

Alloy 617의 저사이클 피로 성질에 미치는 온도의 영향

Effects of Temperature on Low Cycle Fatigue Properties of Alloy 617

응우웬 밉* · 김선진**†
Nguyen Duy Minh* and Seon-Jin Kim**†

(Received 1 April 2020, Revision received 4 August 2020, Accepted 10 August 2020)

Abstract : On series of studies on the high temperature low cycle fatigue properties of Alloy 617, this work focuses on the effect of high temperature on low cycle fatigue properties of the Alloy 617. The low cycle fatigue tests were conducted under fully reserved axial total strain range control mode at 0.9, 1.2 and 1.5% at high temperature of 900°C and 950°C with a constant strain rate of 10⁻³/s. In all test conditions, the fatigue resistance for the Alloy 617 was decreased with increasing temperature and total strain range. The temperature was considered to have small influence on the degradation on the low cycle fatigue life at these testing conditions. However, the cyclic deformation was observed to be softened at high temperature low cycle fatigue, higher degree of cyclic softening was found as a function of increasing with temperature and total strain range.

Key Words : Low cycle fatigue, Alloy 617, Total strain range, High temperature, Cyclic softening

1. 서 론

초고온가스로(VHTR)는 흑연과 헬륨을 연료와 냉각재로 쓰며 수소와 전기를 경제적으로 생산하는 원자로이며 또한 제 4세대(Gen-IV) 원자로 중의 하나로 가장 유망 받는 노형 중의 하나이다.¹⁾ 니켈기 초합금인 Alloy 617은 초고온가스로의 중간열교환기의 유력한 후보재료 중의 하나이다.¹⁻⁴⁾ 초고온가스로는 출구온도가 약 950°C에 이르는 초고온환경과 고압하에서 장시간 운전되도록 설계되며 원자로의 시동 및 정지뿐만 아니라 동력

전달은 구조물에 저사이클 피로 및 크리프-피로 하중을 유발한다.^{3,4)} 따라서 안전성 있는 설계를 위해서는 Alloy 617에 대한 고온에서의 저사이클 피로에 대한 특성 이해와 그에 대한 고온 물성 자료의 확보가 매우 중요하다.

이러한 관점에서 많은 외국 연구자들이 고온에서 Alloy 617에 대한 저사이클 피로 및 크리프-피로에 대한 연구를 수행하여 왔다.³⁻¹⁰⁾ 또한 저자 등도 Alloy 617에 대한 상온 및 고온에서의 저사이클 피로 및 크리프-피로에 관한 연구를 수행하여 반복 응력 반응 거동과 파괴의 특성 등을 연구하였다.^{1,2,11-17)}

**† 김선진(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7755-2581) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-9163
*N. D. Minh(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1868-1970) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과

**† Seon-Jin Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-7755-2581) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University
*N. D. Minh(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1868-1970) : Graduate student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

본 연구에서는 Alloy 617의 고온에서 저사이클 피로 성질을 고찰하기 위한 일련의 연구 과정의 하나로, Alloy 617의 저사이클 피로 성질에 미치는 온도의 영향을 고찰하는 것이다. 특히 본보는 중간열교환기의 고온 환경(950°C)에 장시간 노출되는 온도를 고려하여 저자 등의 900°C 및 950°C에서의 Alloy 617의 저사이클 피로 실험 데이터를 활용하여,^{14,17,18)} Alloy 617의 저사이클 피로 성질에 미치는 온도의 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 시험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 Alloy 617로 열간압연 판재로서 Haynes 제조사에서 생산된 Heat Number는 Haynes 617, R617 6 8837이며, 원 판재의 소재 크기는 25 mm(T) × 1200 mm(W) × 3,600 mm(L)이다. 본 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 본 재료의 화학적 성분은 Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 ASTM B168-08의 규격¹⁹⁾을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 또한 본 시험에 사용된 모든 피

Table 1 Chemical composition in wt.% of the Alloy 617 plate used in this study

Element	ASTM B168-08	This study
C	0.05-0.15	0.08
Ni	44.5 min	53.11
Fe	3.0 max	0.949
Si	1.0 max	0.084
Mn	1.0 max	0.029
Co	10.0-15.0	12.3
Cr	20.0-24.0	22.2
Ti	0.6 max	0.41
P	0.015 max	0.003
S	0.015 max	<0.002
Mo	8.0-10.0	9.5
Al	0.8-1.5	1.06
B	0.006 max	<0.002
Cu	0.5 max	0.0268

로 시험편은 ASTM E606 규정에 따라 제작하였고, 시험편 직경 6 mm, 평행부 길이는 18 mm 환봉시험편이다.

