

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2022.26.5.001>

로켓엔진용 구리크롬 합금의 저주기 피로수명 예측방법 비교 및 평가

박종찬^a · 김재훈^{b,*} · 이금오^c

Comparison and Evaluation of Low-Cycle Fatigue Life Prediction Methods Using Cu-Cr Alloy Developed for Rocket Engines

Jongchan Park^a · Jae-Hoon Kim^{b,*} · Keum-Oh Lee^c

^aLaunch Vehicle System Integration Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

^bSchool of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

^cSmall Launcher R&D Program Office, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

For Cu-Cr alloy developed for rocket engines, estimated fatigue lives were calculated using various fatigue life prediction methods and compared with fatigue life acquired from low-cycle fatigue tests. The utilized methods for fatigue life prediction are as follows: Coffin-Manson relation, plastic/total strain energy density relations, Smith-Watson-Topper relation, Tomkins relation, and Jahed-Varvani relation. As results of estimation of fatigue lives, it satisfied within scatter band two compared to the test fatigue lives in all methods. The quantitative calculation of the deviation of predicted fatigue lives gives that the total strain energy density relation presents the best result.

초 록

로켓엔진용으로 개발된 구리크롬 합금에 대해 저주기 피로시험을 수행하고 여러가지 피로수명 예측방법을 이용해 예측수명을 구하여 이를 시험수명과 비교하여 보았다. 피로수명 예측방법으로는 Coffin-Manson 관계식, 소성 및 전 변형률 에너지 밀도 관계식, Smith-Watson-Topper 관계식, Tomkins 관계식, Jahed-Varvani 관계식 등 총 6가지 방법을 이용하였다. 피로 예측수명을 계산한 결과 모든 방법에서 시험수명 대비 분산범위 2 이내를 만족하였다. 예측수명 편차의 정량적 확인을 통해 전 변형률 에너지 밀도 관계식이 가장 우수한 결과를 나타냈다.

Key Words: Cu-Cr Alloy(구리크롬 합금), Low-Cycle Fatigue(저주기 피로), Life Prediction(수명 예측)

Received 9 August 2022 / Revised 26 September 2022 / Accepted 3 October 2022

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

σ_f'	: Fatigue strength coefficient
b	: Fatigue strength exponent
ϵ_f'	: Fatigue ductility coefficient
c	: Fatigue ductility exponent
$\Delta\epsilon/2$: Total strain amplitude
E	: Elastic modulus
N_f	: Failure life
$2N_{f,test}$: Tested reversals to failure
$2N_{f,est}$: Estimated reversals to failure
$\Delta w_p, \Delta w_e^+, \Delta w_t$: Plastic, tensile elastic, and total strain energy density
PSED	: Plastic strain energy density
TSED	: Total strain energy density
RT	: Room temperature

1. 서 론

구리합금(copper alloy)은 열 및 전기 전도 특성과 가공성이 우수한 구리 재료의 장점을 유지하고 낮은 강도 및 부식성 등의 단점을 개선할 목적으로 다양하게 개발되어 왔다. 구리크롬 합금은 구리에 0.5~1.2% 정도 크롬이 함유된 구리합금 중 한 종류이다. 이 합금은 1000℃ 내외의 용체화(solidification) 처리 후 400~500℃ 정도의 온도에서 시효(aging) 열처리를 수행하면 크롬의 석출 경화(precipitation hardening)로 강도 및 취성이 상승하는 특징을 갖는다. 이를 통해 본 합금은 전도성이 순수 구리의 85% 수준까지 확보되며, 강도가 상승하고 특히 고온에서 강도를 유지하는 특성이 좋으며, 냉간 및 열간 가공성도 우수하다고 알려져 있다[1,2]. 이러한 특성으로 크롬 등을 포함한 구리합금은 고온 환경에 우수한 열전도 특성이 요구되는 경우에 주로 사용되는데, 로켓엔진 연소기의 내부 소재[3-5] 및 핵융합 발전용 설비[6-8] 등이 대표적인 활용 사례이다.

이와 같은 환경에서는 재질에 인가되는 작동

조건 및 열조건 등에 의해 반복 하중이 인가되게 되는데 이는 재료에 피로파괴를 유발하게 된다. 제품을 설계하는 단계에서 제품의 피로수명을 정확히 예측하는 것은 제품의 신뢰성 및 경제성, 안전성 측면에서 대단히 중요하다. 이를 위해 많은 연구자들이 다양한 재질 및 환경조건 하에서 피로수명을 예측하는 방안을 지속적으로 제안하여 왔다[9].

