

한국표준원전 주급수 밸브의 파괴인성 평가

윤지현[†] · 홍석민* · 이봉상*

Fracture Toughness Evaluation for Main Feed Water Valves of Korean Standard Nuclear Power Plant

Ji-Hyun Yoon[†], Seokmin Hong* and Bong-Sang Lee*

(Received 12 June 2015, Revised 29 June 2015, Accepted 29 June 2015)

ABSTRACT

The fracture toughness of 2.25Cr-1Mo cast steel (SA217-WC9) samples which were taken from the check valves of feed water piping of Korean Standard Nuclear Power Plant(KSNPP) was measured by Master Curve method. The measured T_0 reference temperature of SA217-WC9 steel was -30°C . The obtained T_0 was compared to the derived value from Charpy impact test data following to SINTEP procedure. The heat-to-heat variation in fracture toughness of SA217-WC9 steel was observed. It was found that the low toughness of a heat of SA217-WC9 steel was attributed to the coarse MnS inclusion originated by high sulfur content as the results of microanalyses.

Key Words : Feed Water Valve(주급수 밸브), Fracture Toughness(파괴인성), Master Curve(마스터커브), SA217-WC9 Steel, Charpy Impact Test(샤르피 충격시험)

기호설명

K_{Jc} = An elastic-plastic equivalent stress intensity factor derived from the J-integral at the point of onset of cleavage fracture, J_C

$K_{Jc(\text{med})}$ = A median toughness for a data set

T_0 = The test temperature at which the median of the K_{Jc} distribution from 1T size specimen will equal $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$.

1. 서론

원자료를 비롯한 대형 구조물을 용접부 없이 제작하는 것은 거의 불가능하다. 용접부는 모재(base

material)와는 다른 화학조성 및 미세조직을 갖는 것이 일반적이며, 용접 잔류응력 완화를 위해 실시되는 후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)에 의해 주변 모재의 기계적 특성이 열화될 가능성이 있다⁽¹⁾. 따라서, 용접후열처리 후에 용접재 뿐 아니라 주변 모재의 기계적특성을 평가하여 안전에 필요한 구조재로서의 특성을 만족하는지 여부를 확인하는 것이 중요하다.

원전 건설시에는 기기를 설치하기 전에 기기 제작에 사용된 것과 동일한 소재에 대해서 실제 현장 용접과정에서 후열처리에 의해 모재에 가해지는 것과 유사한 조건으로 모의 용접후열처리를 실시한 후, 재료시험을 통해 관련기준의 만족 여부를 재료시험 성적서에 기록해야 한다⁽²⁾.

최근에 한국표준원전 한울원자력 3호기 증기발생기 교체를 위해 지름 12인치 주급수 배관을 절단하는 작업을 하는 과정에서 결함이 발견되었다. 이에 따른 정비계획을 수립하는 과정에서 2.25Cr-1Mo강

[†] 회원, 한국원자력연구원

jhyoon4@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-8554 FAX: (042)868-8549

* 한국원자력연구원

주조재로 제작된 체크밸브 재료에 필수로 실시해야 하는 모의 용접후열처리(Simulated-PWHT) 기록이 미비한 것이 확인되었다. 설치된 배관과 밸브에 대해서는 용접후열처리가 실시되었으나 모의후열처리 및 열처리 후 재료시험이 수행되지 않았던 것이다.

이후, 원전에서 교체된 모의후열처리 기록 미보유 밸브에서 직접 시료를 채취하여 인장 및 샤르피(Charpy) 충격시험을 실시하여 재료의 건전성을 평가하였다. 또한, 본 연구에서 용접후열처리후 재료의 균열 진전에 대한 저항성을 평가하기 위해 총 7개 밸브에 대해 파괴인성 시험을 수행하였으며 마스터 커브(Master Curve) 방법으로 해석하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

시험에 사용된 시험편(test coupon)은 약 35 mm 두께의 7개의 한울 3호기 주급수 밸브에서 채취되었으며 2.25Cr-1Mo강 주조품인 SA217-WC9 재질이다. Table 1에 ASME code에 등재되어 있는 SA217-WC9 강의 화학조성을 나타내었다. 밸브는 미국 Atwood & Morrill 사에서 제작하였으며, 밸브에 사용된 주조품은 미국 PRL 사에서 공급하였다.

