

Inconel 718 의 고온 다축피로하중 하에서의 라체팅 거동

김효신[†] · 김광수^{*}

Multiaxial ratcheting behavior of Inconel 718 at elevated temperature

Hyo-Shin Kim and Kwang-Soo Kim

Key Words : Multiaxial ratcheting(다축 라체팅), Multiaxial fatigue(다축 피로), Inconel 718

Abstract

Ratcheting behavior of IN 718 was investigated at 649°C under various proportional and non-proportional loading conditions with stress control. The material response was initially elastic but substantial plastic strain was developed as the material softened cyclically. Ratcheting strain was measured to near fatigue life, and is found to have three stages of development - primary, secondary (steady-state) and tertiary. The secondary stage dominates for most cases. Under the same equivalent stress amplitude and mean stress, it was revealed that circular path loading gives higher ratcheting rates and shorter lives than linear paths and that the more ratcheting occurs when the cyclic load is in the same direction as the mean stress. The ratcheting strain at failure depends not only on its rate but also on fatigue life itself, and it is not a primary life-determining factor.

기호설명

- N : 하중 주기 (Cycles)
- N_f : 피로 수명 (Cycles)
- $\Delta\sigma$: 축방향 응력 범위 (MPa)
- σ_m : 평균 인장 응력 (MPa)
- $\Delta\tau$: 전단 응력 범위 (MPa)
- τ_m : 평균 전단 응력 (MPa)
- ϵ_p^{\max} : 최대 인장 소성 변형율 (MPa)
- ϵ_p^{\min} : 최소 압축 소성 변형율 (MPa)
- γ_p^{\max} : 최대 전단 소성 변형율 (MPa)
- γ_p^{\min} : 최소 전단 소성 변형율 (MPa)

1. 서론

Inconel 718 강재는 가스 터빈 부품에 매우 광범위하게 사용되는 Ni 기초의 초내열합금으로 특히 터빈 디스크 및 블레이드 재료로 많이 사용되며

가격대비 성능, 성형성, 용접성 등이 우수하여 고온 설비 및 극 저온 시스템 등에도 널리 사용된다. 이에 따라 Inconel 718 재료에 대해 많은 연구가 수행되었으나 라체팅(Ratcheting)에 대한 연구는 미흡하다 [1-2].

본 연구의 목적은 고온 일축 하중에 대한 연구 [2]의 연장으로 649°C (1200°F)에서 Inconel 718 재료가 평균 응력을 포함하는 비율 및 비비율의 다축 피로 하중을 받을 때 이에 대한 라체팅 특성을 알아보는 것이다. 이를 위하여 증공 시편을 이용하여 다양한 하중 조건의 인장-비틀 시험을 수행하였다. 이로부터 하중 경로와 평균 응력, 응력 진폭의 크기가 라체팅에 미치는 영향 및 라체팅의 축적이 피로 수명에 미치는 영향을 알아보았다.

Table 1. Mechanical properties of Inconel 718.

	At Room Temperature	At 649°C
UTS(MPa)	1380	1197
Yield Stress (MPa)	1127	965
Elastic Modulus (MPa)	196400	162600
Elongation (%)	21	22
Reduction of Area (%)	48	64

