

계장화 압입시험법에 의한 Alloy 617 용접 물성치 측정

송기남^{*,†} · 홍성덕^{*} · 노동성^{**} · 이주하^{**} · 홍정화^{**}

^{*}한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부

^{**}(주)프론틱스 소프트웨어 기술개발팀

Measurement of Weld Material Properties of Alloy 617 Using an Instrumented Indentation Technique

Kee-Nam Song^{*,†}, Sung-Deok Hong^{*}, Dong-Seong Ro^{**}, Joo-Ha Lee^{**} and Jung-Hwa Hong^{**}

^{*}Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Hydrogen Reactor Technology Development Division,
Daejeon 305-353, Korea

^{**}Frontics, Inc. Software Team, Seoul 153-803, Korea

[†]Corresponding author : knsong@kaeri.re.kr

(Received ; July 31, 2013 ; Revised August 27, 2013 ; Accepted October 14, 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 a welded PCHE specimen to be made of Alloy 617, the mechanical properties in the weld zone and parent material for a Alloy 617 plate are measured using an 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 용이하게 형상화할 수 있는 편리한 접합 방법이다. 그런데 용접된 구조물의 용접 부위는 용접시에 투입된 열로 인하여 용융부 및 열영향부(Heat Affected Zone; HAZ)가 형성된다. 용융부 및 HAZ에서는 모재와는 다른 미세조직이 형성되고 용접에 의한 잔류응력 등으로 인하여 이 부위의 기계적 물성치도 모재와는 다를 수 있다¹⁾. 모재, HAZ, 용융부 등의 기계적 물성치가 다를 수 있기 때문에 용접된 구조물이 하중을 받을 경우, 거시적으로 보면 구조물의 구조특성 및 기계적 거동이 단일 물성치로 이루어진 구조물의 구조특성 및 기계적 거동과는 사뭇 다를 수 있다²⁾.

한국원자력연구원(KAERI)에서는 원자력 에너지를 이

용하여 대량으로 수소를 생산하기 위한 연구의 일환으로 2011-2012년에 Figs. 1 및 2와 같은 초고온헬륨루프(HELP) 및 소형 질소가스루프를 구축하였고 기기 수준의 운전환경하에서 원자력수소 핵심기기들에 대한 성능시험 수행을 계획하고 있다. 또한 KAERI에서는 2013년 초에 실험실 수준의 인쇄회로판형 열교환기(PCHE: Printed Circuited Heat Exchanger)를 Alloy 617로 제작할 예정이며 상기 실험루프에서 성능시험을 수행할 예정이다. 그런데 이 PCHE는 열교환기판과 챔버(Chamber)가 TIG 용접되어 있다.

근래에 SUS316L로 제작된 실험실 수준의 PCHE에 대하여 모재의 기계적 물성치만을 사용한 고온구조해석 결과에 의하면 용접부 주변에서 비교적 높은 응력이 발생한 것으로 알려졌다³⁾. 따라서 2013년에 Alloy 617로 제작될 실험실 수준의 PCHE의 구조건전성을 좀 더

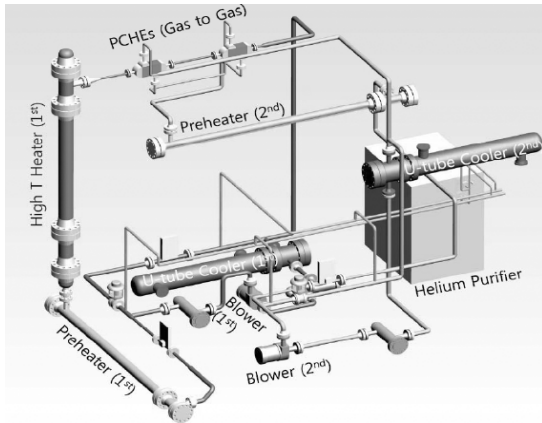


Fig. 1 Helium experimental loop (HELP)