파괴인성시험에는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 25.4 mm 두께의 표준 1T-C(T) 형태의 시험편을 7개의 밸브로부터 각 3개씩, 총 21개를 가공하여 사용하였다.

초기 균열길이가 시험편 너비의 약 50%가 되도록 예비균열(fatigue pre-crack)을 만든 후, 시험편 양면에 각각

Table 1 Chemistry of SA217-WC9 steel (in wt%).

Cr	Mo	Si	Mn	C	S	P
2.00-2.75	0.90-1.20	0.60 max.	0.40-0.70	0.05-0.16	0.045 max.	0.045 max.

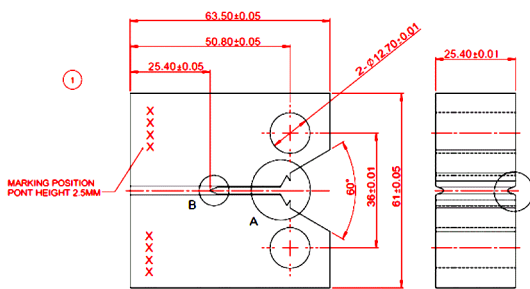


Fig. 1 Drawing of fracture toughness test specimen

두께의 10% 깊이에 해당하는 측면홈(side-groove)을 가공하였다. 이 때 측면홈 안쪽 끝의 곡률 반경은 0.5 mm, 각도는 45°로 하였다.

2.2 시험장치 및 시험절차

MTS 810 유압식 재료시험기를 사용하여 변위제어 방식으로 파괴인성 시험을 실시하였다. 저온시험 시에는 PID controller가 장착된 강제대류식 environmental chamber를 이용하여 시험편을 냉각시켰다. 시험편의 온도는 점용접하여 부착시킨 열전대를 통해 직접 측정되었으며 시험중, 목표온도에서 ±0.2°C 이내의 오차로 유지되었다. 시험을 실시하기 전에 시험편의 온도가 목표온도에서 30분 이상 유지되도록 하였다. 시험 시에는 하중선 변위(load-line displacement)를 측정하기 위해 COD(clip-on-displacement) gage를 시험편 하중선 knife edge에 부착하였다.

파괴인성시험은 1.7°C(35°F)에서 변위제어 방식으로 수행되었고 하중속도는 0.5 mm/min이었다.

2.3 해석절차

일반적으로 체심입방형(Body-Centered-Cubic, BCC) 결정구조를 가진 금속에서는 특정한 온도구간에서 파괴인성이 급격히 떨어져서 취성파괴 양상을 보이기 시작하는 연성-취성 천이온도(Ductile-Brittle Transition Temperature, DBTT) 구간이 나타난다⁽³⁾. 천이온도구간에서는 측정된 파괴인성의 편차가 크고 시험편의 크기에 대한 의존성이 뚜렷하게 나타나는 것이 특징이다. 이러한 파괴인성의 시험편 크기 의존성은 와이블(Weibull) 확률분포를 따른다⁽⁴⁾.

구조용 페라이트강 시험편에 대해서 연성-취성 천이온도 구간에서 ASTM E399⁽⁵⁾에 따른 유효 K_{Ic} 값을 얻을 수 있는 경우는 매우 드물며, 일반적으로 벽개파괴(cleavage fracture)의 시점에서 구한 J적분값을 식 (1)에 따라 변환하여 K_{Ic} 값을 얻는다.

$$K_{Ic} = \sqrt{Jc \frac{E}{1-\nu^2}} \quad (1)$$

여기서 Jc 는 벽개파괴 개시점에서의 J적분값, E는 탄성계수, ν 는 포와송비이다.