[†] 비회원, 포항공대, 기계공학과

E-mail : dallggu@postech.ac.kr

TEL : (054)279-5890 FAX : (054)279-5899

^{*} 회원, 포항공대, 기계공학과

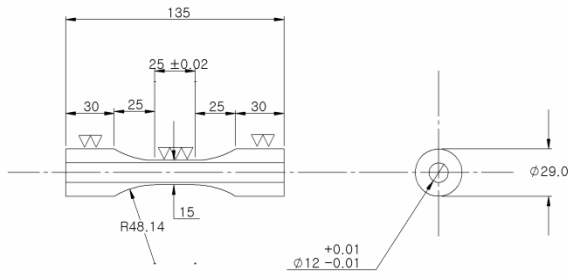


Fig. 1 Biaxial test specimen geometry

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시편

본 연구에 사용된 재료인 Inconel 718 강재는 982°C 에서 한 시간동안 유지된 후 물에서 담금질 (quenching)한 상태의 직경 30 mm 봉재를 구입하여 실험실에서 720°C 에서 8 시간 유지, 620°C 까지 50°C/hr 의 속도로 냉각, 8 시간 유지 후 상온으로 냉각하는 표준과정의 시효처리(aging) 하였다. 재료의 화학 조성은 중량비(wt%)로 Ni 53.68, Cr 18.27, Fe 17.40, Mo 3.05, Nb+Ta 5.37, Ti 0.97, Al 0.6, Co 0.26, Mn 0.09, Si 0.08, Cu 0.04, C 0.04 이다. 재료의 기계적 성질은 Table 1 에 주어졌다.

시편은 Fig. 1 에 주어진 바와 같이 외경 15 mm, 내경 12 mm의 중공 시편으로 기계 가공 후 내부는 호닝하였고, 외부는 그라인딩 후 사포로 연마하고 마지막으로 0.3 μm , 0.05 μm 순의 산화 알루미늄(Al_2O_3)로 연마하였다. Mill sheet에 주어진 정보에 따르면 이 재료는 대부분의 ASTM 규격 9 의 미세 결정과 약간의 ASTM 규격 6~7 정도의 좀 더 큰 결정이 섞인 혼합 결정 재료이다. Fig. 2 에 주어진 바와같이 649°C에서의 세 가지 변형률 속도 0.01%/s, 0.05%/s, 0.1%/s에 대한 실험 결과 변형률 속도의 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

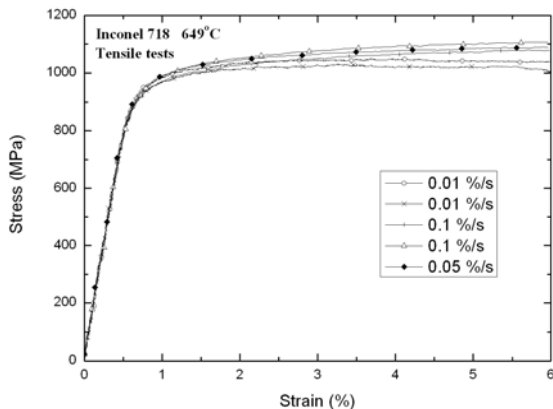


Fig. 2 Tensile stress-strain curves for Inconel 718

2.2 실험 방법

시편의 가열에는 고주파 유도 가열기를 이용하였고 변형률의 측정은 실험실에서 자체 제작한 표점거리 15mm 의 Extensometer 를 사용하였다. 시험에는 INSTRON 8521 인장-비틀 피로 시험기를 이용하였다. 모든 실험은 응력제어 실험이었으며 Circular path 이외에는 상당 응력 속도 1000 MPa/s 의 삼각파형을 이용하였다. Circular path 에 대해서는 동일한 진폭의 다른 하중 경로와 같은 시간에 최고점 및 최저점에 도착하도록 진동수를 조절하였다.

피로 수명은 실험중 축방향 또는 비틀림 방향 변형률 진폭이 1000 주기에서의 값에 비해 50% 이상 변하는 때로 정의 하였다.

라체팅 변형률은 진 응력에 큰 영향을 미칠 정도로 크지 않았다. 따라서 모든 응력은 공칭 응력으로 계산하였다. Inconel 718 의 일축 하중에 대한 연구[2-3]에 의하면 크립에 의한 변형은 라체팅에 비해 그리 크지 않았다. 따라서 본 연구에서도 크립의 영향은 무시하였으며 라체팅은 시간에 무관한 소성 변형으로 생각할 수 있다.

