

# 850°C 고온에서 Alloy 800H 모재와 용접재의 저사이클 피로 거동 Low Cycle Fatigue Behaviors of the Alloy 800H Base Metal and Weldments at a High Temperature of 850°C

샤위언\* · 김선진\*\*  
Yu-En Xia\* and Seon-Jin Kim\*\*

(Received 7 May 2021, Revision received 13 October 2021, Accepted 13 October 2021)

**Abstract :** Alloy 800H is one of the candidate materials for key structural components such as control rod systems, hot gas duct, core barrels, core supports and shut-down cooling systems for the very high temperature reactor (VHTR) system. The aim of this paper is to compare the low-cycle fatigue behaviors of the alloy 800H base metal and weldments at a high temperature of 850°C. Low cycle fatigue tests were carried out for 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 life of base metal and weldments decreased inversely proportional to the total strain range. The cyclic stress response behavior showed cyclic softening phenomenon for both materials. The low cycle fatigue life for base metal and weldments were predicted by the Coffin-Manson-Basquin law. The results showed that transition life of the weldments is shorter than that of the base metal.

**Key Words :** Low cycle fatigue, Total strain range, Weldment, High temperature, Transition life

## 1. 서 론

초고온가스(VHTR)는 흑연과 헬륨을 연료와 냉각재로 쓰며 수소와 전기를 경제적으로 생산하는 원자로이자 제 4세대(Gen-IV) 원자로, 가장 유망받는 노형 중 하나이다.<sup>1-4)</sup> 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.<sup>3,4)</sup> 초고온가스로는 초고온환경과 고압하에

서 장시간 운전되도록 설계되며, 원자로의 시동 및 정지뿐만 아니라 동력 전달은 구조물에 저사이클 피로 및 크리프-피로 하중을 유발한다.<sup>3,4)</sup> 따라서 원자로의 안전한 설계를 위해서는 Alloy 800H에 대한 고온 환경하에서의 저사이클 피로 특성에 대한 정확한 이해와 충분한 물성 데이터의 확보가 매우 중요하다.

이러한 관점에서 국제적으로 많은 연구자들이 Alloy 800H에 대한 저사이클 피로 및 크리프-피로 거동에 대한 연구를 수행하여 왔다.<sup>2-8)</sup> 또한 저자

\* 김선진(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7755-2581) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과  
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-9163  
\*샤위언(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6103-2143) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과

\*\* Seon-Jin Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7755-2581) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.  
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-9163  
\*Yu-En Xia(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6103-2143) : Graduate student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

등도 Alloy 800H에 대한 고온 환경에서의 저사이클 피로 및 크리프-피로에 관한 연구를 수행하여 반복 응력 반응 거동 및 파괴의 특성을 고찰하였다.<sup>2-4)</sup> 그러나 850°C의 고온에서의 가스텅스텐아크용접(GTAW) 용접재에 대한 저사이클 피로 거동을 고찰한 연구는 없다.

이 연구에서는 Alloy 800H 가스텅스텐아크용접 용접재에 대한 고온에서의 저사이클 피로 특성을 고찰하기 위한 일련의 연구의 하나로, 850°C의 고온에서 Alloy 800H의 모재에 대한 이전의 실험 결과<sup>2)</sup>를 활용하여 이 연구에서 행한 Alloy 800H 용접재에 대한 실험 결과와 비교·고찰하고자 한다. 즉, 850°C 고온에서 Alloy 800H 용접재와 모재의 저사이클 피로 특성에 미치는 전변형률 범위의 영향과 Coffin-Manson 법에 의한 피로수명을 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

이 연구에서 사용된 재료는 초고온가스로의 구조재료의 후보 재료인 Alloy 800H이며 오스테나이트계 스테인레스 강이다. Table 1은 본 연구에서 사용한 재료의 화학적 성분을 나타낸다. 저사이클 피로 시험에 사용된 버튼 헤드 시험편은 25.5 mm 두께의 열간 압연 판에서 가스텅스텐아크 용접을 행하여 제작하였다. 용접 이음 조인트의 형상은 단일 V-groove 형상으로 루트 갭이 12 mm, 각도는 80°로 하였다. 용접 형상과 채취 방향의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 시험편은 ASTM-E606에 의거, 버튼 헤드 형상으로 제작하였고 그 시험편의 형상과 치수를 Fig. 2에 나타낸다. 또한 Alloy 800H 모재 및 용접재에 대한 상온 및 850°C에서의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다.

