

TIG 용접된 스테인리스강의 수소영향에 대한 연구

Study on Hydrogen Effect in TIG Welded Stainless Steel

이진경* · 이상필* · 배동수** · 이준현****

Jin-Kyung Lee* · Sang-Pill Lee* · Dong-Su Bae** and Joon-Hyun Lee****

(Received 09 September 2016, Revision received 09 December 2016, Accepted 09 December 2016)

Abstract: A stainless steel has high corrosion resistance because of nickel in material, so it is used as materials for transportation and storage of hydrogen. In this study, TIG(tungsten ingot gas) welding was carried out on the stainless steel using the storage vessel of hydrogen. The microscopic structures at each region of TIG welded material such as HAZ, weld and base metals using optical microscope were observed. And the damage behavior of stainless steel that underwent the hydrogen charging using nondestructive evaluation was also studied. Ultrasonic test, which is the most generalized nondestructive technique, was applied to evaluate the relationship between the ultrasonic wave and mechanical properties at each zone of TIG welded stainless steel. The velocity and attenuation coefficients of ultrasonic wave didn't show a remarkable difference at each region of welded stainless steel. However, the attenuation coefficient was the highest at the weld zone when hydrogen charged stainless steel. In addition, acoustic emission test was also used to study the dynamic behavior of stainless steel experienced both hydrogen charging and weld. Lots of AE event at elastic region of stress-strain curve were occurred both the hydrogen charged specimen and the free specimen.

Key Words : TIG Weld, Hydrogen Charging, Nondestructive Evaluation, Ultrasonic Test, Acoustic Emission Test, AE Event

1. 서 론

스테인리스강은 수소에 의한 재료의 취화되는 성질 및 재질변화 등의 민감도가 낮기 때문에 수소저장용기 및 수소의 이송을 위해 부품재료로서 많이 사용되어지며, 용접할 때 일반적으로 TIG (Tungsten Ingot Gas) 용접이 많이 사용되어진다.

스테인리스강의 TIG용접에 의한 기계적 특성 및 조직변화에 대한 연구를 많은 연구자들이 실시하였다. Yangchuan 등은 오스테나이트계 스테인리스강의 TIG용접을 했을 때 부식저항과 기계적인 성질에 대한 연구를 실시하였으며 경도의 변화에 대한 연구도 실시하였다.¹⁾ 또한 Lu 등은 Cr₁₃Ni₅Mo 마르텐사이트 스테인리스강의 TIG 용

**** 이준현(교신저자) : 부산대학교 기계공학부

E-mail : johlee@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2430

*이진경, 이상필 : 동의대학교 기계공학과

**배동수 : 동의대학교 신소재공학과

**** Joon-Hyun Lee(corresponding author) : School of Mechanical Engineering, Pusan National University.

E-mail : johlee@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2430

*Jin-Kyung Lee, Sang-Pill Lee : Department of Mechanical Engineering, Donggeui University.

**Dong-Su Bae : Department of Advanced Materials Engineering, Donggeui University.

접의 효과에 대한 연구를 실시하여 기존의 MAG 용접에 비하여 충격에 대한 용접성이 훨씬 뛰어난 점을 알 수 있었다.²⁾ Ganesh 등은 TIG 용접에 의해 접합된 316 LN 스테인리스강의 잔류응력과 분포에 대하여 SYSWELD를 이용하여 유한요소해석을 실시하여 해석하였으며 열충격에 대한 영향도 예측하였다.³⁾ Jiang 등은 Mo-Cu 복합재료와 18-8 스테인리스강의 TIG 용접에서 미세적인 조직의 특성에 대하여 연구하였으며 용접부, 열영향부 등에서의 각각의 조직에 대하여 평가하였다.⁴⁾ 또한 수소에 의한 스테인리스강의 특성에 대한 연구에 많이 진행하였으며 오스테나이트계에서 마르텐사이트상으로 상변태가 발생함을 연구한 결과와 수소에 의한 재료의 취화 및 고온의 물속에서 SCC 균열선단에서 산소거동에 대한 연구 등 수소의 영향을 평가한 다수의 연구가 발표되었다.^{5,6)} 이와 같이 이전의 많은 연구들은 TIG 용접한 스테인리스강의 기계적 특성 및 각 영역에서의 조직변화에 대한 연구와 수소에 의한 재료의 상변태 및 기계적 특성변화에 연구가 주로 이루어져 왔다. 이와 같은 기계적 특성평가를 위해서는 재료의 파괴가 이루어져야 하지만 재료를 파괴하지 않고 비파괴적인 기법을 이용하여 수소에 의한 재료의 기계적 특성 변화를 평가하는 것도 대단히 중요하다. 비파괴적인 기술을 사용하면 재료 및 용접된 구조물의 손상없이 수소저장 용기 및 파이프의 손상 정도를 평가할 수 있는 잇점이 있다. 본 연구에서는 비파괴기법을 이용하여 TIG 용접을 한 스테인리스강의 조직변화 및 수소영향을 받은 스테인리스강의 미세적 손상거동을 연구하였다. 초음파 기법은 가장 일반적인 비파괴 평가기법 중의 하나로서 수소영향을 받은 스테인리스강의 기계적 특성과 초음파의 속도 및 감쇠계수와 상관관계를 평가하는데 적용되었으며, 음향방출기법은 수소취화된 스테인리스강의 동적인 거동을 평가하기 위해 사용되었다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 스테인리스 304재료