3.2 시험방법

본 연구의 고온 저사이클 피로 시험에 사용된 시험기는 튜브형 전기로가 장착된 100 kN의 서보유압 기계(MTS 370 Landmark)를 사용하였다. 본 실험의 조건은 Table 2와 같으며, 연속 변형률 제어 방식으로 수행되었다. 본 시험에서 제어된 전 변형률 범위는 0.9, 1.2 및 1.5%이며, 변형률 속도는 모든 조건에서 1×10^{-3} /s의 속도로 일정하게 유지하였다. 피로수명은 최대 응력비가 20% 감소한 지점의 사이클 수를 피로 수명으로 정의하였다. 더욱 상세한 시험방법 및 절차 등은 참고문헌^{14,17,18)}을 참조하길 바란다.

Table 2 Test conditions of low cycle fatigue

Specimens	Alloy 617
Total strain ranges	0.9, 1.2, 1.5%
Strain rate	1×10^{-3} /sec
Environment	Air, 900°C & 950°C
Waveform	Triangular
drop in load	20%
Strain ratio, R	Tension-Compression, $R = -1$

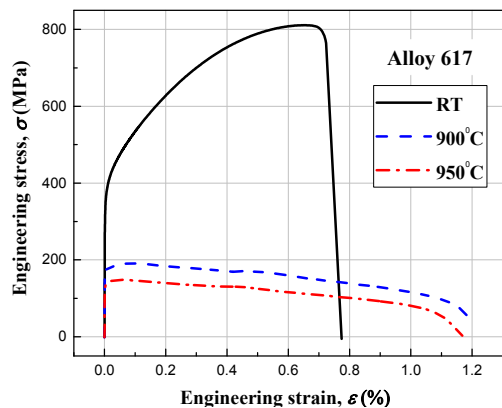


Fig. 1 Stress-strain diagram for 3 different temperatures

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 온도가 인장강도에 미치는 영향

Fig. 1은 상온 25°C, 900°C 및 950°C에서 Alloy 617의 인장시험 결과를 나타낸 것이다.²⁰⁾ 그림에서 알 수 있듯이, 온도가 증가하면 항복강도, 인장강도 및 탄성계수 모두 감소함을 알 수 있다. 상온 25°C, 900°C 및 950°C에서의 항복강도는 각각 346, 167, 131 MPa, 인장강도는 811, 190, 148 MPa 그리고 탄성계수는 211, 149, 144 GPa로 나타났다. 또한 연신율은 상온과 900°C 및 950°C에서 각각 78, 120, 117%를 보였다.

3.2 온도가 피로수명에 미치는 영향

Fig. 2는 900°C 및 950°C에서 전변형률 범위와 피로수명과의 관계를 나타낸다. 동일 전변형률 범위에서 피로수명은 온도가 900°C에서 950°C로 증가하면 감소하였다. 이는 온도 범위는 다르지만 Rao 등의 실험 결과와도 잘 일치하고 있다.⁶⁾ 하지만 피로수명에 미치는 온도의 영향은 적다. 또한 피로수명은 동일 온도에서 전변형률 범위가 증가하면 피로수명은 명확히 감소하는 경향을 보이고 있다. 전변형률 범위 ($\Delta\epsilon_T$)와 피로수명 (N_f)과의 관계에는 다음 식과 같은 함수 관계식으로 표현할 수 있음을 알았다.

