

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.7.612

평균응력을 포함한 피로하중 하에서 Elbrodur-NIB의 피로수명예측 및 Ratcheting 거동

임창범*

Fatigue Life Prediction and Ratcheting behavior of the Elbrodur-NIB under Fatigue loading with mean stress

Chang-Bum Lim*

ABSTRACT

An experimental study was carried out for the Elbrodur-NIB(copper alloy) at room temperature under stress-controlled uniaxial fatigue loading with and without mean stress. As a result, the effects of stress amplitude, mean stress and stress rate on ratcheting behavior were investigated. The ratcheting strain increased with increasing stress amplitude for a given mean stress, and with mean stress for a given stress amplitude. But, the ratcheting strain decreased as the stress rate increased. The three mean stress models were investigated and the mean stress models of Smith-Watson-Topper and Walker yielded good correlation of fatigue lives in the life range of 10^2 - 10^5 cycles.

초 록

동합금 Elbrodur-NIB 재질에 대해 평균응력을 포함한 응력제어시험을 수행하였으며, 그 결과 라체팅 거동에 응력진폭, 평균응력, 응력속도가 어떠한 영향을 주는지에 대해 시험을 통해 알 수 있었다. 라체팅 변형률은 같은 평균응력에서 응력진폭이 증가할수록, 또한 같은 응력진폭에서 평균응력이 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 응력속도가 증가함에 따라 라체팅 변형률은 감소하는 것을 알 수 있었다. 10^2 - 10^5 영역에서 3가지 평균응력을 포함한 피로수명예측모델을 검토하였으며, 그 결과 Smith-Watson-Topper가 제안한 모델과 Walker가 제안한 모델이 매우 신뢰성 있는 결과를 보여주었다.

Key Words : Ratcheting behavior(라체팅 거동), Ratcheting strain(라체팅 변형률), Mean stress(평균응력), Stress amplitude(응력진폭), Stress rate(응력속도), Fatigue life prediction(피로수명예측)

I. 서 론

항공기 및 유도무기의 기계부품 및 구조물은 비행 시 다양한 형태의 반복하중을 받고 있으며, 이러한 반복하중은 대부분 평균응력을 포함하고 있다. 반복하중에 포함된 평균응력은 항공기 및

† 2011년 5월 11일 접수 ~ 2011년 6월 20일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 대합체계단
교신저자, E-mail : nixlions@nate.com
대전광역시 유성구 수남동 111

유도무기에 있는 기계부품 및 구조물에 추가적인 손상을 야기하여 피로수명에 영향을 줌으로 피로수명해석에 반드시 고려되어야 한다.

평균응력이 피로수명에 끼치는 영향에 관한 실험은 크게 응력제어(Stress-controlled)실험과 변형률제어(Strain-controlled)실험으로 나눌 수 있다. 이 두 실험에서 평균응력의 영향은 물체의 탄성영역이내에서 실험한 경우, 즉 HCF(High Cycle Fatigue) 영역에서는 거의 동일한 결과를 보인다. 하지만, 상당량의 소성변형을 포함하는 LCF(Low Cycle Fatigue)영역에서 변형률제어실험의 경우 응력완화(Stress relaxation)현상[1]으로 인해 평균응력의 영향은 큰 의미를 가지지 못한다. 반면 평균응력을 포함하는 응력제어실험에서는 평균응력의 영향으로 인해 소성변형이 축적되는 현상이 발생하게 된다. 이 현상을 Ratcheting이라 하며, 이때 축적된 소성변형률을 Ratcheting 변형률이라 한다. Ratcheting 현상은 항공기 및 유도무기의 기계부품이나 구조물의 설계에 있어서 중요한 요인으로 인식됨에 따라, Ratcheting 현상이 피로수명에 끼치는 영향에 대한 다양한 실험과 연구가 이루어지고 있다. 예를 들면, Armstrong과 Frederick의 A-F Model[2], A-F Model을 수정한 Chaboche Model[3], 그리고 Ohno Wang Model[4] 등이 대표적이라 할 수 있으며, 위의 모델 외에도 Pilo et al.[5], Yoshida et al.[6], Alameel[7], Ruggles and Krempf[8] 등에 의해 Ratcheting 현상에 대한 많은 연구가 수행되었다.