같은 온도에서 6개 이상의 K_{Ic} 데이터 세트로부터 와이블 확률분포상 50%의 파괴확률을 갖는 K_{Ic} (med) 을 구한 후, 식 (2)에 나타난 온도와 $K_{Ic}(\text{med})$ 의

실험적 관계를 나타낸 곡선인 마스터 곡선(Master Curve)을 따라 시험 재료의 $K_{Jc(med)}$ 의 온도에 따른 변화를 유추할 수 있게 된다. $K_{Jc(med)}$ 이 $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 일 때의 온도를 T_0 로 나타내고 이를 천이특성 참조온도로 정의한다⁶⁾.

$$K_{Jc(med)} = 30 + 70 \cdot \exp[0.019(T - T_0)] \quad (2)$$

($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}, ^\circ\text{C}$)

본 연구에서는 T_0 참조온도 파괴인성을 구하는 표준절차인 ASTM E1921-13a "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range"에 따라 SA217-WC9 밸브 재료의 파괴인성을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마스터커브 파괴인성

모든 시험편에 대한 파괴인성 시험결과를 Table 2에 정리하였다. 대부분의 시험편에 대해 ASTM E1921의 데이터 유효성 요건을 만족하는 K_{Jc} 값을 구할 수 있었다. 측정된 K_{Jc} 값들은 대부분 $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 를 넘었으며, 일부 시험편은 연성파괴(ductile fracture)되어 시험 종료시까지 균열이 안정적으로 진전하는 양상을 보여서 K_{Jc} 유효성 요건을 초과할 정도로 시험 온도에서 비교적 파괴인성이 높은 것으로 나타났다.

연성파괴 양상을 보인 6개의 시험편을 제외한 총 15개의 시험데이터에 대해 연성-취성 천이온도구간의 온도와 K_{Jc} 파괴인성의 관계를 통계적으로 나타낸 마스터커브 곡선을 Fig. 2와 같이 구했다. 마스터커브 곡선상에서 $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 해당하는 온도인 참조온도 T_0 는 -30.1°C 로 계산되었다.

ASTM E1921의 X4 조항에서는 시험에 사용된 시험편의 유한한 개수 및 일반 실험오차를 고려한 여유도(margin) 조정값을 식 (3)과 같이 제시한다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\beta^2}{r} + \sigma_{\text{exp}}^2} \quad (3)$$

여기서, β 는 시험편 개수 불확실성 인자($K_{Jc(med)} \geq 83 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 인 경우, 18°C), r 은 T_0 계산에 사용된 총 시험편 개수, σ_{exp} 는 시험의 불확실성 (표준 교정 절차를 사용한 경우, 4°C)을 의미한다.

Table 2 Fracture toughness test results for specimen taken from valves of feed water piping

Heat	ID	$K_{Jc}(\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5})$	K_{Jc} Validity
94265	V0002-1	-	Invalid(Ductile)
	V0002-2	185	Valid
	V0002-3	-	Invalid(Ductile)
94222	V1036-1	163	Valid
	V1036-2	130	Valid
	V1036-3	188	Valid
94209	V1037-1	-	Invalid(Ductile)
	V1037-2	-	Invalid(Ductile)
	V1037-3	261	Valid
94210	V1039-1	98	Valid
	V1039-2	101	Valid
	V1039-3	121	Valid
	V1043-1	133	Valid
	V1043-2	131	Valid
	V1043-3	212	Valid
	V1046-1	114	Valid
	V1046-2	145	Valid
	V1046-3	95	Valid
94211	V1044-1	-	Invalid(Ductile)
	V1044-2	152	Valid
	V1044-3	-	Invalid(Ductile)

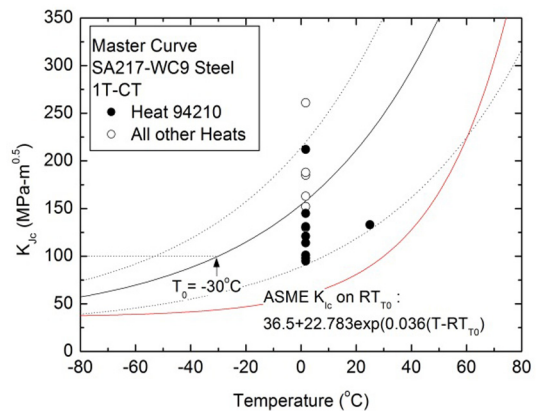


Fig. 2 Master Curve analysis result and ASME K_{Jc} reference fracture toughness curve for SA217-WC9 steel.