$$\Delta\epsilon_T = a + b(N_f) \quad (1)$$

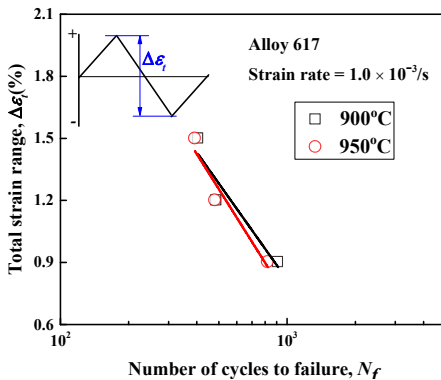
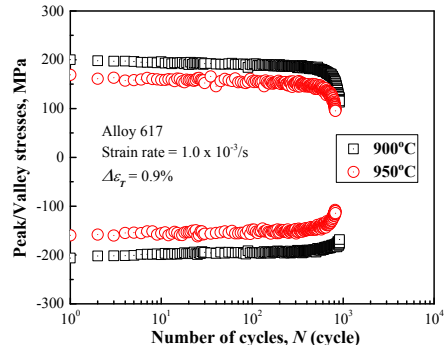


Fig. 2 Effect of temperature on fatigue life

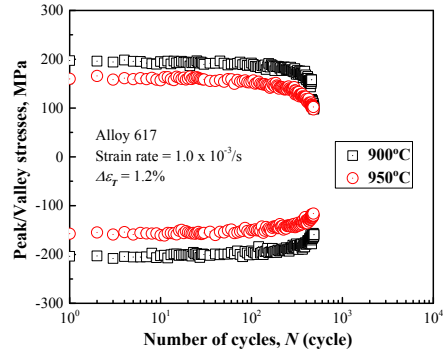
a 와 b 는 각각 재료 상수이며, 온도와 변형률 속도 등에 의존한다. 각각의 온도에서 실험적으로 구한 이들의 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_T = 5.45 - 1.55(N_f) \quad : \quad 900^\circ\text{C} \quad (2)$$

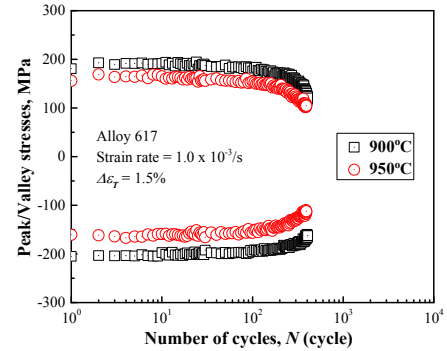
$$\Delta\epsilon_T = 5.96 - 1.75(N_f) \quad : \quad 950^\circ\text{C} \quad (3)$$



(a) Total stain range = 0.9%



(b) Total stain range = 1.2%



(c) Total stain range = 1.5%

Fig. 3 The peak/valley stresses vs. number of cycle

3.3 온도가 반복 응력 반응 거동에 미치는 영향

Fig. 3은 Alloy 617의 반복 응력 반응 거동에 미치는 온도의 영향을 고찰하기 위하여 피크/밸리 응력을 반복수의 함수로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 모든 전변형률 범위에서 온도에 관계없이 피크 응력(즉, 최대 인장응력)과 밸리 응력(최대 압축응력)의 값이 비교적 대칭임을 알 수 있다. 이것은 반복 변형 동안에 변형률의 축적이 실질적으로 인장과 압축에서 거의 동일하다는 것을 의미한다. 모든 전변형률 범위에서 파단에 이르기까지 950°C의 시험편이 900°C의 시험편보다 피크/밸리 응력이 낮게 나타났다. 즉, 피크/밸리 응력에 미치는 온도의 영향은 온도가 높을수록 낮고, 재료의 변형을 쉽게 야기할 수 있음을 의미한다. 또한, 동일 전변형률 범위에서 온도가 증가함에 따라서 피로수명이 감소하였으며, 피크/밸리의 응력 범위의 변화는 반복수가 진행될수록 응력 범위가 감소하는 반복 연화(cyclic softening) 현상을 보이고 있다. 저자 등의 본 재료에 대한 상온에서의 연구 결과에 의하면, 반복수가 증가함에 따라 초기에는 반복 경화(cyclic hardening) 현상을 보이다가 그 다음 반복 연화하는 현상을 나타냈다.¹⁾ 따라서 본 Alloy 617 재료의 상온과 고온 900°C 및 950°C에서의 반복 응력 반응 거동은 아주 다름을 알 수 있다. 이는 Alloy 617의 반복 응력 반응 거동의 메카니즘이 온도에 크게 의존하는 것으로 사료된다.

