



Alloy 800H의 저사이클 피로 특성에 미치는 전변형률 범위의 영향

The Effect of Total Strain Range on Low Cycle Fatigue Characteristics of Alloy 800H

이선기* · 김선진***†
 Seon-Gi Lee* and Seon-Jin Kim***†

(Received 09 August 2019, Revision received 05 December 2019, Accepted 06 December 2019)

Abstract: Alloy 800H is considered as a candidate material for the major high temperature components of a very high temperature reactor (VHTR). This paper is to investigate the influence of total strain range on low cycle fatigue characteristics of Alloy 800H in air environment at 750°C. Low cycle fatigue tests were carried out by a series of fully reversed strain-controls, four different total strain ranges of 0.6, 0.9, 1.2 and 1.5% under constant strain rate of 10⁻³/s. In all test conditions, the fatigue resistance for the Alloy 800H was decreased with increasing the total strain range. The strong effect of total strain range on low cycle fatigue characteristics was observed.

Key Words : Low cycle fatigue, Alloy 800H, Total strain range, High temperature

1. 서 론

초고온가스(VHTR)는 흑연과 헬륨을 연료와 냉각재로 쓰이고 수소와 전기를 경제적으로 생산하는 원자로이며 또한 제 4세대(Gen-IV) 원자로 노형 중에 가장 유망 받는 노형 중의 하나이다.¹⁾ 오스테나이트계 스테인리스강인 Alloy 800H는 초고온가스(VHTR)의 고온 가스 덕트, 코어 배럴, 코어 지지대 및 냉각 시스템과 같은 주요 구조 부품의 후보 재료 중 하나이다.^{2,3)} 초고온가스로는 초고온환경과 고압 하에서 장시간 운전되도록 설계되며 원자로의 시동 및 정지뿐만 아니라 동력 전달은 구조물에 저사이클 피로 및 크리프-피로 하

중을 유발한다. 따라서 주요 구조물의 안정성 있는 설계를 위해서는 Alloy 800H에 대한 고온에서의 저사이클 피로에 대한 특성 이해와 그에 대한 충분한 물성 자료의 확보가 매우 중요하다.

이러한 관점에서 많은 연구자들이 고온에서 Alloy 800H에 대한 저사이클 피로 거동에 대한 연구를 수행하여 왔다.³⁻⁸⁾ 또한 저자 등도 Alloy 800H에 대한 700°C 고온에서의 저사이클 피로 및 크리프-피로에 관한 연구를 수행하여 반복 응력 반응 거동과 파괴의 특성을 잘 파악하였다.³⁾

본 연구에서는 Alloy 800H의 고온에서 저사이클 피로 특성을 고찰하기 위한 일련의 연구의 하나로, 본보는 750°C에서 Alloy 800H의 저사이클

***† 김선진(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7755-2581>) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과
 E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-9163
 *이선기(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8321-2257>) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과

***† Seon-Jin Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7755-2581>) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.
 *Seon-Gi Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8321-2257>) : Graduate student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

피로 특성에 미치는 전변형률 범위의 영향과 손상 메카니즘을 평가한 결과를 보고하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 재료는 Alloy 800H이며 오스테나이트계 스테인레스 강이다.³⁾ Table 1은 본 연구에서 사용한 재료의 화학적 조성 값을 나타낸 것이다. 저 사이클 피로 시험에 사용된 버튼 헤드 시험편은 25.5 mm 두께의 열간 압연 판에서 기계 가공되었으며, ASTM-E606에 의거 하여 직경 6 mm, 평행부 길이 18 mm로 제작하였다. 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다.

본 실험에 사용된 시험기는 튜브형 전기로가 장착된 100 kN의 서보 유압 기계를 사용하였으며, 시험기의 구성은 Fig. 2와 같다. 본 실험의 조건은 Table 2와 같으며, 750℃에서 연속 변형률 제어 방식으로 수행되었다. 제어된 전변형률 범위는 0.6, 0.9, 1.2 및 1.5%이며 변형률 속도는 $1 \times 10^{-3}/s$ 로 일정하게 유지하였다. 피로 수명은 최대 응력비가 20% 감소한 지점의 사이클 수를 피로 수명으로 정의하였다.