이며 TIG 용접을 이용하여 스테인리스강을 용접하였다. 그리고 시험편의 수소장입을 위해 전기화학적인 시스템을 구성하였다. 본 연구에 사용된 시험편은 ASTM G142의 인장시험편(지름 6.0 mm, 표점거리 28.6 mm의 환봉)이 사용되었으며, TIG 용접은 99.9%의 아르곤 분위기에서 200-250 A의 전류와 20-24 V의 전압에서 15 cm/min의 속도로 용접하였다. 또한 수소장입을 위해 황산용액(H₂SO₄)과 비소(As₂O₃)를 용매로 사용하였다. 그리고 포텐시오스탯(Potentiostat, HA 151)을 이용하여 시험편과 백금 와이어에 전류를 일정하게 유지하였다. 수소에 의한 재료의 영향을 평가하기 위하여 수소장입시간을 6시간으로 하여 실험을 실시하였다. 각각의 조건에서 수소취화된 시험편에 대해 1 mm/min의 변위속도로 인장시험이 행하여졌으며, 파단시험편의 표면과 파손형태는 실체현미경(Stereoscopic Microscope)과 전자현미경(SEM)에 의해 관찰되었다. 또한 비파괴적으로 재료를 손상을 평가하기 위하여 초음파와 음향방출 기법을 이용하였으며 초음파의 속도와 감쇠계수를 측정하기 위하여 5 MHz와 10 MHz의 센서를 이용하였다. 그리고 재료의 동적인 거동을 평가하기 위하여 음향방출기법을 이용하였으며, 하중을 받은 시험편은 전위, 변형 및 균열 등에 의해 시험편 내부에 많은 탄성파가 발생하고 발생한 탄성파는 음향방출 센서가 수신하게 된다. 센서에서 수신된 신호의 강도는 너무 미약하기 때문에 시스템에서 신호특성을 분석할 수 없다. 따라서 수신된 신호는 프리앰프에서 40 dB 증폭시켰으며, 증폭된 신호는 음향방출 시스템에서 진폭, 에너지, 카운터, 지속시간, 주파수 등의 음향방출 파라미터에 의해 분석되어진다. 각각의 파라미터들은 외부하중에 의한 손상정도에 따라 다양한 값을 나타낸다.⁷⁾