Table 2. Loading conditions

Test No.	Path (Fig.2)	$\Delta\sigma$	σ_m	$\sqrt{3}\Delta\tau$	$\sqrt{3}\tau_m$	N_f
1	AXAM	650	100	0	0	2,264
2	AXAM	625	100	0	0	6,073
3	AXAM	650	50	0	0	2,397
4	TRTM	0	0	650	100	90,619
5	AXTM	650	0	0	100	3,324
6	TRAM	0	100	650	0	13,816
7	LPAM	$650/\sqrt{2}$	100	$650/\sqrt{2}$	0	35,472
8	LPTM	$650/\sqrt{2}$	0	$650/\sqrt{2}$	100	41,088
9	CPAM	650	100	650	0	2,137
10	CPAM	675	100	675	0	1,161
11	CPAM	675	50	675	0	1,038
12	CPTM	650	0	650	100	2,332

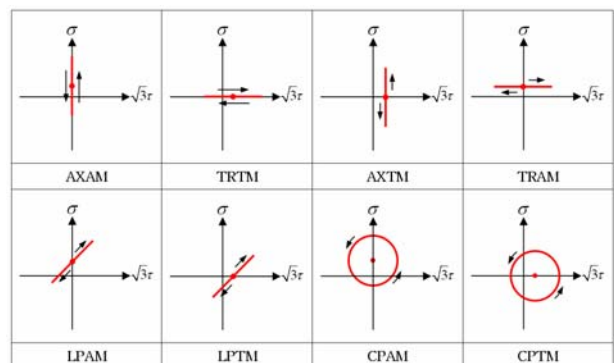


Fig. 3 Loading paths used in ratcheting tests

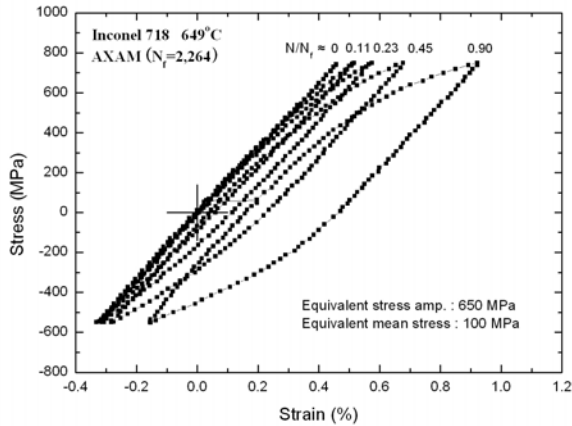


Fig. 4 Stress-strain hysteresis loop at various life fractions under uniaxial ratcheting load

본 연구에 사용된 하중 조건이 Tabel 2 에, 하중 경로가 Fig. 3 에 주어져 있다. 하중은 하중 경로의 영향을 보기 위해 대해 상당 평균 응력 진폭과 상당 응력 진폭이 같도록 설정하였다. 또한 같은 경로에 대해 응력 진폭과 평균 응력의 영향을 보기 위한 실험도 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

축 방향 응력 진폭 650 MPa와 평균 인장 응력 100 MPa의 AXAM (Test no. 1)에 대한 응력-변형률 Hysteresis loop의 N/N_f 에 따른 변화가 Fig. 4 에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 Inconel 718 은 주기적인 연화가 일어나는 재질로써 변형을 제어 실험과는 다르게 이러한 연화 현상이 안정화되지 않고 지속적으로 일어나서 주기 N에 따라 소성 변형률 진폭이 커져 Hysteresis loop도 두꺼워졌다. 그리고 라체팅 현상에 의해 Hysteresis loop가 평균 응력의 방향으로 점차 편이되었다. 또한 인장 부분에 압축 부분보다 더 많은 편이 현상이 일어났는데 이것은 인장시의 응력이 압축시의 응력보다 더 높고 재료가 압축보다는 인장에 더 큰 연화 현상을 보이기 때문이다. 본 연구에는 포함시키지 않았지만 심지어 평균 응력이 없는 축방향 완전 교번 하중하에서도 비슷한 현상이 발견되었는데 이는 재료 자체의 인장/압축에 대한 비대칭적 연화 때문인 것으로 풀이된다[1, 4].