본 논문에서는 구리크롬 합금의 한 종류인 Cu-0.6 wt%Cr을 적용한다. 본 재질은 한국항공우주연구원에서 액체 로켓엔진 연소기의 내부면에 적용하기 위해 개발한 재질이다[10]. 구리합금은 일반적으로 조성 및 열처리의 미세한 차이에도 물성이 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 시험 재질과 유사한 조성의 합금에 대한 정보를 문헌상에서 찾는 것이 쉽지 않은데, 국내에서는 본 연구의 이전 연구에 해당하는 한국항공우주연구원의 연구 외에는 주로 크롬이 코팅된 구리박막에 대한 연구[11]와 구리크롬 소결 재질에 대한 연구[12]가 대부분이다. 해외에서는 Cu-Cr 및 이 재료의 특성을 개선하기 위해 지르코늄(Zr)이나 티타늄(Ti) 등을 소량 추가한 3상, 4상 구리합금에 대한 다양한 피로특성 연구가 수행되었으나, 본 재질과 조성이 유사하다더라도 열처리 및 제조 방법이 다르거나[13], 조성의 차이[3,14]로 직접적인 비교를 하기에는 어렵다고 할 수 있다.

본 논문에서는 Cu-0.6 wt%Cr을 다양한 온도 조건 하에서 저주기 피로시험을 수행한 결과를 여러 가지 피로수명 평가방법에 따라 예측수명을 구하고 시험수명과 비교하여 평가 방법별 예측 정확도를 비교, 평가한다. 이를 위해 본 재질의 인장 및 저주기 피로시험 수행 결과[15]를 이용하여 기존에 평가한 2가지 평가 방안인 Coffin-Manson 관계식 및 Morrow 관계식 외에 전 변형률 에너지 밀도를 이용하여 평가하는 방안, Smith-Watson-Topper 관계식, Tomkins 관계식 그리고 Jahed-Varvani 관계식 등 총 6가지의 피로수명 평가식을 이용하여 예측 피로수명을 계산하고 시험수명과 비교하여 보았다.

2. 재료 및 시험

시험에 사용한 재료는 구리크롬 합금 Cu-0.6 wt%Cr으로, 본 소재는 크롬 0.6% 외 철(Fe) 및 규소(Si) 등도 포함되나 크롬 외 소재는 첨가물 및 불순물 수준으로 관리한다. 열처리를 완료한 소재를 ASTM 규격에 따라 봉 형태의 인장 시편 및 피로 시편을 제작하여 시험에 적용하였다.

소재의 기본 물성을 확인하기 위한 인장시험은 1 mm/min의 변위제어를 통해 상온에서부터 700°C까지 시험 온도별로 3회씩 실시하였다. 저주기 피로시험도 동일한 온도 범위에 대해 변형을 제어 조건으로 각 온도별로 4회씩 수행하였다. 인가한 변형률은 전 변형률 범위(total strain range)를 기준으로 최대 수명이 수만 사이클 이내가 되도록 하고 압축하중 인가 시 좌굴(buckling)이 생기지 않는 범위 이내가 되도록 고려하여 최소 0.5%에서 최대 1.5%(상온의 경우 최대 2.5%)까지 완전 교번 변형률(fully reversed strain, $R_\epsilon = -1$)로 인가하였다. 제어 파형은 삼각파 형태이며 변형률 속도는 2×10^{-3} /sec이다. 고온 시험에는 시험 전 시편의 열적 안정화를 위해 30~60분 정도 대기 시간을 가졌다. 피로수명은 시편의 파손 혹은 수명 중 응력 최대값의 25% 감소 시의 주기값으로 정의하였다. 시험장비는 MTS 사의 페루프 유압서보제어 시험기인 MTS-810을 이용하였으며, 동사의 고온 신장계 및 고온 퍼니스를 적용하여 시험을 수행하였다.

본 논문의 시험 소재, 시편 형상, 시험 장치 및 방법, 인장 및 피로시험 결과 등은 문헌[15]에 상세히 언급되어 있어 여기서는 간략히 언급하였다.

3. 피로수명 비교 및 평가

3.1 Coffin-Manson 관계식

변형률을 수명평가 인자로 고려하는 피로수명 평가식 중 가장 대표적인 관계식인 Coffin-Manson 식[16,17]은 Eq. 1과 같다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \tag{1}$$

위 식에서 σ_f' 는 피로강도계수, b 는 피로강도지수, ϵ_f' 는 피로연성계수, c 는 피로연성지수를 나타내며, $\Delta\epsilon/2$ 는 전 변형률 진폭(total strain amplitude), E 는 탄성 계수 그리고 N_f 는 파손 수명을 의미한다. Eq. 1을 통해 구리크롬 합금에 대해 구한 전 변형률 진폭과 수명 그래프 및 시험수명 대비 예측수명 그래프를 각각 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 1에서 피로수명이 500°C 까지는 온도가 상승할수록 낮아지다가 이후에는 오히려 피로수명이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 문헌[15]에서 언급한 바와 같이 400~500°C

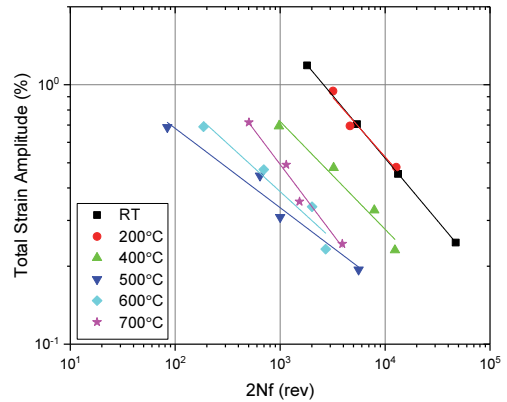


Fig. 1 Relations of life and total strain amplitude at various temperatures[10].