Table 1 The chemical composition of Alloy 800H (wt.%)

C	Ni	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	P	Al	Cu
0.07	30.18	Bal	0.42	0.98	20.43	0.54	0.022	0.49	0.45

Table 2 Testing conditions of low cycle fatigue

Specimens	Alloy 800H
Total strain ranges	0.6, 0.9, 1.2, 1.5%
Strain rate	$1 \times 10^{-3}/sec$
Environment	750℃, Air
Waveform	Triangular
drop in load	20%
Strain ratio, <i>R</i>	Tension-Compression, <i>R</i> = -1

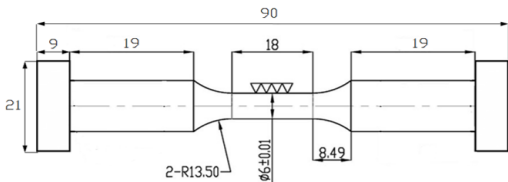


Fig. 1 Low cycle fatigue testing specimen

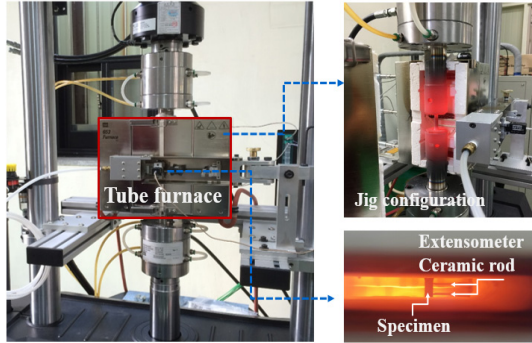


Fig. 2 Configuration of LCF testing M/C (MTS-370)

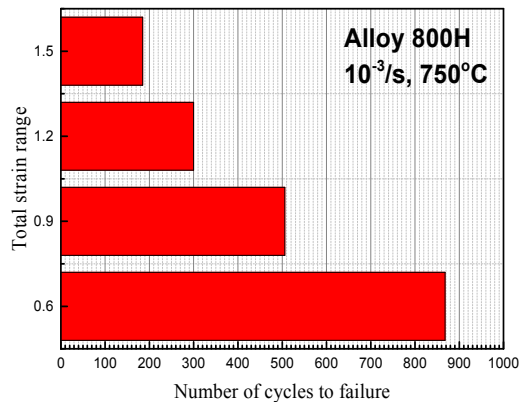


Fig. 3 Total strain range vs. low cycle fatigue life

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 수명에 미치는 전변형률 범위의 영향

Fig. 3은 750℃에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험에 대한 수명에 미치는 전변형률 범위의 영향에 대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 전변형률 범위가 0.6%에서 1.5%로 증가할 수록 피로에 대한 손상이 증가하여 저사이클 피로 수명도 감소하는 결과를 나타내고 있다.

3.2 저사이클 피로 특성

3.2.1 반복 응력 반응 거동

일반적으로 반복 응력 반응 거동은 저사이클 피로 실험 중 재료의 응력 반응 변동을 나타낸 결과이다. 일반적인 반응 거동은 경화, 연화 그리고 유지의 영역을 포함한다.¹⁾ Fig. 4는 Alloy 800H의

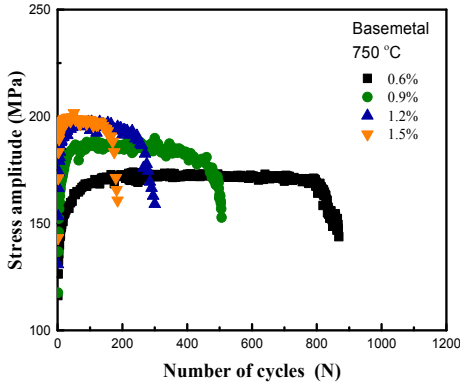


Fig. 4 Stress amplitude of Alloy 800H as a function of number of cycles (750°C)

반복 응력 반응 거동을 응력 진폭의 향으로 반복 수에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 정도의 차이는 있으나 모든 전변형률 범위에서 초기 반복 경화 현상을 나타내고 있음을 명확히 확인할 수 있다. 전변형률 범위가 가장 작은 0.6%의 경우는 초기 반복 경화 이후 대부분의 사이클 동안 유지 영역이 뒤따르며 파단에 앞서 급격하게 연화되어짐을 볼 수 있다. 나머지 전변형률 범위에서는 전변형률 범위가 증가할수록 초기 반복 변형률 경화에 대한 반복 수가 감소하고 또한 비교적 짧은 유지 영역이 뒤따르며 파단 시까지 연화 영역이 뒤따르는 특성을 보이고 있다. 이러한 현상은 소성변형률 거동에서도 언급하겠지만 전변형률 범위의 증가로 인한 응력 진폭과 소성변형률 현상으로 보이며 저사이클 피로 수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 전변형률 범위가 증가함에 따라 최대 응력 진폭의 크기도 증가함을 보여주고 있다. 상대적으로 낮은 0.6%의 전변형률 범위의 경우 다른 전변형률 범위에 비해 소성변형이 많이 일어나지 않기 때문에 초기 경화 영역을 제외하고 유지 구간의 영역이 큰 것으로 사료된다.

