얻었다. 그 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \\ &= \frac{(\sigma_B + 345)}{E} (2N_f)^b - \frac{1}{6} \log\left[\frac{2(\sigma_B + 345)}{\sigma_B}\right] \\ &\quad + 0.64\epsilon_f (2N_f)^{-0.66} \end{aligned} \quad (9)$$

수정된 Mitchell의 방법을 사용하여 구리합금들의 수명 예측한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7의 결과는 과대 예측한 은(AgDr)을 제외하고 대부분의 재료가 3X 흠어짐 범위에 있는 것들을 알 수 있으며, CBZC, 전기주조 구리합금, KARI 크롬-구리합금들이 과소 예측하는 것들을 알 수 있다. 수정된 Mitchell 방법으로 구리합금 수명을 예측할 때 과대 예측을 하지 않기 때문에 보수적인(conservative) 설계가 가능하게 하며, 상당히 많은 데이터들이 3X 흠어짐 범위에 존재함으로 많은 종류의 구리합금에 대하여 비

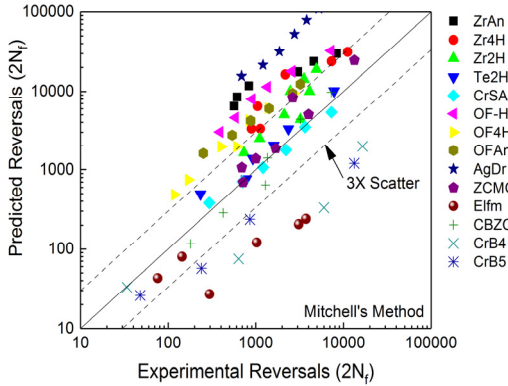


Fig. 6 Fatigue life estimation of copper alloys with original mitchell's method.

교적 정확한 수명 예측을 가능하게 하는 것들을 알 수 있다. 다만 짧은 연신을 또는 RA를 가지고 있는 구리합금 소재(Elfm, CBZC, CrB4, CrB5)에 대해서는 과소 예측하는 경향이 있기는 하나 이 또한 보수적인 설계가 가능하기 때문에 큰 문제요소는 아니라고 할 수 있다.

Baumel과 Seeger에 의해서 제안된 균일 재료 법[7]은 그들로부터 수집된 많은 양의 데이터를 토대로 구해졌는데, 이 방법은 다른 방법들과 비교해서 재료의 단면 수축률이나 피로 연성이 필요없이 오직 인장강도만을 사용하여 변형률-수명 곡선을 예측한다는 데 있다. 이 방법에서는 비합금(unalloyed)과 저합금(low-alloy) 강에 대해서와 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서 두 가지 다른 식들이 사용되었다.

비합금과 저합금 강에 대한 변형률-피로수명 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \\ &= 1.50 \frac{\sigma_B}{E} (2N_f)^{-0.087} + 0.59\psi (2N_f)^{-0.58} \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서,

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

이다.

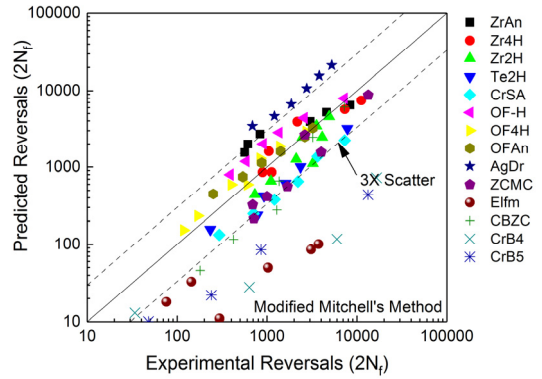


Fig. 7 Fatigue life estimation of copper alloys with modified mitchell's method.

알루미늄과 티타늄 합금에 대한 변형률 피로 수명 관계식은 다음과 같이 제시되었다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \\ &= 1.67 \frac{\sigma_B}{E} (2N_f)^{-0.095} + 0.35 (2N_f)^{-0.69} \end{aligned} \quad (11)$$

Baumel과 Seeger의 균일 재료법은, 강에 대해서는 탄성선의 기울기와 소성선의 기울기가 각각 -0.087과 -0.58로서 수정 공통경사법의 -0.09와 -0.56의 값들과 매우 비슷하다. 그러나 알루미늄과 티타늄 합금에 대해서는 소성선의 기울기가 -0.69로서 매우 가파르며, 이는 수정 Mitchell의 방법의 소성선의 기울기와 비슷하다. 구리합금의 수명 예측에 대해서는 두 가지 종류의 식을 모두 사용하여 비교하였다.