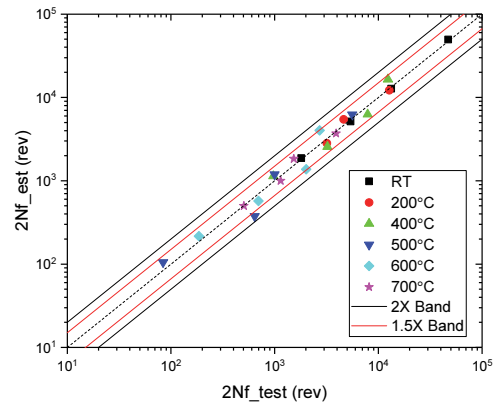


Fig. 2 Comparison of test and estimated fatigue lives using Coffin-Manson relation.

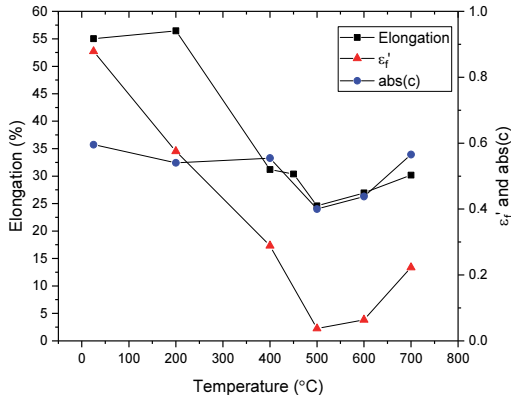


Fig. 3 Changes of fatigue ductility coefficient, exponent and elongation at various temperatures[10].

구간에서 크롬의 석출 경화로 인해 소성 변형률에 직접적으로 영향을 미치는 피로연성계수 및 피로연성지수가 Fig. 1의 온도별 변형률 진폭과 수명의 관계와 유사하게 Fig. 3과 같이 500°C까지는 감소하다가 이후에는 증가하기 때문이다. Fig. 2를 통해 확인할 수 있듯이 본 관계식에 의한 예측 피로수명($2N_{f,est}$)은 시험 피로수명($2N_{f,test}$)과 비교하여 분산범위(scatter band)의 2이내에 모두 위치함을 알 수 있다.

3.2 변형률 에너지-수명 관계식

피로인자로 변형률 에너지를 이용하는 방법으로 가장 대표적인 것은 소성 변형률 에너지 밀도와 수명과의 관계를 나타낸 Morrow의 관계식[18]으로 Eq. 2와 같다.

$$N_f^m \Delta w_p = C \quad (2)$$

이 식에서 Δw_p 는 소성 변형률 에너지 밀도이며, m 과 C 는 재료 상수이다. 소성 변형률 에너지 밀도값은 일반적으로 반수명(half life) 시점의 히스테리시스 곡선의 내부 면적으로 정의된다. Eq. 2를 이용해 구한 소성 변형률 에너지 밀도와 수명과의 관계를 Fig. 4에 나타냈다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이 소성 변형률 에너지 밀도를 피로평가 인자로 사용할 경우 Fig. 1에서 확인한 500°C 이상의 온도에서 피로수명이 더 길

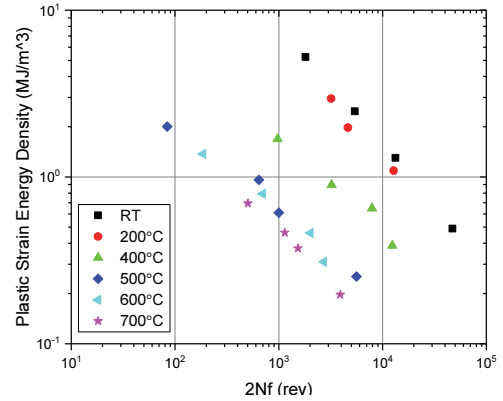


Fig. 4 Relations of life and plastic strain energy density at various temperatures[10].

