

영광 원자력 발전소 원자로 소재의 가동전 재료 물성 특성

김 국철* · 김 정태* · 석 진익* · 권 희경* · 성 운학*

Evaluation of the Preirradiation Baseline Material Characteristics for Yonggwang Nuclear Reactor Pressure Vessel

K. C. Kim, J. T. Kim, J. I. Suk, H. K. Kwon and U. H. Sung

Key Words : Baseline Test, 파괴인성(Fracture Toughness), 기준무연성 천이온도(Nil-Ductility Transition Reference Temperature : RT_{NDT})

Abstract

Nuclear reactor pressure vessel should be safety even in the case that hypothetical defects with allowable size are in vessel. Therefore, the materials should have excellent fracture resistance characteristics. The purpose of this study is to analyze the results of preirradiation baseline test of nuclear pressure vessel for Yonggwang Unit 5/6. In experiments, drop weight tests and impact tests are carried out to obtain nil-ductility transition reference temperature, RT_{NDT} , and static and dynamic fracture toughness tests are performed to compare with K_{IR} curve in accordance with ASME Sec.III. The test results show that the materials had sufficiently fracture resistance characteristics for 40 years of design life.

1. 서 론

원자로 압력용기는 핵연료가 핵분열을 일으켜 열을 발생시키는 로심장부를 둘러싸고 있어 가동 중 높은 에너지에 의해 조사취화를 받는다. 따라서, 체계적인 발전소 수명관리를 위해 중성자에 의한 가동중 취화 정도를 평가하는 감시시험이 수행되어야 한다. 감시시험에는 먼저, 조사전 물성을 평가한 후 조사에 따른 열화를 측정하여 원자로의 수명 및 건전성을 평가하게 된다. 조사취화 후에도 원자로의 건전성을 입증하기 위해서는 저인성, 가압열충격, 압력-온도곡선문제가 USNRC 및 ASME 규정에 만족되어야 한다. 이 중 가압열충격, 압력-온도 곡선 문제는 원자로 내에 일정 크기의 결함이 존재하더라도 사고 및 운전시 건전함을 보여야 하므로 원자로소재는 우수한 파괴저항 특성을 보여야 한다. 현재 건전성평가 규정에는 이러한 파괴특성을 기준 무연성 천이온도를 바탕으로 평가하도록 되어 있다. 기준무연성천이온

도는 낙중시험과 충격시험을 통해 얻어지며 정적, 동적파괴인성시험을 통해 그 유효성이 검증되어진다.

한중은 영광 3,4 호기를 시점으로 원자로를 자체 제작하여 왔으며 그 동안 제강기술개발을 통해 많은 개선을 이루어 왔다. 최근 제작되어진 영광 5,6 호기 원자로의 경우 Si-killing 에 의한 제강방법(단, 6 호기 중간동체는 VCD+A1 제강방법 적용)이 적용되었고, 이 제강방법들은 VCD 제강방법 보다 우수한 물성치를 보이는 것으로 본 저자들에 의해 보고된 바 있다^{1,2)}. 본 연구에서는 원자력 관련 규정에 의거하여 수행한 영광 5,6 호기 원자로 소재의 조사전 물성시험(baseline tests) 수행 결과를 종합하고^{3,4,5)}, 소재의 파괴특성을 살펴 보고자 한다.

2. 시험 방법

2.1 시험 재료

본 연구에서는 영광 5,6 원자로 압력용기 용으로 한중에서 제작한 SA508 Cl.3 단조재 및 그 용접부를 시험소재로 사용하였다. 시편은 모재의 경우 노심대 재료 중에서 가장 취약한 것으로 예상

* 한국중공업(주) 기술연구원

되는 부위인 영광 5 호기는 중간 몸체, 영광 6 호기는 하부몸체에서 채취하였다. 용접부는 중간 몸체와 하부몸체의 용접부위에서 채취하였고, 원주 방향으로 double U-groove 의 SAW 용접되었다.

2.2 시험 종류

조사전 시험(preirradiation baseline tests)은 낙중, 충격, 인장, 정적 및 동적 파괴인성시험으로 구성되었다. 1 호기 당 시험항목별 시편 수는 Table 1 과 같다. 시험편을 채취하기 위한 test block 은 extension ring 의 열처리 끝부분에서 압력용기의 두께(t) 이상이 떨어진 부위에서 채취하였다. 모재 및 HAZ 시편의 경우 표면에서 두께방향으로 1/4T 떨어진 위치에서 채취하였고, 용접재의 경우 표면부(양 표면에서 두께방향으로 5/4 in 떨어진 위치까지)를 제외한 나머지 영역에서 시편을 채취하였다.

