

## 9% 니켈강 후판 용접부의 강도 및 잔류응력 Welding Residual Stress and Strength of Thick 9% Nickel Steel Plate

김영균\* · 김영완\*\*\*† · 김재훈\*\*\*

Young-Kyun Kim\*, Young-Wann Kim\*\*\*† and Jae-Hoon Kim\*\*\*

(접수일 : 2014년 03월 04일, 수정일 : 2014년 06월 24일, 채택확정 : 2014년 06월 24일)

**Abstract:** In this paper, the transient thermal and residual stress analysis of the welding of 9% Ni steel plates using the FEA software ABAQUS are presented. The 9% Ni steel plates are welded manually with welding consumables of 70% Ni based Inconel type super-alloys (YAWATA WELD B (M)), producing a multi-pass/multi-layer butt weld. For these materials, temperature dependant mechanical and thermal material properties are used in the analysis. The back gouging is considered in welding process simulation. The FE thermal results are validated by comparing the real fusion profile and heat affected zone (HAZ). In addition, the continuous indentation test was conducted to measure the strength of base metal, HAZ and weld metal.

**Key Words :** Welding Residual Stress, 9% Ni Steel, Back Gouging, Continuous Indentation Test

### 1. 서 론

천연가스는 석유 대체에너지로써 최근 사용량이 급증하고 있다. 특히 셰일가스 시추기술의 발달로 더욱 주목을 받고 있다. 천연가스를 저장하기 위해  $-162^{\circ}\text{C}$ 로 액화시킨 액화천연가스(LNG)는 극저온에도 견딜 수 있는 탱크에 저장된다. 이처럼 LNG 저장탱크는 극저온 구조물로써 상온은 물론 저온 환경에서도 우수한 기계적 특성 및 피로강도를 지니고 있는 9% 니켈강이 LNG 저장탱크의 내부탱크 재료로 널리 사용되고 있다. 국내에 건설 중인 지상식 LNG 저장탱크는 27만 $\text{m}^3$ 의

초대용량으로 매우 두꺼운 9% 니켈 강판이 용접에 의해 제작되고 있다. 용접부에 국부적으로 존재하는 잔류응력은 피로강도를 저하시키거나 균열전파력을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 용접은 모재보다 강도가 큰 용접금속을 이용하여 작업을 한다. 그러나 9% 니켈강 용접의 경우 용접금속보다 모재의 강도가 크며, 강도 차이가 크다. 따라서 9% 니켈강의 용접부에 대한 잔류응력을 파악하는 것은 매우 중요하다. 많은 연구자들이 유한요소법을 이용하여 다양한 재료들에 대해 용접잔류응력 해석을 수행하였다.<sup>1,2)</sup> 근래에는 상용 유한요소 프로그램을 2차원 또는 3차원 용접 시뮬레이션에

\*\*\* 김영완(교신저자) : 전남대학교 기계설계공학과

E-mail : wannkim@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7285

\* 김영균 : 한국가스공사 연구개발원

\*\*\* 김재훈 : 충남대학교 기계설계공학과

\*\*\* Young-Wann Kim(corresponding author) : Department of

Mechanical Design Engineering, Chonnam National University.

E-mail : wannkim@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7285

\* Young-Kyun Kim : R&D Division, Korea Gas Corporation.

\*\*\* Jae-Hoon Kim : Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University.

널리 활용하고 있다. 그러나 9% 니켈강에 대해서는 소재 특성이나 파괴역학적 거동에 대한 연구가 대부분이다.<sup>3,4)</sup> 이처럼 9% 니켈강의 용접 잔류응력에 관한 연구는 보고된 것이 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 LNG 저장탱크용 9% 니켈강 후판 용접부에 대한 역학적 거동을 2차원 유한요소해석을 통해 규명하였다. 용접과정 시뮬레이션을 위한 열전달 해석을 수행하여 용접과정 중에 발생하는 온도분포를 예측하였으며, 이를 기초로 잔류응력해석을 수행하였다. 또한 연속압입 시험법을 이용하여 모재, 열영향부 및 용접금속에 대해 강도를 측정하여 그 결과를 제시하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소모델

지상식 LNG 저장탱크는 수직 원통형으로 높이에 따라 9% 니켈 강관의 두께를 달리하여 용접 제작된 다단구조이다. 이때 LNG 저장탱크의 수평방향 용접은 SAW이 이용되고 있으며, 수직방향은 주로 수동 SMAW이 적용되고 있다. 본 연구에서는 수직으로 수동 용접된 두께가 45mm인 9% 니켈 강관을 고려하였다. 사용된 용접봉은

NiCrFe-4계의 YAWATA WELD B(M)이다.