하지만, Ratcheting 현상은 다양한 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 이러한 많은 모델들이 있음에도 불구하고 아직도 정확히 Ratcheting 현상을 예측하기가 어렵다. 또한 Ratcheting 변형률의 측정도 지금까지 수행된 대부분의 연구에서 낮은 cycle에 국한되었으며, 피로수명까지 Ratcheting 변형률 측정에 대한 실험은 수행되지 않아서 Ratcheting 변형률이 피로수명에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구는 최근 몇몇 논문 [9,10] 외에는 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 피로하중 하에서 동합금(Copper alloy)인 Elbrodur-NIB에 대해 평균응력을 포함한 응력제어피로시험을 수행하였으며, 재료가 파단 될 때까지 Ratcheting 변형률을 측정하였다. 측정된 Ratcheting 변형률을 바탕으로, 응력진폭, 평균응력, 응력속도가 Ratcheting 변형률에 어떠한 영향을 주는지에 대해 살펴보았으며, 피로시험 결과값을 이용하여 평균응력모델 중 Modified Goodman equation[11], Smith-Watson-Topper(SWT) parameter[12] 그리고 Walker parameter[13]을 적용하여 평균응력의 모델에 대해 평가하였다.

II. 본 론

2.1 시 험

본 시험에 사용된 재질은 고온에서 강도와 피로특성이 뛰어난 동합금 Elbrodur-NIB로써 두께가 25mm인 판(300mm*300mm)의 형태로 구입한 후 ASTM Standard 466 일축 피로시험[14] 규격에 맞게 제작하였다. 제작된 시험편은 상온(25°C)에서 MTS-810 재료시험기와 Extensometer (MTS 632.54F-14)를 이용하여 시험을 수행하였다.

인장시험을 통해 Elbrodur-NIB의 응력과 변형률 선도를 Fig. 1과 같이 얻었으며, Elbrodur-NIB의 화학구성비 및 기계적 특성은 Table 1, 2에 표기하였다.

피로수명이 $10^2 \sim 10^5$ cycle영역에서 1000MPa/s의 응력속도를 가지는 삼각파형을 사용(응력속도를 독립변수로 갖는 실험을 제외)하여 피로시험을 수행하였으며, 시험편 파단 시 Ratcheting 변형률이 3%가 넘는 경우($\sigma_a=480$ MPa, $\sigma_m=100$ MPa)에 대해서는 Ratcheting 변형률에 의한 단면감소를 고려한 시험을 추가로 수행하였다.

또한, 평균응력에 의해 발생한 크리프(Creep) 변형을 알아보기 위해, 시험에 사용된 최대 평균응력 및 시간을 고려한 크리프 시험을 수행하였

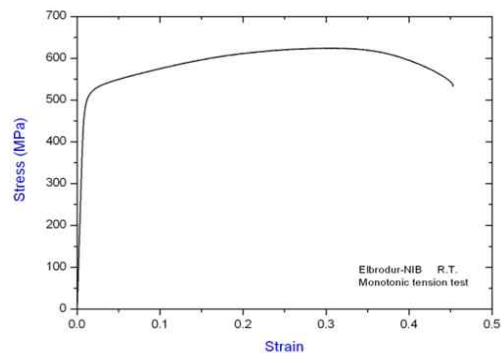


Fig. 1. Tensile stress-strain curve of the Elbrodur-NIB

Table 1. Chemical composition of the Elbrodur-NIB

Elements	Weight (%)
Cu	97.64
Ni	1.79
Be	0.29

Table 2. Chemical composition of the Elbrodur-NIB

Mechanical Properties		
Ultimate Strength (MPa)		621.3
Yield Strength (MPa)		479.1
Young's Modulus (GPa)		62.4
Elongation (%)		23.9
Reduction of area (%)		27.05

으며, 그 결과 크리프에 의한 변형은 미비함을 알 수 있었다.

2.2 Ratcheting 거동

Ratcheting 변형률 ϵ_r 는 소성변형률의 축척현상이므로, 본 연구에서 Ratcheting 변형률 ϵ_r 를 전체 변형률에서 탄성변형률을 제외한 소성변형률로 식(1)과 같이 정의하였다.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{max}^p + \epsilon_{min}^p}{2} = \frac{\epsilon_{max} + \epsilon_{min}}{2} - \frac{\sigma_m}{E} \quad (1)$$

위 식에서 ϵ_{max} 와 ϵ_{min} 은 각각 같은 사이클에서 최대변형률 및 최소변형률이고, ϵ_{max}^p 와 ϵ_{min}^p 은 각각 같은 사이클에서 최대 소성변형률 및 최소 소성변형률이다.