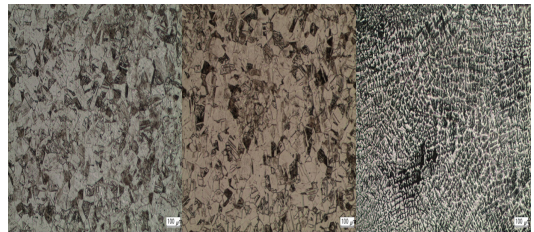
3. 결과 및 토론

3.1 수소취화에 의한 재료의 기계적 특성

본 연구에서는 TIG 용접된 스테인리스 304강의 용접부, 열영향부 및 모재의 각 영역에서 수소의 영향을 받았을 때 재료의 기계적 특성을 평가하

기 위하여 충격에너지 및 재료의 경도의 변화를 평가하였다. Fig. 1은 용접된 시험편의 각 영역에서의 조직변화를 평가하기 위하여 재료표면을 부식시켜 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 모재(Fig.1(a))와 열영향부(Fig.1(b))에서는 주로 페라이트의 고용체 모드가 있는 오스테나이트계 스테인리스강의 전형적인 형태를 보이고 있으며, 열영향부에서의 그레인 크기가 모재에서의 조직보다는 조금 더 큰 것을 알 수 있다. 그리고 용접부(Fig. 1(c))에서도 페라이트의 미세적 조직이 관찰되었으며 오스테나이트 모재의 그레인 내부에 덴드라이트 구조가 형성됨을 알 수 있다. Fig. 2에서는 용접한 시험편의 각 영역에서의 경도의 변화를 평가하고 수소영향을 받은 경우의 시험편에 대하여 각 영역에서의 경도 변화에 대하여 평가하였다. 그림에서 보여주는 바와 같은 중앙부분이 용접부이고 좌, 우로 3 mm씩 이동하면서 비커스경도를 측정하였다. 먼저 수소의 영향을 받지 않은 경우 약 300 HV 내외의 비커스 경도를 나타내었으며, 중앙의 용접부 및 열영향부 그리고 모재쪽으로 이동하면서 경도를 측정하였지만 큰 변화는 없었다. 그러나 수소의 영향을 받은 시험편인 경우 중앙에서 가장 높은 450 Hv 정도의 경도를 나타내었으며 모재 방향으로 이동할수록 점차적으로 경도는 감소하는 경향을 나타내었다. 즉 용접부, 열영향부 및 모재순으로 경도값이 낮아짐을 알 수 있었다. 이러한 결과는 용접부에서 수소의 영향을 가장 많이 받고 모재쪽으로 이동할수록 수소에 의한 영향이 줄어들음을 알 수 있었다. 그리고 수소의 영향을 받게 되면 전반적으로 경도가 높아지는데 이러한 것은 수소에 의해 재료가 취화됨으로써 경도는 높게 발생함을 알 수 있었다. Fig. 3은 용접된 스테인리스 304강의 수소에 의한 충격흡수 에너지의 영향을 평가하기 위하여 충격실험을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 수소의 영향을 받지 않은 시험편의 충격흡수에너지는 약 120 J의 값을 나타낸 반면 6시간의 수소장입시간을 가진 시험편에서 충격흡수 에너지는 101 J 정도의 값을 나타내었다. 따라서

수소의 영향을 받게 되면 충격흡수에너지가 많이 감소한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 수소에 의해 재료의 성질이 취성으로 변화함에 따라 충격에 약한 결과로 나타났다. 이것은 이전의 재료표면에 대한 SEM연구결과에서 수소에 의한 재료표면이 취화되는 결과와 일치하는 경향을 보였다.



(a) Base (b) HAZ (c) Weld

Fig. 1 Optical microscope from welded stainless steel 304 at 100×magnification.

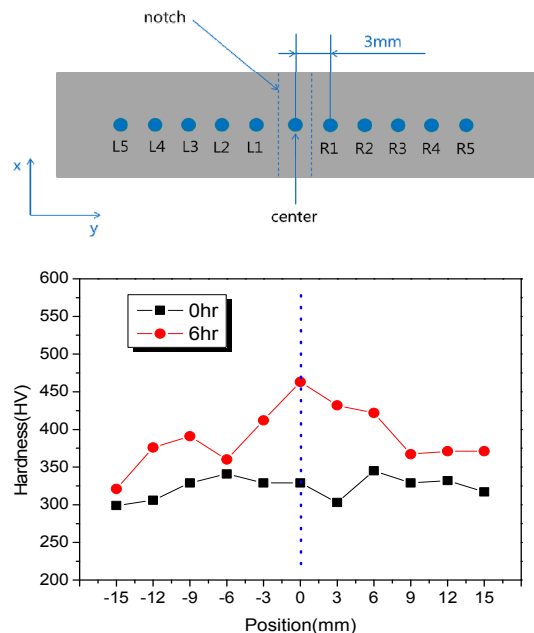


Fig. 2 Vickers hardness at each position of hydrogen free and hydrogen charged specimens.