용접과정을 해석하기 위해 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 2차원 열전달 해석을 위해 열전달 요소인 DC2D8 및 DC2D6가 이용되었으며, 잔류응력해석을 위해서는 평면변형률 요소인 CPE8 및 CPE6를 사용하였다. 해석에 적용될 유한요소모델을 Fig. 1에 제시하였다. 그림에서처럼 용접부는 다른 부분보다 세밀하게 모델링하였다. 용접부의 전면 및 후면 그르부 각은 60° 및 90°이다. 그림에서 숫자는 각 용접 패스의 번호이다. 전면부에 대해 총 열 한 번의 용접 패스가 시행된다(Fig. 1a). 후면 용접을 하기 전에 후면 가우징(back gouging)을 한 후(Fig. 1b), 뒷면에 대해 아홉 번의 용접 패스가 이루어진다(Fig. 1c).

### 2.2 고온재료물성

용접에서 용접금속은 용융점 이상의 고온 거동을 하기 때문에 보다 정확한 결과를 얻기 위해 고온 재료특성을 해석에 적용하여야 한다. 그러나 9% 니켈강이나 YAWATA WELD B(M) 등에 대한 고온 재료특성은 거의 찾아볼 수가 없다. 9% 니켈강에 대해서는 500°C까지의 재료특성을 일부 제공하고 있다.<sup>5-7)</sup> 고온에서의 인장물성이 잔류응

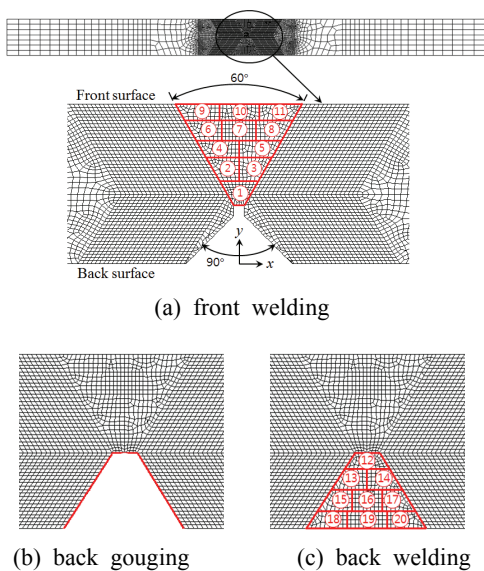


Fig. 1 Multi-pass welding processes

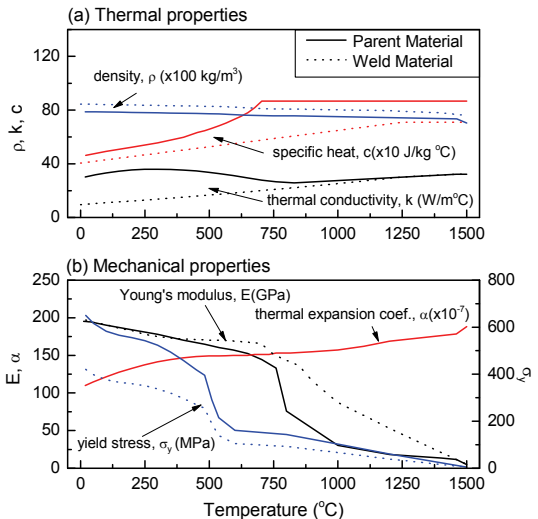


Fig. 2 Temperature-dependent material properties of parent and weld materials

력에 큰 영향을 주지 않는다는 연구결과<sup>8)</sup>에 따라 9% 니켈강의 500℃ 이상 고온에서의 재료물성은 강재에 대한 자료를 바탕으로 적절히 가정하여 해석에 적용하였다. 그러나 YAWATA WELD B(M)에 대해서는 공개된 자료가 거의 없기 때문에 Inconel 계열강, 순수 니켈 및 9% 니켈강 등의 물성을 바탕으로 물성을 가정하여 해석에 적용하였다. 용접재에 대한 열팽창 계수는 9% 니켈강과 같다고 가정하여 해석에 적용하였다(Fig. 2).

