

계장형 압입시험법에 의한 원자력 구조재료 용접 물성치 측정

송기남^{*,†} · 노동성^{**}^{*}한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부^{**}(주) 프론틱스Measurement of Mechanical Properties in Weld Zone of Nuclear Material
using an Instrumented Indentation TechniqueKee-Nam Song^{*,†} and Dong-Seong Ro^{**}^{*}Nuclear Hydrogen Reactor Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute,
Daejeon 305-353, Korea^{**}Frontics Ltd, Seoul 153-704, Korea[†]Corresponding author : knsong@kaeri.re.kr

(Received April 04, 2012 ; Revised June 11, 2012 ; Accepted June 27, 2012)

※ 본 논문은 2011년도 추계 대한용접·접합학회 (2011.11.10)에서 발표한 논문임

Abstract

Different microstructures in the weld zone of a metal structure including a fusion zone and heat affected zone are formed as compared to the base material. Thus, the mechanical properties in the weld zone are different from those in the base material. As the basic data for reliably understanding the structural characteristics of welded nuclear material, the mechanical properties in the weld zone and base material for a Zircaloy-4 strap and Hastelloy®-X alloy strap are measured using an instrumented indentation technique (IIT) in this study.

Key Words : Zircaloy-4, Hastelloy®-X alloy, Instrumentation indentation technique, Weld property

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 형성되며 이 부위에서는 모재와는 다른 미세조직이 형성되고 따라서 재료의 기계적 물성치도 모재의 그것과 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 그것과는 사뭇 다를 수 있다. 그럼에도 불구하고 원자력 기기 및 핵연료 구조물

의 용접 구조물 해석에서는 용접부위의 기계적 물성치에 대한 자료 부족과 단순화된 해석의 편리성으로 인해 용접부위의 기계적 물성치를 무시한 구조해석이 수행되어 왔다^{2,3)}. 그러나 용접된 구조물의 구조특성을 좀 더 신뢰성 있게 파악하기 위해서는 용접부, HAZ 및 모재의 기계적 물성치를 사용한 구조해석이 반드시 수반되어야 한다.

일반적으로 용접부의 기계적 물성치를 얻는 좋은 방법은 용융부, HAZ 등의 부위에서 표준 인장시험편을 채취하여 ASTM의 인장시험 절차에 따라 인장시험을 수행하는 것이다. 그러나 용접부가 좁고 경계면이 불확실한 경우에는 용접부에서 인장시험편의 채취가 상당히 곤란하므로 용접부에서 기계적 물성치를 얻기 위한 적절한 대체방법이 연구되어야 하며, 계장형 압입시험법은 어느 정도 신뢰성이 입증된 대체방법중의 하나로 알

려져 있다^{4,5)}.

본 연구에서는 원자력에 사용되는 재료에서 용접에 의한 기계적 물성치 변화를 파악하기 위해 질칼로이 판재와 Hastelloy[®]-X alloy 판재의 용융부, HAZ 및 모재 부위의 기계적 물성치를 계장형 압입시험법을 이용하여 처음으로 측정하고 정리한 것이다. 이 시험법을 사용한 이유는 본 연구의 대상인 원자력 구조물에서 용접부위가 매우 좁기 때문이다. 본 연구에서 얻은 결과는 해당소재가 사용된 용접구조물의 구조특성 분석 및 평가를 위한 기초자료로 이용될 수 있다.

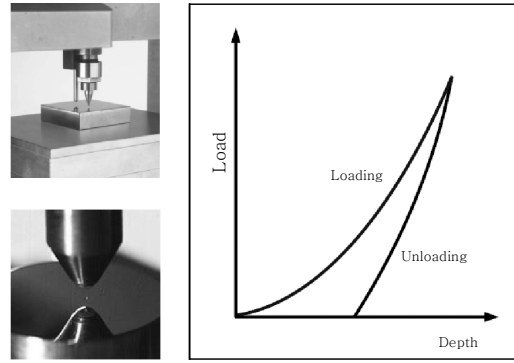
2. 계장형 압입시험법

계장형 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 남기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다. 이에 시험을 위한 표준 시편 채취가 필요 없어 운용중이거나 완료된 구조물에 직접 적용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

계장형 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 4에 상세히 나와 있다.

