

850°C에서의 Alloy 617 용접재의 저사이클 피로 특성§

황정준* · 김선진*† · 김우곤** · 김응선**

* 부경대학교 기계설계공학과, **한국원자력연구원

Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy617 Weldment at 850°C

Jeong Jun Hwang*, Seon Jin Kim*†, Woo Gon Kim** and Eung-Seon Kim**

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Korea Atomic Energy Research Institute

(Received August 20, 2016 ; Revised November 4, 2016 ; Accepted December 17, 2016)

Key Words: Low Cycle Fatigue(LCF, 저사이클 피로), Gas Tungsten Arc Welding(GTAW, 가스텅그스텐아크 용접), Weldment(용접재), Fatigue Life(피로수명), Transgranular(입내파괴)

초록: Alloy 617은 초고온가스로(VHTR)의 중간열교환기(IHX)의 유력한 후보 재료 중의 하나이다. 850°C의 고온에서 Alloy 617 용접재의 저사이클 피로 거동을 고찰하기 위하여, 완전 양진 변형률제어 피로 시험이 0.6에서 1.5%의 전변형률범위에서 수행되었다. 용접재 시험편은 V-그루브 형상의 가스텅그스텐아크 용접한 용접 패드로부터 가공되었다. 피로수명은 전변형률범위가 증가할수록 감소하였다. 모든 실험조건에서 Alloy 617 용접재 시험편의 반복 응력 반응 거동은 초기 수 사이클에서 반복 변형률 경화 현상을 나타내었다. 또한 모든 피로 균열의 발생과 전파는 입내파괴의 파손 모드를 보였다.

Abstract: Alloy 617 is one of the primary candidate materials to be used in a very high temperature reactor (VHTR) system as an intermediate heat exchanger (IHx). To investigate the low cycle fatigue behavior of Alloy 617 weldments at a high temperature of 850°C, fully reversed strain-controlled fatigue tests were conducted with the total strain values ranging from 0.6~1.5%. The weldment specimens were machined using the weld pads fabricated with a single V-groove configuration by gas tungsten arc welding (GTAW) process. The fatigue life is reduced as the total strain range increases. For all testing conditions, the cyclic stress response behavior of the Alloy 617 weldments exhibited the initial cyclic strain hardening phenomenon during the initial small number of cycles. Furthermore, the overall fatigue cracking and the propagation or cracks showed a transgranular failure mode.

1. 서론

초고온가스로(VHTR)는 수소와 전기를 경제적으로 생산하기 위한 제4세대(Gen-IV) 원자로 중의 하나로 가장 유망 받는 노형 중의 하나이다.^(1,2) 원자력용 니켈기 초합금인 Alloy 617은 초고온가스로의 중간열교환기의 유력한 후보재료 중의 하나이다.⁽²⁻⁴⁾ 원자로의 기동 및 중지 뿐만

아니라 동력전달은 부재의 저사이클 피로 및 크리프-피로 하중을 유발한다.⁽²⁻⁴⁾ 따라서 Alloy 617의 신뢰성 있는 설계를 수행하기 위해서는 고온에서의 저사이클 피로 및 크리프-피로 수명에 대한 물성 자료가 필요하다.

이러한 관점에서 국제적으로 많은 연구자들이 Alloy 617에 대한 저사이클 피로 및 크리프-피로 거동에 대한 많은 연구를 수행하여 왔다.⁽²⁻⁸⁾ 하지만 이들의 연구는 대부분은 Alloy 617 모재에 대한 연구 결과이다. 국내의 경우는 Alloy 617에 대한 저사이클 피로에 관한 연구는 아주 미약한 실

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2016년도 춘계 학술대회(2016. 4. 28. - 29., 부경대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, sjkim@pknu.ac.kr,

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

정이다.^(9,10) 또한 실용적 관점에서 구조부재는 필연적으로 용접에 의하여 접합되므로 용접재에 대한 저사이클 피로 특성의 파악과 신뢰성 있는 데이터의 확보가 필수적이다. 이러한 관점에서 저자 등은 한국원자력연구원과 더불어 Alloy 617에 대한 상온 및 고온에서의 저사이클 피로 특성 평가에 대한 일련의 연구를 수행하였다.^(2,9-11)

본 연구에서는 Alloy 617/Alloy 617 가스텅스텐아크 용접한 용접재 시험편에 대하여 850°C에서의 완전 양진 변형률제어 저사이클 피로 실험을 수행하고 고찰한 결과를 보고하고자 한다.