3.2 수소장입에 의한 초음파 특성

본 연구에서는 TIG용접한 스테인리스강의 각 영역에서의 초음파 속도와 감쇠계수를 측정하여

그 특성을 평가하였으며, 또한 6시간의 수소장입 시간을 받은 시험편에서의 초음파 특성을 연구하여 수소의 영향에 따른 초음파의 특성변화에 대한 연구를 진행하였다. Fig. 4는 용접된 시험편에서의 열영향부, 용접부 및 모재에서의 초음파의 전형적인 파형을 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 각 영역에서의 파형의 형태는 거의 비슷함을 알 수 있고 용접부에서 다른 영역에 비하여 진폭의 크기가 약간 작게 나타남을 알 수 있다. Fig. 5에서는 각 영역에서의 초음파 속도와 6시간 수소의 영향을 받았을 때 속도의 변화를 나타낸 것으로 열영향부, 용접부 및 모재에서의 초음파 종파속도는 약 5750 m/s에서 5800 m/s 범위를 나타내었으며, 수소의 영향을 받았을 때에도 거의 같은 범위의 속도를 나타내었다. 따라서 용접을 하더라도 초음파 속도의 변화는 거의 발생하지 않으며 수소의 영향을 받더라도 속도의 변화는 거의 발생하지 않았다. 따라서 초음파 속도를 이용하여 재료의 용접에 대한 특성과 수소장입에 대한 특성을 평가하는데 효과적인 방법은 아니었다. Fig. 6에서는 각 용접영역과 수소장입에 따른 초음파 감쇠계수를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 수소영향을 받지 않은 시험편에서 열영향부에서는 0.03 dB/mm, 모재에서는 0.06 dB/mm 그리고 용접부에서 0.12 dB/mm의 값을 나타내었다. 열영향부에서 감쇠계수가 가장 적은 값을 나타내었고 용접부에서 가장 높은 값을

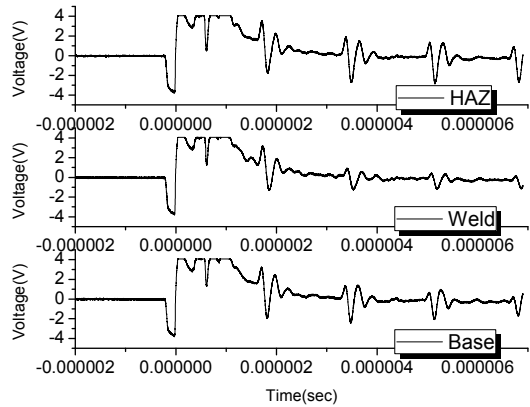


Fig. 4 Typical ultrasonic waveforms at each region of TIG welded specimens.

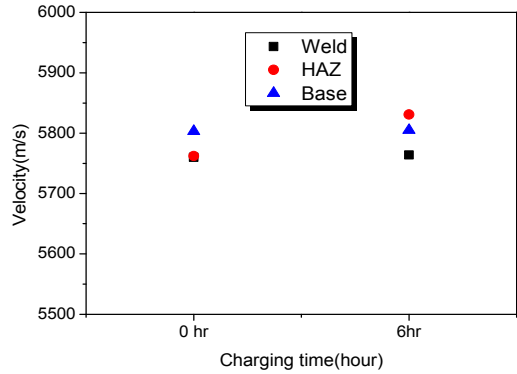


Fig. 5 Velocity of ultrasonic wave at each region according to hydrogen charging time.

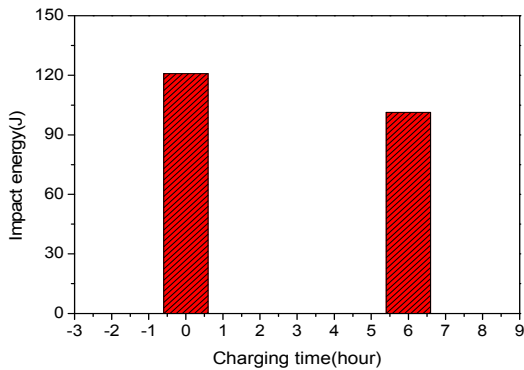


Fig. 3 Impact absorbed energy of hydrogen free and hydrogen charged specimens.

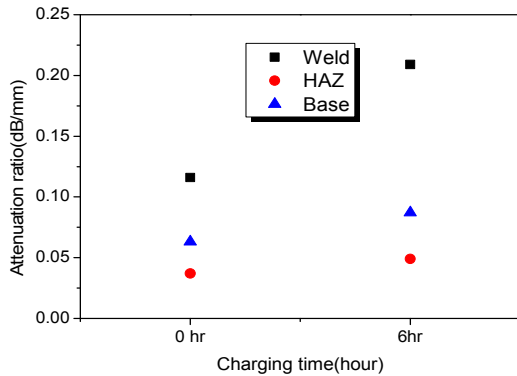


Fig. 6 Attenuation coefficient of ultrasonic wave at each region according to charging time.