Fig. 1은 계장형 압입시험을 통하여 얻어지는 압입하중-압입 깊이 곡선을 나타낸 것이다. 실제 접촉 깊이를 결정하기 위해서는 우선 하중 제거 곡선을 역함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분하여 구한 기울기 값으로써 재료의 강성(Stiffness)인 S 를 평가한다. Fig. 1의 정보를 이용하고 ISO TR29381⁵⁾의 절차에 따라 재료의 인장물성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 계장형 압입시험장비인 Micro AIS를 이용하여 변위제어 압입시험을 수행하였다. 시험에 사용하는 지름 0.05 mm의 구형 압입자를 이용하고 최대 압



Indentation load-depth curve

Fig. 1 Indentation load-depth curve

입깊이 6 μm , 다중압입회수 6회, 하중제거비율 50%, 시험속도 0.03 mm/min의 시험조건으로 수행하였다.

3. 용접시편의 물성치 측정

3.1 Zircaloy 판재의 물성치

질칼로이(Zircaloy)는 중성자 경제성이 높아 핵연료 피복재 및 구조재로 사용되는 질코늄계 합금이며 핵연료 구조체인 지지격자체에 사용되는 질칼로이 판재는 냉간 압연된 Zircaloy-4 판재로서 대표적인 화학조성은 Table 1과 같다⁶⁾.

Fig. 2는 경수로(PWR; Pressurized Water Reactor) 핵연료집합체의 전반적인 형상을 나타내며, 핵연료봉

Table 1 Chemical composition of Zircaloy-4

Alloying element(wt%)			
Zr	Sn	Fe	Cr
Rest	1.20-1.70	0.18-0.24	0.07-0.13

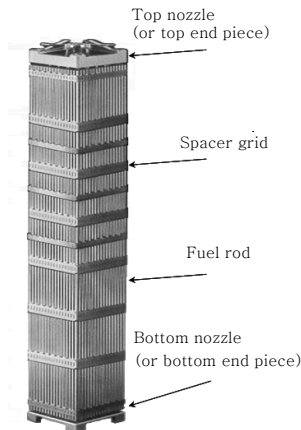


Fig. 2 PWR fuel assembly

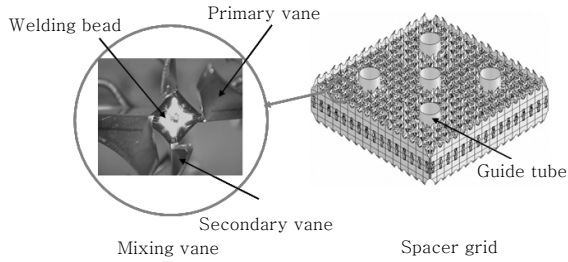


Fig. 3 Spacer grid assembly and weld bead

(fuel rod)의 피복재와 지지격자체(spacer grid assembly)에는 질칼로이 소재가 사용된다. Fig. 3은 지지격자체의 형상과 용접부 형상을 나타낸 것으로 흠이 있는 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고 엇갈린 격자판의 교차점 상·하부를 점용접한 egg-crate 형상의 구조물이다. 점용접은 TiG 용접, 전자빔 용접(EBW), 레이저빔 용접(LBW) 등의 특수용접법이 사용되고 있으나 근래에 국내·외의 지지격자체 제조업체에서는 상용 지지격자체 제조시에 용접비드 크기를 작게 하면서 용입깊이를 증가시키기 위해 EBW나 LBW 방법이 널리 사용되고 있는 추세이다. 지지격자체에서 용접부 용접비드 크기를 작게 하면 연료봉 사이로 흐르는 냉각수의 수력저항을 감소시켜 원자로 냉각펌프의 부하를 낮추어서 원자로 경제성을 향상시킬 수 있는 장점이 있고, 용접부 용입깊이를 증가시키면 지지격자체의 충격강도를 증강시켜서 핵연료집합체의 구조건전성을 향상시키는 장점이 있기 때문이다⁷⁾. 지지격자체의 구조특성인 지지격자체 충격강도는 재료의 기계적 물성치와도 밀접한 관련이 있다. 따라서 지지격자체 용접부위에서 재료의 기계적 물성치를 파악하는 것은 지지격자체 구조특성을 좀더 신뢰성있게 평가/예측할 수 있는 기초자료가 된다.