Table 1. Quantity of specimens for preirradiation baseline tests

시험 종류	방향	시편수량				
		모재	용접부	HAZ	SRM*	소계
낙중	T	12	12	12		36
	L	24			15	39
충격	T	24	24	24		72
	L	12				12
인장	T	12	12			24
	L	4				4
정적과 파괴인성	1"	T	8	8		16
		L	4			4
	1/2"	T	4	4		8
		L	4			4
동적과 파괴인성	L	12				12
	T	12	12			24
소계		128	72	36	15	251

SRM : Standard Reference Material (SA533 Type B)

3. Baseline 시험

3.1 기준 무연성 천이온도(RT_{NDT}) 결정

기준 무연성 천이온도(RT_{NDT})는 낙중시험과 충격시험을 통해 다음과 같이 구해진다.

- i) $T_{NDT} \geq T_{CV} - 60^\circ F$ 인 경우
 $RT_{NDT} = T_{NDT}$
- ii) $T_{NDT} < T_{CV} - 60^\circ F$ 인 경우
 $RT_{NDT} = T_{CV} - 60^\circ F$

여기서,

T_{NDT} : 낙중시험으로 구한 무연성 천이온도

T_{CV} : 충격시험에서 흡수에너지 50ft-lb, 횡방향평

창량 35mils 를 만족하는 온도

영광 5,6 호기 설계수명은 40 년으로 이를 만족하려면 기준 무연성 천이온도가 $10^\circ F$ 또는 그 보다 낮아야 한다. 본 연구에서는 낙중시험 및 충격시험을 다음과 같이 수행하였다.

3.1.1 낙중시험(Drop Weight Test)

무연성 천이온도 T_{NDT} 를 구하기 위해 낙중시험을 수행하였다. 낙중시험은 ASTM E208 에 규정된 방법에 따라 3,570J 용량의 낙중시험기(E.T.I 8000 A/3C)를 이용하여 수행되었다. 무연성 천이온도는 낙중시험 후 시편에서 break 가 관찰되는 최고 온도로써, 무연성 천이온도보다 $10^\circ F$ 높은 온도에서 반드시 2 회 이상의 no-break 가 관찰되어야 한다.

낙중시험 결과는 Table 2 와 같다.

Table 2. Drop weight test results

재료구분	영광 5 호기 $T_{NDT} \text{ } ^\circ F(^\circ C)$	영광 6 호기 $T_{NDT} \text{ } ^\circ F(^\circ C)$
모재	-30 (-34)	0 (-18)
용접재	-60 (-51)	-60 (-51)
HAZ	-70 (-57)	-70 (-57)

3.1.2 충격시험(Impact Test)

충격시험은 KS B 0809, 0810 및 ASTM E23 에 따라 5 가지 종류의 재료(모재 L, T, 용접금속, 열영향부, SRM)에 대해 저온에서의 low shelf, 고온에서의 upper shelf 및 중간온도에서의 취성 연성 천이거동을 결정하기 위해 약 $-100 \sim 288^\circ C$ 온도 범위에서 수행되었다. $T_{300-ft-lb}$ 및 $T_{500-ft-lb}$ 온도의 결정을 위해 온도에 따른 충격흡수에너지 데이터는 다음의 hyperbolic tangent 함수로 curve fitting 하였다.

$$CvE = A + B \tanh[(T - T_0)/C] \quad (1)$$

여기서, CvE 는 충격흡수에너지, T 는 시험온도, A, B, C 및 T_0 는 곡선맞춤(curve fitting)으로 결정되는 상수이다.

충격흡수에너지 외에 횡팽창률, 전단분율 역시 측정 후 hyperbolic tangent 함수로 curve fitting 하였고 횡팽창률 35mils 에 해당하는 T_{35mils} 온도를 구하였다. 최대흡수에너지는 천이구역 상단온도 이상에서 수행된 모든 샤르피 시험편의 흡수에너지 평균값으로 구하였다. Table 3 은 영광 5,6 호기 원자로 소재의 충격시험 결과를 보여준다. Table 3 에서 알 수 있듯이 각 소재의 기준 무연성 천이온도는 $T_{NDT} \geq T_{CV} - 60^\circ F$ 이므로 T_{NDT} 값을 기준 무연성 천이온도 RT_{NDT} 로 둘 수 있었다.