본 연구에서는 평균응력, 응력진폭, 응력속도가 Ratcheting 거동에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해, 각각을 독립변수로 두고 시험을 수행하였다. 그 결과 평균응력과 응력진폭에 따른 피로 수명자료를 Table 3과 같이 얻었으며, Table 3에서 재료에 가한 피로하중 $\Delta\sigma$ 은 식(2)와 같다.

$$\Delta\sigma = \sigma_m \pm \sigma_a \quad (2)$$

여기서, σ_m 와 σ_a 은 평균응력 및 응력진폭을 나타낸다.

재료의 거동이 인장과 압축에 대칭($\sigma_m=0$)인 경우, Ratcheting 변형률이 발생하지 않는 것에 비해 Elbrodur-NIB 재질은 평균응력이 없는 실험에서 Fig. 2와 같이 인장방향으로 약간의 Ratcheting 변형률이 발생하는 경향을 보였다.

이것은 Fig. 3과 같이 재료의 거동이 압축응력을 받을 때보다 인장응력을 받을 때 재료가 더 연화(Soft) 현상을 보이기 때문이며, 이와 유사한 결과를 Inconel 718에 대한 Ratcheting 시험 결과 [9] 및 9Cr-1Mo steel에 대한 Ratcheting 시험 결과 [15]에서도 볼 수 있었다.

Table 3. Fatigue test conditions and cycles to failure

Mean Stress, σ_m (MPa)	Alternative Stress, σ_a (MPa)	Cycle to failure, N_f (cycle)
0	480	5,764
	440	12,775
	400	15,330
	360	62,441
50	480	3,889
	440	5,242
	400	11,877
	360	23,910
100	480	1,905
	440	4,428
	400	7,044
	360	15,740
-50	480	5,066
	440	13,595
	400	34,330
	360	85,120

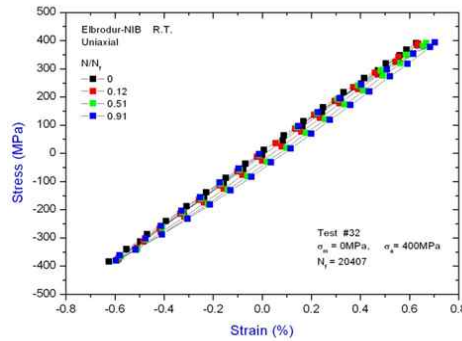


Fig. 2. Stress-strain hysteresis loops at different life fractions for a fully reversed cycles with 400 MPa stress amplitude

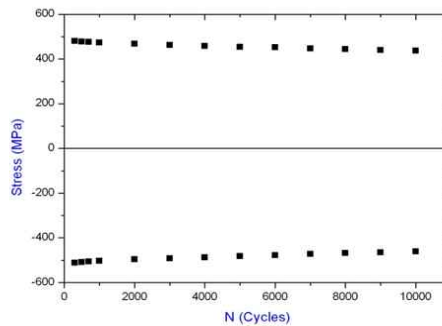


Fig. 3. Variation of max. and min. stresses with cycles in strain control test with amplitude of 0.8%

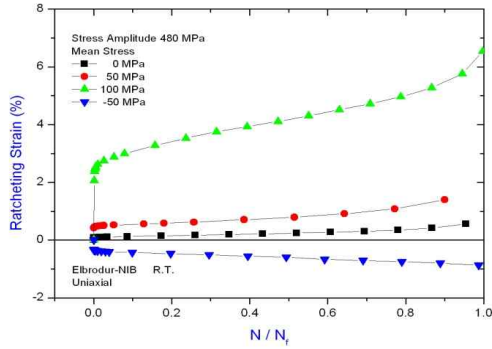


Fig. 4. Ratcheting strain versus cycle curves under different mean stresses at 480MPa stress amplitude