Fig. 4는 지지격자체 레이저 빔 용접부의 기계적 물성치를 계장형 압입시험법으로 측정하기 위해 지지격자체 점용접부 주변을 절단하여 에칭(etching)한 시편과

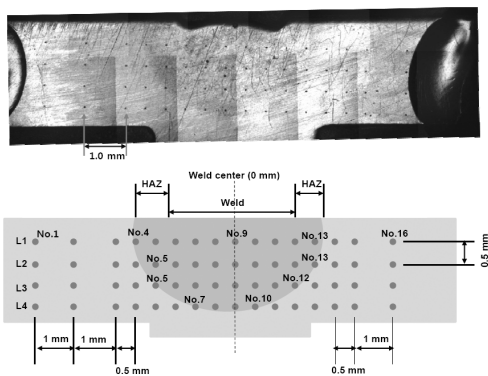


Fig. 4 Etched specimen and indented positions in Zircaloy-4 strip

Table 2 Welding conditions for the Zircaloy-4 spacer grid specimens

Peak power (kW)	3.20
Pulse width (ms)	6
Repeat	17
Number of shot	6

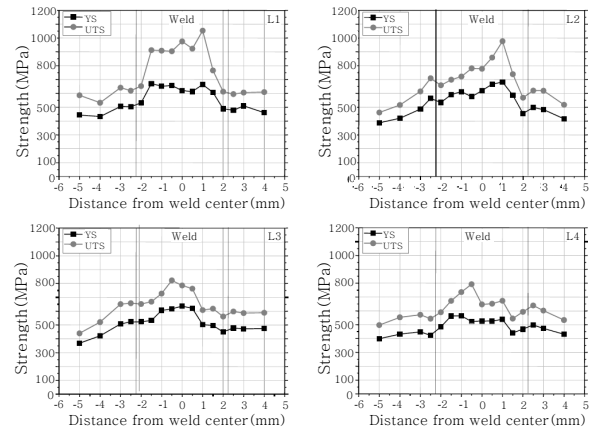


Fig. 5 Variation of mechanical properties in Zircaloy-4 strip

계장형 압입시험법으로 기계적 물성치를 측정한 부위와 위치를 나타낸 것으로 Fig. 4에서 용접부(Weld)를 중심으로 어둡게 나타난 영역이 용융부와 HAZ를 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 지지격자체 레이저 빔 용접부의 용접조건은 Table 2에 나타나 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 L1, L2, L3, L4 측정위치를 따라 기계적 물성치의 변화를 나타낸 것으로 모재에 비해 용융부 및 HAZ에서의 인장강도, 항복응력의 변화가 두드러지고 있다.

3.2 Hastelloy[®]-X alloy 판재의 물성치

Hastelloy[®]-X alloy는 니켈-철-크롬-몰리브덴 합금으로 산화저항성 및 고온강도가 우수하기 때문에 고온 구조재료로 널리 사용되며 대표적인 화학조성은 Table 3과 같다⁸⁾.