### 3. 과도열전달해석

용접 중에 발생하는 온도분포를 파악하기 위해 과도열전달 해석을 수행하였다. 용접 중에 대류와 복사를 동시에 고려하기 위해 다음과 같은 열전달계수를 해석에 적용하였다.<sup>1,2)</sup>

$$h(W/m^2) = \begin{cases} 0.0668T & 0 < T < 500^\circ\text{C} \\ 0.231T - 82.1 & T > 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

용접물이 용착되는 순간에는 어떠한 열전달도 일어나지 않는다고 가정하였다. 가열되는 동안 용접물을 제외한 나머지 자유면에서는 자연대류가 일어나며, 용입금속은 단열상태이고 단지 열전도만 일어난다고 가정하였다. 냉각과정에서 모든 자유면에 대류 조건이 부여되며, 냉각시간은 용접시방서<sup>9)</sup>에 따라 최대층간온도를 넘지 않도록 하였다. 이와 같은 열적 경계조건은 각 용접 패스가 수행될 때 마다 수정되어 적용된다. 용접금속은 액상선 온도보다 높은 온도로 용착된다고 가정하였다. 용접금속에 가해지는 입열량은 Table 1의 용접시방서<sup>9)</sup>에서처럼 실제 용접과정에서는 달라질 수 있기 때문에 해석에서의 입열량은 용접시방서 상의 평균값으로 설정하였다.

열전달 해석을 통해 얻은 온도분포를 Fig. 3에 제시하였다. 해석에서 용접과정을 구현하기 위해 ABAQUS에서 제공하는 "MODEL CHANGE" 옵션을 이용하였다. Fig. 3a는 PASS-4 용접에서 용착, 가열 및 냉각과정에서의 온도분포를, Fig. 3b는 후면 가우징 과정에서의 온도분포를, Fig. 3c는 마지

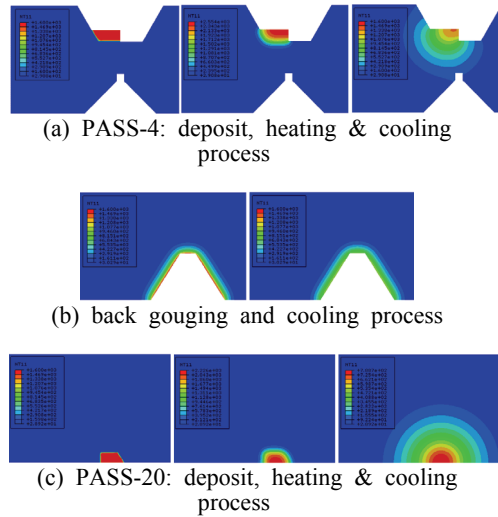


Fig. 3 Temperature contour during welding

Table 1 Welding procedure specification<sup>9)</sup>

Filler Metal (ENiCrFe-4)	Electrical Characteristics (polarity : AC)		Speed (mm/min)
Size(mm)	Current(A)	Voltage(V)	
φ3.2	80~100	20~25	45~150
φ4.0	110~140	20~27	
φ5.0	140~170	20~27	
Max. Interpass Temperature			150℃

막 용접과정인 PASS-20에서 용착, 가열 및 냉각과정에서의 온도분포를 보이고 있다.

용접이 진행되는 동안 모재의 전면부(y=45mm) 좌/우측 열영향부에서의 온도변화를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4a는 온도 취득 부분이 용접부를 중심으로 왼쪽에 위치하고 PASS-9이 가장 가까운 용착 지점이기 때문에 PASS-9이 가열되는 시점에서 온도가 급격히 상승한다. 같은 이유로 PASS-6가 용착되는 시점에서도 온도변화가 크게 나타난다. Fig. 4b는 온도 취득 부분이 용접부 오른쪽에 위치하고 PASS-11이 가장 가까운 용착 지점이기 때문에 PASS-11이 가열되는 과정에서 가장 큰 온도값을 보이고 있다.