Fig. 5 (a)는 상당 응력 진폭 675 MPa와 평균 인장 응력 100 MPa의 CPAM (Test no. 10) 실험에 대한 축변형률-전단변형률 곡선의 N/N_f 에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험이 진행됨에 따라 평균 응력의 방향으로 라체팅이 발생함을 알 수 있다. 이와 더불어 평균 전단 응력이 없음에도 불구하고 초기 전단 하중이 주어지

는 방향으로 약간의 비틀림 방향 라체팅이 발생하였다. 또한 주기가 지날수록 loop가 점점 커지면서 찌그러짐도 볼 수 있다. 곡선의 크기가 점점 커지는 것은 Inconel 718 이 Circular path처럼 고도의 비비율 하중 하에서도 재료에 주기적 연화 현상이 일어나기 때문인 것으로 풀이된다. 그리고 곡선의 찌그러짐은 반복적인 변형에 의해 재료의 비등방성이 발생하기 때문으로 생각 된다. Fig. 5 (b)에 보이는 바와 같이 같은 진폭의 상당 평균 전단 응력 100 MPa의 CPTM (Test no. 12) 실험에서도 비슷한 경향을 보였다.

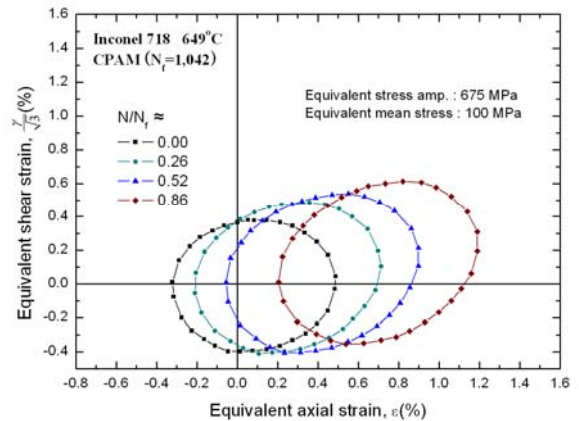
본 연구에서는 상당 라체팅 변형율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\epsilon_{eq}^r = [(\epsilon_p^r)^2 + (\gamma_p^r/\sqrt{3})^2]^{1/2}$$

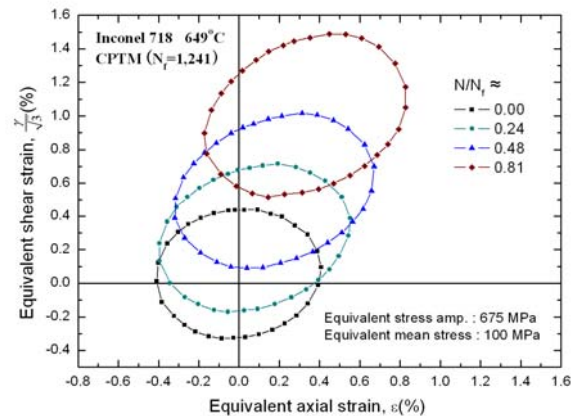
여기서 ϵ_p^r 과 γ_p^r 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_p^r = (\epsilon_p^{\max} + \epsilon_p^{\min})/2$$

$$\gamma_p^r = (\gamma_p^{\max} + \gamma_p^{\min})/2$$



(a)



(b)

Fig. 5 Axial-shear strain loops in circular loading: (a) CPAM, (b)CPTM

상당 평균 응력 100 MPa 에 대한 비율 및 비 비율의 여러 하중 경로의 라체팅 거동이 Fig. 6 에 2000 주기까지 비교되어 있다. 다른 하중에 비해 Circular path 에 대한 라체팅 증가율이 가장 컸다. 그러나 이것이 비비율 하중에 대한 라체팅 증가율이 항상 더 높다는 것을 뜻한다고 볼 수는 없다. 예를 들어 약간의 비비율 하중인 AXTM 이나 TRAM 은 비율하중인 AXAM 이나 TRTM 에 비해 훨씬 작은 라체팅 증가율을 보이기 때문이다. 이러한 경향은 재료의 특성에 따라 달라질 수도 있다 [5]. AXAM, TRTM 과 AXTM, TRAM 의 비교에서 일반적으로 응력 진폭이 평균 응력과 같은 방향일 때 더 큰 라체팅 증가율을 유발하는 것을 볼 수 있다.

상당 평균 전단 응력 100 MPa 과 상당 응력 진폭 650 MPa 에 대한 여러 하중 경로에서 피로수명까지의 라체팅 거동이 Fig. 7 에 비교되어 있다. 역시 다른 하중에 비해 Circular path 에 대한 라체팅 변형율 증가율이 가장 큼을 알 수 있다. 또한 동일한 평균 전단 응력과 상당 응력 진폭임에도 불구하고 비틀림 피로 하중 (TRTM)의 경우가 가장 긴 피로 수명을 보였다. 특히 이 경우 작은 라체팅 변형율 증가율에도 불구하고 긴 수명으로 인해 다른 하중 경로보다 큰 라체팅의 축적을 보였다.