3.2.2 반복 경화 비율의 비교

반복 경화 비율 및 반복 연화 비율은 금속재료의 반복 변형 거동을 특정화 짓는 두 가지 중요한 파라미터이다.⁹⁾ Alloy 800H의 750°C에서 초기 반

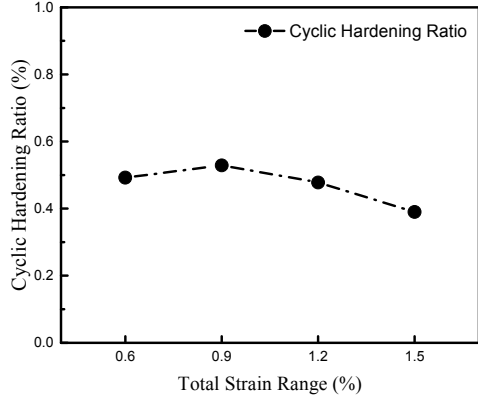


Fig. 5 Cyclic hardening ratio of Alloy 800H as a function of total strain range (750°C)

복 변형률 경화 현상에 대한 전변형률 범위의 영향을 좀 더 면밀하게 고찰하기 위하여, 다음과 같이 반복 경화 비율(cyclic hardening ratio, CHR)을 다음과 같이 정의하였다.⁹⁻¹¹⁾

$$CHR = \frac{\sigma_h - \sigma_1}{\sigma_1} \quad (1)$$

여기서, CHR은 반복 경화 비율을 나타내며, σ_1 , σ_h 는 각각 첫 번째 사이클에서의 응력 진폭과 반수명(half-life)에서의 응력 진폭을 나타낸다. Fig. 5는 전변형률 범위에 따른 반복 경화 비율을 나타낸다. 초기 반복 경화 비율은 0.6%에서 0.9%까지 증가하며 그 후 0.9%에서 1.5%까지는 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 3의 저사이클 피로 수명과 반복 경화 비율을 비교한 결과, 0.6%에서 0.9%까지 362 cycle (42%) 감소하였고, 1.2%와 1.5%에서는 각각 206 cycle (40%), 115 cycle (38%)만큼 감소하였다. 즉, 반복 경화 비율은 전체적인 저사이클 피로 수명 감소에 추가적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 전변형률 범위가 가장 낮은 0.6%의 경우를 제외하면 전변형률 범위의 증가와 더불어 반복 경화 비율은 감소하는 결과를 보여주고 있다.

3.2.3 히스테리시스 루프 거동

Fig. 6은 750°C에서 Alloy 800H에 대한 4가지

전변형률 범위에서의 각 시험편에 대한 반 수명에서의 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다. 전변형률 범위가 증가할수록 히스테리시스 루프 선도의 형상은 증가하며 또한 위쪽과 아래쪽이 평평한 사각형 모양의 선도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Alloy 617의 저사이클 피로 실험결과와도 일치한다.¹²⁾ 또한 응력 진폭과 소성 변형률 범위는 전변형률 범위가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 소성변형률 범위에 미치는 전변형률 범위의 영향을 관찰하기 위해 소성변형률 진폭에 미치는 전변형률 범위의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 결과적으로, 전변형률 범위가 증가할수록 Alloy 800H의 소성변형률 진폭도 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

