

# 가중함수법을 적용한 파이프라인 구조건전성평가에 관한 연구

노기섭\* · 오동진\* · 김명현\*<sup>†</sup>

\*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

## A Study on Structural Integrity Assessment of Pipeline using Weight Function Solution

Ki-Sup Noh\*, Dong-Jin Oh\* and Myun-Hyun Kim\*<sup>†</sup>

\*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received July 26, 2016 ; Revised September 1, 2016 ; Accepted October 24, 2016)

### Abstract

There are many Industry Code and Standard (ICS) for Structural Integrity Assessment (SIA) on welded structure with defect. The general ICSs, such as R6, BS 7910 and API 579-1/ASME FFS-1, provide equations to determine the upper bound residual stress profiles based on collections from many literatures. However, these residual stress profiles used in the SIA cause the conservative design for welded structures. In this study, the structural integrity assessment for girth weld in pipeline has been conducted based on fracture mechanics. In addition, thermo-elastic plastic FE analysis was performed for evaluating the residual stress of girth weld in pipeline. The weight function solution is used to determine the stress intensity factor using the residual stress profile obtained by the FE analysis. This approach can account for redistribution and relaxation of residual stress as the defects grow. In order to the evaluate quantitative comparison between BS 7910 and weight function solution, structural integrity assessment determining allowable crack size on cracked pipe was performed with failure assessment diagram.

Key Words : Structural Integrity Assessment, Welding residual stress, Weight function solution, FE analysis, Stress intensity factor

### 1. 서 론

선박 및 해양플랜트 뿐만 아니라 파이프, 대형보일러와 같은 구조물의 접합방법으로써 용접이 주로 사용되고 있다. 용접은 가열과 냉각이 반복되기 때문에 용접 구조물에 변형과 용접부 잔류응력을 발생시키게 된다. 이러한 요소들은 용접구조물의 피로 강도 및 파괴 인성에 영향을 미치기 때문에 구조 건전성 평가에 있어서 중요한 파라미터중 하나이다. 이에, 용접구조물의 건전성 평가에 있어서 용접부에 분포하는 잔류응력을 반드시 고려하게 되도록 요구 되고 있으며 보다 정확한 설계를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다<sup>1)</sup>.

최근, 구조건전성평가를 위한 지침서(BS 7910, R6 또는 API 579<sup>2-4)</sup>)를 통해 수직적인방법으로 용접으로

인한 잔류응력을 도출 할 수 있는 방법들이 많이 제시되어 있다. 하지만 이러한 방법을 통해 얻어진 잔류응력 분포는 수많은 실험으로 얻어진 산포된 데이터를 바탕으로 최대한 보수적으로 도출한 식을 통해 계산된 값이다<sup>5)</sup>. 따라서 실험을 통한 측정값이나 유한요소해석을 이용한 방법에 비해 매우 높은 값으로 나타나게 되며, 이는 보수적인 설계로 이어지게 된다는 것을 의미한다. 이러한 관점에서, 균열 성장에 따른 용접부 잔류응력의 완화효과를 고려하여 유한요소해석 방법이나 가중함수 방법을 통해 응력확대계수를 도출하는 연구들이 수행되고 있다<sup>6-7)</sup>.

본 연구에서는, 구조건전성평가에 있어서 잔류응력의 정확한 평가를 위해 유한요소해석을 수행하여 파이프 용접부에 나타나는 두께방향 잔류응력분포를 도출 하였다. 또한, 잔류응력 해석 결과를 가중함수법에 적용하

여 응력확대계수 계산 및 균열 깊이에 따른 허용결함크기를 산정하고 고찰하였다.

## 2. 구조 건전성 평가

### 2.1 평가 절차

파괴역학 기반으로 구조물의 결함을 평가하는 방법을 Fitness-For-Service (FFS) 혹은 Engineering Critical Assessment (ECA) 라고 한다. 전 세계적으로 결함에 대한 정량적인 평가를 위한 다양한 규정들이 금속 구조물, 용접 구조물, 파이프라인, 핵 발전 설비 등 여러 가지 산업 분야에 적용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 구조물에 존재하는 결함의 허용 가능 여부를 BS 7910 지침서에 따라서 평가하고 있다. 그 평가방법은 참조응력을 기반으로 한 파손평가도 (Failure Assessment Diagram)를 이용한다.