X4 조항에 따라 금번 시험에서 $\beta=18^\circ\text{C}$, $r=15$, $\sigma_{\text{exp}}=4^\circ\text{C}$ 를 대입하면, 결정된 T_0 의 표준편차는 6.1°C 이다. 따라서 95% 신뢰도를 가정한 여유도 $2\sigma=12.2^\circ\text{C}$ 이다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 1개의 데이터를 제외하

고 모든 데이터가 95% 신뢰도 구간 안에 위치하였으나, Heat 94210 소재의 파괴인성이 다른 Heat 소재에 비해 전반적으로 떨어지는 경향을 보였다. 2개의 그룹으로 분리하여 계산한 참조온도 T_0 는 각각, -18.4°C 와 -38.7°C 로 Heat 94210이 약 20°C 높았다.

ASME Code Section XI의 Appendix G는 구조용 페라이트강의 파괴역학 해석에 필요한 참조 파괴인성 특성의 하한값을 식 (4)와 같이 제공한다⁽⁷⁾.

$$K_{Ic} = 36.5 + 22.783e^{(0.036(T - RT_{NDT}))} \text{MPa} \sqrt{\text{m}} \quad (4)$$

또한, ASME Code Section XI, Appendix G에서는 파괴인성 마스터커브 시험을 통해 상기의 RT_{NDT} 값을 대체할 수 있는 RT_{T_0} 를 (5)와 같이 규정한다.

$$RT_{T_0} = T_0 + 19.4^\circ\text{C} \quad (5)$$

한국 표준원전 주급수 벨브 재료에 대한 마스터커브 시험결과에 표준편차의 2배에 해당하는 12.2°C 의 여유도(margin)를 더해 구한 RT_{T_0} 는 1.5°C 였다. 이 값을 식 (4)에 대입하여 K_{Ic} 곡선을 구하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, ASME K_{Ic} 참조파괴인성 곡선은 충분히 보수적임을 확인하였다.

3.2 마스터커브 파괴인성과 샤르피 충격인성의 상관관계

Fig. 3에 마스터커브 파괴인성 시험에 사용된 것과 동일한 소재들에 대한 샤르피 충격시험 데이터를 나타내었다. 1.7°C 에서 평균 충격흡수에너지는 47 J이었다. 마스터커브 파괴인성과 동일하게 Heat 94210 소재의 충격인성이 다른 Heat의 소재에 비해 전반적으로 떨어지는 경향을 보였다.

샤르피 충격인성과 마스터커브 파괴인성을 연관성에 대해서는 많은 연구자들의 보고가 있었으나, 유럽연합의 구조건전성평가 절차인 SINTAP(Structural Integrity Assessment Procedure)⁽⁸⁾의 특성 관계식이 가장 널리 사용되고 있다. SINTAP에 따르면, 충격흡수에너지가 27 J인 온도는 마스터커브 파괴인성시험으로부터 얻은 참조온도 T_0 보다 통계적으로 약 18°C 높다. 또한 절차서에 프로 주어진 시험온도와 충격흡수에너지의 관계를 이용하면 샤르피 흡수에너지로부터 T_0 참조온도 근사값을 유도할 수 있다. 상세한 절차는 참고문헌에 기술되어 있다.

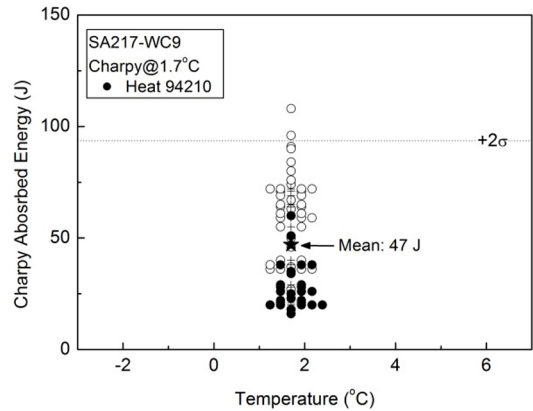


Fig. 3 Charpy impact test results for SA217-WC9 steel

Table 3 Master Curve analysis of data measured for SA217-WC9 steel.