Table 3. Impact properties for Yonggwang Unit 5/6 reactor pressure vessel materials

영광 5 호기	최대흡수 에너지		41J (30ft-lb) Index Temp.		68J (50ft-lb) Index Temp.		0.89mm (35mils) Index temp.	
	J	ft-lb	°C	°F	°C	°F	°C	°F
모재 L	275	203	-49	-57	-35	-31	-39	-39
모재 T	261	192	-41	-42	-30	-22	-32	-26
용접재	263	194	-59	-74	-46	-51	-46	-50
HAZ	323	238	-130	-202	-114	-174	-105	-158
SRM	238	175	-25	-12	-6	21	3	38

영광 6 호기	최대흡수 에너지		41J (30ft-lb) Index Temp.		68J (50ft-lb) Index Temp.		0.89mm (35mils) Index temp.	
	J	Ft-lb	°C	°F	°C	°F	°C	°F
모재 L	270	199	-66	-87	-46	-51	-46	-50
모재 T	261	192	-62	-80	-43	-45	-38	-36
용접재	264	194	-59	-74	-44	-47	-44	-47
HAZ	259	191	-133	-207	-108	-163	-75	-104
SRM	188	139	-7	19	10	50	4	40

3.2 K_{IR} 곡선과 파괴인성시험결과 비교

원자로의 압력온도운전 곡선의 작성 및 비파괴 검사로 검출된 결함의 피로해석시 K_{IR} 곡선이 이용된다. K_{IR} 곡선은 식(2)와 같이 온도에 따른 파괴인성으로 나타내어지며, 정적, 동적 파괴인성시험을 통해 얻어진 값들이 K_{IR} 곡선 위에 위치하여야 분석이 유효하게 된다.

$$K_{IR} = 26.78 + 1.223 \exp[0.0145(T - RT_{NDT} + 160)] \quad (2)$$

여기서, 온도 T는 °F, 기준파괴인성 K_{IR}는 ksi√in 단위임.

3.2.1 정적 파괴인성(Static Fracture Toughness Test)

정적 파괴인성은 ASTM E813, E1152 및 E1737에 따라 단일시편 해중법(single specimen unloading compliance method)에 의해 수행되었다. 시험온도는 천이온도영역과 운전온도 288°C, 상온 그리고 운전온도와 상온의 중간온도인 149°C에서 수행되었다. 고온영역의 파괴인성시험은 온도의존성을 조사하는 목적외에 운전온도에서의 불안정 파괴에 대비한 상세 해석 기초 자료인 J-R 특성을 얻는다는 데 그 의미가 크다고 본다.

천이영역의 경우 저온에서 불안정 취성파괴가 발생하였으며, ASTM E1737 및 E1921(Ferrite steel

의 천이온도 구역에서 기준 온도 T₀ 결정법)에 따라 최종 불안정 취성파괴가 발생할 때의 J 값을 J_c로 취하였다. 연성파괴가 발생한 고온영역의 경우 J-R 선도와 0.2mm offset 선도의 교차점으로 J_Q 값을 구할 수 있었다. 이렇게 얻어진 J_c 혹은 J_Q 값은 다음식에 의해 정적 파괴인성 K_{JC}로 환산되었다.

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)}} J_c, \text{ 혹은 } K_{JC} = \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)}} J_Q \quad (3)$$

여기서, E는 탄성계수, ν는 Poisson 비이다.

영광 5,6 호기에 대한 정적파괴인성시험 결과를 Fig.1,2에 K_{IR} 곡선과 함께 도시하였다.

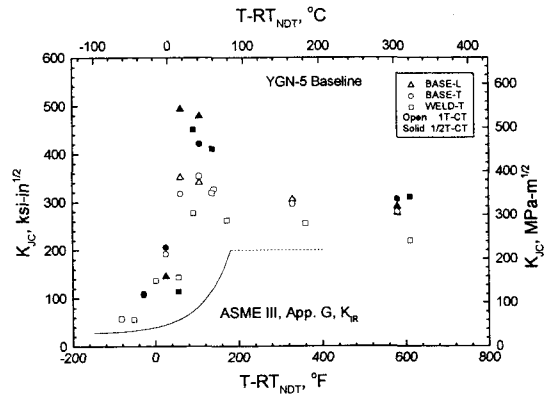


Fig. 1 Comparison of static fracture toughness of Yonggwang Unit 5 baseline materials with ASME III K_{IR} curve.