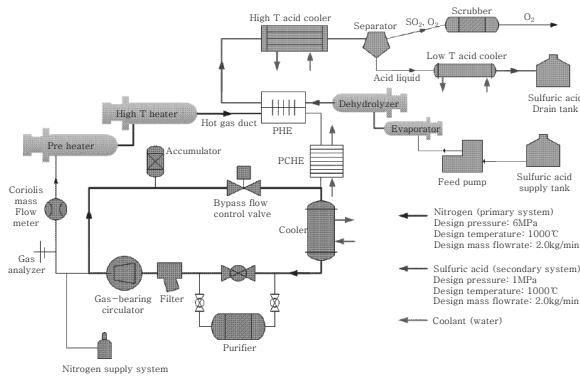


Fig. 2 Small-scale nitrogen gas loop

신뢰성 있게 평가하기 위해서는 Alloy 617 판재 용접 부위의 기계적 물성치를 파악하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 실험실 수준의 PCHE의 고온구조해석을 위한 기초자료로서 Alloy 617판의 용융부, 열영향부(HAZ) 및 모재 부위에 대한 기계적 물성치를 계장화 압입시험법으로 측정하고 정리하였다.

2. 계장형 압입시험법

계장화 압입시험은 재료에 가해지는 압입 하중에 따른 압입 깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 얻고, 이를 분석하여 대상 재료의 기계적 특성을 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 미세영역을 평가하므로 용접부와 같은 국부적인 물성변화가 존재하는 재료에 대해서도 그 변화 양상을 평가할 수 있고, 시험 위치에는 미세한 흔적만 남기기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다. 이에 시험을 위한 표준

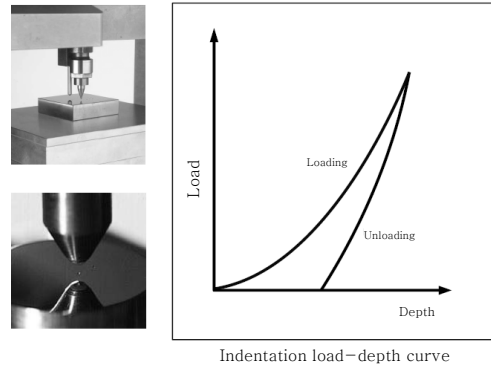


Fig. 3 Indentation load-depth curve

시험 채취가 필요없어 운용중이거나 완료된 구조물에 직접 적용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

계장화 압입시험은 구형(sphere type) 압입자를 이용하여 진행하게 되며 이때 재료는 압입하중이 증가함에 따라 완전탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며, 압입자와 시험의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다. 구형 압입자는 압입깊이에 따라 재료의 변형이 증가하게 되는데 이를 통하여 압입하중-압입 깊이를 곡선으로부터 일축 인장시험에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 구형 압입시험법에 의한 기계적 물성 측정에 대한 이론은 참고문헌 4에 상세히 나와 있다.

Fig. 3은 계장화 압입시험을 통하여 얻어지는 압입하중-압입 깊이를 곡선을 나타낸 것이다. 실제 접촉 깊이를 결정하기 위해서 우선 하중제거 곡선을 역함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분하여 구한 기울기 값으로써 재료의 강성(stiffness)인 S 를 평가한다. Fig. 3의 정보를 이용하고 ISO TR29381⁵⁾의 절차에 따라 재료의 인장물성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 계장형 압입시험장비인 Micro AIS를 이용하여 변위제어 압입시험을 수행하였다. 시험에서는 지름 0.05 mm의 구형 압입자를 이용하고 최대 압입깊이 6 μm , 다중압입회수 6회, 하중제거비율 50%, 시험속도 0.03 mm/min의 시험조건으로 수행하였다.

3. 용접시험의 물성치 측정 및 분석

3.1 용접시험 준비

실험실 수준의 PCHE는 고온강도, 내부식성 및 내입계 부식성이 우수한 Alloy 617로 제작되어 있다. 본 실험에 사용된 Alloy 617 용접시험편은 Haynes 617 열간압연 판재로 제작되었는데 루트 갭(root gap) 10 mm, V-groove 각도 80°로 설계되었다. 사용된 Alloy 617 판재 시험편의 대표적인 화학적 조성은 Table 1과 같다⁶⁾.

Table 1 Chemical composition of Alloy 617

Alloying element(≤wt%)										
C	Ni	Fe	Si	Mn	Co	Cr	Ti	P	Mo	Al
0.08	53.11	0.949	0.084	0.029	12.3	22.2	0.41	0.003	9.5	1.06

Table 2 Welding conditions for an Alloy 617 plate specimen

Welding method	GTAW welding
Welding current, voltage	180-200 A 14-16 V
speed	3-3.7 mm/s
Shielding gas, flow rate	99.99% Argon 10-15 l/min.