이 실험에 사용된 시험기는 튜브형 전기가장장착된 100 kN의 서보 유압 기계(MTS 370)를 사용하였다. 이 실험의 조건은 Table 3과 같으며, 연속 변형률 제어 방식으로 수행되었다. 구체적인 실험 방법과 절차는 참고문헌을 참조 바란다.<sup>2)</sup> 이 연구에서 제어된 전변형률 범위는 0.6, 0.9, 1.2 및 1.5%이며 변형률 속도는 10<sup>-3</sup>/s로 일정하게 유지

하였다. 이 연구에서 피로수명은 최대응력비가 20% 감소한 지점의 사이클 수 혹은 시험편이 파단되었을 때의 사이클 수를 피로수명으로 정의하였다.<sup>2)</sup>

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 The mechanical properties of Alloy 800H base metal and weldments (1\_BM, 2\_Weldments)

	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
1_RT(850°C)	246.4(134.8)	568.7(143.2)	54.0(105.4)
2_RT(850°C)	434.7(176.8)	654.6(181.9)	42.8(70.8)

Table 3 Conditions of the low cycle fatigue testing

Condition \ Specimens	Alloy 800H / Weldments
Total strain range (%)	0.6, 0.9, 1.2, 1.5
Strain rate (/sec)	1×10 <sup>-3</sup>
Waveform	Triangular
Drop in load (%)	20
Strain ratio, (R)	-1

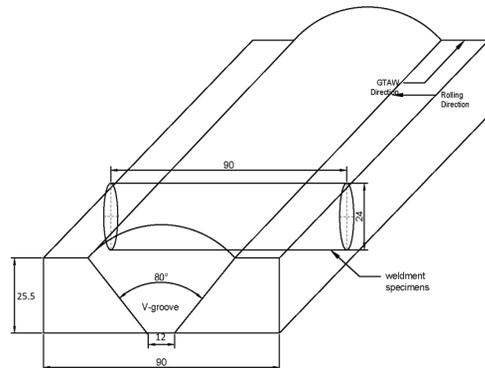


Fig. 1 Example of specimen cutting from GTAWed pad

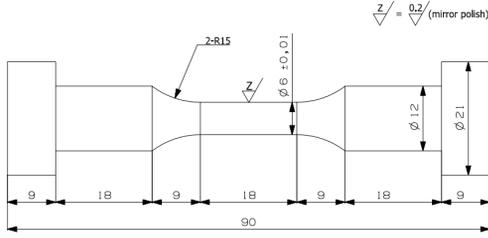


Fig. 2 Low-cycle fatigue testing specimen

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 저사이클 피로수명

Fig. 3은 이 연구의 850°C 고온에서 Alloy 800H의 용접재에 대한 저사이클 피로 실험에 대한 피로수명과 이전의 Alloy 800H 모재에 대한 실험 결과<sup>2)</sup>를 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 용접재 및 모재 모두 전변형률 범위가 증가함에 따라 그 피로수명이 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 전변형률 범위가 증가하면 그 피로저항이 감소하는 것이다. 전변형률 범위와 피로수명사이에는 다음과 같은 멱함수 관계가 존재함을 알 수 있다.

$$\Delta \epsilon_t = a(N_f)^b \quad (1)$$

여기서,  $a$ 와  $b$ 는 각각 재료 상수이다.