### 2.2 파손평가도

허용 가능한 결함에 대한 평가는 BS 7910 Option 1 파손평가도를 사용하는데, Fig. 1와 같이 횡축을 하중비, 종축을 파괴비로 하여 평가를 실시하게 된다. 식 (1), (2), (3)을 사용하여 하나의 선도를 그리게 되는데, 최종적으로 평가를 실시하여 나타낸 점이 선도를 기준으로 내부에 있으면 안전하지만, 밖에 위치할 경우 불안정하다고 판단한다.

For  $L_r \leq 1$ ,

$$f(L_r) = \left(1 + \frac{1}{2}L_r^2\right)^{-1/2} [0.3 + 0.7\exp(-\mu L_r^6)] \quad (1)$$

For  $1 < L_r < L_{r \max}$ ,

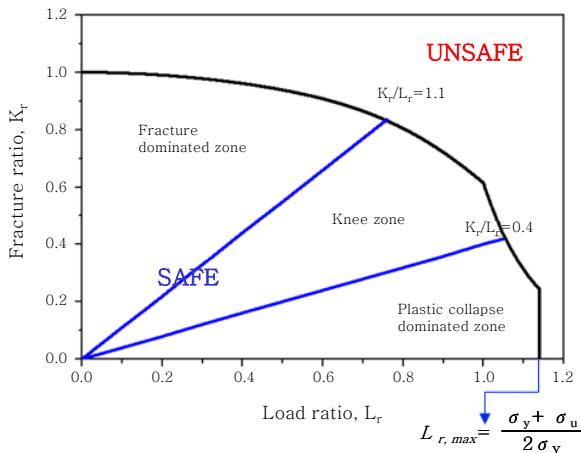


Fig. 1 Option 1 flaw assessment diagram

$$f(L_r) = f(1)L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (2)$$

For  $L_r \geq L_{r \max}$ ,

$$f(L_r) = 0 \quad (3)$$

where:

$$\mu = \min\left(0.001 \frac{E}{\sigma_Y}, 0.6\right), N = 0.3 \left(1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_u}\right)$$

여기서, E는 탄성계수,  $\sigma_Y$ 와  $\sigma_u$ 는 각각 항복강도, 인장강도를 나타낸다. 그리고 소성붕괴가 일어나는 점을 정의하는  $L_{r \max}$  기준으로 cut-off를 결정하는데, 이때  $L_{r \max}$ 는 식 (4)와 같다.

$$L_{r \max} = \frac{\sigma_Y + \sigma_u}{2\sigma_Y} \quad (4)$$

### 2.3 응력확대계수

#### 2.3.1 BS 7910 방법

파손평가도의 종축인  $K_r$ 은 재료의 파괴인성을 의미하는  $K_{mat}$ 과 응력확대계수인  $K_I$ 의비로 나타나며 식 (5)와 같다.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (5)$$

BS 7910에서 제시하고 있는 응력확대계수인  $K_I$ 의 일반적인 식은 식 (6)과 같다.

$$K_I = (Y\sigma) \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

$$(Y\sigma) = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad (7)$$

응력변수에 해당하는  $Y\sigma$ 는 소성붕괴에 기여하는 하중인 1차 응력과 잔류응력과 열응력이 포함되는 2차 응력으로 나뉘고, 1차 응력과 2차 응력에 해당하는 식은 아래 식(8), (9)와 같다.

$$(Y\sigma)_p = Mf_w [k_{tm} M_{km} M_m P_m] \quad (8)$$

$$+ k_{tb} M_{kb} M_b P_b + (k_m - 1) P_m] \quad (9)$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b$$

위 식에서 M과  $f_w$ 는 균열의 형상에 기인하는 형상계수 이고,  $k_{tm}$ 과  $k_{tb}$ 는 각각 멤브레인 과 벤딩 응력에 해당하는 응력집중계수이다. P와 Q의 정의는 각각 1차 응력과 2차 응력을 나타낸다.