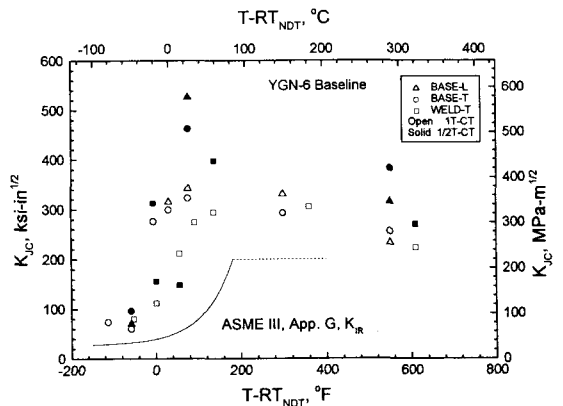


Fig. 2 Comparison of static fracture toughness of Yonggwang Unit 6 baseline materials with ASME III K_{IR} curve.

상온 이하의 온도에서는 파괴인성이 온도에 따

라 급격히 증가하였다. 100°C 이상의 고온영역에서는 온도에 따라 파괴인성이 다시 감소하였다. 이것은 동적변형시효(dynamic strain aging)의 영향으로 사료된다. 시편 두께에 따른 비교에서는 1/2 T 시편의 결과가 1T 시편의 결과보다 높게 나타났다. 여기서, 사용된 1/2 T 시편은 1T 시편에 비해 폭과 두께 모두 2 배 작은 크기이다. 1/2 T 시편이 사용된 이유는 중성자 조사후 파괴인성 측정에 소형 시편이 사용되어야 하므로 조사에 따른 결과비교를 위해 시험되어 졌다. 시험결과, 천이영역에서는 시편 두께가 커질수록 취약부위를 포함할 가능성이 높으므로 취약결합설에 따라 두께가 얇은 1/2 T 시편의 파괴인성이 1T 시편의 파괴인성보다 높게 나온 것으로 보여진다.

운전온도 288°C에서의 각 조건별 파괴인성을 비교하기 위해 영광 5,6 호기 모재 및 용접부, 그리고 시편 두께(1T, 1/2T)에 따른 파괴인성결과를 Fig.3 에 나타내었다.

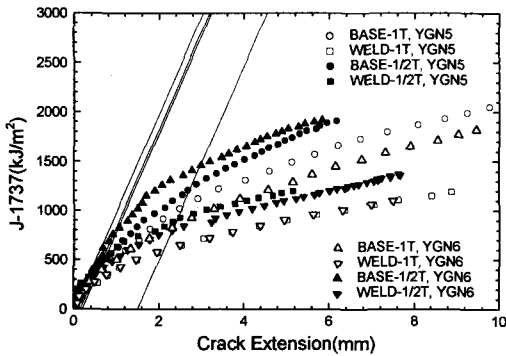


Fig. 3 J-R curves of reactor pressure vessel at 288°C

정적 J-R 시험 결과, 1/2 T 시편의 J-R curve 가 1T 시편의 J-R curve 에 비해 모재 용접재 모두 높게 나왔다. 본 시험소재는 인성이 높아 1T 시편의 경우에도 평면 변형조건을 만족하지 못하였다. 따라서, 1T 시편에 비해 1/2 T 시편이 더욱 평면 응력 상태에 가까우며 이 평면응력상태로 인해 1/2 T 시편이 더 높은 파괴저항 특성을 보인 것으로 사료된다. Lai 와 Ferguson 의 연구에 따르면⁷⁾, 두께가 증가함에 따라 파괴인성치는 감소하고 일정 두께 이상에서는 파괴인성치가 일정한 값을 갖는다고 보고하고 있어 본 시험결과와 일치하고 있다.