이상에서와 같이 과도열전달 해석을 통해 얻은 용융부 형상과 실제 용융부 형상을 Fig. 5에 제시

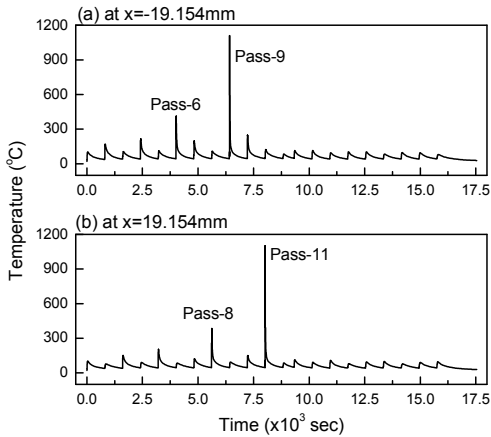


Fig. 4 Temperature history of front surface of the plate

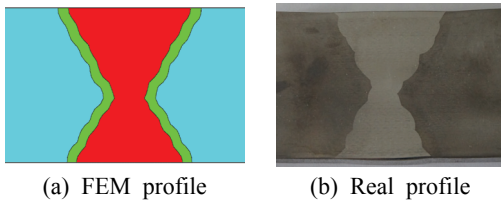


Fig. 5 Comparison of fusion zone profile

하였다. 용융부 형상 및 크기를 이용하여 유한요소법을 이용한 온도해석 결과의 타당성을 평가할 수 있다. 그림에서처럼 유한요소해석결과와 실제 용융부의 형상이 비교적 잘 일치하고 있다. 단지 실제 용접에서는 수동 용접의 결과로 약간의 불균일한 용융부 형상을 보이고 있다.

#### 4. 용접부 강도 및 잔류응력 해석

##### 4.1 용접부 강도 측정시험

용접부 강도를 측정하기 위해 연속압입시험<sup>10,11)</sup>이 수행되었다. 이 방법은 압입시험 후 발생하는 압흔 직경이 0.5mm 이내로 매우 작아 현장평가가 가능하며 비파괴적으로 강도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 용착금속, 열영향부 등과 같은 관심 있는 특정 부분만을 선택적으로 기계적 물성을 평가할 수 있다. 용접부의 강도를 측정하기

Table 2 Measured mechanical properties of base metal

Pt.	Left side		Right side	
	$\sigma_Y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]	$\sigma_Y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]
1	624.9	773.7	645.7	788.4
2	609.7	756.8	663.0	790.9
3	604.0	785.0	648.5	787.1
4	648.0	770.0	622.0	777.3
5	612.5	777.9	663.0	796.5
Ave.	619.8	772.7	648.4	788.0

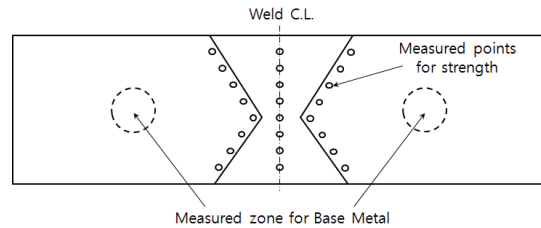


Fig. 6 Measurement regions and points

Table 3 Measured mechanical properties of HAZ

Pt.	Left side		Right side	
	$\sigma_Y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]	$\sigma_Y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]
1	852.0	1042.1	760.5	1025.5
2	708.4	879.4	655.6	835.4
3	676.9	865.6	667.0	881.6
4	654.4	853.6	647.0	826.2
5	673.3	878.3	675.9	920.4
6	708.5	946.1	685.0	879.5
7	671.0	875.5	838.4	1130.4
8	856.9	1143.8	855.7	1099.9
Ave.	725.2	935.6	723.1	949.99

위해 본 연구에서는 프론틱스에서 개발한 연속압입시험 장치인 AIS3000을 사용하였다.