이 실험 결과에 의하면, 전변형률 범위가 비교

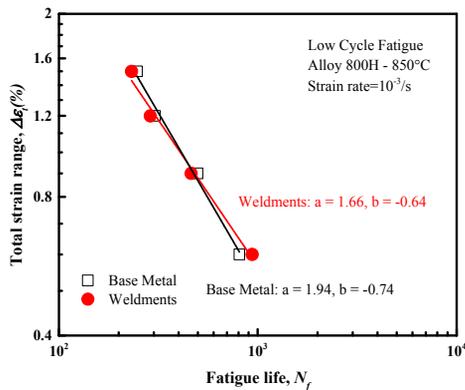
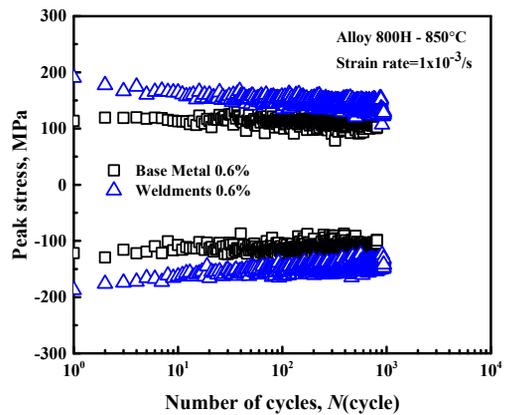


Fig. 3 Comparison of fatigue life for Alloy 800H base metal and weldments

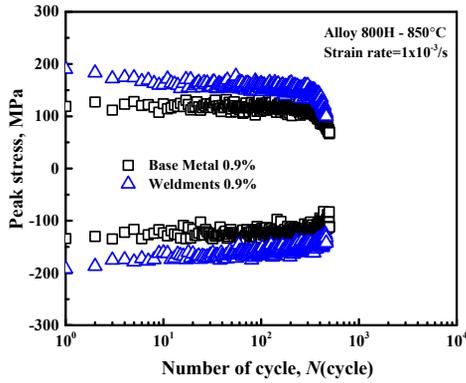
적 낮은 0.6%에서는 용접재의 경우가 모재보다 피로수명이 다소 높게 나타난 점을 주목하고 싶다. 이는 재료에 대한 피로저항의 변동성에 의한 영향을 고려할 수 있고, 또 하나는 실제 용접재의 강도가 우수하여 낮은 전변형률 범위에서는 피로수명에 대한 저항 능력이 높게 나타날 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 향후 이 부분에 대해서는 더 많은 실험과 고찰이 요구된다.

#### 3.2 반복 응력 반응 거동

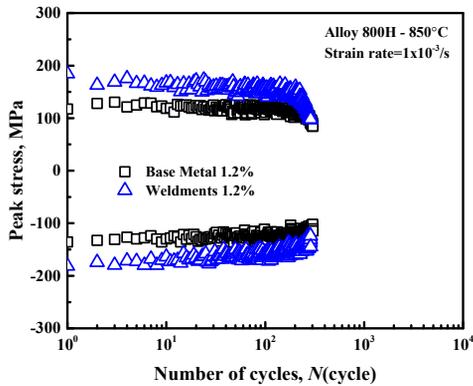
반복 응력 반응 거동은 저사이클 피로 실험에서 나타나는 시험편의 응력 반응 변동을 나타낸 결과로, 일반적으로 반복 경화(cyclic hardening), 반복 연화(cyclic softening) 그리고 반복 유지(saturation) 영역의 3가지를 포함한다.<sup>1)</sup> Fig. 4는 Alloy 800H 모재와 용접재에 대하여 반복 응력 반응 거동을 피크 응력(즉, 최대 인장 응력과 최대 압축 응력)을 하중 반복수의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 정도의 차이는 있으나 이 실험의 모든 전변형률 범위의 조건에서 모재 및 용접재 모두 초기부터 반복 연화 현상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 용접재의 경우가 모재보다 더 큰 피크 응력 값을 나타내고 있으며, 전변형률 범위가 증가할수록 응력 피크 응력 값이 높게 나타남을 알 수 있다.