모재와 용접재의 비교에서는 모재의 정적 J-R 특성이 용접재의 J-R 특성보다 우수하게 나타났다. 이것은 VCD 제강방법이 적용된 울진 3 호기 결과와는 반대되는 현상이다⁸⁾. 이것은 영광 5,6 호기의

경우 용접재의 J-R 특성은 울진 3 호기와 비슷하게 나온 반면 모재부는 Si-killing 제강방법 적용에 따른 결정립 미세화로 J-R 특성이 개선되었기 때문으로 사료된다.

3.2.2 동적파괴인성(Dynamic Fracture Toughness Test)^{3,4,9)}

동적파괴인성시험은 ASTM E636 에 따라 예비균열을 지닌 Charpy 충격시편을 이용하여 계장화 충격시험기에서 시험하였다. 하중이 가해지는 충격시험기 tup 부위에는 하중을 측정할 수 있는 계장화 tup(44kN, max.)을 부착하였고, 충격속도 및 데이터 추출시작 신호를 정확한 시점에 제어시스템에 알리기 위해 충격부인 anvil 바로 앞에 속도 센서를 부착하였다. 충격에 의한 시편의 파단은 4msec 의 아주 짧은 시간 내에 발생되므로 시험시 high speed data acquisition system 을 사용하여 1msec 당 1024 개의 시간-하중 데이터가 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 저장된 시간-하중 데이터는 속도 센서로 측정된 시험속도를 이용하여 변위-하중 데이터로 변환되었다. 이 변위-하중데이터로부터 동적파괴인성 K_{ID} 는 다음과 같이 구하였다.

$$K_{ID} = \left(\frac{EJ_{FCI}}{1-v^2} \right)^{1/2} \quad (4a)$$

$$J_{FCI} = \frac{2E_m}{B(W-a)} \quad (4b)$$

여기서, E_m 은 최대하중까지의 에너지, E 는 탄성계수, v 는 Poisson 비, B 는 시험편 두께, W 는 시험편 폭, S 는 시험편 span, P_Q 는 최대 하중이다.

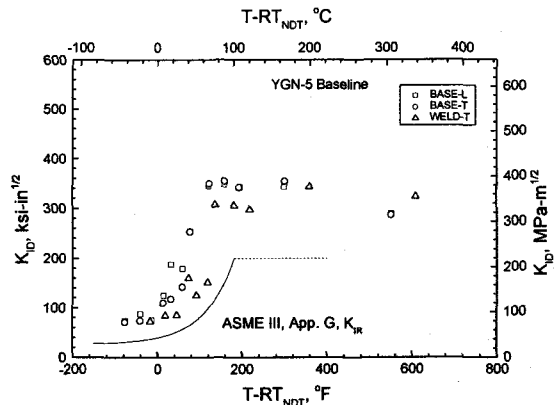


Fig. 4 Comparison of dynamic fracture toughness of Yonggwang Unit 5 baseline materials with ASME III K_{IR} curve.

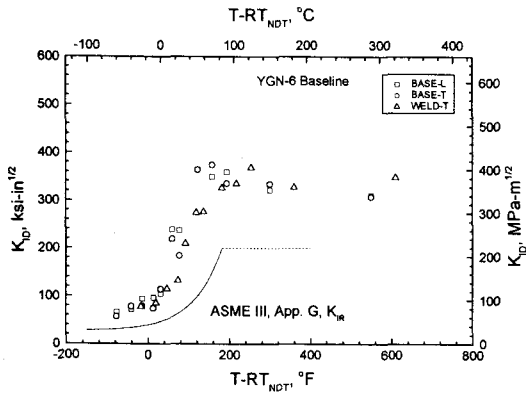


Fig. 5 Comparison of dynamic fracture toughness of Yonggwang Unit 6 baseline materials with ASME III K_{IR} curve.

Fig.4,5는 영광 5,6 호기에 대한 정적파괴인성시험 결과를 K_{IR} 곡선과 함께 도시한 것이다. Fig.1,2,4,5에서 알 수 있듯이 영광 5,6 호기 정적, 동적 파괴인성 데이터 모두 K_{IR} 곡선 상단에 위치하여 본 K_{IR} 곡선이 유효함을 알 수 있었다. 이로써 본 원자로 소재는 설계수명 40년에 대하여 충분한 파괴저항특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 고온영역에서 온도에 따른 동적파괴인성 K_{ID} 의 변화는 용접재의 경우 대체로 일정하였고, 모재의 경우 운전온도 288°C에서 약간 감소하였으나 정적파괴인성 때의 감소량에 비해서는 그 차이가 적었다. 그 이유는 고온영역에서 정적 파괴인성 감소의 주원인이었던 동적변형시효는 이동하는 전위가 전위주위에 용질원자 분위기를 형성해서 전위와 용질원자 사이의 작용으로 발생하는 데^{10,11}, 본 동적파괴인성 측정을 위한 시험속도는 2~6m/sec의 빠른 속도이어서 전위의 이동속도가 매우 빨라 전위주위에 용질분위기를 형성하기 어려워서 동적 변형시효에 의한 파괴인성 감소효과가 적었던 것으로 보인다.