한편, 금속재료의 반복 변형 거동을 특성 짓는 파라미터 중의 하나가 반복 연화 현상이다. Alloy 617의 고온 900°C 및 950°C에서 온도에 미치는 반복 연화 현상의 정도를 평가하기 위하여, 다음과 같이 반복 연화율(cyclic softening ratio, CSR)을 정의하였다.²¹⁾

$$CSR = \frac{(\Delta\sigma/2)^{\max} - (\Delta\sigma/2)}{(\Delta\sigma/2)^{\max}} \quad (4)$$

여기서, $(\Delta\sigma/2)^{\max}$ 및 $(\Delta\sigma/2)$ 는 각각 최대 응력 진폭과 반수명(half-lifetime)에서의 응력 진폭을 나타낸다. Fig. 4는 전변형률 범위의 함수로 반복

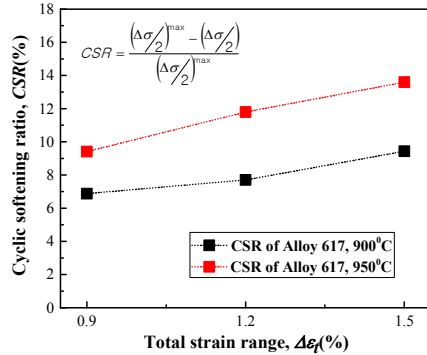


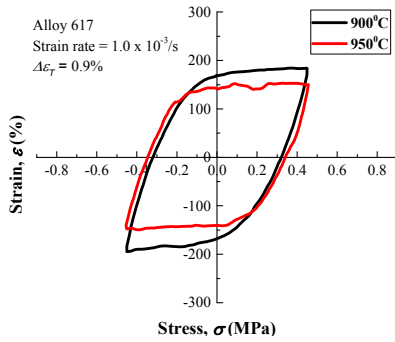
Fig. 4 Effect of degree of softening on the temperature and total strain range

연화율(CSR)을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 전변형률 범위에서 온도가 증가하면 반복 연화율도 증가하며, 또한 동일 온도에서 전변형률 범위가 증가하면 반복 연화율도 증가하는 경향을 보인다. 온도는 반복 연화율의 증감에 영향을 미치는 중요한 영향 인자임을 알 수 있다. 이것은 고온에서 재료 내부의 성질이 전위의 이동이 쉬워지는 방향으로 변하게 되기 때문이라²²⁾ 사료된다. 또한 전변형률 범위에 미치는 반복 연화율의 기울기(slope)는 온도가 증가할수록 더 커지는 경향을 보였다. 이는 Fig. 3의 그림에서도 잘 이해할 수 있다. 또한, 이는 Wright 등의 850°C 및 950°C에서의 Alloy 617의 반복 응력 반응 거동의 결과와도 아주 유사하다.⁹⁾

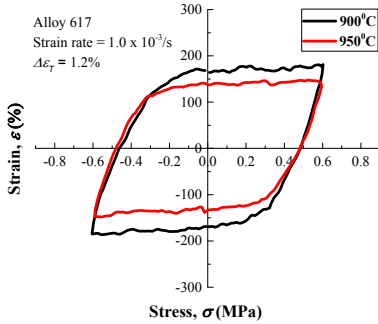
3.4 온도가 반복 응력-변형률 반응 거동에 미치는 영향

Fig. 5는 Alloy 617의 반복 응력-변형률 반응 거동에 미치는 온도의 영향을 고찰하기 위하여 반수명에서의 히스테리시스 루프를 나타낸 것이다. 동일 전변형률 범위에서 900°C 및 950°C의 히스테리시스 루프 선도의 형상은 거의 유사한 경향을 보이지만, 온도가 높을수록 응력 범위는 작아지고 소성 변형률 범위는 증가하는 경향을 보인다. 또한 전변형률 범위가 증가할수록 응력 범위의 크기는 감소하며 소성 변형률 범위는 증가한다. 동일 전변형률 범위에서도 온도가 증가하면 히스