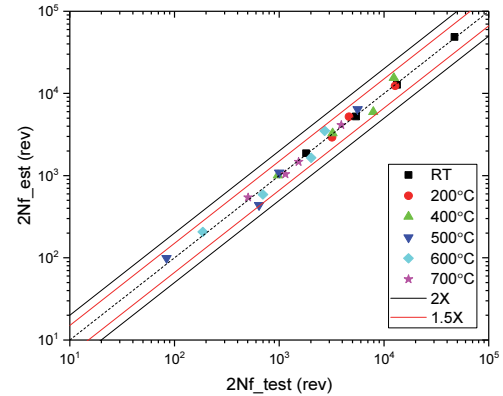


Fig. 5. Comparison of test and estimated fatigue lives using Morrow relation.

어지는 현상은 나타나지 않았다. 본 관계식을 이용해 얻은 예측수명과 시험수명과의 비교 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 두 수명의 관계가 대부분 분산범위 1.5 내에 위치하여 Fig. 2의 경우보다 좀 더 개선된 것으로 보인다.

변형률 에너지 밀도를 피로인자로 고려하는 다른 관계식으로 Golos 등[19]이 제안한 Eq. 3이 있다. 이 식은 변형률 에너지와 수명의 관계에서 변형률 에너지를 소성 변형률 에너지 밀도 외에 인장 탄성 변형률 에너지 밀도(Δw_e^+ , Fig. 6 참조)를 함께 고려한 전 변형률 에너지 밀도를 피로인자로 고려한다. 일반적으로 수명이 비교적 긴 경우 히스테리시스 곡선의 내부 면적이 줄어들어 소성의 역할이 줄어들 때 상대적으로 탄성

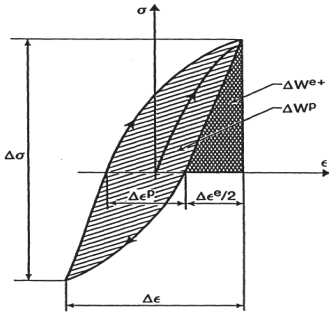


Fig. 6 A typical hysteresis loop and the tensile elastic and plastic strain energy densities[14].

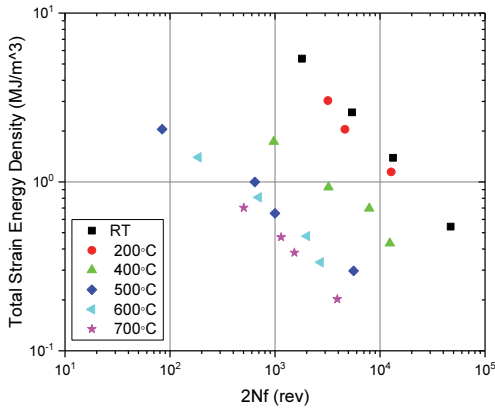


Fig. 7 Relations of life and total strain energy density at various temperatures.

에 의한 피로파손 영향성을 반영할 수 있는 장점이 있는 방법이다. Eq. 3에서 제안된 전 변형률 에너지 밀도와 피로수명은 Eq. 4와 같은 관계를 갖는다. Eq. 4에서 m' 과 C' 은 재료 상수이다.

$$\Delta w_i = \Delta w_p + \Delta w_e^+ \quad (3)$$

$$N_f^{m'} \Delta w_i = C' \quad (4)$$

Eq. 4를 이용해 구한 전 변형률 에너지 밀도와 수명과의 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 그리고 본 관계식을 이용해 얻은 예측수명과 피로수명과의 비교 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 소성 및 전 변형률 에너지 밀도와 수명의 관계에서 구한 재료 상수를 비교한 Fig. 9를 살펴보면 거의 유사한 것을 확인할 수 있는데 이는 문헌[15]

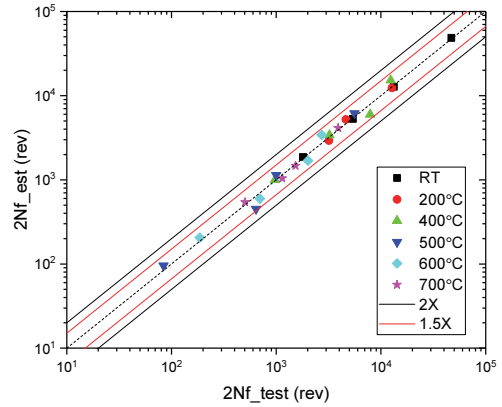


Fig. 8 Comparison of test and estimated fatigue lives using Golos-Ellyin relation.

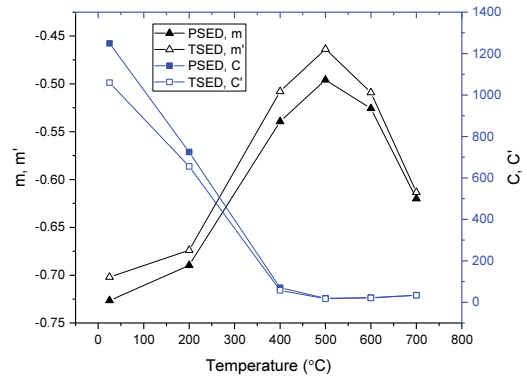


Fig. 9 Comparison of material constants m and C acquired from PSED and TSED-life relations.