Fig. 6은 원자력에서 생산된 초고온 열(약 950℃)을 이용하여 수소를 생산하기 위한 초고온 가스열(VHTR: Very High Temperature Reactor)에 사용될 공정열

Table 3 Chemical composition of Hastelloy[®]-X alloy

Alloying element(wt%)									
Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
47	22	18	9	1.5	0.6	0.10	1	1	0.008

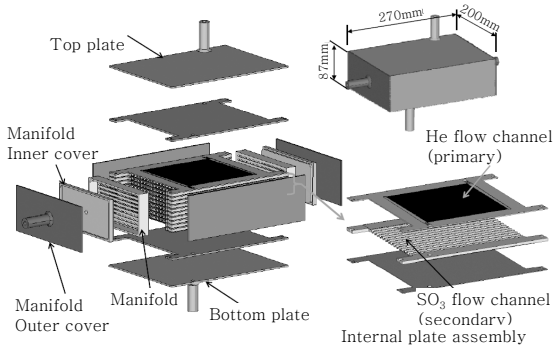


Fig. 6 Overall dimensions and parts of a PHE prototype

교환기의 소형 시제품을 구성하는 부품들을 나타낸 것으로 소형 시제품의 외면은 고온재료인 Hastelloy®-X alloy 판재로 감싸여져 있고 판재의 교차부위는 TIG 용접되어 있다.

근래에 공정열교환기 소형 시제품에 대하여 모재의 기계적 물성치만을 사용한 고온구조해석 결과에 의하면 Hastelloy®-X alloy 판재로 감싸지고 용접된 모서리 부위에서 비교적 높은 응력이 발생한 것으로 알려졌다³⁾. 따라서 공정열교환기 소형 시제품의 구조건전성을 좀 더 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 Hastelloy®-X alloy 판재 용접부위의 기계적 물성치를 확보하는 것이 필요한 것으로 보인다.

Fig. 7은 Hastelloy®-X alloy 판재 TiG 용접부위에서 용접부의 기계적 물성치를 계장형 압입시험법으로 측정하기 위해 판재 용접부 주변을 절단한 시편(두께 방향)으로 모재, 열영향부 및 용융부에서 재료의 기계적 물성치를 측정하였다. 판재 시편의 용접은 Argon gas 분위기에서 TIG용접을 시행하였고 용접조건은 Table 4와 같다. 계장형 압입시험에서는 이와 같은 시편 2개에 대하여 기계적 물성치를 측정하였다.

Fig. 8는 시편 1개에서 Fig. 8의 측정위치를 따라 기계적 물성치의 변화를 대표적으로 나타낸 것으로 용

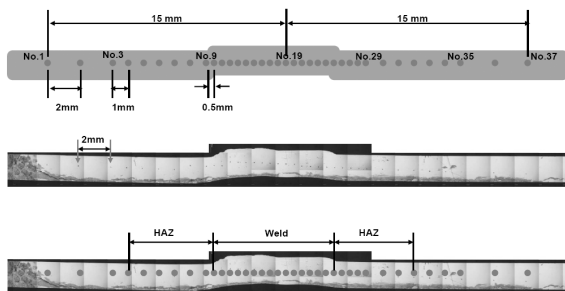


Fig. 7 Indented position in Hastelloy®-X strip

Table 4 Welding conditions for the Hastelloy®-X alloy specimens

Welding method	TIG welding
Welding current, voltage	60A 220V
Shielding gas, flow rate, discharge pressure	99.95% Argon 10 l/min. 1 bar

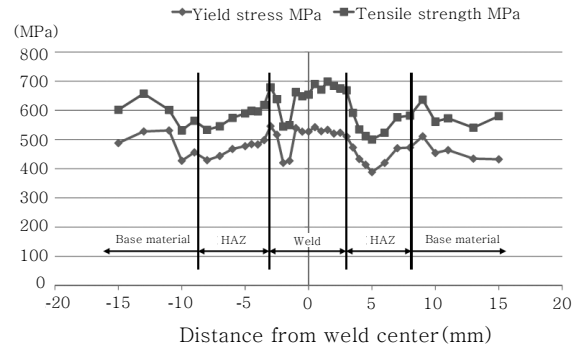


Fig. 8 Variation of mechanical properties in Hastelloy®-X strip

접부에서의 기계적 물성치(항복응력, 인장강도) 모두 모재보다 높게 나타나고 있으나 HAZ 부위에서는 모재보다 작게 나타나고(연화 현상) 있다. 이러한 현상이 일반적인가에 대한 확인여부는 용접부에 대한 미세조직 분석, 대체 시험을 포함한 추가시험을 통해 규명해야 될 것으로 보인다. 한편 용융부 중앙 부위에서 항복응력 및 인장강도 값이 급격히 작게 나타나는 것은 이 부위에 발생한 미세한 기공의 영향으로 추정되어 비정상적인 실험 data로 인식하여 실험 data 분석 및 처리에서 삭제하였다(뒤의 측정결과 분석 참조).