	T_0 derived from Charpy data ($^\circ\text{C}$)	Measured T_0 ($^\circ\text{C}$)
Heat 94210	-17.0	-18.4
All the other Heats	-36.8	-38.7
Total	-29.3	-30.1

이와 같은 방법으로 샤르피 충격시험 결과로부터 구한 T_0 참조온도를 Table 3에 실제 시험결과와 비교하여 나타내었다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이, 전체 시험편 및 Heat 94210 소재와 그 이외의 소재로 나누어 충격흡수에너지로부터 유도한 T_0 참조온도가 실측치와 2°C 이내의 차이만 보일 정도로 잘 맞았다. 따라서 본 연구에 사용된 SA217-WC9강의 경우에는 SINTAP에서 제시하고 있는 마스터커브 파괴인성과 샤르피 충격인성의 관계가 실제 재료의 거동을 잘 나타내고 있다고 판단된다.

3.3 마스터커브 파괴인성과 미세조직의 상관관계

동종 금속재료에서 heat에 따라 파괴인성의 차이가 발생하는 이유는 화학조성, 열처리, 가공공정 등의 차이로 인한 미세조직적인 차이 때문이다⁽⁹⁾. 따라서 상대적으로 나쁜 파괴인성을 보인 Heat 94210의 미세조직적 원인을 분석하기 위해 시험후의 파면을 미세 관찰하고, 화학조성을 분석하였다.

Fig. 4는 가장 낮은 파괴인성을 나타낸 시험편의 파면을 SEM/EDS(Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy)로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 파면상의 균열이 비교적 조대한 MnS

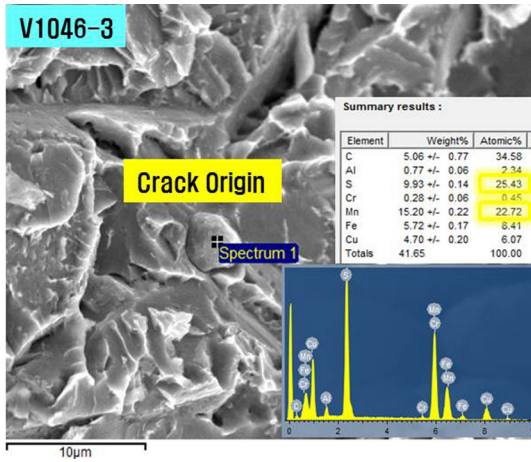


Fig. 4 SEM/EDS analysis for a fracture surface of SA217-WC9 steel specimen showing low toughness

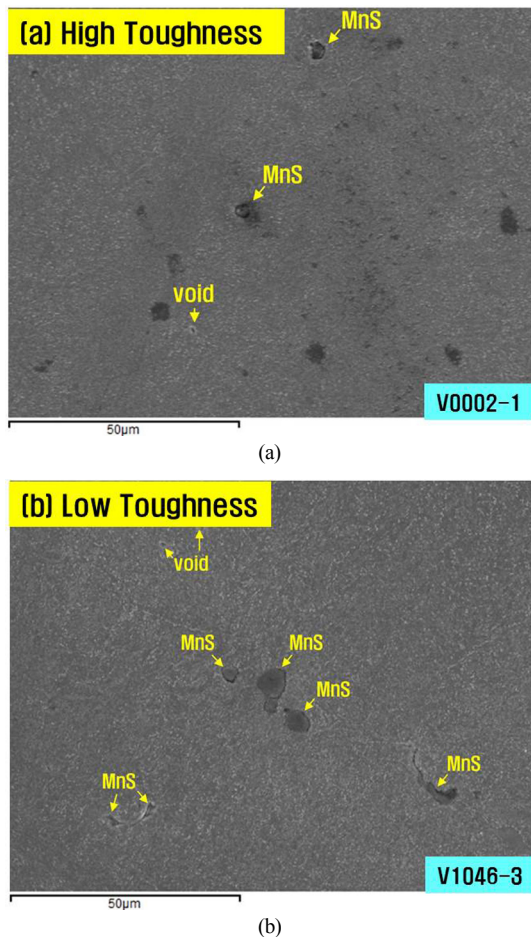


Fig. 5 Scanning electron micrographs of SA217-WC9 steel with (a) high toughness and (b) low toughness