용접시편의 용접은 GTAW 용접에서 아크가 안정화되고 전력소모가 적은 비소모성 전극적 용접방법인 직류 전극성(DCSP: Direct Current Straight Polarity) 방법을 사용하였는데 용접봉을 음(-)극에, 모재는 양(+)극에 연결하였다. 용접에 사용된 텅스텐 전극봉은 직경 3.2 mm의 토리아 함유 텅스텐인 EWth-2를 사용하였는데 대표적인 용접 조건은 Table 2에 나타나 있다. 그 외의 용접조건으로는 용접시 용융풀을 대기로부터 차폐하기 위해 순도 99.99%의 아르곤 가스를 차폐가스(Shielding gas)로 사용하였고 모재의 이면에는 산화를 방지하기 위하여 사용되는 backing 가스와 용접이후 응고의 낮은 온도까지 용접 금속을 대기로부터 차폐하기 위해 사용되는 후행가스(Trailing)도 주입하지 않았다. 용접시 최저 예열온도는 18℃, 최대 패스(pass)간 온도는 177℃ 이하로 하였으나 예열유지시간은 적용하지 않았다. 용접시편의 총 적층 수 및 패스 수로 14층, 33패스를 적용하였는데 용접부 응고시에 변형을 방지하기 위해 root gap 뒷부분에 용가재로는 8패스를 추가하였다. 용접에서 용접자세는 1G로서 아래보기 자세로 수행하였는데 초기에 원활한 용접을 위해 두께 10 mm의 SUS304 판재의 back 판을 사용하여 가접하였다. Fig. 4는 용접된 시편에의 형상을 나

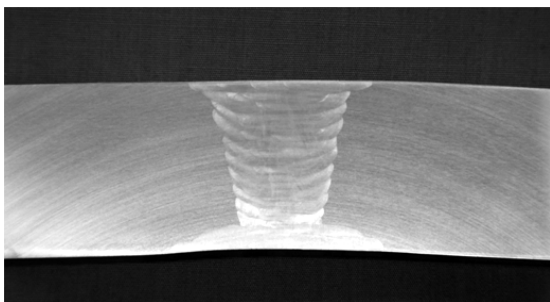


Fig. 4 Welded Alloy 617 strip

Table 3 Chemical composition of filler metal

Alloying element(≤wt%)										
C	Ni	Fe	Si	Mn	Co	Cr	Ti	P	Mo	Al
0.07	Bal.	0.33	0.3	0.3	11.29	22.5	0.42	0.003	8.8	1.1

타낸 것이다. AWS A 5.14-05 ERNiCrCoMo-1 (UNS N06617)에 따라 제조된 용접봉을 사용하였는데 화학적 조성은 Table 3과 같다⁶⁾.

3.2 용접부 기계적 물성치 측정

Fig. 5는 Alloy 617 판재 GTAW 용접부위에서 용접부의 기계적 물성치를 계장형 압입시험법으로 측정하기 위해 판재 용접부 주변을 절단한 시편(두께 방향)으로 모재, 열영향부(HAZ) 및 용융부에서 재료의 기계적 물성치를 측정하였다. 측정은 Data points를 되도록 많이 확보하기 위해 Fig. 5와 같이 3곳의 라인(Line)에서 측정하였는데 모재 및 용접부는 1.0 mm 간격으로, HAZ 부위는 0.1 mm 간격으로 측정하였다(압흔의 직경은 0.0325 mm 정도임)⁷⁾. 일반적으로 다층용접의 경우 용접층간에 열이력이 달라져서 같은 용착금속이라도 기계적 물성치가 다를 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서 용접시편은 다층 용접시 별도의 입열량 조절이 없었고 매 용접 pass시에 용착부의 온도를 측정된 결과 60-77℃ 범위에 있는 것으로 알려져⁶⁾ 있어서 압입시험이 수행된 3곳의 라인에서의 열이력의 영향은 크지 않을 것으로 보인다.