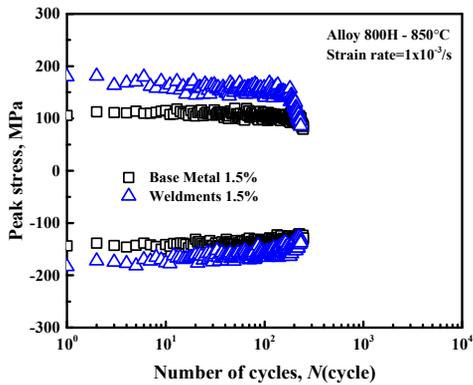
(a) Total strain range of 0.6%



(b) Total strain range of 0.9%



(c) Total strain range of 1.2%



(d) Total strain range of 1.5%

Fig. 4 Peak stresses as a function of number of cycles

### 3.3 반복 연화율의 비교

반복 경화율 및 반복 연화율은 금속재료의 반복 변형 거동을 특정화 하는 두 가지 중요한 파라

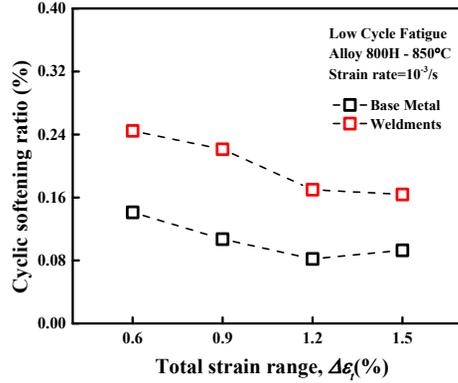


Fig. 5 Effect of cyclic softening ratio on total strain range for Alloy 800H base metal and weldments

미터이다.<sup>9)</sup> Alloy 800H의 모재와 용접재에 대한 850°C에서 초기 반복 변형을 연화 현상에 대한 전 변형을 범위의 영향을 좀 더 면밀하게 고찰하기 위하여, 이 연구에서는 다음과 같이 반복 연화율(cyclic softening ratio, CSR)을 정의한다.<sup>9-12)</sup>

$$CSR = \frac{\sigma_{max} - \sigma_h}{\sigma_{max}} \quad (2)$$

여기서, CSR은 반복 연화율을 나타내며,  $\sigma_{max}$  및  $\sigma_h$ 는 각각 최대 응력 진폭과 반수명(half-life)에서의 응력 진폭을 나타낸다.

Fig. 5는 Alloy 800H의 모재와 용접재에 대한 연화율을 구하여 전변형을 범위의 함수로 나타낸 것이다. 거시적으로는 Alloy 800H의 용접재 및 모재 모두 전변형을 범위가 증가할수록 연화율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 동일 전변형을 범위에서는 용접재의 경우가 모재보다도 60~70% 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 고온에서의 강도와 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다.

### 3.4 히스테리시스 루프 거동

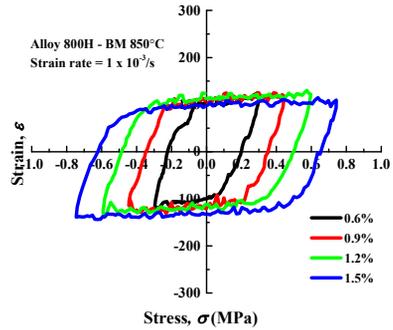
Fig. 6은 850°C에서 용접재 및 모재에 대한 4가지 전변형을 범위에서의 각 시험편에 대한 반수명에서의 히스테리시스 루프 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모재 및 용접재 모두 전변형을 범위가 증가할수록 소성변형을 진폭과

응력 진폭이 모두 증가하는, 즉 히스테리시스 루프 선도의 형상이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 전변형률 범위가 증가함에 따라 히스테리시스 루프의 상하면은 더욱 편평한 사각형 모양의 루프 선도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Wright 등의 고온 저사이클 피로 실험 결과<sup>13)</sup>와도 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이하에서는 850°C 고온에서 Alloy 800H의 모재와 용접재에 대한 응력 진폭과 소성변형률 진폭의 영향을 더욱 명확히 고찰하도록 한다.

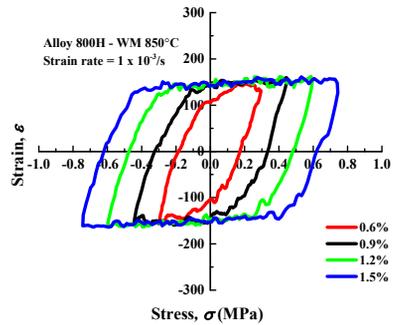
Fig. 7은 전변형률 범위의 함수로 응력 진폭의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Alloy 800H 용접재의 응력 진폭이 각 전변형률 범위에서 모재의 응력 진폭보다 모두 크게 나타났다. 또한 모재 및 용접재 모두 응력 진폭은 전변형률 범위가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 기울기는 용접재의 경우가 다소 높게 나타났다. 즉, Alloy 800H의 용접재 및 모재의 기울기는 각각 16.9 및 14.2로 나타났다. 또한 이들의 상관관계 식을 그림 중에 나타내었다.