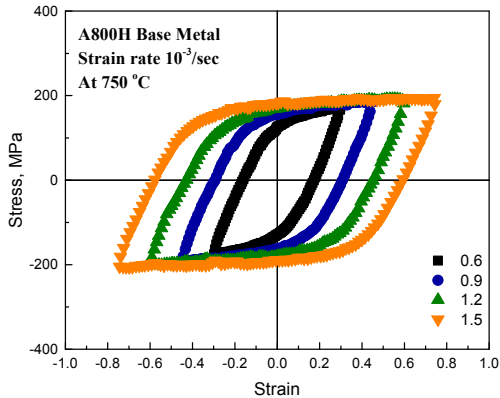


Fig. 6 Effect of total strain range on hysteresis loops

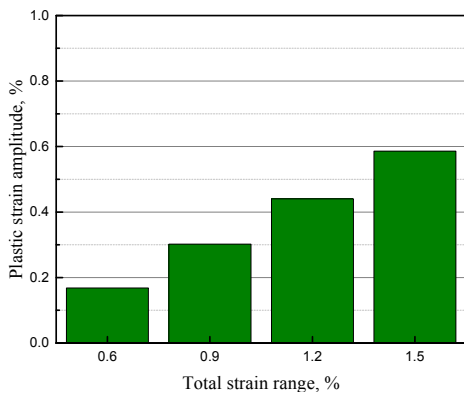


Fig. 7 Effect of total strain range on plastic strain amplitude

3.3 파면 분석을 통한 손상 메카니즘

Alloy 800H의 750°C에서의 저사이클 피로 파괴 메카니즘을 분석하기 위해 주사 전자현미경(SEM)을 통해 시험편의 파면을 관찰하였다. Fig. 8은 일례로 저사이클 피로 실험 후 전변형률 범위 0.6 및 1.5%의 파면 사진이며, 균열 개시(crack initiation), 균열 진전(crack propagation) 및 최종 파단(final fracture)의 세 영역으로 구분하여 각각의 영역에 대해 분석하였다.²⁾ 관찰한 결과, 모든 전변형률 범위에 대한 균열의 개시는 표면의 한 방향에서 집중되어 발생하여 전파되었으며, 균열의 진전 영역에서 전형적인 스트라이에이션(striation)이 관찰되었다. 또한 균열 개시 영역에서 벽개 파괴(cleavage facets) 특징과 더불어 최종 파괴 영역에서 딩플(dimple)현상도 관찰되었다.

피로 파괴의 손상 메카니즘을 좀 더 면밀히 고찰하기 위해 파단 후 시험편을 절단하여 에칭 후에 광학현미경(OM)으로 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Alloy 800H의 균열의 발생과 전파의 파괴 메카니즘은 전변형률 범위에 관계없이 입내 파괴(transgranular) 형태로 발생하였다.

이는 저사이클 피로 실험의 일반적인 파괴 메카니즘의 특징과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.^{3,7)} 또한 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 시험편 표면에 2차 잔가지 균열이 발생함을 관찰할 수 있었다.

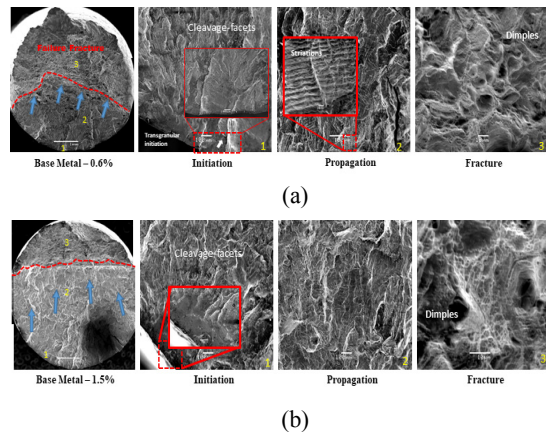
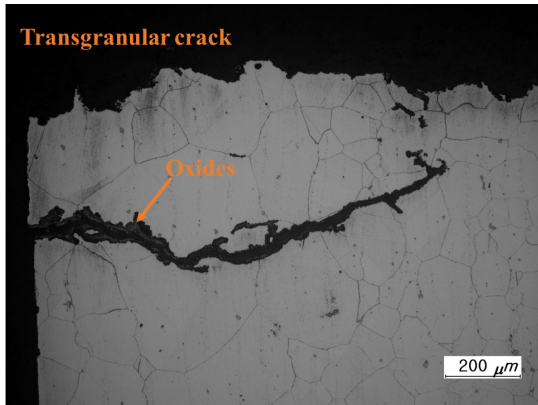
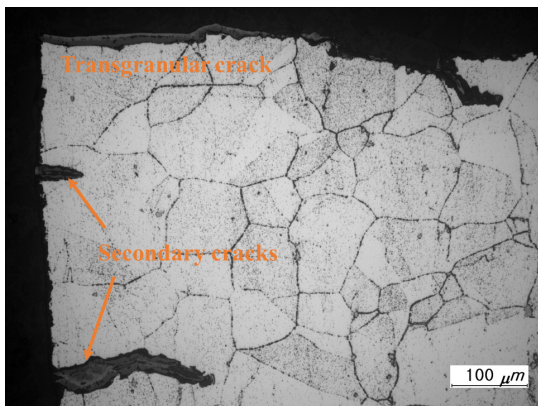


Fig. 8 Cracking morphologies of Alloy 800H at the total strain ranges (a) 0.6% and (b) 1.5%



(a)



(b)

Fig. 9 Surface cracking of Alloy 800H observed by OM (Optical Microscope) (a) 0.6% and (b) 1.5%

4. 결론

고온 750℃에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 특성에 미치는 전변형률 범위의 영향과 피로 손상 메카니즘을 평가하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

1) 피로 수명은 전변형률 범위가 증가할수록 감소하였다.