2. 실험방법 및 절차

본 연구에 사용된 재료는 Alloy 617의 상용 열간 압연 판재로서 제조사에서 생산된 Heat Number는 Haynes 617, R617 6 8837이며, 원 판재의 크기는 25mm(T) × 1200mm(W) × 3600mm(L)이다. 본 재료의 화학적 성분은 Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 ASTM 규격⁽¹²⁾을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 그리고 니켈과 코발트, 크롬, 몰리브덴의 성분비가 높아 내열성 뿐만 아니라 내식성 또한 매우 뛰어난 재료이다.

본 연구에 사용된 용접은 가스텅스텐아크 용접(GTAW)이 사용되었다. 본 용접에 사용된 용가재는 KISWEL사에서 제조한 KW-T617를 사용하였다. 용접시험편은 14층 41패스로 용접되었으며, 용접형상은 V-groove, 각도 80도, 10mm root gap

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

을 갖도록 하였다. 본 용접 방법과 조건에 대한 상세한 내용은 참고문헌⁽¹⁾를 참조 바란다. Alloy 617 용접재의 시험편 채취 모식도를 Fig. 1에 나타낸다. 용접재 시험편의 채취방향은 압연방향과 일치하고 용접방향과 수직이 되도록 하였다. 본 실험에 사용된 실험 장비는 인스트론사의 100 kN의 만능유압 피로 시험기를 사용하였으며, 온도를 제어하기 위한 고온로는 MTS 653 튜브형로를 사용하였다. 850°C에서 완전 양진 변형률제어 피로 시험을 ASTM 규격⁽¹³⁾에 따라 수행하였다. 변형률속도는 모든 조건에서 $1 \times 10^{-3}/s$ 로 일정하게 제어하였다. 본 실험에서 제어한 전변형률범위는 0.6, 0.9, 1.2 및 1.5%의 네 가지 조건에