나타내었다. 약 4배 정도의 감쇠계수값이 용접부에서 높게 나타났다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 용접부에서 덴드라이트 구조가 그레인 내부에 형성됨으로써 초음파의 산란에 크게 영향을 미치고 또한 열영향부에서의 그레인 크기가 모재에서의 그레인 크기보다 더 커짐에 따라 열영향부의 경계면이 더 적어짐에 따라 계면에서의 산란의 영향이 적어지고 따라서 초음파의 감쇠가 줄어들어 따라 감쇠계수값도 작아짐을 알 수 있었다. 그리고 수소의 영향을 받게 되면 초음파의 감쇠도 증가하며, 특히 용접부에서는 감쇠계수의 값이 수소의 영향을 받지 않은 시험편에 비하여 두 배 정도 증가하는 경향을 나타내었다. 열영향부 및 모재에서의 감쇠계수 역시 수소의 영향을 받지 않은 시험편에 비하여 높은 감쇠계수값을 나타내었다.

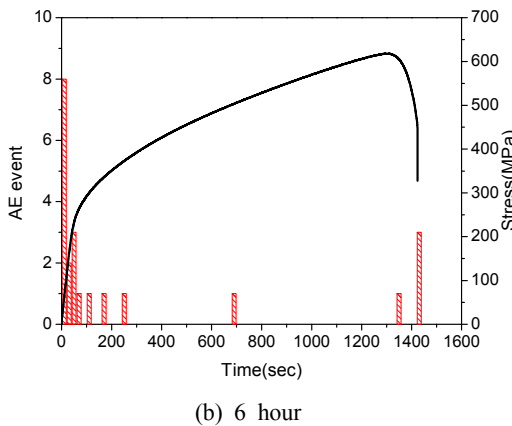
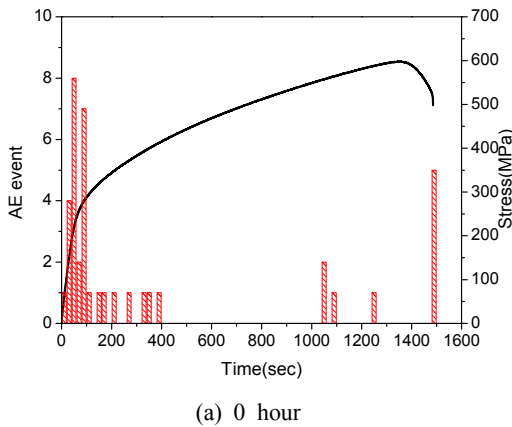


Fig. 7 AE event, stress and charging time

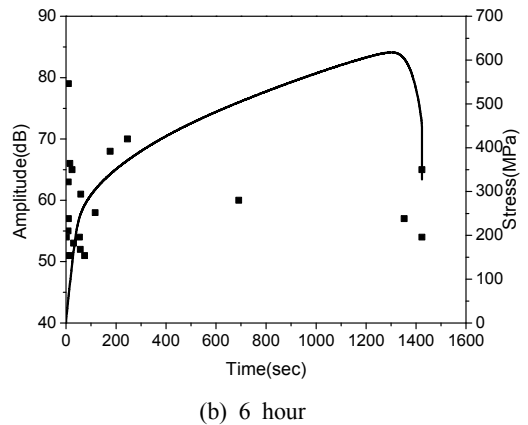
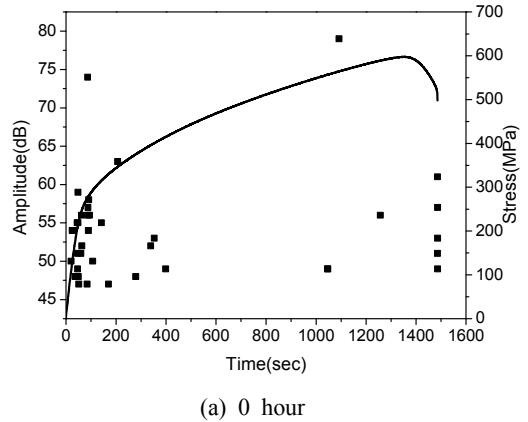