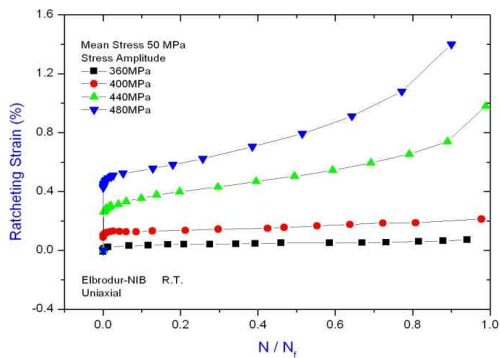


Fig. 5. Ratcheting strain versus cycle curves under different stress amplitudes at 50 MPa mean stress

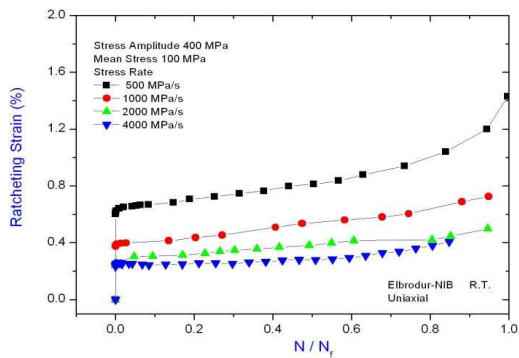


Fig. 6. Ratcheting strain versus cycle curves under different stress rates

시험을 통해 얻은 변형률 자료를 식(1)에 대입하여 Ratcheting 변형률을 구하였고, 각 cycle 값(N)을 파단이 일어난 cycle 값(N_f)을 나누어 Fig. 4, 5, 6과 같이 Ratcheting strain-N/N_f 그래프를 그려주었다. 그 결과 Ratcheting 변형률은 크리프

와 같이 3가지 단계(primary, steady state, tertiary region)로 나눌 수 있었으며, 특히, Ratcheting 변형률은 primary 단계와 tertiary 단계에서 많이 일어난 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 4, 5, 6을 통해 Ratcheting 거동은 평균응력, 응력진폭, 응력속도(피로시험시 가하는 응력의 속도, MPa/s)에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다. 즉, Fig. 4, 5와 같이 Ratcheting 변형률은 평균응력과 응력진폭이 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 알 수 있었으며, Fig. 6에서는 Ratcheting 변형률은 응력속도가 증가할수록 오히려 줄어드는 것을 볼 수 있었다. Ratcheting 변형률과 응력속도와의 반비례현상은 Chen[16,17], Kang[18] 등이 63Sn37Pb, Polytetrafluoroethylene, SiCp/6061Al metal-matrix 복합 재료에 대해 실험한 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다.

2.3 평균응력모델

1910년 평균응력을 포함하지 않는 피로시험(Fully reversed fatigue test), Basquins는 Log-Log scale에서 응력과 수명 값이 선형적인 관계를 나타내는 것으로 관찰하여 식(3)으로 나타내었다.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3)$$

여기서, σ_a 는 응력진폭, N_f 는 피로수명, σ'_f , b 는 각각 피로강도 상수 및 지수이다.

평균응력이 존재하는 경우, 식(3)의 좌변에 등가응력진폭(Equivalent stress amplitude) σ_a^{eq} 을 사용하여, 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기에 사용된 등가응력진폭을 이용하여 평균응력의 영향을 나타낼 수 있으며, 얻어진 등가응력진폭을 이용하여 S-N 선도 상에서 피로수명예측을 할 수 있다.

$$\sigma_a^{eq} = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (4)$$

J. O. Smith은 평균응력의 영향을 고려한 등가응력진폭을 구하는 Modified Goodman equation을 식(5)와 같이 제안하였으며, Smith-Watson-Topper (SWT)와 Walker도 평균응력의 영향을 고려한 식(6), (7)과 같이 등가응력진폭을 구하는 식을 제안하였다.

Modified Goodman equation

$$\sigma_a^{eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \sigma_m / \sigma_u} \quad (5)$$

SWT parameter

$$\sigma_a^{eq} = \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a} = \sigma_{max} \sqrt{\frac{1-R}{2}} = \sigma_a \sqrt{\frac{2}{1-R}} \quad (6)$$

Walker parameter

$$\sigma_a^{eq} = \sigma_{max}^{1-\gamma} \sigma_a^\gamma = \sigma_{max} \left(\frac{1-R}{2}\right)^\gamma = \sigma_a \left(\frac{2}{1-R}\right)^{1-\gamma} \quad (7)$$

여기서, σ_a 는 인장강도, $R(=\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 은 응력비, γ 는 Walker 지수이다.