에 언급한 바와 같이 본 시험에서는 모두 천이 수명(N_i) 이전에 파손이 발생하여 수명 중 소성 변형률이 지배적인 역할을 하기 때문이다.

3.3 Smith-Watson-Topper 관계식

Smith-Watson-Topper(이하 SWT) 관계식[20]은 변형률 제어 하에 일정 진폭 변형률(ϵ_a)이 평균응력(σ_m)이 존재하는 상태에서 인가될 때, 수명 중 응력 최대값과 변형률 진폭의 곱, 즉 $\sigma_{max}\epsilon_a$ 는 일정하다는 개념을 바탕으로 하여 Eq. 5와 같이 주어진다. 이 식은 Coffin-Manson 식(Eq. 1)의 양변에 Basquin의 관계식($\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b$)을 적용한 것으로 계수 및 지수값은 Eq. 1과 동일하다. $\sigma_{max}\epsilon_a$ 는 변형률 에너지로 고려할 수 있

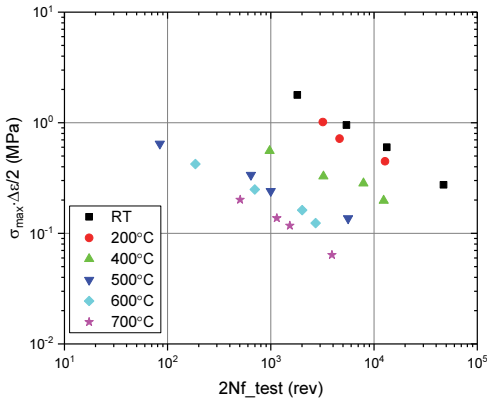


Fig. 10 Relations of life and SWT parameter at various temperatures.

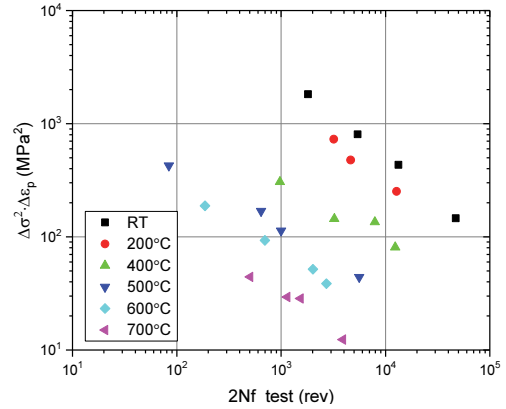


Fig. 12 Relations of life and Tomkins parameter at various temperatures.

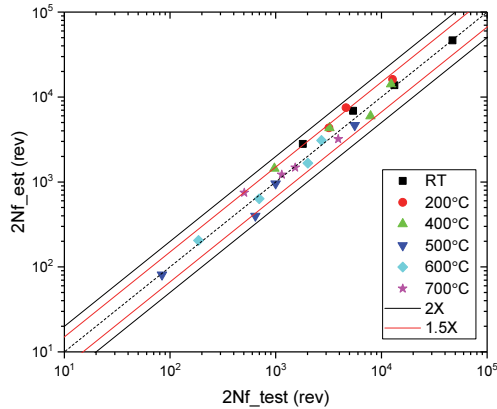


Fig. 11 Comparison of test and estimated fatigue lives using SWT relation.

어 Eq. 5는 에너지를 피로인자로 고려하는 방법의 하나로 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} \epsilon_a &= \sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon}{2} \\ &= \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \epsilon_f' \sigma_f' (2N_f)^{b+c} \end{aligned} \quad (5)$$

3.1절에서 구한 피로강도 및 연성계수 및 지수 값과 Eq. 5를 이용하여 구한 SWT 파라미터와 수명과의 관계를 Fig. 10에 나타냈으며, 본 관계식을 이용해 획득한 예측수명과 시험수명과의 비교 그래프를 Fig. 11에 나타냈다. Fig. 11을 살펴보면 모든 예측수명이 분산범위 2 이내에 위

치하나 앞 절의 방법을 이용해 구한 경우보다는 다소 분포가 벌어진 것으로 보인다.