Table 4 Chemistry of specimens showing high toughness and low toughness

sample \ wt%	C	Mn	Mo	P	S
V0002-1	0.147	0.650	1.02	0.019	0.005
V1046-3	0.153	0.638	0.95	0.016	0.010

개재물로부터 시작되어 전파된 것이 관찰되었다. 조대한 MnS개재물은 Fig. 5의 (a)와 (b)의 비교에서 알 수 있는 바와 같이, 파괴인성이 높은 시험편에서는 훨씬 적은 숫자로 관찰되었다.

개재물 생성량 차이의 원인 분석을 위해 높은 파괴인성을 보인 시험편과 낮은 파괴인성을 보인 시험편에 대해 각각 화학조성 분석을 실시한 결과를 Table 4에 정리하였다. 파괴인성이 낮은 시험편의 황 함량이 파괴인성이 높은 시험편에 비해 2배 높은 것으로 분석되었다. 따라서, Heat 94210소재의 높은 황 함량이 조대한 MnS 개재물의 생성을 조장하였고, 개재물이 비교적 낮은 응력에서도 파괴를 쉽게 일어나게 한 것으로 판단된다.

4. 결론

2.25Cr-1Mo강 주조재로 제작된 한국표준원전 주급수 밸브의 파괴인성을 1.7°C에서 평가한 결과, 대부분의 시험편이 100 MPa√m 이상의 파괴인성을 보였으며 일부 시험편에서는 연성파괴 거동을 보였다. 마스터커브 해석으로부터 구한 T₀ 참조온도는 -30°C였으며, 샤르피 충격시험결과로부터 유도한 값과 거의 일치하였다.

미세조직 분석결과, 파괴인성이 낮은 시험편에서 조대한 MnS 개재물들이 더 많이 관찰되었으며 이는 상대적으로 높은 황의 함량에 기인한 것으로 분석되었다.

후기

시험편과 관련자료를 제공해 주신 한국수력원자력(주) 중앙연구원에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Masubuchi, K., 1980, *Analysis of Welded Structures-*

- Residual Stress and Distortion and Their Consequences*, Pergamon Press, Oxford, NY.
- (2) Kim, H., Lee, Y., Park, S., Lee, K., and Lee, J., 2014, "Effect of Simulated Post Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties of Low Alloy Steel Components" *Proceedings of 2014 KPVP Annual Meeting*, Busan, Korea, pp. 145-146.
- (3) Reed-Hill, R. E. and Abbaschian, R., 1996, *Physical Metallurgy Principles*, 3rd ed., PWS Publishing Company, Boston, MA, pp. 830-832.
- (4) McCabe, D. E., Merkel, J. D., and Wallin, K., 2005, *An Introduction to The Development and Use of The Master Curve Method*, MNL 52, ASTM Manual Series, Philadelphia, PA.
- (5) ASTM, 2012, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials," ASTM E399-12.
- (6) ASTM, 2013, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature T_0 , for Ferritic Steels in The Transition Range," ASTM E1921-13a
- (7) ASME, 2013, Fracture Toughness Criteria for Protection Against Failure," *ASME B&PV Sec. XI*, App. G.
- (8) Bannister, A. C., 1998, Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry (SINTAP), Sub-Task 3.3 Report: Final Issue Determination of Fracture Toughness from Charpy Impact Energy: Procedure and Validation, British Steel plc., Rotherham, UK.
- (9) Yoon, J. H., Lee, B. S., and Hong, J. H., 2006, "Effects of Microstructure on J-R Fracture Resistance of Korean-made SA508-Gr.3 Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 38, No. 12, pp. 1586-1592.