Fig. 8 Amplitude, stress and charging time

3.3 수소장입에 따른 음향방출 특성

Fig. 7은 TIG용접된 스테인리스강이 하중을 받을 때 발생하는 음향방출신호의 이벤트의 변화를 나타낸 것으로 수소의 영향을 받지 않은 경우(Fig. 7(a)) 시험편에서는 하중 초기에 다수의 음향방출 신호가 발생한다. 발생하는 음향방출 신호의 이벤트 수는 항복점까지 탄성영역에서 집중적으로 발생하였으며 소성영역에서는 불규칙적으로 소수 발생함을 알 수 있었다. 그리고 시험편이 완전히 파손될 때 다수의 신호가 발생하였다. 6시간의 수소장입시간을 거친 시험편에서 음향방출 이벤트는 수소취화되지 않은 시험편과 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 즉 하중초기에 발생하는 이벤트의 전체적인 수는 다른 영역에 비해서 현저히 많게 나타났으며 소성영역에서는 소수의 신호가 발생하였다. Fig. 8에서는 발생한 신호의 진폭의 변

화를 나타낸 것으로, 수소의 영향을 받지 않은 시험편에서는 대부분 60 dB 이하의 신호가 주로 발생하지만 6시간의 수소장입시간을 거친 시험편에서는 60~70 dB 사이의 높은 진폭을 나타내는 신호도 다수 발생하였다. 수소 장입을 받은 시험편에서 진폭이 높은 신호가 발생하는 것은 재료의 취화에 의해 하중초기 발생한 탄성파는 진폭이 높은 신호가 발생하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 용접된 시험편의 각 영역에서 경도는 비슷했지만 수소장입을 받은 경우 용접부에서 가장 높게 나타나고 모재쪽으로 갈수록 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, 충격흡수에너지는 수소장입을 받게 되면 수소의 영향을 받지 않은 시험편에 비하여 조금 낮게 나타났다.

2) 초음파의 종파속도는 수소장입 및 용접 각 부분에 따라 거의 변화가 발생하지 않았지만, 감쇠계수는 용접부에서 가장 크고 수소의 영향을 받은 시험편에서 조금 더 높은 것을 나타내었다. 따라서 초음파 속도와 감쇠계수를 측정함으로써 용접부의 특성과 수소의 영향을 평가할 수 있었다.

3) 수소의 영향을 받지 않은 시험편과 수소장입된 시험편의 음향방출 신호는 항복점까지의 탄성 영역에서 많은 음향방출 이벤트가 발생하고 소성 영역에서도 소수 발생하였다.

4) 수소취화되지 않은 시험편에서의 음향방출 신호의 진폭은 대부분 60 dB 이하의 신호이지만 수소장입된 시험편에서는 60~70 dB 사이의 높은 진폭을 나타내는 신호도 다수 발생하였다. 따라서 음향방출 신호의 파라미터를 이용하여 수소장입된 재료의 손상정도를 예측할 수 있었다.

후 기

이 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Y. Cai, Z. Luo, M. Feng, Z. Liu, Z. Huang and Y. Zeng, 2016, "Effect of activator on mechanical properties and intercrystalline corrosion resistance of austenitic stainless steel weld", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 234, pp. 243-248.
2. S.P. Lu, M.P. Qin and W. C. Dong, 2013, "Highly efficient TIG welding of Cr13Ni5Mo martensitic stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, pp. 229-237.
3. K. C. Ganesh, M. Vasudevan, K. R. Balasubramanian, N. Chandrasekhar, S. Mahadevan, P. Vasantharaja and T. Jayakumar, 2014, "Modeling, Prediction and Validation of Thermal Cycles, Residual Stresses and Distortion in Type 316 LN Stainless Steel Weld Joint made by TIG Welding Process", *Procedia Engineering*, Vol. 86, pp. 767-774.
4. J. Qinglei, L. Yajiang, U. A. Puchkov, W. Juan and X. Chunzhi, 2010, "Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mo - Cu composite and 18-8 stainless steel", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 28, pp. 429-433.
5. P. Rozenak and R. Bergman, 2006, "X-ray Phase of Martensitic Transformations in Austenitic Stainless Steel Electrochemically Charged with Hydrogen", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 437, pp. 366-378.
6. E. Herms, J. M. Olive and M. Puiggali, 1995, "Hydrogen Embrittlement of 316L Type Stainless Steel", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 272, pp. 279-283.
7. J. K. Lee, S. P. Lee, S. K. Hwang, D. S. Bae and Y. S. Sohn, 2015, "Application of Nondestructive Technique on Hydrogen Charging Times of Stainless Steel 304L", *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 19, No.2, pp. 60-66.