Fig. 8은 강에서 사용하는 균일재료법을 구리합금에 적용한 결과이며, Fig. 9는 알루미늄과 티타늄 합금에서 사용되었던 균일재료법을 구리합금에 적용한 결과이다. Fig. 8과 Fig. 9는 상반된 결과를 보여주고 있는데, Fig. 8은 과소 예측되는 데이터가 거의 없으며, Fig. 9에서는 과대 예측되는 데이터가 거의 없다는 것이다. 보수적인 설계의 관점에서 본다면, Eq. 11을 사용한 Fig. 9의 결과가 가장 안전한 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 비록 많은 데이터들이 실제보다 과소 예측되고 있지만, 설계상 이 식을 사용할 때

많은 구리합금에서 위험하게 과대 예측하는 경우가 별로 발생하지 않아 설계상 사용하기에 가장 안전한 식이라고 할 수 있다.

Ong[8]이 제안한 수정 4점 연관법(four-point correlation)은 초기 4점 연관법을 개선한 것이었다. Ong은 4점 연관법을 향상시키기 위해서 기존에 사용하던 4점을 다시 바꾸었는데, 변형률-수명 관계는 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_c}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f(2N_f)^c \quad (12)$$

여기에서

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

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

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

이다.

Fig. 10은 Baumel과 Seeger의 예측(Fig. 8)과 비슷하게 과소 예측하는 데이터가 거의 없는 특징을 보여주고 있으며, Fig. 8에 비교할 때 조금 더 정확한 예측을 하고 있지만, 역시 OFHC 구리와 Te2H, Elfm, CBZC, CrB4, CrB5의 많은 데이터들이 과대 예측하는 경향을 보이고 있다.

4. 각 수명 예측식의 비교

구리합금에 대한 각각의 수명 예측식을 정량적으로 비교하기 위해서 일반적으로 Eq. 13과 같은 오차 기반의 예측식이 사용된다.

$$\frac{\text{Number of data falling within} \left[\frac{1}{s} \leq \frac{PV}{EV} \leq s \right]}{\text{Total number of data}} \quad (13)$$

이것은 수명 예측 방법들을 사용하여 예측한 데

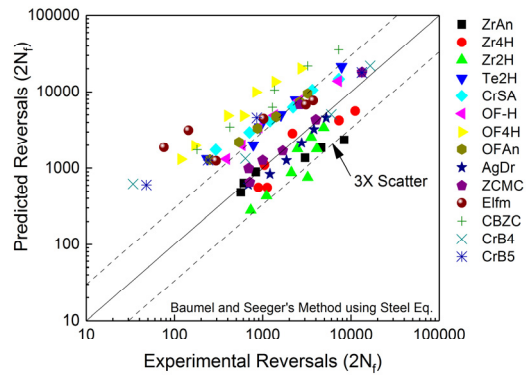


Fig. 8 Fatigue life estimation of copper alloys with baumel and seeger's method using steels' equation.

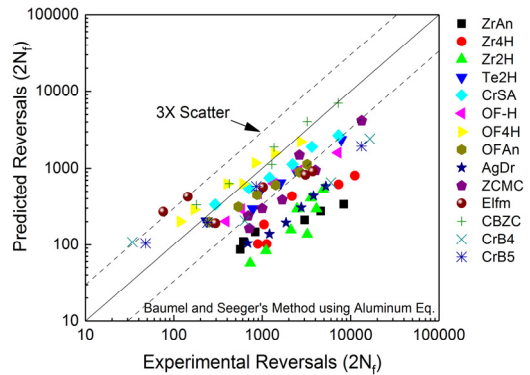


Fig. 9 Fatigue life estimation of copper alloys with baumel and seeger's method using aluminum alloys' equation.

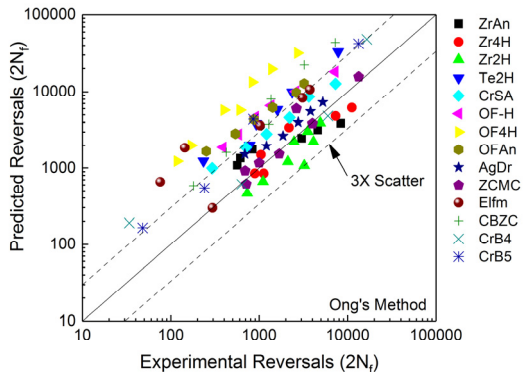


Fig. 10 Fatigue life estimation of copper alloys with ong's method.