Fig. 6은 강도측정을 위한 모재, 용접재 및 열영향부의 시험편 단면에서의 측정 위치 및 영역을 나타내고 있다. 이 때 모재에 대한 인장물성인 항복강도( $\sigma_Y$ )와 인장강도( $\sigma_U$ )를 측정하여 Table 2에 제시하였다. 표에서처럼 각 영역의 측정점에서의 값은 그다지 큰 차이가 없다. 좌/우측에 대한 측정 결과에 약간의 차이가 있으나 이는 측정 상의 오차로 판단된다. 전반적으로 측정 강도는 재료의

Table 4 Measured mechanical properties of weld metal

Pt.	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]
1	566.4	686.5
2	549.8	698.8
3	616.5	731.7
4	592.7	695.3
5	581.2	675.6
6	578.4	686.9
7	543.8	647.5
8	515.6	641.9
Ave.	568.1	683.0

실제 강도와 매우 유사한 결과를 제시하고 있다.

한편 열영향부에 대한 강도 측정 결과를 Table 3에 제시하였다. 측정위치는 판의 상단면으로부터 5mm 간격으로 8점을 측정하였다. 표에서처럼 왼쪽 및 오른쪽 부분에 대해 평균 강도가 잘 일치하고 있다. 전반적으로 열영향부의 강도는 용접열에 의해 모재에 비해 증가한 것을 볼 수 있다.

용접부의 중심선을 따라 용접금속에 대해 상단면으로부터 5mm 간격으로 8점에 대해 강도를 측정하여 Table 4에 제시하였다. 표에 나타난 것처럼 측정 지점에 따라 강도가 달라지는 것을 볼 수 있으며, 용접부 안쪽이 다른 곳에 비해 강도가 약간 크지만 그 차이는 미미하다.

### 4.2 잔류응력해석

용접 중에 발생된 잔류응력 분포를 Fig. 7에 제시하였다. 수직 방향 잔류응력( $\sigma_x$ )의 경우 상/하단 면에서는 주로 인장응력이 발생되며, 특히 열영향부에 큰 응력이 발생된다. 용접금속 내부에는 주로 압축응력이 발생되고 있다. 두께 방향 잔류응력( $\sigma_y$ )의 경우에는 용접금속 좌우측의 모재 부분에 주로 압축응력이, 용접금속에는 인장응력이 발생된다. 그리고 용접금속에서 각 용접패스의 경계에 큰 응력집중이 나타난다. 이는 각 용접패스에서 용접재가 용착될 때 용착 경계에서 열에 의한 팽창과 수축이 두께 방향으로 활발히 이루어지기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 용접선 길이 방향의 잔류응력( $\sigma_z$ )은 주로 인장응력이 발생된다. 이 때 열영향부에 발생하는 잔류응력이 재료의 항복강도 이상으로 나타나고 있다. 전반적으로 용접부에 멀어질수록 응력은 급격히 감소한다.

Fig. 8은 용접부의 소성변형률 분포를 제시한 것이다. 용접선 수직방향 소성 변형률( $\epsilon_x^p$ )의 경우 각 용접패스별로 팽창과 수축이 이루어지기 때문에 용접금속에서는 인장과 압축이 동시에 나타난다. 용접패스가 완료된 용접부에 다른 용접패스가 진행될 때 용착금속이 수축되면서 인접한 용접금속을 잡아당겨 인접 용접부에는 인장이, 용접 중인 용접 금속에는 압축이 발생된다. 같은 이유로