4. 측정결과 분석

4.1 Zircaloy 판재

Fig. 5의 실험 data를 이용하여 모재, HAZ 및 용융부에서의 기계적 물성치 평균값과 95% 신뢰도 하한 평균값을 구했다. 전체 실험 data에서 측정결과의 신뢰성이 부족한 것으로 판단되는 값을 제거하고 구한 기계적 물성치들의 평균값, 표준편차, 95% 신뢰도 하한 평균값 및 data point 개수 등이 Table 5에 나타나 있다.

Table 6는 Table 5에 있는 계장형 압입시험법을 통해 얻은 모재의 기계적 물성치 측정값(95% 신뢰도 하한 평균값 기준)으로 HAZ 및 용융부에서의 기계적 물

Table 5 Mechanical properties of Zircaloy weld strap

	YS* (MPa)	Tensile strength (MPa)
Base material		
- Average	463.3	582.0
- SD**	30.3	39.9
- 95% LCA***	453.4	568.9
- # of data points	27	27
HAZ		
- Average	540.6	676.9
- SD	36.0	52.7
- 95% LCA	526.7	656.6
- # of data points	20	20
Weld		
- Average	636.3	868.7
- SD	29.9	97.2
- 95% LCA	622.1	822.7
- # of data points	14	14

* YS: Yield stress
 ** SD: Standard Deviation
 *** LCA: Lower Confidence Average

Table 6 Normalized mechanical properties of Zircaloy weld strap

	YS	Tensile strength
Base material	1.000	1.000
HAZ	1.162	1.154
Weld	1.372	1.446

성치를 정규화한 것이다. 모재, HAZ 및 용융부에서 기계적 물성치 변화를 Table 6에서 살펴보면 HAZ에서 항복응력은 모재의 값에 비해 약 16.2% 증가하며 용융부에서는 모재보다 약 37.2% 증가하고 있다. 또한 인장강도는 모재의 값에 비해 HAZ에서 약 15.4% 증가하며 용융부에서는 모재보다 약 44.6% 증가하고 있다.

한편 모재의 인장시험편으로부터 얻은 물성치⁹⁾ (항복응력 379.5 MPa, 인장강도 595.5MPa)와 금번 연구의 계장형 압입시험법으로부터 얻은 모재의 물성치를 비교할 때 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 계장형 압입시험에서 얻은 95% 신뢰도 하한 평균값은 모재 물성치와 비교할 때 항복응력은 14.06% 크게 예측하는 반면, 인장강도는 4.47% 작게 예측하고 있다. 이와 같은 차이는 계장형 압입시험법과 ASTM 절차에 따른 인장시험으로부터 얻은 차이 혹은 오차로 볼 수 있으며 설계/해석 요원은 data 사용시 이러한 차이를 인지하고 설계/해석/연구 등에서 사용해야 할 것으로 보인다.

Table 7 Mechanical properties of Hastelloy®-X alloy weld strap

	YS (MPa)	Tensile strength (MPa)
Base material		
- Average	432.1	772.8
- SD	25.8	30.8
- 95% LCA	418.7	756.8
- # of data points	12	12
HAZ		
- Average	415.8	771.0
- SD	25.0	43.0
- 95% LCA	402.1	747.5
- # of data points	11	11
Weld		
- Average	472.8	865.2
- SD	13.0	44.5
- 95% LCA	466.1	842.1
- # of data points	12	12

Table 8 Normalized mechanical properties of Hastelloy®-X alloy weld strap

	YS	Tensile Strength
Base material	1.000	1.000
HAZ	0.960	0.988
Weld	1.113	1.113

4.2 Hastelloy®-X alloy 판재

Fig. 8와 같은 실험 data를 이용하여 모재, HAZ 및 용융부에서의 기계적 물성치 평균값과 95% 신뢰도 하한 평균값을 Table 7과 같이 얻었다. 용융부 중앙 부위에서 항복응력 및 인장강도 값이 급격히 작게 나타나는 것은 이 부위에 발생한 미세한 기공의 영향으로 추정되어 비정상적인 실험 data로 인식하여 실험 data 분석 및 처리에서 삭제하였다.