3.4 Tomkins 관계식

Tomkins[21]는 균열진전 모델을 이용하여 저주기 피로수명 평가 관계식을 Eq. 6과 같이 제시하였다.

$$N_f \Delta \sigma^2 \Delta \epsilon = C_T \quad (6)$$

이 식은 재료상수가 C_T 한 개로 간편히 적용할 수 있다는 장점이 있으나, Tomkins가 제시한 파라미터($\Delta \sigma^2 \Delta \epsilon$)와 피로수명(N_f)이 log-log 그래프에서 항상 -1의 기울기 관계를 가져야 한다는 단점이 있다. Lee 등[22]은 이를 개선하여 Eq. 7과 같이 제시하였다. 이 식에서 n 도 재료상수로 이를 통해 Eq. 7은 앞서 다른 변형률 에너지-수명의 관계식과 유사한 형태가 된다.

$$N_f^n \Delta \sigma^2 \Delta \epsilon = C_T \quad (7)$$

위 식을 이용하여 Tomkins 파라미터와 수명의 관계를 Fig. 12와 같이 나타냈다. 그래프를 통해 500°C 이상의 고온 시험 데이터에 대해 파라미터와 수명과의 관계가 앞서 검토한 모든 관계식보다 명확히 구분되는 것을 알 수 있다. 그리고 본 관계식을 이용해 얻은 예측수명과 시험

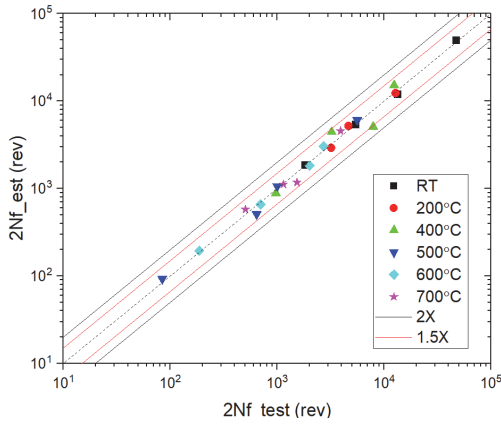


Fig. 13 Comparison of test and estimated fatigue lives using Tomkins relation.

수명과의 비교 그래프를 Fig. 13에 나타내었는데 그 경향성은 다른 경우와 유사한 것으로 보인다.

3.5 Jahed-Varvani 관계식

Jahed 등[23]은 다축 피로를 변형률 에너지 밀도로 표현할 경우 순수 인장 조건을 상위 한계 (upper limit), 순수 전단 조건을 하위 한계 (lower limit)로 하는 범위 내에 수명이 위치한다고 고려하였다. 제안된 관계식은 순수 인장의 경우 Eq. 8과 같은데 이는 인장 탄성, 소성, 전 변형률 에너지 밀도값을 이용하여 논리적으로 Coffin-Manson의 변형률-수명 관계식(Eq. 1)의 형태로 나타낼 수 있다는 개념을 바탕으로 제시되었다.

$$\Delta E_A = E_c'(N_{f,a})^B + E_f'(N_{f,a})^C \quad (8)$$

여기서 ΔE_A 는 순수 인장일 때의 전 변형률 에너지 밀도, E_c' 와 E_f' 는 각각 인장 피로강도계수와 인장 피로인성계수(fatigue toughness coefficient)를, B 와 C 는 재료상수로 각각 피로강도지수와 피로인성지수를 의미한다. 각 계수와 지수는 도식적으로 Fig. 14와 같은 의미를 갖는다. 본 관계식은 전 변형률 에너지 밀도를 수명 계산에 사용하기 때문에 두 인자의 관계는 Fig. 7과 동일하다. Eq. 8을 이용해 획득한 예측수명을 시험

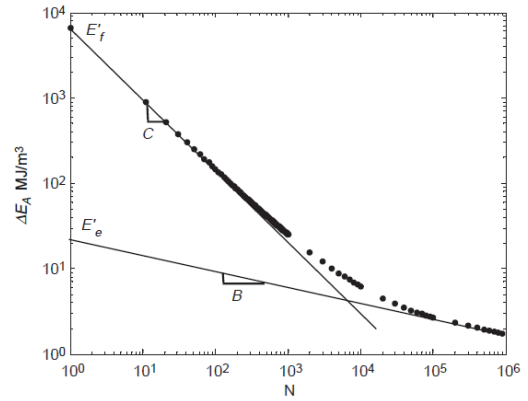


Fig. 14 A typical energy-life curve in pure tension and corresponding energy-based properties[18].

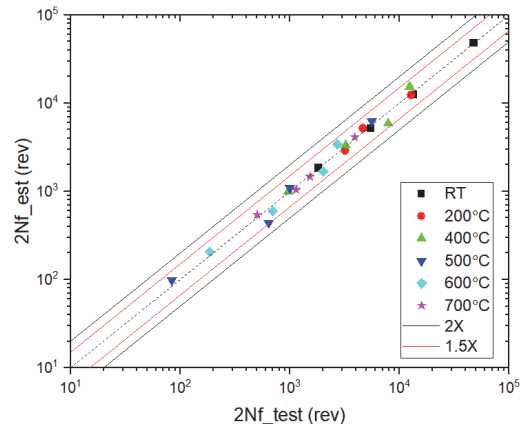


Fig. 15 Comparison of test and estimated fatigue lives using Jahed-Varvani relation.

수명과의 비교를 위해 Fig. 15와 같은 그래프를 도시하였다. 정성적으로는 다른 방법들과 거의 유사한 결과를 얻었다.