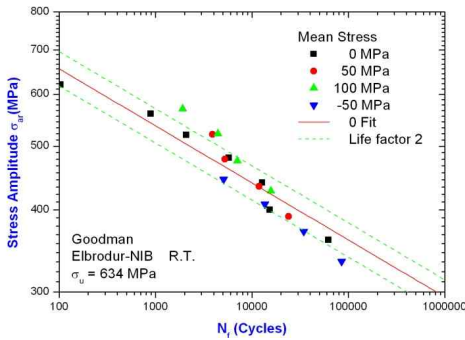


Fig. 7. Correlation of fatigue lives with modified Goodman equation

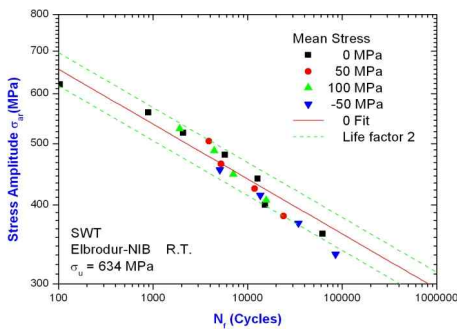


Fig. 8. Correlation of fatigue lives with SWT parameter

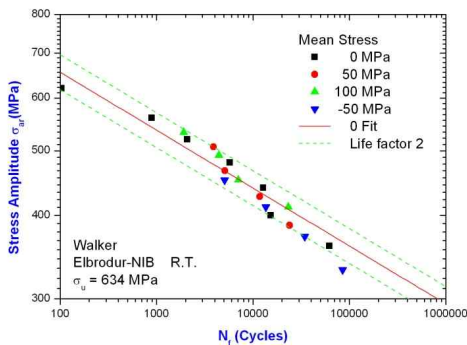


Fig. 9. Correlation of fatigue lives with Walker parameter

위 3가지 식으로부터 평균응력의 영향을 고려한 등가응력진폭 σ_a^{eq} 을 구하였고 그 값을 사용하여 S-N 선도 상에 Fig. 7, 8, 9와 같이 나타내었다.

그 결과 평균응력의 영향을 고려한 피로수명 예측 식 중 J. O. Smith가 제안한 Modified Goodman 식보다 Smith-Watson-Topper (SWT)와 Walker가 제안한 식이 신뢰성 있는 결과를 보여주었다. 또한, SWT가 제안한 식과 Walker가 제안한 식의 결과가 매우 유사함을 나타내었는데 이것은 Walker의 지수가 0.5가 될 때 SWT와 Walker식이 같게 되는데 Elbrodur-NIB의 경우 Walker 지수 값[12]이 0.451이므로 0.5와 비슷한 값을 갖게 되어, SWT가 제안한 식과 Walker가 제안한 식의 결과가 거의 같음을 알 수 있었다. 하지만, 피로수명예측에 Ratcheting 변형률을 고려한 Ratcheting-modified SWT parameter[10]는 앞에서 살펴본 3가지 평균응력의 영향을 고려한 피로수명예측식에 비해 신뢰성 있는 결과를 보여주지 못하였다.

III. 결 론

본 연구에서 평균응력을 포함하는 응력제어 실험을 통해 동합금인 Elbrodur-NIB의 피로특성 및 Ratcheting 거동에 대해 살펴보았으며 그 결과는 다음과 같다.

1. Ratcheting 변형률의 진전은 크리프 변형률 진전과 같이 3가지 단계(primary, steady state, tertiary region)로 나눌 수 있었으며, ratcheting 변형률은 primary 단계와 tertiary 단계에서 많이 일어난 것을 알 수 있었다.

2. 본 연구에 사용된 Elbrodur-NIB 재질의 경우 necking 현상이나 소성변형에 의해 발생하는 진응력의 변화가 미비하다는 것을 알 수 있었다.