2) 반복 응력 반응 거동은 모든 전변형률 범위에서 초기 반복 경화 현상을 나타내었으며, 전변형률 범위가 가장 낮은 0.6%에서는 초기 반복 경화 이후 유지(saturation)영역이 일정 기간 뒤따르며 파괴 직전 연화하는 현상을 보였다.

3) 반복 경화 비율은 0.6%의 전변형률 범위를 제외하고 전변형률 범위가 증가하면 감소하는 경향을 보였다.

4) 전변형률 범위가 증가할수록 소성변형률 진폭과 응력 진폭이 증가하며, 이러한 영향은 저사이클 피로 수명과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다.

5) 균열의 발생과 전파의 파괴 메카니즘은 전변형률 범위에 관계없이 입내 파괴(transgranular) 형태로 발생하였다. 또한 시험편 표면에는 2차 균열이 발생하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(2017M2A8A1019392)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Author contributions

S. G. Lee; Experimental, Data curation, Investigation, Writing-original draft, S. J. Kim; Supervision, Conceptualization, Project administration, Writing-review & editing.

References

1. P. H. Choi, S. J. Kim, W. G. Kim and M. H. Kim, 2014, "An Experimental Investigation on Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 617 Base Metal and Alloy 617/Alloy 617 Weld Joints", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 115-121. ([https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.5.115.](https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.5.115))
2. S. J. Kim, R. T. Dewa, W. G. Kim and E. S. Kim, 2016, "Macro and Microscopic Investigation on Fracture Specimen of Alloy 617 Base Metal and Weldment in Low Cycle Fatigue Regime", Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 40, No. 6, pp. 565-571. ([https://doi.org/10.3795/KSME.2016.40.6.565.](https://doi.org/10.3795/KSME.2016.40.6.565))

3. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2018, "Uniaxial Low-Cycle Fatigue Study of Alloy 800H Weldments at 700°C", *Metals* 2018, 8, 918, pp. 1-16. (<https://doi.org/10.3390/met.2018.8.918>.)
4. J. L. Kaae, 2009, "High-Temperature Low-Cycle Fatigue of Alloy 800H", *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 332-340. (<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.08.002>)
5. J. K. Wright, L. J. Carroll, C. Cabet, T. M. Lillo, J. K. Benz, J. A. Simpson, W. R. Lioyd, J. A. Chapman and R. N. Wright, 2012, "Characterization of Elevated Temperature Properties of Heat Exchanger and Steam Generator Alloys", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 251, pp. 252-260. (<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.10.034>)
6. M. Kolluri, P. Ten Pierick and T. Bakker, 2015, "Characterization of High Temperature Tensile and Creep-Fatigue Properties of Alloy 800H for Intermediate Heat Exchanger Components of (V)HTRs", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 284, pp. 38-49. (<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.12.017>)
7. K. B. S. Rao, H. Schuster and G. R. Halford, 1996, "Mechanism of High Temperature Fatigue Failure in Alloy 800H", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 27, pp. 851-861. (<https://doi.org/10.1007/BF02649752>)
8. K. Sonoya and Y. Tomisawa, 2010, "Cracking by Elevated Temperature Embrittlement in the HAZ of Alloy 800H", *Welding International*, pp. 425-429. (<https://doi.org/10.1080/09507119109446765>)
9. C. Chen, B. L. F. Wang and F. C. Zhang, 2017, "Low-Cycle Fatigue Behaviors of Pre-hardening Hadfield Steel", *Materials Science & Engineering A*, 695, pp. 144-153. (<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.107>)
10. Y. Qiu, J. C. Pang, S. X. Li, M. X. Zhang and Z. F. Zhang, 2018, "Influence of Temperature on the Low-Cycle Fatigue Properties of Compacted Graphite Iron", *International Journal of Fatigue*, Vol. 117, pp. 450-460. (<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.08.031>.)
11. D. Ye, S. Matsuoka, N. Nagashima and N. Suzuki, 2006, "The Low-Cycle Fatigue, Deformation and Final Fracture Behaviour of an Austenitic Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, A415, pp. 104-117. (<https://doi.org/10.1016/J.msea.2005.09.081>)
12. J. K. Wright, L. J. Carroll, J. A. Simpson and R. N. Wright, 2013, "Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850°C and 950°C", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 135, pp. 1-8. (<https://doi.org/10.1115/1.4023673>)