이터가 어느 일정한 흠어짐 범위 s 안에 어느 정도의 비율(fraction)로 예측 데이터가 존재하는지를 평가하는 것[6, 9]이다. Eq. 13에서 $s=2$ 또는 3에서 흠어짐 범위 안에 예측된 데이터가 존재할 때 수명식의 예측이 잘 된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 $s=3$ 인 경우에 대해서 계산을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. Table 2는 각각의 소재들에 대해 3X의 흠어짐 범위 안에서 몇 개가 들어오는지 개수를 써 넣었으며, 전체 84개의 데이터에서 3X의 흠어짐 범위 내에 들어오는 비율을 최종적으로 계산하였다. 그 결과로 수정 Mitchell의 방법(Modified Mitchell's Method, MMM)으로 예측한 결과가 가장 많은 데이터를 3X 흠어짐 범위에 놓는 것(0.643)을 알 수 있었으며, 가장 흠어짐이 심한 결과는 기존 Mitchell의 방법(Original Mitchell's Method, OMM)이라는 것(0.412)을 알 수 있다. 또한 여기에서 특이한 결과는 은(Ag)의 저사이클 피로 수명 예측에서, Baumel-Seeger의 방법(BSM-Steel)과 Ong's 방법(OM)이 좋은 결과를 주었다는 것이다. 은에 대한 피로 수명 예측 결과는 구리합금을 상대적으로 잘 예측하는 다른 수명식과는 상관관계가 매우 적은 것들을 알 수 있다.

수명 예측식의 정확도를 평가할 수 있는 다른 방법은 실제 수명과 예측된 수명의 편차(deviation)를 계산하는 것이다[6]. 피로 수명 예측은 log-log 축을 가지고 있는 그래프에서 계산되기 때문에, 편차는 실제 수명(N_f)과 예측 수명(N_p)의 비율로 결정된다.

$$\begin{aligned} Dev(i) &= N_p/N_f, & N_p &\geq N_f \\ &= N_f/N_p, & N_f &< N_p \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서 $Dev(i)$ 는 i 번째의 예측 데이터의 편차를 의미한다. 즉, Eq. 14는 log-log 선도에서, 예측 데이터가 실제 데이터와 얼마나 차이가 나는지의 정도를 나타내는 것이다. 편차는 Eq. 14에 의해서 1보다 크게 계산된다. 전체 편차의 평균값을 계산하기 위해서는 다음과 같은 식을 사용하게 된다.

$$Aver. = \{Dev(1) \times Dev(2) \times \dots \times Dev(n)\}^{1/n} \quad (15)$$

여기에서 n 은 평가에 사용된 총 데이터 수(total number of data)이다.

Table 3은 각 수명 예측식의 편차의 평균값을

Table 2. Comparison of predictions methods within a factor of 3.

Materials Abbrev.	Total number of data	Number of data within a factor of 3						
		OUSM	MUSM	OMM	MMM	BSM-Steel	BSM-AI	OM
ZrAn	6	3	6	0	4	5	0	6
Zr4H	6	6	6	2	6	6	0	6
Zr2H	8	8	5	5	8	7	0	7
Te2H	6	6	0	6	5	2	5	1
CrSA	6	6	6	6	3	3	6	5
OF-H	6	1	0	0	6	2	5	1
OF4H	7	1	0	0	7	0	7	0
OFAn	6	3	0	0	6	2	6	0
AgDr	6	0	2	0	0	6	0	6
ZCMC	7	7	7	6	5	7	2	7
Elfm	6	2	0	2	0	2	3	3
CBZC	6	6	2	6	3	0	6	1
CrB4	4	1	3	1	1	3	0	3
CrB5	4	3	1	1	0	1	3	1
Total	84	0.631	0.452	0.417	0.643	0.548	0.512	0.559

계산한 것이다. 각각의 소재에 대한 편차의 최소값이 진한(bold) 숫자로 구별되어 있다. Zr-Cr과 Te-Cr에 대해서는 공통경사법(original universal slopes method, OUSM)이 가장 적은 편차를 가지고 있었으며, 다양한 합금을 섞은 ZCMC, CBZC의 경우에도 좋은 결과를 보여 주었다. OFHC 구리에 대해서는 MMM이 가장 좋은 결과를 보여주었으며, 은(Ag)에 대해서는 BSM-Steel이, KARI의 Cr-Cu에 대해서는 Ong의 방법이 가장 좋은 결과를 보여주는 것을 알 수 있다.

Table 3의 모든 데이터에 대한 편차의 평균을 냈을 때, 공통경사법(OUSM)이 가장 작은 편차를 가지고 있었으며, 수정공통경사법(MUSM)이 가장 큰 편차를 가지고 있다는 결과를 얻었다. 강이나 알루미늄 소재에 가장 적합한 결과를 얻었던 수정공통경사법[9]이 구리합금에서는 오히려 기존의 공통경사법보다 좋지 않은 결과가 나타난 것은 기존의 강이나 알루미늄 소재에 비해 구리합금 소재가 σ_B/E 값이 비교적 낮은 값을 가지고 있기 때문에 이로 인해서 기존의 강이나 알루미늄에서 더 잘 사용하기 위해 OUSM에서 수정한 MUSM이 더 맞지 않는 것으로 판단된다.