3.6 피로수명 평가결과 비교

총 6가지의 관계식을 이용하여 구리크롬 합금에 대한 피로수명을 평가한 결과 모든 경우에서 분산범위 2 이내의 우수한 결과를 얻었다. 이를 정량적으로 비교하기 위해 2가지 지표를 계산하였다. 첫 번째는 분산범위 내 예측수명이 몇 개나 위치하는지 비율을 확인하였고, 두 번째는 시험수명에 대해 예측수명이 얼마나 떨어져 있는지에 대한 지표로 RMSLE(root mean squared

Table 1. Comparison of fatigue prediction methods by number of data within scatter band and deviation calculated from RMSLE.

	Scatter Band	Coffin-Manson	PSED	TSED	SWT	Tomkins	Jahed-Varvani
No. of Data within Scatter Band	1.2	14 (60.9%)	18 (78.3%)	19 (82.6%)	10 (43.5%)	18 (78.3%)	18 (78.3%)
	1.3	19 (82.6%)	21 (91.3%)	21 (91.3%)	15 (65.2%)	20 (87.0%)	21 (91.3%)
	1.5	22 (95.7%)	23 (100%)	23 (100%)	20 (87.0%)	22 (95.7%)	23 (100%)
	2.0	23 (100%)	23 (100%)	23 (100%)	23 (100%)	23 (100%)	23 (100%)
T_{RMSLE}		1.239	1.162	1.150	1.292	1.173	1.158

logarithmic error)를 계산하는 것이다. Eq. 9와 같이 계산되는 RMSLE 값을 Eq. 10에 적용하여 구한 T_{RMSLE} 값은 하나의 관계식으로부터 구한 전체 예측수명이 시험수명으로부터 어느 정도나 분산되어 있는지에 대한 표준편차 개념으로 고려할 수 있다. 이 값은 예측수명이 시험수명과 모두 일치할 경우 1을 나타내며, 1에 가까울수록 예측 정확도가 우수하다고 할 수 있다.

$$RMSLE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_{10} \left(\frac{2N_{f_{cpi}}}{2N_{f_{bdi}}} \right)^2} \quad (9)$$

$$T_{RMSLE} = 10^{RMSLE} \quad (10)$$

Table 1에 결과를 정리하였다. 표의 값 중 굵은 글자 및 밑줄로 표기한 값이 6가지 항목 중 가장 우수한 값을 의미한다. 피로수명 평가에 적용한 6가지 방법 모두 분산범위 2 이내에 예측수명이 위치하였다. 분산범위를 좀 더 좁혀서 고려하면 1.2 범위 내에는 전 변형률 에너지를 이용한 방법이 가장 우수하였으며, 분산범위 1.3부터 TSED, PSED, JV 법이 동일하게 가장 우수한 결과를 얻었고, 이 세 방법은 분산범위 1.5 내에 모든 예측수명이 위치하였다. 이 세가지 방법은 모두 변형률 에너지를 피로인자로 고려하는 방안인데, SWT 법을 제외하면 피로인자로 이를 이용하는 방안이 다른 방안보다 우수한 결과를 나타내어 변형률 에너지를 피로인자로 고려하는 것이 시험 재질에 좀 더 적합한 것으로 예상된다. T_{RMSLE} 값을 기준으로 TSED,

JV, PSED 순으로 우수한 결과를 얻었는데, TSED와 JV 법은 변형률 에너지를 적용함에 있어 소성항 외에 탄성항을 고려하였다. 이는 시험 재질이 3.2절에서 언급한 바와 같이 소성이 지배적인 역할을 한다고 하더라도 탄성의 영향을 고려하면 예측수명의 정확도가 상승할 수 있음을 나타낸다고 하겠다.

4. 결 론

로켓엔진용으로 개발된 구리합금에 대해 여러 가지 피로수명 예측식을 이용하여 예측수명을 구하였고 이를 시험수명과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로수명 예측방법으로 변형률을 피로인자로 고려하는 Coffin-Manson 식, 변형률 에너지를 피로인자로 고려하는 소성 변형률 에너지 밀도 관계식(Morrow 식), 전 변형률 에너지를 에너지 밀도 관계식(Golos-Ellyin 식), SWT 식 그리고 Jahed-Varvani 식, 균열진전 이론을 바탕으로 제안된 Tomkins 식 등 총 6가지 방법을 이용하여 피로 예측수명을 계산한 결과 모든 방법에서 시험수명 대비 분산범위 2 이내를 만족하였다.
- (2) 각 방법의 결과를 정량적으로 비교하기 위해 분산범위 내 데이터 수 비율 및 시험수명 대비 예측수명의 편차값을 계산한 결과, TSED 법, Jahed-Varvani 법, PSED 법,

Tomkins 법, Coffin -Manson 법, SWT 법 순으로 우수한 결과를 얻었다.