3.3 용접부 기계적 물성치 분석

Figs. 6-8은 Fig. 4의 Line 1,2,3을 따라 측정된 항복응력(YS)과 인장강도(TS)의 측정값을 나타내고 있다. Figs. 6-8에서 보면 항복응력과 인장강도 측정값들은 모재, HAZ 및 용융부의 각 영역에서 어느 정도의 변동(fluctuation)이 발견되고 있다. 따라서 각 영역에서의 항복응력과 인장강도 측정값을 대표할 수 있

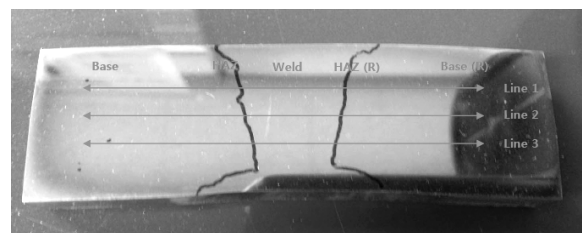


Fig. 5 Indented position in a welded Alloy 617 strip

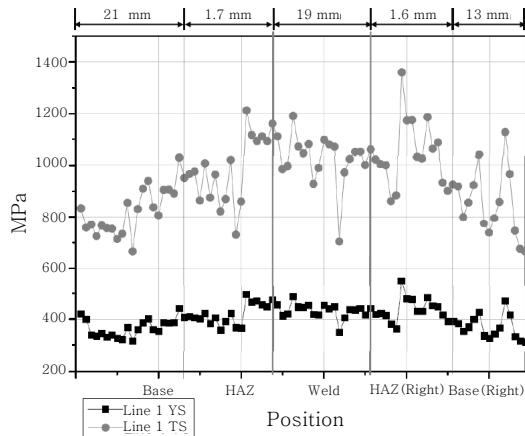


Fig. 6 Measured data along Line 1

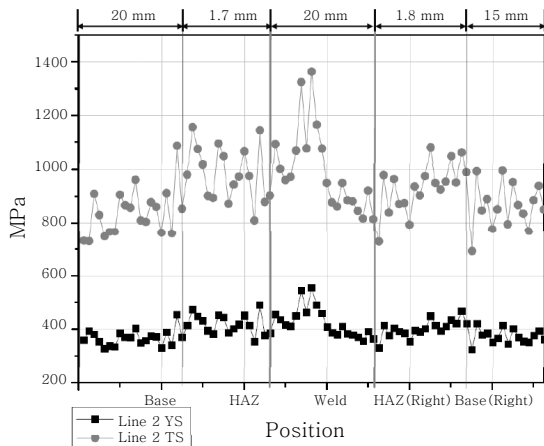


Fig. 7 Measured data along Line 2

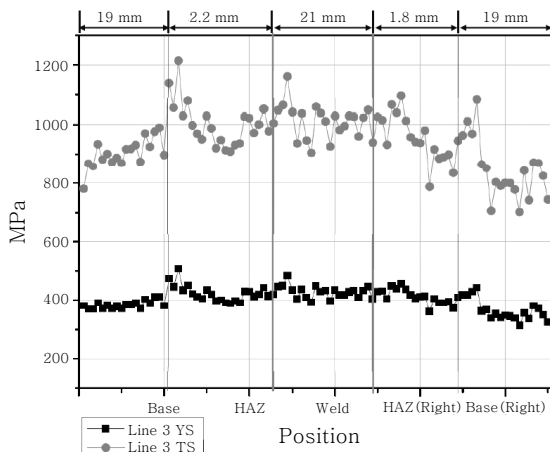


Fig. 8 Measured data along Line 3

도록 통계적으로 처리할 필요성이 있다.