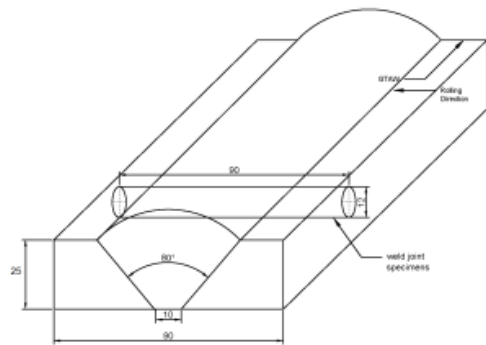


Fig. 1 Illustration of specimen cutting from the GTAWed pad

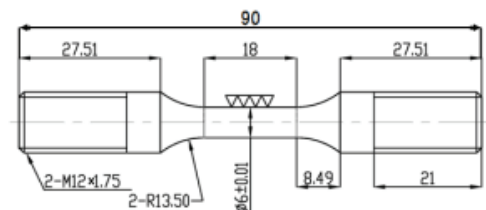


Fig. 2 Shape and dimensions of cylindrical low cycle fatigue testing specimen

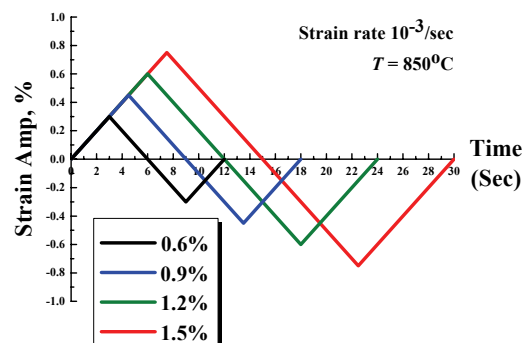


Fig. 3 Schematic diagram of strain history for continuous low cycle fatigue

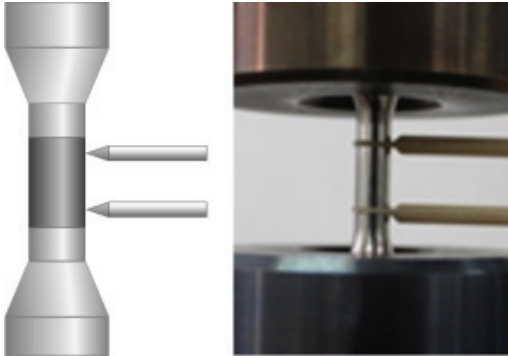


Fig. 4 Specimen configuration and position of the 12.5mm extensometer

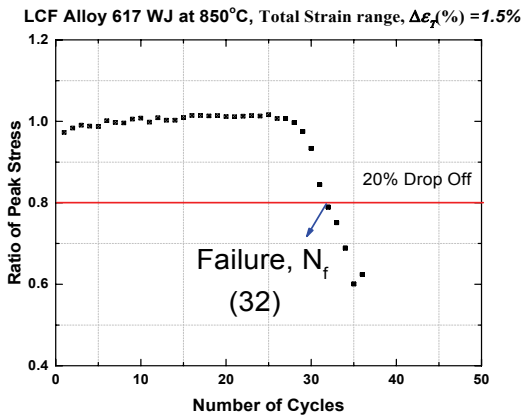


Fig. 5 Illustration of LCF failure criterion

서 수행되었다. 그리고 Fig. 3에 네 가지 조건의 전변형률범위에 대한 변형률 이력을 나타낸다.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 시험편에 부착한 신장계의 모식도를 나타낸 것으로 신장계의 게이지 길이는 12.5mm의 것을 사용하였다. 실제 본 연구의 피로 실험은 응력의 80% drop off에서 종료하였다. 한편, 본 실험에서의 피로수명의 정의는 Wright 등⁽⁸⁾과 같이 Fig. 5와 같이 Peak Stress Ratio가 20% 감소하는 지점, 즉 다시 말해 0.8%의 Peak Stress Ratio의 점과 일치하는 지점의 사이클을 피로수명으로 정의하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 저사이클 피로수명 거동

Fig. 6에 본 연구의 저사이클 피로 실험으로 얻어진 Alloy 617 용접재에 대한 피로수명과 Wright 등의 Alloy 617 모재에 대한 피로수명 데이터를 포함하여 함께 정규좌표표로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 용접재 및 모재 모두 전변형률범위

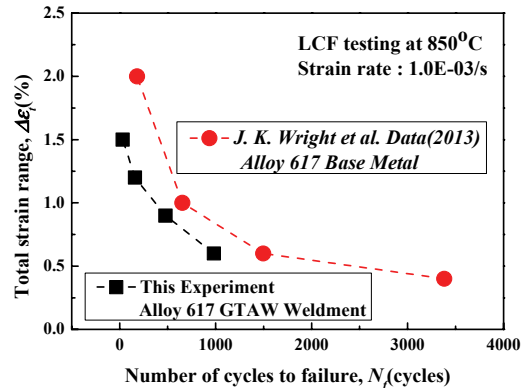


Fig. 6 Comparison of fatigue life for Alloy 617 weldments and the base metal

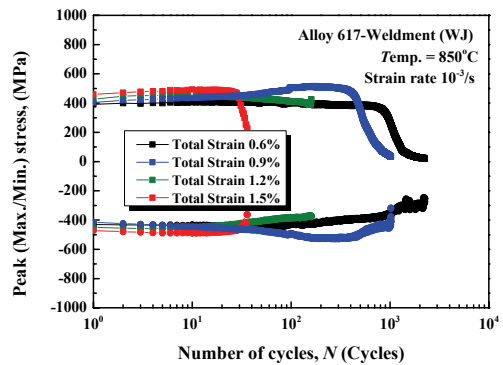


Fig. 7 Peak tensile and compressive stresses plotted as a function of number of cycles

가 증가할수록 피로수명은 비교적 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 또한 Totemier⁽⁴⁾의 800에서의 Alloy 617 용접재의 결과와도 유사한 경향을 보이고 있음을 알았다. Alloy 617 용접재의 피로수명은 동일 전변형률범위에서 모재보다도 그 피로수명이 짧다는 것을 알 수 있었다. 이는 용접에 의한 미세조직의 변화와 함께 용접으로 인한 용접 결함, 그리고 재료의 연성에 기인하는 것으로 사료된다.