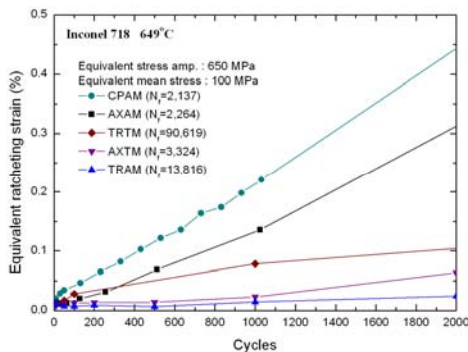


Fig. 6 Variation of equivalent ratcheting strain with cycles for different loading paths

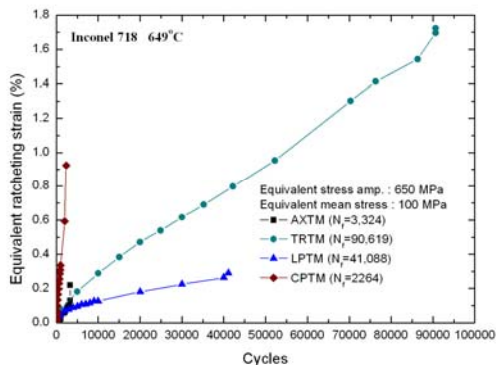


Fig. 7 Variation of equivalent ratcheting strain with cycles under the same torsional mean stress

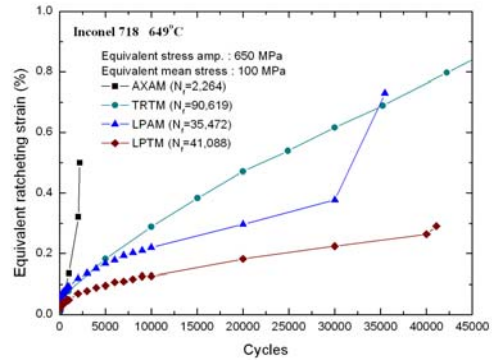
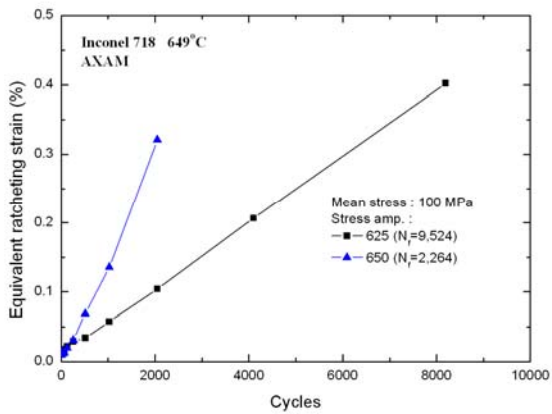


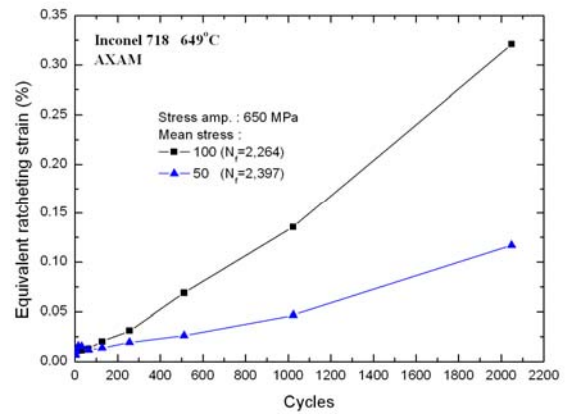
Fig. 8 Effect of loading mode on ratcheting strain