Fig. 8은 전변형률 범위의 함수로 소성변형률 진폭의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Alloy 800H 용접재의 소성변형률 진폭은 각 전변형률 범위에서 모재의 소성변형률 진폭보다 약간 적게 나타났다. 또한 모재 및 용접재 모두 소성변형률 진폭은 전변형률 범위가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 그 기울기 또한 용접재의 경우가 다소 높게 나타났다. 이들의 상관관계 식을 그림 중에 나타내었다.

한편, 850°C 고온에서 모재와 용접재에 대한 전변형률 범위가 반수명에서의 소성변형률 범위와 탄성변형률 범위의 비율에 미치는 정량적인 영향을 고찰하기 위하여 소성변형률 범위와 탄성변형률 범위의 비의 관계를 Fig. 9에 도식화하여 나타내었다. Alloy 800H 모재의 경우 전변형률 범위 0.6%에서 소성변형률 범위는 70% 그리고 탄성변형 범위는 30%로 나타났다. 또한 동일 전변형률 범위에서 Alloy 800H 용접재는 소성변형률 범위 60%, 탄성변형률 범위 40%로 나타났다. 또한 전변형률 범위가 증가할수록 소성변형률 범위도 증가하며, 그에 상응하여 탄성변형률 범위도 전변형률



(a) Alloy 800H base metal



(b) Alloy 800H weldments

Fig. 6 The hysteresis loops for a half-life for Alloy 800H base metal and weldments

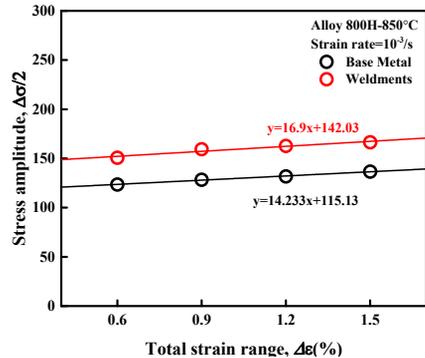


Fig. 7 Effect of stress amplitude as a function of total strain range for Alloy 800H base metal and weldments

범위가 증가함에 따라 감소하는 경향을 알 수 있다. 이상과 같은 실험 결과는 저사이클 피로 수명을 Coffin-Manson 법칙에 의하여 비교적 잘 평가될 수 있음을 시사해 준다. 즉, 이들의 관계는 저

사이클 피로수명과 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다.

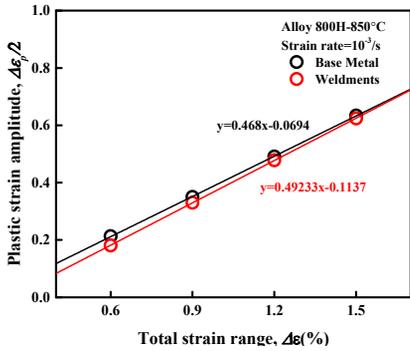
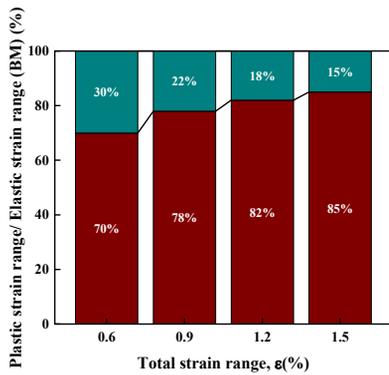
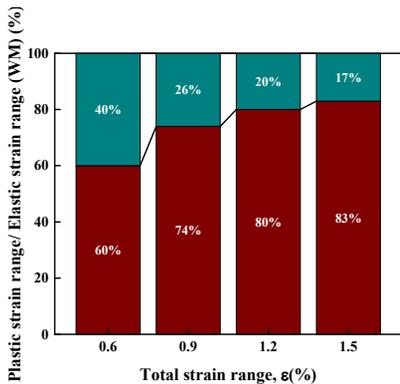


Fig. 8 Effect of plastic strain amplitude as a function of total strain range for Alloy 800H base metal and weldments