2.3.2 가중합수법

가중합수법은 비선형적인 응력분포를 가진 구조물에 대해서 효과적으로 응력확대계수를 산정하기 위해 사용되는 방법이다.

$$K = \int_0^a \sigma(x)m(x,a)dx \tag{10}$$

$$m(x,a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} [1 + M_1(1 - \frac{x}{a})^{1/2} + M_2(1 - \frac{x}{a})^1 + M_3(1 - \frac{x}{a})^{3/2}] \tag{11}$$

응력확대계수는 식 (10)의 형태로 균열면에 수직으로 작용하는 응력분포인  $\sigma(x)$ 와 가중합수인  $m(x,a)$ 의 곱을 균열길이인  $a$ 에 대해서 적분하여 계산한다. 여기서  $M$ 은 균열의 종류에 따라 달라지는 형상함수이다<sup>8)</sup>.

본 논문에서는 BS 7910에서 제시하는 방법과 가중합수법을 사용하여 잔류응력에 의한 응력확대계수에 대한 논의를 진행하였다.

3. 실험 및 해석

3.1 인장 및 파괴인성 시험

3.1.1 인장시험

본 연구에서 사용된 재료는 ASTM A131 DH36이며, ASTM-E8<sup>9)</sup>기준에 따라 시험편 제작 및 시험을 실시하였다. 환봉형 시험편을 사용하였고, 총 3회 시험이 진행되었다. 시험편 형상 및 시험조건, 인장시험 결과를 각각 Fig. 2, Table 1,2에 나타내었다.

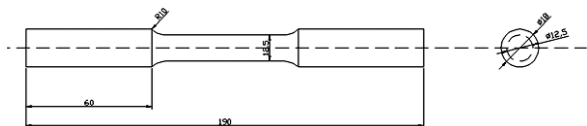


Fig. 2 Specimen design of tensile test

Table 1 Conditions of tensile test

Temperature	Crosshead speed	End condition
Ambient	0.5 mm/min.	75% Load drop

Table 2 Tensile test results

	Tensile properties		
	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E$
1st	447 MPa	585 MPa	211 GPa
2nd	448 MPa	586 MPa	212 GPa
3rd	446 MPa	574 MPa	211 GPa
Average	447 MPa	581 MPa	211 GPa

시험 수행 결과, 3번의 시험 결과중 평균 항복강도는 447MPa, 인장강도는 581MPa임을 확인하였다. 구조건전성평가를 수행함에 있어서 보수적인 평가를 위해 가장 낮은 값인 446MPa의 항복강도, 574MPa의 인장강도 값을 사용하였다.

3.1.2 파괴인성 시험

파괴인성의 측정은 탄소성 파괴인성 파라미터인 Crack Tip Opening Displacement (CTOD) 시험을 실시하였으며, BS 7448 기준에 따라 3점 굽힘시험을 실시하였다<sup>10)</sup>. Fig. 3과 같이 원주방향 용접이 된 두께 50mm 파이프에서 두께를 동일하게 유지한 채 시험편을 채취하였으며, 시험편 채취 및 형상은 Fig. 3과 같다. 본 시험을 실시함에 있어 사용된 장비는 축 인장/압축 유압 구조 시험기 (IMT 8800, Instron)을 사용하였다. CTOD 시험은 총 3회 실시 하였으며, 그 결과 각각 0.988mm, 0.806mm, 0.996mm 결과를 확인 할 수 있었다. 최종적으로 구조건전성평가에 사용된 CTOD 값은 3번의 시험 중 가장 낮은 값인 0.806mm를 사용하였다.

3.2 잔류응력해석

열전달 및 응력의 해석에 사용된 상용 유한요소프로그램은 아바쿠스(ABAQUS)를 사용하였으며, 해석 모델에 대한 모델링 요소망(finite element mesh)은 Fig. 4와 같이 실제 용접에 사용된 용접 절차 사양서(welding procedure specification)에 따라 동일한 개선각을 묘사 하였다. 이때, 용착 금속과 열 영향부에서 용접부의

Table 3 Test results of fracture toughness

	1st	2nd	3rd
CTOD value	0.988mm	0.806mm	0.996mm

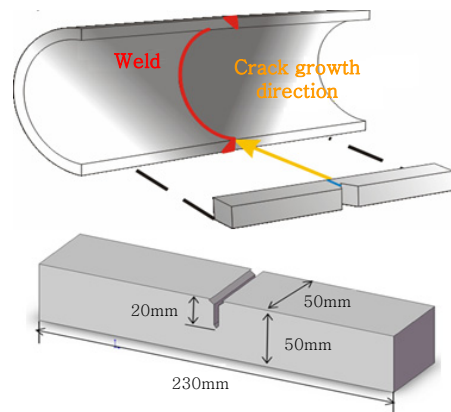


Fig. 3 Dimension of SENB specimen

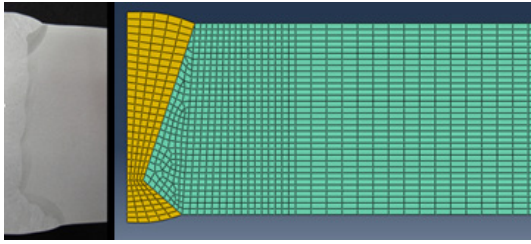


Fig. 4 Groove shape and FE mesh

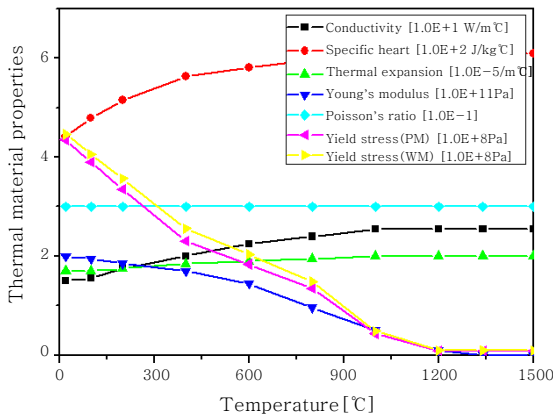


Fig. 5 Thermal material properties used in the FE analysis

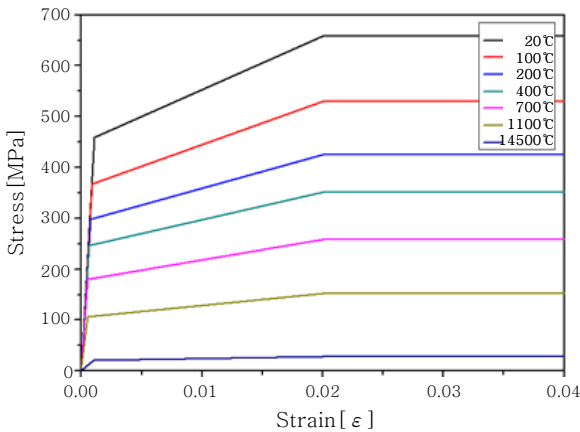


Fig. 6 Temperature dependent stress-strain curve

요소 크기는 평균적으로 1x1mm를 유지하도록 하였다.

열전달 해석 및 응력해석에 사용된 재료의 특성치는 Fig. 5,6과 같이 최대 1500°C 까지 각각의 온도에 따라 변화하는 특성을 재료 모델에 적용시켜 해석에 반영하였다<sup>11-12)</sup>.

모든 해석을 실시함에 있어서 축대칭 (axisym metric) 조건과 용접부 중심을 기준으로 대칭 (symmetric) 조건을 경계조건으로 사용하였으며, model change 방법을 사용해 각각의 용접 pass에 따른 element birth/death 기법을 적용하였다.

## 4. 결 과

### 4.1 잔류응력

유한요소해석을 통해 얻어진 해석 결과와 두께방향 잔류응력분포를 Fig. 7, 8에 각각 정리하여 나타내었다. Fig. 8에 나타나 바와 같이, 잔류 응력 분포는 두께방향으로 평형상태를 이루도록 인장 잔류응력과 압축 잔류응력이 번갈아 가며 분포하고 있다. 이에 반해 BS 7910에서 제시된 식을 통해 계산된 잔류응력 분포는 모든 구간에서 인장 잔류응력임을 Fig. 8에서 확인 할 수 있다. 최종적으로, 각기 다른 두 가지 응력분포에 대해 각각의 멤브레인과 벤딩에 해당하는 응력 성분을 Table 5에 정리하였다.

### 4.2 결함 평가

본 연구에서는 내부에 존재하는 원주방향 표면결함을 가진 파이프에 대해 결함평가를 실시하였다. 유한요소 해석을 통해 도출한 잔류응력분포를 바탕으로, 균열 깊이 에 따른 응력확대계수를 BS 7910 방법과 가중합수법을 이용하여 도출 하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같

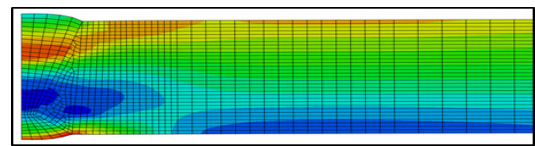


Fig. 7 Contour results of residual stress

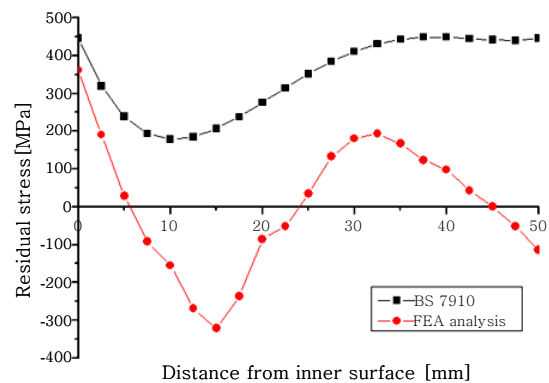


Fig. 8 Axial residual stress distribution along the weld centerline

Table 5 Residual stress decomposition

	BS 7910 [MPa]	FEA [MPa]
Membrane	342	2.8
Bending	-139	-54

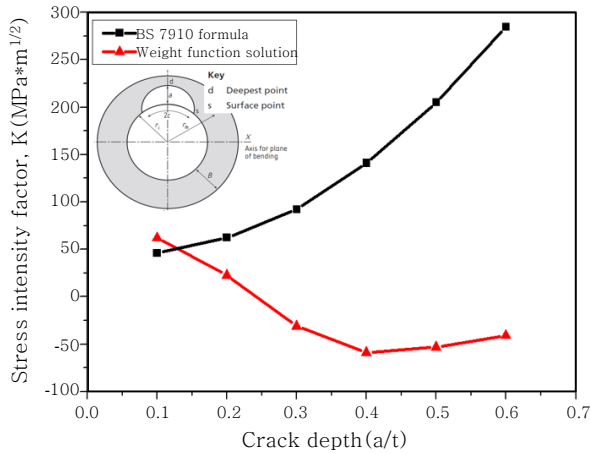


Fig. 9 Stress intensity factor for deepest point of internal surface crack

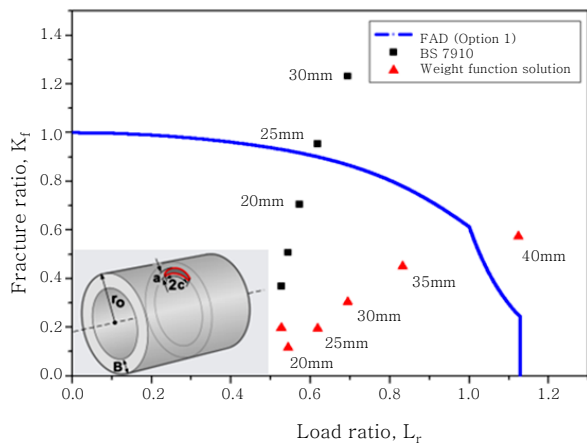


Fig. 10 Option 1 flaw assessment results

이, BS 7910 방법에 따른 응력확대계수는 응력분포의 영향을 크게 받지 않고 균열 깊이에 따라 급격하게 증가한다. 이에 반해, 가중함수법을 이용하여 도출한 응력확대계수는 응력분포의 변화와 동일한 경향을 나타내었다.

최종적으로 파손 평가도를 이용한 구조건전성평가 결과를 Fig. 10에 정리하여 나타내었다. 건전성 평가를 위해 균열 깊이를 5mm씩 증가시켰으며, 최대 허용결함의 크기가 BS 7910 방법에 따르면 20mm이었고, 가중함수법을 적용시켰을 경우 35mm임을 확인하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 두께 50mm의 ASTM A131 DH36 강관에 대해 파괴인성 및 기계적 성질에 대한 실험을 바탕으로 파괴역학 기반의 구조건전성 평가를 실시하였다. 이때, 잔류응력의 영향에 따른 허용결함 평가를 위

해서 파손평가도를 기반으로 정량적인 평가를 실시하였으며, BS 7910 지침서에서 제시하는 절차에 따라 평가를 수행하였다.

1) BS 7910에 제시되어 있는 코드에 따라 파이프의 두께방향으로 분포하는 잔류응력과 실제 유한요소해석을 통해 도출한 잔류응력분포는 큰 차이가 있었다. 지침서에서 제시하는 응력분포는 평형상태가 이루는 응력분포 형태가 아닌 모든 구간에서 인장잔류응력을 나타내고 있었으며, 이는 설계에 반영할 시 매우 보수적인 결과로 이어지게 된다는 것을 의미한다.

2) 본 연구에서는 응력확대계수를 정의하는 방법으로 BS 7910과 가중함수법을 사용한 결과를 비교하였다. BS 7910에 따른 응력확대계수는 균열깊이에 따라 급격하게 증가하는 경향을 보였으며, 가중함수법을 적용시켰을 때에는 균열이 성장함에 따라 변화는 응력분포를 반영하는 결과가 나타났다. 이는 초기 균열 상태의 응력분포를 바탕으로 계산하게 되는 BS 7910 방법과는 달리 균열이 성장함에 따라 바뀌는 잔류응력의 분포 상태를 반영한다는 것을 의미 한다. 따라서 정확한 평가를 위해 균열성장애 따른 응력재분포를 반영하는 가중함수법을 사용한 평가가 수행되어야 한다.

3) 허용가능한 결함 크기를 평가하기 위해 앞서 언급한 두 가지 결과를 바탕으로 파손평가도를 작성하여 구조 건전성평가를 실시하였다. 5mm 단위를 기준으로, 지침서의 절차에 따른 결과는 20mm의 결함을 인정하는 것에 반해 가중함수법을 적용한 결과는 35mm의 결함을 인정하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 비추어, 기존의 지침서는 결함평가에 있어서 지나치게 보수적인 경향을 보이는 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문(저서)은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014H1C1A1073088). 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0030013).

### References

1. A. Stacey, J.-Y. Barthelemy, R.H. Leggatt, R.A. Ainsworth, Incorporation of residual stress into the SINTAP defect assessment procedure, *Jouranal of Engineering Fracture Mechanics*, 67 (2000), 573-611
2. British Standards Institution, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, *BS 7910* (2013), 1-480

3. British Energy Generation Ltd, Assessment of the integrity of structures containing defects, R6 Revision 3 (1999)
4. American Petroleum Institute, API 579/ASME Joint FFS-1 Fitness-For-Service, API 579 (2000)
5. Health and Safety Executive, A review of residual stress distribution in welded joints for the defect assessment of offshore structures, 1997
6. J.K. Hong, R.P. Brodzinski, P.M. Vargas, H.C. Rhee, K.J. Young, J.A. Penso, Issues in welding residual stress model in fitness for service assessment of crack like defect in weld area, *Proceedings of Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, ASME, 2015
7. P. Dong, J.K. Hong, Fracture mechanics treatment of residual stress in defect assessment, *Journal of Welding in the world*, 2004, 19-27
8. Shen. G., Glinka G. Glinka, Stress Intensity Factors for Internal Edge and Semi-Elliptical Cracks in Hollow Cylinders *ASME-PVP*, 263, 1993, 73-79
9. ASTM, Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, *ASTM E8-13a* (2013), 1-28
10. British Standard, Fracture mechanics toughness tests, *BS 7448* (1991)
11. Commission of design analyses and structural strength of welded structures, Standardization for temperature distribution prediction of the arc weld using FEA, *Journal of KWJS*, 23(6), (2005), 1-7 (in Korean)
12. H.K. Jin, D.J. Lee, S.B. Shin, D.H. Park, A Study on Welding Distortion and Residual Stress for Tubular Welded Joint, *Journal of KWJS*, 28(5), (2012), 51-56 (in Korean)