3.2 반복 응력 반응 거동

반복 응력 반응 거동은 저사이클 피로 시험중 재료의 응력 반응 변동을 나타내는 것으로, 일반적으로 반복 응력 반응 거동은 경화, 연화 그리고 유지의 영역을 포함하고 있다. 이들 영역의 상대적인 비율은 재료에 의존한다.⁽⁹⁾

Fig. 7은 본 연구에서 수행한 850°C에서의 Alloy 617 용접재의 반복 응력 반응 거동을 고찰하기 위해 피크 인장 응력과 압축 응력의 관계를 나타낸 것이다. 즉, 사이클 수에 따른 인장응력과

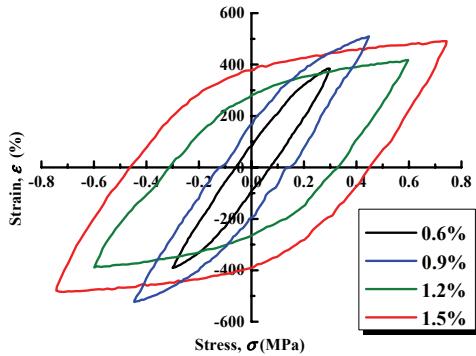


Fig. 8 Stress-strain hysteresis loops of Alloy 617 weldment for the half-life cycle at each total strain range

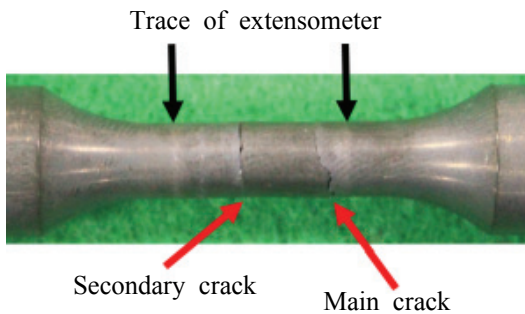
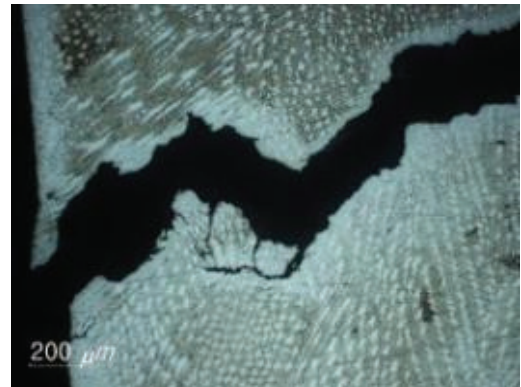


Fig. 9 Photograph of failed specimen for 0.6% of total strain range at 850°C

압축응력의 함수로 나타내었다. Peak Stress는 전변형률범위가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. Wright 등⁽⁸⁾의 850°C에서의 Alloy 617 모재의 저사이클 피로에 관한 결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, 균열이 발생하기 전까지 경화 후 연화하는 거동을 보이고 있고, 전변형률범위 0.9%의 경우를 제외하면 전변형률범위가 증가하면 전응력진폭은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전변형률범위가 증가할수록 피로수명이 감소하는 것과 비교적 잘 일치하고 있다. 결과적으로 Alloy 617 용접재의 850°C에서의 반복 응력 거동은 모든 전변형률범위에서 비교적 초기 수십 사이클 동안에 반복 변형률 경화 거동을 나타내고 있음을 알았다.

3.3 히스테리시스루프 거동

Fig. 8은 각각의 전변형률범위에 대한 반수명에서의 히스테리시스루프 곡선을 나타낸다. 전변형률범위 0.9%의 경우를 제외하고 최대 인장/압축 응력은 전변형률범위가 증가할수록 증가하였다. 그리고 전변형률범위가 낮은 0.6%와 0.9%에서는



(a)



(b)

Fig. 10 Transgranular fracture path shown in specimen tested at total strain range (a) 0.6% and (b) 1.5%

위쪽과 아래쪽이 가파른 형상을 나타내었다. 이는 Wright 등⁽⁸⁾의 950°C에서의 Alloy 617 모재에 대한 히스테리시스루프 곡선과 아주 유사한 경향을 보였다.