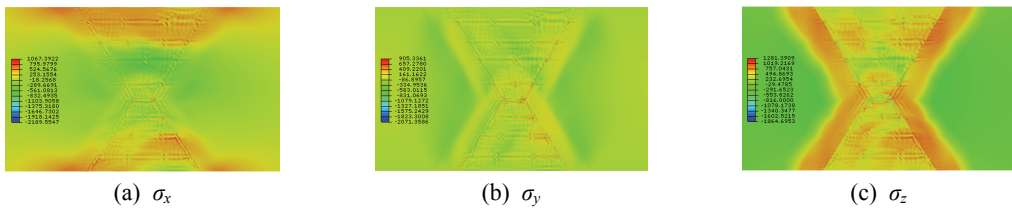


Fig. 7 Residual stress contours of welded plate

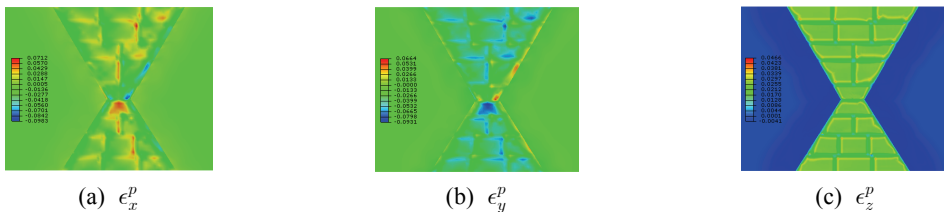


Fig. 8 Plastic strain contours of welded plate

용접금속과 모재가 연결되는 부근의 용접금속에서는 압축이, 모재에는 인장이 발생된다. 또한 PASS-1에서 용접된 용접금속에서 가장 큰 압축변형이 발생되고 있다. 이는 후면 용접을 할 경우 가우징에 의해 모재 및 PASS-1의 용접금속 일부가 제거되고 이 부분을 PASS-12가 용착이 된 이후 수축되면서 모재에 의해 압축되기 때문에 나타나는 현상이다. 두께 방향 소성변형률( $e_y^p$ )의 경우에도 각 용접금속의 경계부근을 중심으로 두께 방향에 대해 인장과 압축이 발생되고 있다. 길이 방향 소성변형률( $e_z^p$ )의 경우는 앞의 경우와는 달리 용접금속에 모두 인장을 보이고 있다. 이는 열팽창에 대한 길이방향으로의 구속이 상대적으로 약하기 때문에 나타나는 현상이다.

## 5. 결 론

LNG 저장탱크용 9% 니켈강 후판 용접부에 대해 용접 중에 발생하는 온도 및 잔류응력분포를 규명하기 위해 2차원 유한요소해석을 수행하였으며, 강도평가를 위해 연속압입시험을 함께 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 잔류응력의 거동을 통해 해석에 사용된 9% 니켈강 및 용접재의 고온재료물성이 적절히 추정되었음을 확인하였다.

(2) 연속압입시험법을 이용한 강도 측정 결과 열영향부 및 용접금속 부분에서 용접열의 영향으로 강도가 증가한 것을 확인하였다.

(3) 용접부의 잔류응력의 크기는 용접선 길이방향 응력 > 수직 방향 응력 > 두께방향 응력 순으로 나타난다.

(4) 잔류응력은 용접구조물의 표면에서 가장 큰 값을 보이고 있으며, 특히 열영향부 및 용접재료에 집중된다.

## 후 기

본 연구는 2012년 한국가스공사의 연구비 지원으로 수행한 과제임.

## References

1. B. Brickstad and B. L. Josefson, 1998, "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-welded Stainless Steel Pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 1-25.
2. I. Sattari-Far and M.R. Farahani, 2009, "Effect of the Weld Groove Shape and Pass Number on Residual Stresses in Butt-welded Pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 86, pp. 723-731.
3. M. Hoshino, N. Saitoh, H. Muraoka and O. Saeki, 2004, "Development of Super-9% Ni Steel Plates with Superior Low-temperature Toughness for LNG Storage Tanks", Nippon Steel Technical Report, No. 90, pp. 20-24.
4. J.H. Kim, K.T. Shim Y.K. Kim and B.W. Ahn, 2010, "Fatigue Crack Growth Characteristics of 9% Ni Steel Welded Joint for LNG Storage Tank at Low Temperature", Journal of KWJS, Vol. 28, No. 5, pp. 537-542.
5. MPDB Software Inc, MPDB Software, MPDB Software Inc, USA.
6. Key to Metals AG, <http://www.keytometals>, Switzerland.
7. Arcelormittal USA, 2010, 9% Nickel Steel: For Use of Cryogenic Temperatures, Arcelormittal Brochure, USA.
8. PVRC, 2006, Prediction of Residual Stresses, PVRC Joint Industry Program, Phase I.
9. KOGAS, 2012, Welding Procedure Specification (WPS-SC-018).
10. ISO/TR 29381, 2008, Metallic Materials- Measurement of Mechanical Properties by Instrumented Indentation Test-Indentation Tensile Properties.
11. S.K. Park, W.D. Choi, D.S. Gil, J.B. Ko, K.C. Lee and Y.H. Lee, 2004, "A Study on the Evaluation of Welding Residual Stress of Pipe used in Power Plant by Indentation Method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 12-17.