Table 4는 Figs. 6-8의 측정 data를 이용하여 모재, HAZ 및 용융부에서 항복응력과 인장강도 측정값의 평균값, 표준편차 및 95% 하한 신뢰도 평균값 그리고

Table 4 Mechanical properties of Alloy 617 weld strap

	YS* (MPa)	TS** (MPa)
Base material		
- Average	369.7	852.7
- SD***	35.7	101.7
- 95% LCA****	364.2	837.0
- # of data points	115	115
HAZ		
- Average	417.4	980.2
- SD	36.3	106.1
- 95% LCA	411.8	963.7
- # of data points	105	105
Weld		
- Average	429.7	1014.8
- SD	37.9	108.7
- 95% LCA	421.5	991.4
- # of data points	60	60
Tensile test on base material ⁵⁾	346.6	811.1

* YS: Yield stress

** TS: Tensile strength

*** SD: Standard Deviation

인장시험에서 얻은 모재부위에서 상온 항복응력과 인장강도를 나타낸 것이다. 평균을 취하게 된 것은 Figs. 6-8에서 보듯이 측정 data가 같은 영역에서도 어느 정도 비산(scattering)되어서 영역을 대표할 수 있는 값을 구하기 위함이었다. Table 4에서 보면 계장형 압입 시험법을 이용하여 얻은 모재부위의 기계적 물성치의 값이 상온 인장시험에서 얻은 값과 차이가 있다. 즉, 95% 하한 신뢰도 평균값을 기준으로 할 때 금번의 계장형 압입시험에서 얻은 항복응력은 인장시험에서 얻은 값보다 약 5.1% 정도 크고 인장강도는 약 3.2% 정도 크게 나타났다. 따라서 본 실험에서 얻은 기계적 물성치를 용접부를 포함한 구조물의 설계입력자료로 사용하기 위해서는 예전 연구에서와^{2,8,9)} 같이 계장형 압입시험법에서 얻은 모재부위의 실험값에 기준한 HAZ 및 용융부에 대한 상대적 기계적 물성치 값을 도출할 필요가 있다.

Table 5는 Table 4의 측정 data를 이용하여 모재, HAZ 및 용융부에서 항복응력과 인장강도의 평균값을 모재부위에서의 평균값으로 정규화(Normalizing)한 것을 나타낸 것이다. Table 5에서 보면 HAZ 및 용융부에서 항복응력은 모재부위의 항복응력보다 각각 약 13.1%, 15.8% 정도 증가하고 있으며 인장강도는 모재부위의 인장강도보다 각각 약 15.1%, 18.4% 정도 증가하고 있다. 즉 HAZ 및 용융부에서 항복응력 및 인장강도가 모재에서의 값들보다 유의할 정도로 증가하고 있다.

Table 5 Normalized mechanical properties of Alloy617 weld strap based on 95% low confidence level

	Base material	HAZ	Weld
Yield stress	1.000	1.131	1.158
Tensile strength	1.000	1.151	1.184

Figs. 9-11은 모재, HAZ를 포함한 용접선 근처 그리고 용융부에서의 조직을 광학현미경(Optical Microscopy: OM)으로 관찰한 미세조직 사진이다.⁶⁾ Fig. 9의 모재 부위 OM 미세조직 사진에서 보듯이 결정립계가 안정된 결정립계를 보이고 있다. 그러나 용접부 OM 미세조직은 Fig. 10에서 보듯이 셀 수지상(cell dendrite)으로 매우 꼬불꼬불한 굴곡이 심한 결정립계를 보이고 있다. 이것은 용융온도에서 응고 후 상온까지 냉각되면서 나타나는 응고 결정립계 조직이다. Fig. 11은 Alloy 617 모재와 용융부 경계에서의 OM 미세조직 사진으로 HAZ를 포함한 용융선(fusion line) 주변을 나타낸 것이다.