위의 Fig. 8 에 동일한 상당 평균 응력 및 상당 응력 진폭의 축방향과 비틀림 방향 하중 이력에 대한 라체팅 거동이 비교되어 있다. TRTM 에 비해 AXAM 의 라체팅 증가율이 더 크지만 피로 수명까지의 라체팅 축적량은 더 긴 피로 수명으로 인하여 TRTM 이 훨씬 큼을 Fig. 7 과 Fig. 8 을 통해 확인할 수 있다. 파괴시까지 축적되는 라체팅 변형율의 양이 경우에 따라 다른 것은 비록 이것이 재료에 손상을 입히기는 하지만 피로 수명을 결정하는 주요한 요인은 아님을 뜻한다. Fig. 8 에는 또한 LPAM 과 LPTM 도 비교되어있다. LPAM 이 LPTM 에 비해 약간 더 큰 라체팅 증가율을 보인다. 이는 평균 응력과 동일한 방향의 응력 진폭이 다른 응력 성분보다 라체팅에 큰 영향력을 가진다는 앞의 결과와 일치한다. 또한 각 응력 방향에 대하여 LPAM 과 LPTM 의 응력 진폭이 각각 AXAM 과 TRTM 보다 작으므로 LPAM 과 LPTM 의 라체팅 축적량이 AXAM 과 TRTM 의 그것보다 더 작았다.

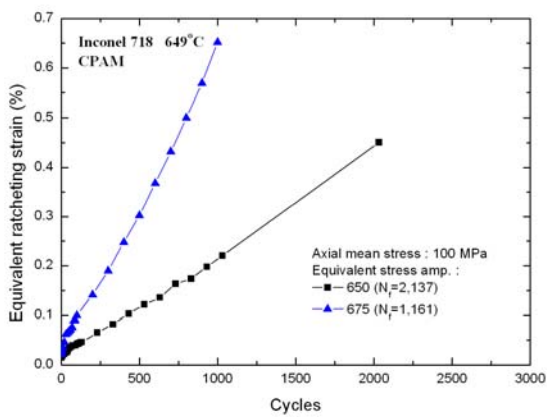
Fig. 9 (a)에 동일한 평균 인장 응력 100 MPa 에 대해 축방향의 각각 다른 응력 진폭 650 MPa 과 625 MPa 을 가했을 때의 결과가 비교되어 있다. 피로 수명은 당연히 높은 응력 진폭 조건에서 더 짧았지만 파괴시까지 축적된 라체팅은 더 작았다. 이는 높은 응력 진폭 조건에서 라체팅 증가율은 크지만 그만큼 피로 수명이 짧아 라체팅 변형율이 축적되는 시간은 오히려 짧기 때문이다. 또한 이것은 Inconel 718 이 일축 하중 조건에서 동일 평균 응력과 다른 응력 진폭에 대해 보이는 일반적인 현상이다[2]. 그러나 이러한 현상은 재료에 따라 다르게 나타난다. 구리 합금에 대한 실험[6]에서는 높은 응력 진폭에서 더 많은 라체팅이 축적되는 반대의 결과를 보였다. 하중 경로도 역시 파괴까지의 라체팅 축적에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 9 (b)에서 볼 수 있는 Inconel 718 에 대한 CPAM 실험에서는 평균 응력이 같을 때 높은 응력 진폭에서 더 많은 라체팅의 축적을 보였다.



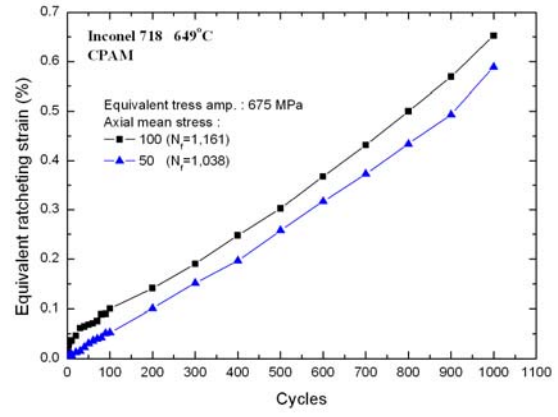
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 9 The effect of stress amplitude on ratcheting strain : (a) uniaxial test, (b) circular path test

Fig. 10 Effect of mean stress on ratcheting : (a) uniaxial test, (b) circular path test