(a) Alloy 800H base metal



(b) Alloy 800H weldments

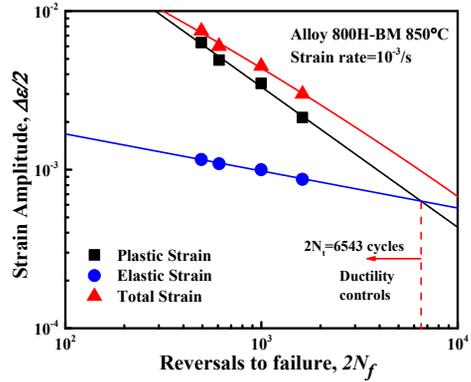
Fig. 9 The ratio of plastic strain amplitude and elastic strain amplitude at each total strain range

### 3.5 저사이클 피로수명 평가

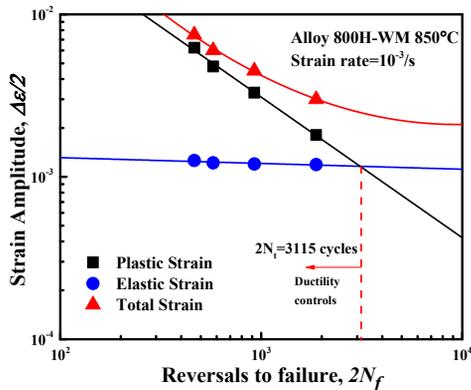
이 연구의 저사이클 피로수명 평가는 아래 식과 같은 잘 알려진 Coffin-Manson-Basquin(이하에서는 모두 CMB로 표기함) 법에 의하여 평가하였다.<sup>3)</sup>

$$\frac{\Delta \epsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

여기서,  $\Delta \epsilon_t/2$  는 전변형률 진폭,  $E$ 는 탄성계수,  $\sigma_f'$ 는 피로 강도 계수,  $b$ 는 피로 강도 지수,  $\epsilon_f'$ 는 피로 연성 계수,  $c$ 는 피로 연성 지수이다. 또한  $2N_f$ 는 파괴까지의 반전수(reversal)이다.



(a) Alloy 800H base metal



(b) Alloy 800H weldments

Fig. 10 Strain-life curves by Coffin-Manson method

Table 4 The estimated parameters for Coffin-Manson method

Parameter	Base Metal	Weldments
$\sigma_f$	626.7 MPa	202.8 MPa
$b$	-0.233	-0.036
$E$	142.5 GPa	142.5 GPa
$\epsilon_f$	0.743	0.555
$c$	-0.885	-0.865

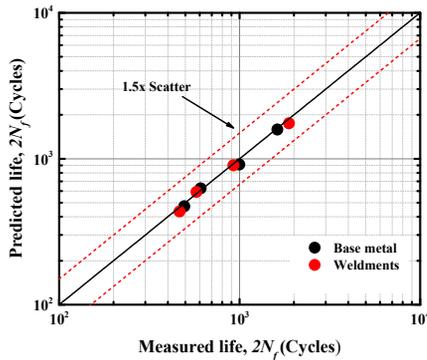


Fig. 11 Comparison of measured life and predicted life by Coffin-Manson method

식 (3)의 CBM 식을 사용하기 위해서는 피로수명의 반수명에서의 전변형률 진폭, 탄성변형률 진폭 및 소성변형률 진폭 값이 요구된다. Fig. 10은 850°C에서 Alloy 800H 모재 및 용접재에 대하여 얻어진 실험값을 CBM 식에 의한 전변형률 진폭-수명 선도, 탄성변형률 진폭-수명 선도 및 소성변형률 진폭-수명 선도를 함께 나타낸 결과이다. 이렇게 얻어진 탄성변형률과 소성변형률 진폭의 그래프가 교차하는 지점을 천이수명(transition life)이라 부르며, 탄성 및 소성 변형률이 동일한 값을 가질 때의 수명을 말한다. 모재 및 용접재의 천이수명은 각각 6,543 및 3,115 반전수로 나타났다. 이 연구의 850°C 고온의 실험 조건에서 Alloy 800H 용접재의 천이수명은 모재의 천이수명보다 약 47% 낮게 나타났다. 일반적으로 천이수명은 재료의 인장강도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 알려져 있으며 이 실험의 결과와도 잘 일치한다. CBM 관계식에 의하여 추정된 파라미터 값을

Table 4에 나타내었다. 위와 같이 동정한 식을 바탕으로 한 예측값과 실험값을 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 용접재와 모재 모두 실험값과 예측값이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 CBM 법에 의하여 추정된 파라미터를 활용하여 Alloy 800H의 용접재 및 모재의 피로수명의 정량적 평가가 가능함을 알 수 있었다.