용접금속의 결정은 응고 시 용접 열에 의하여 용융온

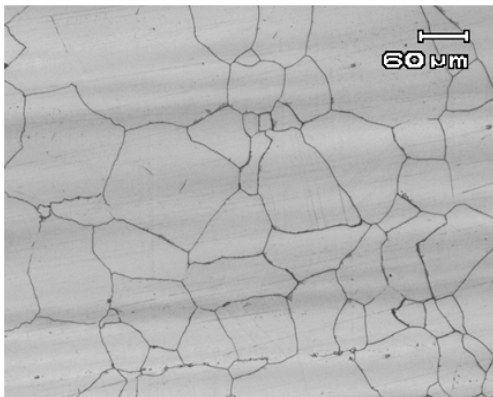


Fig. 9 Microstructure in base material

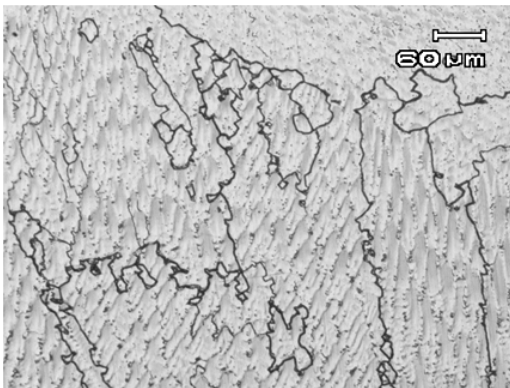


Fig. 10 Microstructure in weld

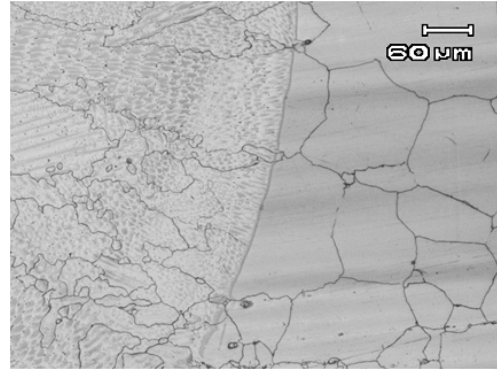


Fig. 11 Microstructure around fusion line

도 가까이 가열되어 결정립이 조대화된 모재 열영향부의 결정립에서 그 결정립과 동일한 결정방향으로 직접 성장을 시작하는 적층성장(epitaxial growth)을 보이고 있다.

한편 다층 용접의 경우 HAZ 부위는 복잡한 열이력과 coarse grained HAZ, fine grained HAZ, intercritical HAZ 및 subcritical HAZ 등의 영역에서의 상이한 조직과 그리고 좁은 영역으로 인하여 기계적 물성치 측정이 용이하지 않다. 본 연구에서는 용접된 부품에서 용접 물성치를 고려한 거시적 구조 거동을 파악하기 위한 연구의 일환으로 편의상 용접부를 모재, 열영향부 및 용착금속 등 3가지 영역으로만 구분하여 각 영역별의 대표적 기계적 물성치를 도출하였는데 향후에는 세분화된 HAZ 영역에서의 기계적 물성치를 도출하는 연구가 수행되어야 할 것으로 본다.

4. 결 론

Alloy 617의 용접부 기계적 물성치를 계장형 압입시험기를 이용하여 측정하고 분석한 결과는 다음과 같다.

1) HAZ 및 용융부에서의 항복응력 및 인장강도는 모재에 비해 유의할 정도로 증가하고 있다.

2) 본 연구 결과는 해당소재가 사용된 용접구조물의 거시적 구조특성을 이해하고자 할 때 모재 물성치로만 해석했던 예전의 방법에 비해 용접부 기계적 물성치를 사용함으로써 좀 더 신뢰성 있게 구조특성을 이해하고 평가하기 위한 구조해석의 기초자료로 이용될 수 있다.

References

1. George E. Linnert : Welding Metallurgy 1, American Welding Society, New York (1965)
2. 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
3. K. N. Song *et al.*, : Structural Strength Evaluation of a Lab Scale PCHE Prototype Under the Test Condition of the HELP, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Fall Meeting*, Chang-won, Korea, Nov. **7-9** (2012)
 4. 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 and Materials Engineering*, **22-2** (2009), 36-43 (in Korean)
 5. ISO TR29381 : Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties (2008)
 6. W. G. Kim *et al.* : Comparative Study on the High-Temperature Tensile and Creep Properties of Alloy 617 Base and Weld Metals, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **27-8** (2013), 2331-2340
 7. K. N. Song *et al.*, : Measurement of Weld Material Properties of Alloy617 Using an Instrumented Indentation Technique, *Proceedings of the Korean Welding and Joining Society Spring Meeting*, Daegu, Korea, May 23-24 (2013)
 8. K. N. Song and D. S. Ro : Measurement of Mechanical Properties in Weld Zone of Nuclear Material using an Instrumented Indentation Technique, *Journal of KWJS*, **30-3** (2012), 51-56 (in Korean)
 9. K. N. Song and S. D. Hong : Measurement of Mechanical Properties of SUS316L Plate Using an Instrumented Indentation Technique, *Journal of KWJS*, **31-2** (2013), 43-50 (in Korean)