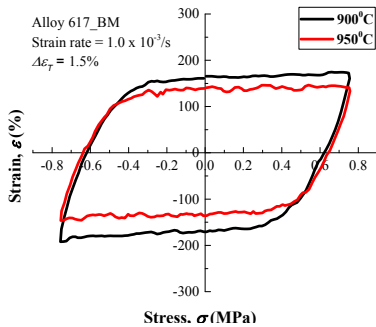
테리시스 루프 선도의 형상이 위쪽과 아래쪽이 평평한 사각형 모양의 선도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 Wright 등의 저사이클 피로 실험 결과와도 잘 일치한다.⁹⁾ 또한 900°C 및 950°C에서의 소성 변형을 진폭에 미치는 전변형을 범위의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 결과적으로, 동일 온도에서 전변형을 범위가 증가할수록 소성 변형률 진폭은 크게 증가하며 응력 진폭은 미미



(a) Total stain range = 0.9%

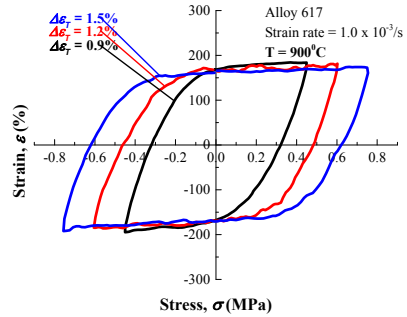


(b) Total stain range = 1.2%

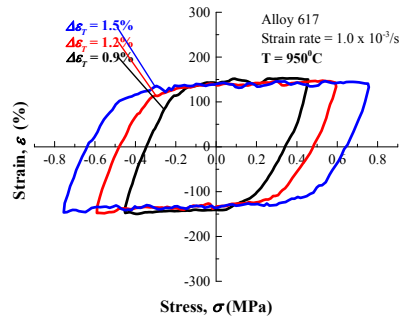


(c) Total stain range = 1.5%

Fig. 5 Effect of temperature on the hysteresis loops for half-lifetime at each total strain range



(a) T = 900°C



(a) T = 950°C

Fig. 6 Effect of total strain range on the hysteresis loops for half-life at each temperature

하게 작아지는 경향을 보인다.

또한 온도가 증가하면 응력 진폭은 작아지고 소성 변형률 진폭은 증가하는 경향을 보인다. 이들의 결과를 통하여 고온에서의 응력 진폭과 소성 변형률 진폭의 영향을 이해할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 초고온가스로의 중간열교환기의 고온 환경에 장시간 노출되는 온도를 고려하여 900°C 및 950°C에서의 Alloy 617의 저사이클 피로 성질에 미치는 온도의 영향에 대하여 고찰하여 다음과 같은 주요한 결과를 얻었다.

- 1) 동일 전변형을 범위에서 피로수명은 온도가 900°C에서 950°C로 증가하면 다소 감소하였다. 또한 피로수명은 동일 온도에서 전변형을 범위가 증가할수록 감소하였다.
- 2) 반복 응력 반응 거동은 고온 900°C 및 950°C

모두 반복 연화 현상을 보였으며, 동일 전변형률 범위에서 온도가 증가할수록 반복 연화율은 증가하였다. 또한 동일 온도에서 반복 연화율은 전변형률 범위가 증가할수록 증가하였다.

3) 반복 연화율의 전변형률 범위에 미치는 기율의 영향은 온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

4) 동일 전변형률 범위에서 900°C 및 950°C의 히스테리시스 루프 선도의 형상은 거의 유사한 경향을 보이지만, 온도가 높을수록 응력 범위는 작아지고 소성 변형률 범위는 증가하는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

N. D. Minh; Data curation, Investigation, Writing-original draft, S. J. Kim; Supervision, Conceptualization, Writing-review & editing, Project administration.