3.4 파손 해석

Fig. 9는 전변형률범위 0.6% 시험편의 거시적 파괴 양상을 나타낸 것이다. 균열은 시험편 표면에서 용접금속 영역에서 주균열과 2차 균열 등이 발생함을 보여주고 있다. 파괴된 시험편은 거시적으로 웨지(wedge) 타입의 파단 양상으로 나타났다. 본 연구의 모든 실험 조건에서 동일한 양상의 파괴 거동을 보였다.

Fig. 10은 전변형률범위 0.6%와 1.5%에서 파손된 시험편의 파단면을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 본 실험에 사용된 Alloy 617 용접재 시험편은 입내파괴(transgranular)의 형태로 균열이 발생, 전파함을 알 수 있다. 이는 Carroll 등⁽³⁾의 950°C에서의 Alloy 617 모재 시험편에 대한 저사이클 피로의 파손 모드와도 매우 유사한 결과를 얻

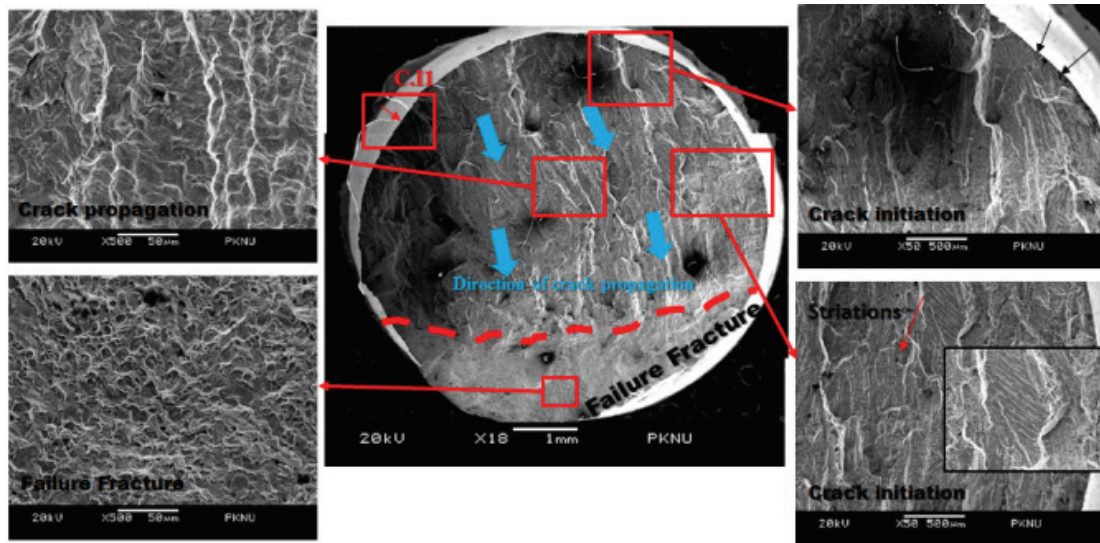


Fig. 11 Fractured surface observation of Alloy 617 weldment tested at 1.5% of total strain range

었다. 한편, 전변형률범위 1.5%의 Alloy 617 용접재 시험편의 SEM 관찰 사진을 Fig. 11에 나타낸다. 피로 균열의 발생과 전파, 그리고 최종파괴 영역의 3부분으로 나누어 관찰하였으며, 균열의 발생 위치는 표면의 다수의 지점에서 발생함을 알 수 있었다. 균열의 전파 영역에서는 스트라이에이션(striation)을, 그리고 최종파괴 영역에서는 딴플(dimple)의 형태로 파괴됨을 알았다. 균열의 진전 방향에 하얀 부분들은 스트라이에이션 과면으로 피로가 진전됨에 따라서 전위가 발생하고 내부에 슬립밴드(slip band)가 축적이 되어 어느 임계치가 되면 재료가 저항성을 상실하고 균열이 진전되며 궁극적으로 파단에 이르는 것으로 사료된다. 용접 결함, 석출물, 계재물 등이 용접금속에서 관찰되었다. 앞에서도 언급하였듯이 이들이 용접재의 피로수명에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 사료된다.⁽¹⁴⁾

4. 결론

본 연구에서는 가스팅그스텐아크 용접된 Alloy 617 용접재 시험편에 대하여 850°C에서의 저사이클 피로 실험을 수행하여, 다음과 같은 중요한 결과를 얻었다.