평균 응력이 라체팅 변형율에 미치는 영향을 보면 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 응력 진폭이 일정할 때 더 높은 평균 응력에서 파괴시에 더 많은 라체팅의 축적을 보였다. 이는 평균 응력이 피로 수명에 미치는 영향이 본 연구에 사용된 정도의 낮은 평균 응력에서는 미미하다는 사실과 관련이 있는 것으로 여겨진다. Fig. 10 에서 볼 수 있듯 동일한 응력 진폭에 대해 다른 평균 응력을 가했을 때 피로 수명은 별 차이가 없지만 더 높은 평균 응력에서 더 큰 라체팅 증가율을 보이므로 파괴시 까지 축적되는 라체팅은 높은 평균 응력에서 더 크게 나타난다. 평균 응력이 라체팅에 미치는 영향은 AXAM 에서는 매우 크게 나타났지만 CPAM 이나 LPLM 에서는 미미하게 나타났다.

4. 결론

Inconel 718 강재에 대한 649°C (1200°F)에서의 다축 피로에 대한 라체팅 현상에 대한 연구가 수행되었다. 실험은 인장-비틀림 피로 시험기를 이용한 응력 제어 실험이었으며 평균 응력을 포함한 비율 및 비비율의 여러 다축 하중 경로에 대하여 행하여졌다. 라체팅 변형율은 피로파괴가 일어날 때까지 측정되었다. 여러 하중 조건에 대한 실험 결과로부터 다음 결론을 도출하였다.

- (1) 라체팅 증가율과 파괴까지 축적되는 라체팅은 하중 경로, 응력 진폭, 평균 응력에 따라 매우 다양하게 변화하였다. 본 연구에 사용된 응력 진폭과 평균 응력에서는 파괴시의 라체팅이 변형율이 피로 수명에 결정적인 요인은 아닌 것으로 판단된다. 한편 파괴시까지의 라체팅 축적량은 라체팅 증가율뿐만 아니라 피

- 로 수명 자체에 의해서도 영향을 받았다.
- (2) 실험 재료에 대해서는 Linear path보다는 Circular path에서 라체팅 증가율이 더 크게 나타났다. 그러나 하중에 있어서의 비비율 정도가 클수록 라체팅 증가율도 크다고 일반화 할 수는 없다.
 - (3) 응력 진폭 방향이 평균 응력 방향과 일치할 때 라체팅 증가율도 더 커지는 것으로 관측되었다.
 - (4) 재료 자체의 인장 및 압축에 대한 비대칭성으로 인해 축 방향의 완전 교번하중 하에서 라체팅이 발생하였다. 완전 비틀림 교번하중 하에서도 초기 하중이 가해지는 방향으로 라체팅이 발생하였는데 이에 대해서는 좀 더 연구가 필요하다.

Paper No. PVP2007-26440, accepted for publication in Journal of Pressure Vessel Technology.

- (6) Lim, C.B., Kim, K.S., Seong, J.B., 2008, "Ratcheting and fatigue behavior of a copper alloy under uniaxial loading with mean stress," International Journal of Fatigue, in press.

참고문헌

- (1) Xiao, L., Chen, D.L., Chaturvedi, M.C., 2006, "Effect of boron and carbon on thermomechanical fatigue of IN 718 superalloy – Part I. Deformation behavior," Materials Science and Engineering, A Vol. 437, pp. 157~171.
- (2) Park, S.J., Kim, K.S., Kim, H.S., 2006, "Ratcheting behavior and mean stress considerations in uniaxial low-cycle fatigue of Inconel 178 at 649°C," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 30, pp. 1076.
- (3) Kim, K.S., Van Stone, R.H., "Elevated Temperature Crack growth," NASA CR-189191, Prepared by GE Aircraft Engines, 1992.
- (4) Iyer, Saiganesh K., Lissenden, Cliff J. 2000, "Inelastic Anisotropy of Inconel 718: Experiments and Mathematical Representation," Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, Vol. 122, pp. 321~326.
- (5) Kim, K.S., Jiao, R., Chen X., Sakane, M., 2007, "Ratcheting of stainless steel 304 under multiaxial nonproportional loading," Proceedings of PVP2007, 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas,