

# 계장화 압입시험법에 의한 SUS316L판의 용접부 기계적 물성치 측정

송기남<sup>\*†</sup> · 홍성덕<sup>\*</sup> · 노동성<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부

<sup>\*\*</sup>프론틱스

## Measurement of Weld Mechanical Properties of SUS316L Plate Using an Instrumented Indentation Technique

Kee-Nam Song<sup>\*†</sup>, Sung-Deok Hong<sup>\*</sup> and Dong-Seong Ro<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Nuclear Hydrogen Reactor Technology Development Division, KAERI, Daejeon 305-353, Korea

<sup>\*\*</sup>Frontics Ltd., Seoul 153-704, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : knsong@kaeri.re.kr

(Received December 17, 2012, Revised January 28, 2013, Accepted March 6, 2013)

### Abstract

Different microstructures in the weld zone of a metal structure such as a fusion zone or heat affected zone are formed as compared to the parent material. Thus, the mechanical properties in the weld zone are different from those in the parent material. As the basic data for reliably understanding the structural characteristics of welded PCHE prototype made of SUS316L, the mechanical properties in the weld zone and parent material for a SUS316L plate are measured using an the instrumented indentation technique in this study.

Key Words : Instrumented indentation technique, Mechanical property, PCHE(Printed Circuited Heat Exchanger), very high temperature reactor

### 1. 서 론

용접은 단품으로 이루어진 부품들을 원하는 형상의 구조물로 -복잡한 구조물에서도- 용이하게 형상화할 수 있는 편리한 접합 방법으로 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그런데 용접된 구조물의 용접 부위는 용접시에 투입된 열로 인하여 용융부 및 열영향부(Heat Affected Zone; HAZ)가 형성된다. 추가적인 열처리를 하지 않을 경우 일반적으로 용융부 및 HAZ에서의 미세조직은 모재와는 다른 미세조직이 형성되어서 재료의 기계적 물성치(항복응력, 인장강도 등)가 모재에 비해 다를 수 있다. 더구나 용융부 및 HAZ에서는 용접에 의해서 잔류응력도 발생하게 된다<sup>1)</sup>.

구조물의 구조특성을 해석/평가할 때 구조재의 물성치는 구조물의 거동에 영향을 준다. 따라서 모재, HAZ

및 용융부에서 기계적 물성치가 서로 상이한 용접구조물이 하중을 받고 있는 경우에 용접구조물의 구조특성은 동일한 기계적 물성치로 해석/평가한 구조특성, 즉 모재의 기계적 물성치로만 해석/평가한 것과는 다른 것으로 알려져 있다<sup>2,3)</sup>.

한국원자력연구원(KAERI)에서는 원자력 에너지를 이용하여 대량으로 수소를 생산하기 위한 연구의 일환으로 2012년 중반 Fig. 1과 같은 초고온헬륨루프(HELP)를 구축하였고 기기 수준의 운전환경하에서 원자력수소 핵심기기들에 대한 성능시험 수행을 계획하고 있다. 또한 KAERI에서는 2012년 초 실험실 수준의 인쇄회로판형 열교환기(PCHE; Printed Circuited Heat Exchanger) 시제품을 SUS316L로 제작하였고(Fig. 2) HELP에서 고온구조 성능시험을 수행할 예정인데 이 PCHE 시제품은 Fig. 2에서 보듯이 열교환기판과 챔버(Chamber)가 TIG 용접되어 있다.

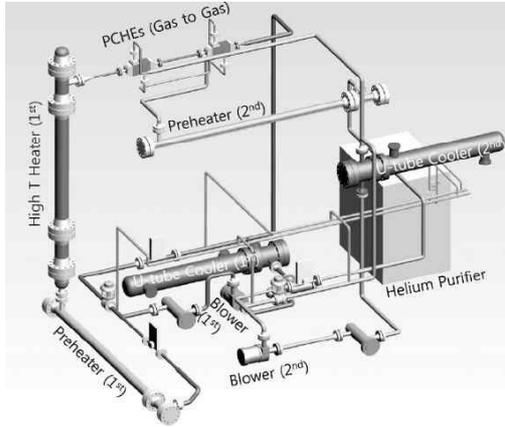


Fig. 1 Helium experimental loop (HELP)

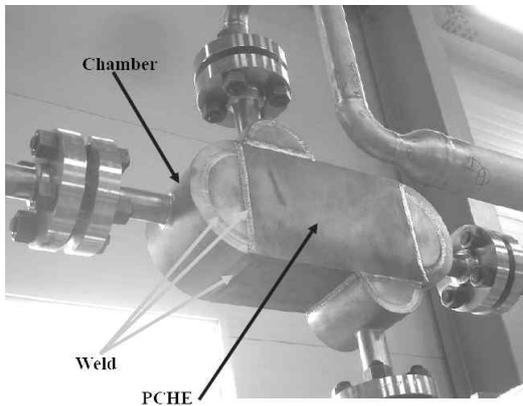


Fig. 2 Lab-Scale PCHE prototype

본 연구에서는 실험실 수준 PCHE 시제품의 고온구조해석을 위한 기초자료로서 SUS316L판의 용융부, 열영향부 및 모재 부위에 대한 기계적 물성치를 통상적인 인장시험으로부터 얻기 어려운 경우의 대체방법으로 제시되고 있는 계장화 압입시험법을 이용하여 측정하고 정리하였다.

### 2. 계장형 압입시험법

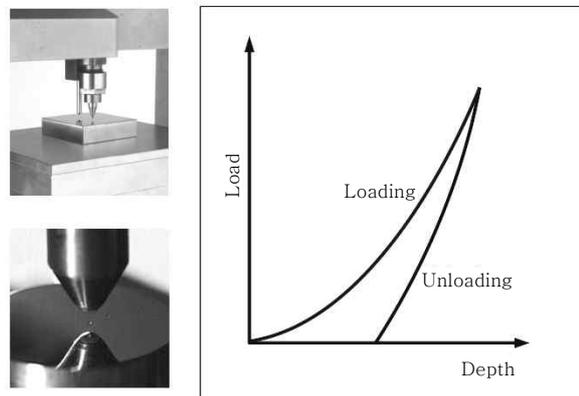
재료의 기계적 물성치는 ASTM 규격에 따라 제작된 인장시편을 ASTM 절차에 따라 인장시험을 수행하여 얻는 것이 일반화된 방법이다. 그런데 인장시편을 채취하기 곤란한 부위에서의 기계적 물성치를 비교적 용이하게 얻을 수 있는 대체방법으로 계장화 압입시험법(Instrumented Indentation Technique)이 있는데 기본 원리는 다음과 같이 요약될 수 있다<sup>5)</sup>.

계장화 압입시험은 재료에 가해지는 압입 하중에 따른 압입 깊이를 연속적으로 측정하여 압입 하중-변위 곡선을 얻고, 이를 분석하여 대상 재료의 기계적 특성

을 평가하는 기법이다. 기존의 경도시험과 유사하지만 직접 압흔의 크기를 측정하지 않는다는 차이점과 기존의 경도값 외에 탄성계수, 유동특성, 파괴인성 그리고 잔류응력 등 다양한 재료 고유의 물성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 최대 수백 마이크로미터 이내의 미세 영역을 평가하므로 용접부와 같은 국부적인 물성변화가 존재하는 재료에 대해서도 그 변화 양상을 평가할 수 있고, 시험 위치에는 미세한 흔적만 남기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다. 이에 시험을 위한 표준 시편 채취가 필요 없어 운용중이거나 완료된 구조물에 직접 적용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

계장화 압입시험은 구형 압입자를 이용하여 진행하게 되며 이때 재료는 압입하중이 증가함에 따라 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며, 압입자와 시편의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다. 구형 압입자는 압입깊이에 따라 재료의 변형이 증가하게 되는데 이를 통하여 압입 하중-압입 깊이 곡선으로부터 일축 인장시험에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 구형 압입시험법에 의한 기계적 물성 측정에 대한 이론은 참고문헌 6에 상세히 나와 있다. Fig. 3은 계장화 압입시험을 통하여 얻어지는 압입 하중-압입 깊이 곡선을 나타낸 것이다. 실제 접촉깊이를 결정하기 위해서는 우선 하중제거 곡선을 역함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분하여 구한 기울기 값으로써 재료의 강성(stiffness)인  $S$ 를 평가한다. Fig. 3의 정보를 이용하고 ISO TR29381<sup>7)</sup>의 절차에 따라 재료의 인장물성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 참고문헌 5에서와 같은 장비 및 실험 조건으로 시험을 수행하였다. 즉, 계장형 압입시험장비인 Micro AIS를 이용하여 변위제어 압입시험을 수행하였다. 시험에서는 직경 0.05 mm의 구형 압입자를



Indentation load-depth curve

Fig. 3 Indentation load-depth curve

이용하고 최대 압입깊이 6 μm, 다중 압입 횟수 6회, 하중 제거 비율 50%, 시험 속도 0.03 mm/min의 시험조건으로 수행하였다.

### 3. 실험실 수준 PCHE 시제품

Fig. 4는 실험실 수준 PCHE 시제품을 제작하는 공정을 나타낸 것으로 PCHE 제작공정을 살펴보면 화학적으로 에칭(etching)하여 제작한 1차 및 2차 유체가 흐르는 열교환기 관들을 교대로 적층한 뒤 모서리부위를 확산접합(diffusion bonding)하여 열교환기 core를 제작하고 헤더와 플랜지가 부착된 챔버를 열교환기 core에 TIG용접한다. 용가재없이 또한 별도의 용접구속을 하지 않은 상태로 TIG 용접을 시행하였다.

실험실 수준 PCHE 시제품은 내부식성 및 내입계부식성이 우수한 SUS316L 재료로 제작되어 있는데

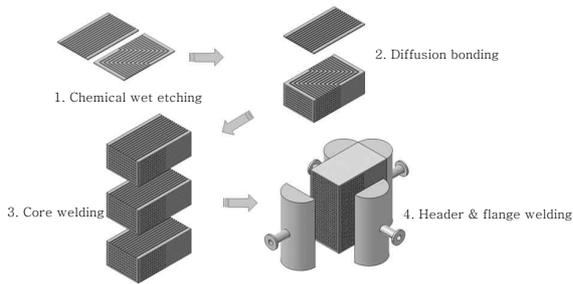


Fig. 4 Manufacturing process of a lab-scale PCHE

Table 1 Chemical composition of SUS316L

Alloying element(≤wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	12-15	16-18	2.0-3.0

Table 2 Material properties of SUS316L

Temperature (°C)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivity (W/mK)	Heat Capacity (J/kgK)	Coefficient of Thermal Expansion (10 <sup>-6</sup> /°C)
20	192	0.3	7966	13.94	470	15.9
100	186	0.3	7932	15.08	486	16.4
200	178	0.3	7889	16.52	508	17.0
300	170	0.3	7846	17.95	529	17.5
400	161	0.3	7803	19.39	550	17.9
500	153	0.3	7760	20.82	571	18.3
600	145	0.3	7717	22.25	592	18.7
700	137	0.3	7674	23.69	613	19.0

Table 3 Welding conditions for the SUS31

Welding method	TIG welding
Welding current, voltage speed	180 A 220 V 4.0 mm/s
Shielding gas, flow rate, discharge pressure	99.95% Argon 100 ml/min. 1.0 bar

SUS316L의 대표적인 화학조성과 물성치는 Tables 1 및 2에 나타나 있다. 또한 TIG 용접 조건은 Table 3에 나타나 있다.

### 4. 용접시편의 물성치 측정 및 분석

근래에 실험실 수준 PCHE 시제품에 대하여 모재의 기계적 물성치만을 사용한 고온구조해석 결과에 의하면 용접부 주변에서 비교적 높은 응력이 발생한 것으로 알려졌다<sup>4)</sup>. 실험실 수준 PCHE 시제품의 구조건전성을 좀 더 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 SUS316L 판재 용접부위의 기계적 물성치를 파악하는 것이 필요하다.

Fig. 5는 SUS316L 판재 TIG 용접부위에서 용접부의 기계적 물성치를 계장화 압입시험법으로 측정하기

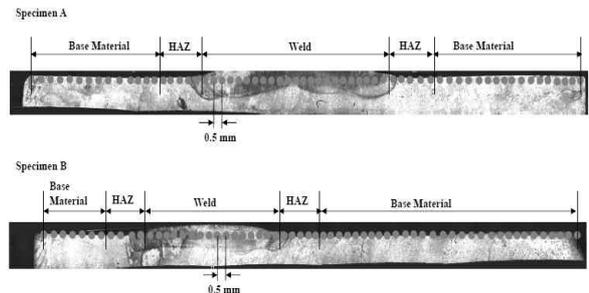


Fig. 5 Weld specimens of SUS316L strip and their indented positions

위해 5 mm 판재 용접부 주변을 절단한 시편(두께 방향) 2개와 압입시험 위치를 나타낸 것이다. 판재의 용접면은 용접변형이 발생하였기 때문에 계장형 압입시험법을 이용하려면 평평하게 별도의 표면가공을 해야 한다. 본 논문에서는 절단 단면을 가공하여 압입시험을 수행하였다. 압입시험은 영역별로 되도록 많은 측정 data를 얻기 위해 절단한 시편 단면에서 0.5 mm 간격으로 수행하였다. Fig. 5에서와 같이 모재부위에서는 총 60개 지점, 열영향부(HAZ) 부위에서는 총 20개 지점 그리고 용융부에서는 총 45개 지점에서 기계적 물성치를 측정하였다. 모재 및 용융부는 구분이 용이하나 HAZ 부위를 구분하는 것이 용이하지 않기 때문에 본 연구에서는 PCHE 구조해석 모델에 사용된 유한요소 크기가 2.0 mm인 점을 감안하여 용융부와 근접한 곳에서 모재 쪽으로 2 mm까지로 가정하였다.

Fig. 6은 Fig. 5에 표시된 측정부위에서의 항복응력(YS)과 인장강도(UTS) 측정치를 나타낸 것으로 모재, HAZ 및 용융부의 측정부위에서 어느 정도 scattering이 있어서 구조해석에 사용할 물성치를 얻기 위해서는 영역별로 대표할 수 있는 값을 도출하는 것이 필요하다. Table 4는 Fig. 6의 측정 data를 이용하여 모재, HAZ 및 용융부에서 항복응력과 인장강도의 평균값, 분산 및 95% 하한 신뢰도 평균값과 ASME Boiler & Pressure Vessel Code<sup>9)</sup>에 나와 있는 모재부위에서 최소 항복응력과 인장강도 등을 나타낸 것이다. 예전에

는 용접부의 기계적 물성치가 확보되지 못하여서 참고 문헌 9에 있는 SUS316L의 기계적 물성치들을 PCHE 구조물의 구조해석 및 평가에 사용하였다<sup>10)</sup>.

Table 4에서 보면 계장형 압입시험법을 이용하여 얻은 모재부위의 항복응력 및 인장강도(평균값 및 95% 하한 신뢰도 평균값)가 참고문헌에 있는 값(비록 최소 규정된 값일지라도)들과 상당한 차이가 있다. 따라서 본 실험에서 얻은 기계적 물성치인 항복응력 및 인장강도를 용접부를 포함한 구조물의 구조해석용 설계입력자료로 사용하기 위해서는 선행연구<sup>5,11)</sup>에서와 같이 계장형 압입시험법에서 얻은 모재부위의 실험값을 기준으로 하여 HAZ 및 용융부에 대한 상대적 기계적 물성치 값을 도출할 필요가 있다.

Table 5는 Table 4에 의거하여 모재, HAZ 및 용융부에서 항복응력과 인장강도의 95% 하한 신뢰도 평균값을 모재부위에서의 95% 하한 신뢰도 평균값으로 정규화한 것이다. Table 5에서 보면 HAZ 및 용융부에서 항복응력은 모재 부위의 항복응력보다 각각 약

Table 4 Mechanical properties of SUS316L weld strap

	YS* (MPa)	UTS** (MPa)
Parent material		
- Average	253.0	571.5
- SD***	18.4	56.1
- 95% LCA****	249.0	559.4
- # of data points	60	60
HAZ		
- Average	250.6	607.8
- SD	24.2	67.6
- 95% LCA	241.2	581.7
- # of data points	20	20
Weld		
- Average	235.6	669.5
- SD	17.0	84.3
- 95% LCA	231.4	648.3
- # of data points	45	45
ASME code Sec. III (minimum value)	172.4	448.2

\* YS: Yield stress  
 \*\* UTS: Ultimate tensile strength  
 \*\*\* SD: Standard Deviation  
 \*\*\*\* LCA: Lower Confidence Average

Table 5 Normalized mechanical properties of SUS316L weld strap based on 95% lower confidence average

	Parent material	HAZ	Weld
Yield stress	1.000	0.969	0.929
UTS	1.000	1.040	1.159

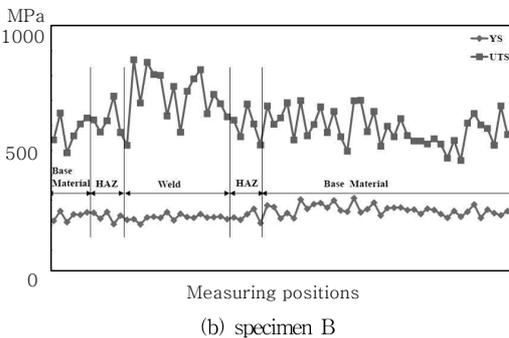
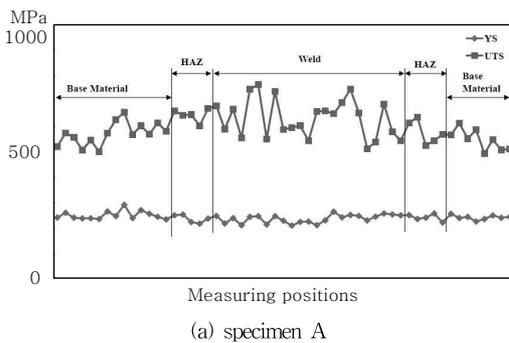


Fig. 6 Variation of mechanical properties at the indented positions of specimen A and B

3.1%, 7.1%정도 작아지고 있는 반면, HAZ 및 용융부에서 인장강도는 모재부위의 인장강도보다 각각 약 4.0%, 15.9%증가하고 있다. 즉 HAZ 및 용융부에서 항복응력은 감소하는 연화(softening) 현상이 일어나고 있으나 인장강도가 증가하고 있으므로 HAZ 및 용융부에서 변형도 경화의 정도가 모재의 그것과 다름을 시사해준다. 이것은 용접부 물성치를 고려한 탄소성 구조 해석에서 영역별로 다른 탄소성 변형도 경화 관계 (Elastic-plastic strain hardening relation)를 사용해야 함을 시사해준다.

Fig. 7은 모재, HAZ 그리고 용융부에서 조직사진을 촬영한 위치와 조직사진들을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보면 용접에 의한 상변화는 발생하지 않았으나 입자 (Grain)의 크기와 형상이 변하였음을 알 수 있다. 즉, 모재부위에서는 입자의 크기가 비교적 균일한데 반해 HAZ 및 용융부에서는 입자의 크기가 길게 늘여지고 촘촘해지는 것을 관찰하였는데 이러한 관찰사항과 용접 잔류응력에 의해서 모재보다 항복응력이 연화되고 인장강도는 증강되는 현상이 나타내는 것으로 보인다.

### 5. 결 론

SUS316L로 제작된 실험실 수준 인쇄기관형 열교환기(PCHE) 시제품의 용접부 기계적 물성치를 계장화 압입시험법으로 측정하였고 측정자료를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) SUS316L 판재의 용접 용융부에서 항복응력은 모재에 비해 유의할 정도로 감소하고 있으나 인장강도는 유의할 정도로 증가하고 있다.
- 2) 본 연구 결과는 해당 소재로 용접/제작된 PCHE 시제품의 구조특성을 좀 더 신뢰성 있게 평가하기 위한 기초자료로 이용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. George E. Linnert : Welding Metallurgy 1, American Welding Society, New York (1965)
2. K. N. Song and S. H. Lee : Lateral Crush Strength of Nuclear Fuel Spacer Grid Considering Weld Properties, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 36-12 (2012), 1663-1668 (in Korean)
3. K. N. Song, S. D. Hong, and H. Y. Park : High-Temperature Structural Analysis of a Small-Scale PHE Prototype - Analysis Considering Material Properties in Weld Zone, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 36-10 (2012), 1289-1295 (in Korean)
4. K. N. Song, J. S. Chang, S. H. Kang, and S. D. Hong : Measurement of Weld Material Properties of SUS316L Using an Instrumented Indentation Technique, Abstracts of the 2012 Autumn Annual Meeting of Korean Welding & Joining Society, 57 (2012), 94, Chang-won, Nov. 7-9 (in Korean)
5. K. N. Song and D. S. Ro : Measurement of Mechanical Properties in Weld Zone of Nuclear Material using an Instrumented Indentation Technique, Journal of the Korean Welding & Joining Society, 30-3 (2012), 51-56 (in Korean)
6. D. I. Kwon *et al.* : Indentation to Instrumented Indentation Technique for Evaluating Tensile Properties of ISO TR29281; Representative Stress-Representative Strain Method, Trends in Metals & Materials Eng.,

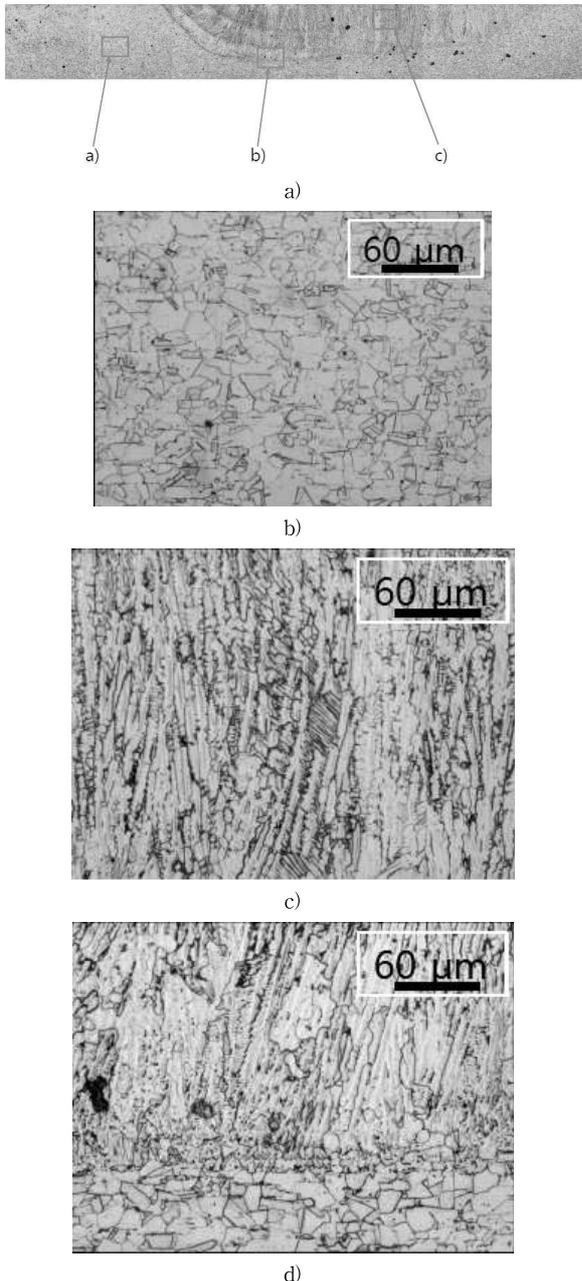


Fig. 7 Comparison of microstructure in (a) position of each microstructure, (b) base material, (b) HAZ, and (c) weld

- 22-2 (2009), 36-43 (in Korean)
7. ISO TR29381 : Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties (2008)
  8. ASTM Material Edition 2001
  9. ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section II Part D (Customary), 2007
  10. K. N. Song, H. Y. Lee, C. S. Kim, S. D. Hong, and H. Y. Park : Macroscopic High-Temperature Structural Analysis Model for a Small-Scale PCHE Prototype (I), Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 35-11 (2011), 1499-1506 (in Korean)
  11. K. N. Song, S. D. Hong, S. H. Lee and H. Y. Park : Effect of Mechanical Properties in the Weld Zone on the Structural Analysis Results of Plate-Type Heat Exchanger Prototype and Pressurized Water Reactor Spacer Grid, Journal of Nuclear Science and Technology, 49-9&10 (2012), 947-960