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. (<http://dx.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://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.6.565>)
3. L. J. Carroll, C. Cabet, M. C. Carroll and R. N. Wright, 2013, "The Development of Microstructural Damage during High Temperature Creep-Fatigue of a Nickel Alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 47, pp. 115-125. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.07.016>)
4. T. C. Totemeier and H. Tian, 2007, "Creep-Fatigue-Environment Interactions in INCONEL 617", *Material Science & Engineering A*, Vol. 468-470, pp. 81-87. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.170>)
5. M. A. Burke and C. G. Beck, 1984, "The High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of the Nickel Base Alloy IN-617", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 15A, pp. 661-670.
6. K. B. S. Rao, H. Schiffers, H. Schuster and H. Nickel, 1988, "Influences of Time and Temperature Dependent Processes on Strain Controlled Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 617", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 19A, pp. 359-371.
7. J. K. Wright, L. J. Carroll, C. Cabet, T. M. Lillo, J. K. benz, J. A. Simpson, W. R. Lloyd, 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. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.10.034>)
8. X. Chen, Z. Yang, M. A. Sokolov, D. L. Erdmann III, K. Mo and J. F. Stubbins, 2014, "Effect of Creep and Oxidation on Reduced Fatigue Life of Ni-Based Alloy 617 at 850°C", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 444, pp. 393-403. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.09.030>)
9. 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, Transactions of the ASME, Vol. 135, pp. 1-8.
(<http://dx.doi.org/10.1115/1.4023673>)
10. C. V. Rao, N. C. S. Srinivas, G. V. S. Sastry and V. Singh, 2019, "Low Cycle Fatigue, Deformation and Fracture Behavior of Inconel 617 Alloy", Material Science & Engineering A, Vol. 765, 138286.
(<http://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138286>)
 11. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and M. H. Kim, 2014, "Evaluation of fatigue Life on Alloy 617 base Metal and Alloy 617/Alloy 617 Weld Joints under Low Cycle Fatigue Loading", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 122-128.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2014.18.5.122>)
 12. S. J. Kim, R. T. Dewa, W. G. Kim and M. H. Kim, 2015, "Cyclic Stress Response and Fracture Behaviors of Alloy 617 Base Metal and Weld Joints under LCF Loading", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2015, Article ID 207497.
(<http://dx.doi.org/10.1155/2015/207497>)
 13. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2016, "Low Cycle Fatigue Behaviors of Alloy 617 (INCONEL 617) Weldments for High Temperature Applications", Metals, Vol. 6, No. 100, pp. 1-11.
(<http://dx.doi.org/10.3390/met6050100>)
 14. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2016, "Understanding Low Cycle fatigue Behavior of Alloy 617 Base Metal and Weldments at 900°C", Metals, Vol. 6, No. 178.
(<http://dx.doi.org/10.3390/met6080178>)
 15. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2017, "Effect of Strain Range on the Low Cycle fatigue in Alloy 617 at High Temperature", Metals, Vol. 7, No. 54.
(<http://dx.doi.org/10.3390/met7020054>)
 16. R. T. Dewa, J. H. Park, S. J. Kim and S. Y. Lee, 2018, "High Temperature Cree-Fatigue Behavior of Alloy 617", Metals, Vol. 8, No. 103.
(<http://dx.doi.org/10.3390/met8020103>)
 17. R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2018, "Evaluation of the Low Cycle Fatigue Failure Properties for GTAW Weldments of Alloy 617 at 950°C", Engineering Failure Analysis, Vol. 90, pp. 201-214.
(<http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.017>)
 18. N. D. Minh, 2020, "On Effect of Temperature on Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 617", Master Thesis, Pukyong National University.
 19. ASTM International, 2008, Standard Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys and Nickel-Chromium Cobalt Molybdenum Alloy Plate, Sheet, and Strip.
 20. I. M. W. Ekaputra, W. G. Kim, J. Y. Park, S. J. Kim and E. S. Kim, 2016, "Influence of Dynamic Strain Aging on Tensile Deformation Behavior of Alloy 617", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 48, pp. 1387-1395.
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.06.013>)
 21. C. Chen, B. Lv, F. Wang and F. Zhang, 2017, "Low-Cycle Fatigue behavior of Pre-hardening Hadfield Steel", Materials Science & Engineering A, Vol. 695, pp. 144-153.
(<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.107>)
 22. K. T. Hwang, J. H. Kim, K. B. Yoo and H. S. Lee, 2010, "Low Cycle Fatigue in Ni-Base Superalloy IN738LC at Elevated Temperature", Trans, Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 34, No. 10, pp. 1403-1409.
(<http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.10.1403>)