(1) 전변형률범위가 증가할수록 그 피로수명은 감소하였다.

(2) 전변형률범위가 증가할수록 최대 인장/압축 응력은 증가하는 경향을 보였고, 모든 전변형률 범위의 실험조건에서 균열이 발생하기 전까지 반

복 경화 후 반복 연화 하는 반복 응력 반응거동을 나타내었다.

(3) 용접재 시험편의 균열은 모든 전변형률범위 실험조건에서 용접금속 영역에서 발생하였고, 시험편의 거시적 파괴는 wedge 타입의 파단 양상을 보였다.

(4) 파손 모드는 피로파괴의 대표적인 특징인 스트라이에이션을 가지는 입내파괴의 형태로 균열이 발생, 전파하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(사업명: 원자력연구개발사업-NRF-2016M2A8A2902895)로서, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, W. G., Park, J. Y., Ekaputra, M. W., Hong, S. D., Kim S. J. and Kim, Y.W., 2013, "Comparative Study on the High-Temperature Tensile and Creep Properties of Alloy 617 Base Metal and Weld Metals," *J. of Mechanical Science & Technology*, Vol. 27, No. 8, pp. 2331~2340.
- (2) Kim, S. J., Dewa, R. T., Kim W. G. and Kim, M. H., 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, pp. 1~11.
- (3) Carroll, L. J., Cabet, C., Carroll, M. C. and Wright, R. N., 2013, "The Development of Microstructural Damage during High Temperature Creep-Fatigue of a Nickel Alloy," *International Journal of Fatigue*, Vol. 47, pp. 115~125.
- (4) Totemeier, T. C. and Tian, H., 2007, "Creep-Fatigue Interactions in INCONEL 617," *Material Science and Engineering A*, Vol. 468-470, pp. 81~87.
- (5) Burke, M. A. and Beck, C. G., 1984, "The High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior of the Nickel Base Alloy IN-617," *Metallurgical and Material Transactions A*, Vol. 15A, pp. 661~670.
- (6) Rao, K. B. S., Schiffers, H., Schuster, H. and Nickel, H., 1988, "Influences of Time and Temperature Dependent Processes on Strain Controlled Low Cycle Fatigue Behavior of Alloy 617," *Metallurgical and Material Transactions A*, Vol. 19A, pp. 359~371.
- (7) Chen, X., Yang, Z., Sokolov, M. A., Erdmann III, D. L. and Mo, K., 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.
- (8) Wright, J. K., Carroll, J., Simpson, J. A. and Wright, R. N., 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.
- (9) Choi, P. H., Kim, S. J., Kim, W. G. and Kim, M. H., 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 Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 115~121.
- (10) Kim, S. J., Dewa, R. T., Kim, W. G. and Kim, E. S., 2016, "Macro and Microscopic Investigation on Fracture Specimen of Alloy 617 Base Metal and Weldment in Low Cycle Fatigue Regime," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, Vol. 40. No. 6, pp. 565~571.
- (11) Dewa, R. T., Kim, S. J., Kim, W. G. and Kim, E. S., 2016, "Low Cycle Fatigue Behaviors of Alloy 617 (INCONEL 617) Weldments for High Temperature Applications," *Metals*, Vol. 6, No. 5, doi:10.3390/met6050100.
- (12) ASTM B168-08, 2008, "Standard Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy plate, Sheet, and Strip," *ASTM Standard by ASTM International*, USA.
- (13) ASTM E606-92, 1992, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," *ASTM Standard by ASTM International*, USA.
- (14) Kchaou, Y., Pelosin, V., Henaff, G., Haddar, N. and Elleuch, K., 2016, "Low Cycle Fatigue Behavior of SMAW Welded Alloy 28 Superaustenitic Stainless Steel at Room Temperature," *Material Science and Engineering A*, Vol. 651, pp. 556~566.