3. 본 연구에 사용된 Elbrodur-NIB 재질의 Ratcheting 거동은 평균응력, 응력진폭 그리고 응력속도에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다. 특히, Elbrodur-NIB 재질의 Ratcheting 변형률은 평균응력과 응력진폭에 비례하여 증가하였으나, 응력속도에 대해서는 응력속도가 빨라질수록 Ratcheting 변형률은 반비례하여 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

4. 평균응력의 영향을 고려한 피로수명예측 식 중 J. O. Smith가 제안한 Modified Goodman 식보다 Smith-Watson-Topper(SWT)와 Walker가 제안한 식이 신뢰성 있는 결과를 보여주었다. 특

히, Elbrodur-NIB 재질의 Walker 지수를 구한 결과 0.5와 비슷한 0.451을 가지므로, SWT가 제안한 식과 Walker가 제안한 식의 결과가 거의 같음을 알 수 있었다. 하지만, 피로수명예측에 Ratcheting 변형률의 영향을 고려한 Ratcheting-modified SWT parameter는 평균응력의 영향을 고려한 피로수명예측식에 비해 신뢰성 있는 결과를 보여주지 못하였다.

참 고 문 헌

- 1) Landgraf, R. W., "The Resistance of Metal to Cyclic Deformation", ASTM STP, 3, 1970, pp. 467.
- 2) Armstrong, P. J., Frederick, C. O., "A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect", CEBG Report RD/B/N731, Berkely Nuclear Laboratories, Berkely, UK. 1966.
- 3) Chaboche, J. L., "On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects" Int. J. Plast. 7, 1991, pp. 661-678.
- 4) Ohno, N., Wang, J. D., "Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery" Int. J. Plast. 9, 1993, pp. 375-390.
- 5) Pilo, D., Reik, W., Mayr, P. and Macherauch, R., "Cyclic Induced Creep of a Plain Carbon Steel at Room Temperature", Fatigue of Engineering Materials and Structures. 1, 1979, pp. 287.
- 6) Yoshida, F., Murata, K., and Shiratori, E., "Constitutive Equation of Cycle Creep under Increasing Stress Condition", Bulletin of the JSME, 23, 1980, pp. 337.
- 7) Alamell, G. M., "Cyclic Loading of Inelastic Materials: Experiments and Predictions", M. S. thesis, The university of Texas at Austin, 1985, EMRL Report No. 85/2.
- 8) Ruggles, M. B., and Krempl, E., "The Influence of Test Temperature on the Ratcheting Behavior of Type 304 Stainless Steel", ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 1989, pp. 378.
- 9) Z. Xia, D. Kujawski, F. Ellyin, "Effect of mean stress and ratcheting strain on fatigue life of steel" International Journal of Fatigue, vol. 18, No. 5, 1996, pp. 335-341.
- 10) S. J. Park, K. S. Kim, H. S. Kim "Ratcheting behavior and mean stress consideration in uniaxial low-cycle fatigue of Inconel 718 at 649°C." Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures 30(11), 2007, pp. 1076-1083.
- 11) Goodman, J., Mechanics Applied to Engineering, Longmans, Green and Co., London, 1919, pp. 631-636
- 12) Smith, K. N., P. Watson, and T. H. Topper, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals", Journal of Materials, ASTM, Vol. 5, No. 4, Dec. 1970, pp. 767-778.
- 13) Walker, K., "The Effect of Stress Ratio During Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum", Effects of Environment and Complex Load History of Fatigue Life, ASTM STP 462, Am. Soc. for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1970, pp. 1-14.
- 14) ASTM International Designation: E466-96 (2002), ASTM, Philadelphia.
- 15) M. Yaguchi, Y. Takahashi Ratcheting of viscoplastic material with cyclic softening, part 1: experiments on modified 9Cr-1Mo steel. International Journal of Plasticity 21, 2005, pp. 43-65.
- 16) Gang Chen, Xu Chen, Chang-Dong Niu, "Uniaxial ratcheting behavior of 63Sn37Pb solder with loading histories and stress rates", Materials Science and Engineering A, 2006, pp. 238-244.
- 17) Xu Chen, Shucai Hui, "Ratcheting behavior of PTEE under cyclic compression", Polymer testing, 2005, pp. 829-833.
- 18) Guozheng Kang, "Uniaxial time-dependent ratcheting of SiCp/6061Al composites at room and high temperature", Composites science and technology, 2006, pp. 1418-1430.