5. 결 론

재생냉각채널의 저사이클 열피로 수명을 예측하기 위해 NASA와 KARI의 구리합금 데이터를 사용하여 7종의 피로수명 예측식을 비교하였으며, 비교 결과는 다음과 같다.

- (1) 피로수명 예측식들에서 가장 좋은 수명 예측을 하는 예측식은 OUSM과 MMM이었으며, 가장 좋지 않은 예측식은 MUSM과 OMM이었다.
- (2) OUSM은 구리합금의 수명 예측에서 가장 좋은 결과를 보여 주었으며, MMM은 OFHC 구리의 수명 예측에서 가장 좋은 결과를 보여주었다. 은(Ag)에 대해서는 BSM-Steel이 가장 좋은 결과를 보여주었다.
- (3) 구리합금에 대한 과대 수명 예측을 하지않아 보수적인 설계가 가능한 피로 수명식은 MMM과 BSM-AI이었다.

후 기

본 연구는 “소형위성발사체개발사업”과 “한국형발사체개발사업”으로 수행되었습니다.

Table 3. Comparison of prediction method with the deviation from experimental data.

Materials Abbrev.	Total number of data	Number of data within a factor of 3						
		OUSM	MUSM	OMM	MMM	BSM-Steel	BSM-AI	OM
ZrAn	6	2.20	1.62	7.88	1.94	1.72	10.39	1.80
Zr4H	6	1.52	1.62	4.09	1.39	1.58	8.77	1.43
Zr2H	8	1.31	2.45	2.66	1.50	2.14	12.28	1.59
Te2H	6	1.31	5.37	1.40	2.33	3.40	2.22	3.92
CrSA	6	1.32	1.77	1.17	2.90	3.35	1.70	2.38
OF-H	6	3.68	6.98	7.21	1.81	3.10	2.42	4.23
OF4H	7	3.86	17.62	4.18	1.29	10.13	1.37	12.38
OFAn	6	2.95	8.25	4.58	1.25	3.60	2.09	4.74
AgDr	6	4.19	3.30	19.58	4.06	1.27	8.55	1.57
ZCMC	7	1.25	1.40	1.51	2.13	1.33	3.33	1.27
Elfm	6	3.44	8.70	6.41	15.42	5.94	2.77	3.81
CBZC	6	1.24	3.09	1.43	2.45	6.79	1.34	4.55
CrB4	4	4.76	2.90	6.03	16.21	2.79	4.97	2.14
CrB5	4	2.33	7.06	4.20	11.25	4.68	2.27	3.34
Total		2.24	3.85	3.80	3.00	3.07	3.46	2.85

References

1. Conway, J.B., Stentz, R.H. and Berling, J.T., "High Temperature, Low-Cycle Fatigue of Copper-Base Alloys in Argon; Part I - Preliminary Results for 12 Alloys at 1000°F (538°C)," NASA CR 121259, 1973.
2. Arya, V.K. and Halford, G.R., "Large-Displacement Structural Durability Analyses of Simple Bend Specimen Emulating Rocket Nozzle Liners," NASA TM 106521, 1994.
3. Manson, S.S., "Fatigue - a Complex Subject," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, No. 7, pp. 193-226, 1965.
4. Muralidharan, U. and Manson, S.S., "A Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue Characteristic of Metals," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, Issue 1, pp. 55-58, 1988.
5. Mitchell, M.R., *Fatigue and Micro-structures*, American Society for Metals, Metals Pack, O.H., U.S.A., pp. 385-437, 1979.
6. Lee, K.O., Bae, K.H. and Lee, S.B., "Comparison of Prediction Methods for Low-Cycle Fatigue of HIP Superalloys at Elevated Temperatures for Turbopump Reliability," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 519, Issue 1-2, pp. 112-120, 2009.
7. Baumel, A.J. and Seeger, T., *Materials Data for Cyclic Loading, Supplement 1*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1990.
8. Ong, J.H., "An Improved Technique for the Prediction of Axial Fatigue Life from Tensile Data," *International Journal of Fatigue*, Vol. 15, No. 3, pp. 213-219, 1993.
9. Park, J.H. and Song, J.H., "Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties," *International Journal of Fatigue*, Vol. 17, No. 5, pp. 365-373, 1995.
10. Lee, K.O., Ryu, C.S. and Choi, H.S., "Comparison of Life Prediction Method of Copper Alloy of Regenerative Cooling Chamber for Thrust Chamber," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 90-97, 2010.