- (3) 변형률 에너지 밀도를 피로인자로 고려한 방법들 중 SWT 법을 제외한 나머지 세가지 방법이 다른 방법들에 비해 우수한 결과를 보여주었다.

후 기

본 연구는 “한국형발사체개발사업”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. “Chromium Copper”, retrieved 26 Mar. 2021 from http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/chrom_cu.html.
2. Lee, K.O., Rye, C.S., Heo, S.C. and Choi, H.S., “A Study on Strength Improvement of Copper Alloy for Combustion Chamber of Liquid-Propellant Engine,” 2013 KSPE Fall Conference, Gyeongju, Korea, pp. 328-331, 2013.
3. 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.
4. Ellis, L.D., “Observations of a Cast Cu-Cr-Zr Alloy,” NASA/TM-2006-213968, 2006.
5. Biswas, A., Nagesh, A., Sukumaran, G., Parameswara, P., Asraff, A.K., Sandhya, R. and Ray, S.K., “Low Cycle Fatigue Behavior of a Cu-Cr-Zr-Ti Alloy,” *Procedia Engineering*, Vol. 55, pp. 171-175, 2013.
6. Kalinin, G. and Matera, R., “Comparative Analysis of Copper Alloys for the Heat Sink of Plasma Facing Components in ITER,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 258-263, Part 1, pp. 345-350, 1998.
7. You, J.H. and Miskiewicz, M., “Material Parameters of Copper and CuCrZr Alloy for Cyclic Plasticity at Elevated Temperatures,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 373, pp. 269-274, 2008.
8. Park, J.Y., Jung, Y.I., Choi, B.K., Lee, J.S., Jeong, Y.H. and Hong, B.G., “Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of CuCrZr after Manufacturing Thermal Cycle for Plasma Facing Component,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 417, pp. 916-919, 2011.
9. Santecchia, E., Hamouda, A.M.S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., Cabibbo, M., El Mehtedi, M. and Spigarelli, S., “A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metal,” *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2016, 2016.
10. Ryu, C.S., Choi, H.S., Lee, K.O., Kim, J.G., Lim, B.J., Ahn, K.B. and Kim, M.K., “Method for Manufacturing Inner Structure of Regenerative Cooling Type Combustion Chamber,” Patent No. 10-2012-0077685, 10 Jul. 2012.
11. Seo, H.S. and Kim, K.B., “Microstructure of Sputter-Deposited and Annealed Cu-Cr, Cu-Ti Alloy Films on Polyimide Substrate and Their Adhesion Property,” *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 261-272, 1994.
12. Song, J.H. and Huh, H., “Dynamic Material Property of the Sinter-Forged Cu-Cr Alloys with the Variation of Chrome Content,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 6, pp. 670-677, 2006.
13. Wang, Q.J., Du, Z.Z., Luo, L. and Wang, W., “Fatigue Properties of Ultra-Fine Grain Cu-Cr Alloy Proceeded by Equal-Channel Angular Pressing,” *Journal of Alloys and*

- Compounds*, Vol. 526, pp. 39-44, 2012.
14. Tamiya, Y., "A Validity of Estimation Methods of Total Strain-Fatigue Life Curve about Copper and Copper Alloys," *Journal of the Society of Materials Science Japan*, Vol. 60, No. 9, pp. 777-782, 2011.
 15. Park, J., Lee, K.O. and Kim, J.H., "Life Evaluation of Low-Cycle Fatigue at High Temperature using Plastic Strain Energy Density on Cu-0.6wt%Cr," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 46, No. 9, pp. 827-834, 2022.
 16. Coffin, L.F., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, Vol. 76, pp. 931-950, 1954.
 17. Manson, S.S., "Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress," NACA TR 1170, 1954.
 18. Morrow, J.D., "Cyclic Plasticity Strain Energy and Fatigue of Metal," *Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, Philadelphia, U.S.A, pp. 45-87, Jan. 1965.
 19. Golos, K. and Ellyin, F., "Total Strain Energy Density as a Fatigue Damage Parameter," *Advanced in Fatigue Science and Technology. NATO ASI Series*, Vol. 159, pp. 849-858, 1989.
 20. Smith, K.N., Watson, P. and Topper, T.H., "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Materials," *International Journal of Materials*, Vol. 5, pp. 767-778, 1970.
 21. Tomkins, B., "Fatigue Crack Propagation - An Analysis," *Philosophical Magazine*, Vol. 18, pp. 1041-1066, 1968.
 22. Lee, K.O., Hong, S.G., Yoon, S. and Lee, S.B., "A New High Temperature Life Correlation Model for Austenitic and Ferritic Stainless Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, Issue 10-12, pp. 1559-1563, 2005.
 23. Jahed, H. and Varvani-Farahani, A., "Upper and Lower Fatigue Life Limits Model using Energy-Based Fatigue Properties," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, Issue 5-6, pp. 467-473, 2006.