Table 8은 계장형 압입시험법으로 측정된 모재의 기계적 물성치(95% 신뢰도 하한 평균값 기준)로 HAZ 및 용융부에서의 기계적 물성치를 정규화한 것이다. 모재, HAZ 및 용융부에서 기계적 물성치 변화를 Table 8에서 살펴보면 HAZ에서 항복응력은 모재의 값에 비해 약 4.0% 정도 감소하였고 용융부에서는 모재보다 약 11.3% 증가하고 있다. 또한 인장강도는 모재의 값에 비해 HAZ에서 약 1.2% 감소하였고 용융부에서는 모재보다 약 11.3% 증가하고 있다.

한편 모재의 Website⁸⁾에 있는 물성치(항복응력 380 MPa, 인장강도 765 MPa)와 금번 연구의 계장형 압

입시험법으로부터 얻은 모재의 물성치를 비교할 때 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 계장형 압입시험에서 얻은 95% 신뢰도 하한 평균값은 모재 물성치와 비교할 때 항복응력은 약 10.18% 정도 크게 예측하는 반면, 인장강도는 1.07% 작게 예측하고 있다. 이와 같은 차이는 계장형 압입시험법과 ASTM 절차에 따른 인장시험으로부터 얻은 차이 혹은 오차로 볼 수 있으며 설계/해석 요원은 data 사용시 이러한 차이를 인지하고 설계/해석/연구 등에서 사용해야 할 것으로 보인다.

5. 결 론

경수로 핵연료의 구조재로 널리 사용되고 있는 질칼로이 판재와 초고온 가스로의 열교환기 유력 후보재료로 논의되고 있는 Hastelloy[®]-X alloy 판재에서 용융부, HAZ 및 모재부위의 기계적 물성치를 계장형 압입 시험법으로 측정하고 측정된 자료를 통계적으로 처리하여 분석하였다.

1) 질칼로이 판재의 용접 용융부 및 HAZ에서의 기계적 물성치중에서 항복응력 및 인장강도는 유의할 정도로 크게 증가하였다.

2) Hastelloy[®]-X alloy 판재의 용접 용융부에서 항복응력 및 인장강도는 모재에 비해 유의할 정도로 증가하였으나 HAZ에서는 항복응력, 인장강도가 모재에 비해 유의할 정도로 감소하였다.

참 고 문 헌

1. George E. Linnert : Welding Metallurgy 1, American Welding Society, New York (1965)
2. K. N. Song : Structural Design Considerations on the Spacer Grid Assembly of PWR Nuclear Fuel, Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, **7-3** (2011), 54-60 (in Korean)
3. K. N. Song *et al.*, : Elastic High-temperature Structural Analysis on the Small Scale PHE Prototype Considering the Pipeline Stiffness, Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, **7-3** (2011), 48-53 (in Korean)
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 & Materials Eng., **22-2** (2009), 36-43 (in Korean)
5. ISO TR29381 : Metallic Materials-Instrumented Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties (2008)
6. Technical data sheet of reactor grade zirconium alloys for nuclear waste disposal, <http://www.wahchang.com/>
7. K. N. Song *et al.*, : New Spacer Grid to Enhance Mechanical/Structural Performance; Journal of Nuclear Science and Technology, **47** (2010), 295-303
8. Hastelloy[®]-X alloy, Retrieved June 26, 2012 from <http://www.haynesintl.com/pdf/h3009.pdf>
9. M. K. Shin *et al.*, : Optimization of a Nuclear Fuel Spacer Grid Spring Using Homology Constraints, Nuclear Engineering and Design, **238** (2008), 2624-2634