### 5. 결론

고온 850°C에서 Alloy 800H 용접재와 모재의 저사이클 피로 거동에 미치는 전변형률 범위의 영향과 CBM 법에 의한 피로수명을 평가하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

- 1) 용접재 및 모재 모두 피로수명은 전변형률 범위가 증가할수록 감소하였다. 전변형률 범위와 피로수명사이에는 멱함수 관계가 존재하였다.
- 2) 용접재 및 모재 모두 모든 전변형률 범위의 실험조건에서 거시적으로 반복 연화 현상을 보였으며, 반복 연화율은 전변형률 범위가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 동일 전변형률 범위에서 반복 연화율은 용접재의 경우가 모재보다도 약 60~70% 높게 나타났다.
- 3) 용접재 및 모재 모두 전변형률 범위가 증가할수록 응력 진폭은 증가하였으며, 용접재의 응력 진폭이 모재보다 크게 나타났다.
- 4) 용접재 및 모재 모두 전변형률 범위가 증가할수록 소성변형률 진폭은 증가하였으며, 용접재의 소성변형률 진폭이 모재보다 적게 나타났다.
- 5) 용접재 및 모재 모두 전변형률 범위가 증가할수록 소성변형률 범위도 증가하며, 그에 상응하여 탄성변형률 범위도 전변형률 범위가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.
- 6) CBM 법에 의하여 피로수명의 정량적 평가가 가능하였으며, 용접재의 천이수명이 모재의 천이수명보다 약 47% 낮게 나타났다.

### 후 기

본 연구는 샤위언의 석사학위 논문의 일부이다.

## Author contributions

Y. U. Xia; Experimental, Data curation, Investigation, Writing-original draft, S. J. Kim; 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. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.5.115)
2. Y. E. Xia, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2020, "Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 800H at High Temperature of 850°C", *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 44, No. 7, pp. 481-488. (DOI:10.3795/KSME-A.2020.44.7.481)
3. S. G. Lee and S. J. Kim, 2019, "The Effect of Total Strain Range on Low Cycle Fatigue Characteristics of Alloy 800H", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 26-31. (DOI:10.9726/kspse. 2019.23.6.026.)
4. 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. 2-16. (DOI:10.3390/met8110918)
5. J. L. Kaae, 2009, "High-Temperature Low-Cycle Fatigue of Alloy 800H", *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 332-340. (DOI:10.1016/j.ijfatigue.2008.08.002)
6. J. K. Wright, L. J. Carroll, C. Cabet, T. M. Lillo, J. K. Benz, J. A. Simpson, W. R. Liloyd, 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. (DOI:10.1016/j.nucengdes.2011.10.034)
7. 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. (DOI:10.1016/j.nucengdes.2014.12.017)
8. 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. (DOI:10.1007/BF02649752)
9. K. Sonoya and Y. Tomisawa, 2010, "Cracking by Elevated Temperature Embrittlement in the HAZ of Alloy 800H", *Welding International*, pp. 425-429. (DOI:10.1080/09507119109446765)
10. C. Chen, B. Lv, F. Wang and F. C. Zhang, 2017, "Low-Cycle Fatigue Behaviors of Pre-hardening Hadfield Steel", *Materials Science and Engineering : A*, Vol. 695, pp. 144-153. (DOI:10.1016/j.msea.2017.03.107)
11. 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", *Int. Journal of Fatigue*, Vol. 117, pp. 450-460. (DOI:10.1016/j.ijfatigue.2018.08.031)
12. 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 : A*, Vol. 415, pp. 104-117. (DOI:10.1016/J.msea.2005.09.081)
13. 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. (DOI:10.1115/1.4023673)