최근 원자로 압력용기 조사취화평가에 무연성 천이온도 RT_{NDT} 개념 대신에 소형 시편을 이용하여 파괴인성을 직접 측정하는 master curve 방법이 많이 연구되어지고 있다^{12,13}. master curve 방법은 경험에 의해 정의된 K_{IR} 곡선과는 달리 정확한 물리적 개념 및 통계기법을 바탕으로 되어 있다. 현재 국산 원자로소재에 대해서 baseline test의 의무 시험조항으로 master curve 법이 규정되어 있지 않아 본 시험에서는 수행하지 않았으나 기준온도 T_0 를 이용한 master curve 방법은 원자로 파괴특성을 잘 표현하고 있어 향후 많은 응용이 예상된다.

3.3 인장 특성

인장시험은 25ton 만능재료시험기에서 고온 extensometer를 이용하여 KS B 0802, KS D0026, ASTM E8 및 E21에 따라 수행되었다. 시험온도는 상온, 가동온도 288°C, 중간온도 149°C, 저온 -20°C에서 수행되었다. 항복점이 나타나는 경우에는 항복점을 항복점으로 취하였고, 항복점이 나타나지 않는 경우에는 0.2% offset 법을 사용하여 항복점을 결정하였다. Fig.6,7은 영광 5 호기 원자로 소재의 모재 및 용접재에 대한 인장특성을 도시한 것으로 영광 5,6 호기간 인장 특성은 비슷하였다.

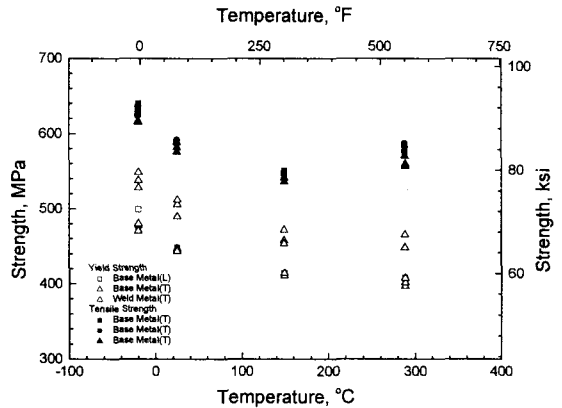


Fig. 6 The variation of preirradiation tensile properties with temperature.(yield strength, tensile strength)

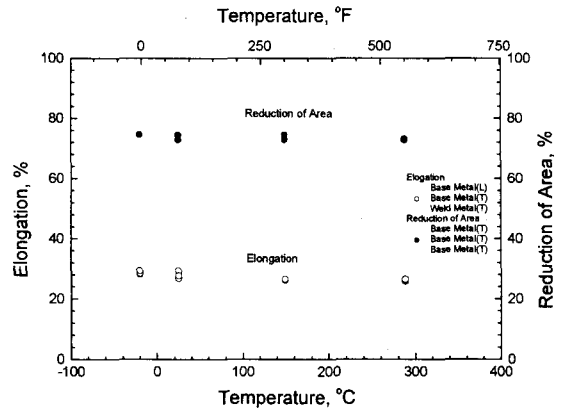


Fig. 7 The variation of preirradiation tensile properties with temperature.(elongation, reduction of area)

모재의 방향(L, T 방향)에 따른 인장특성은 서로 비슷하였다. 모재와 용접재의 비교에서 용접재는 모재보다 항복강도가 높았으며 인장강도에서는 약

간 낮은 값을 보였다. 연신률 및 단면수축률은 서로 비슷한 값을 보였다. 온도에 따른 항복강도는 온도 증가에 따라 감소하였으며, 인장강도는 중간 온도인 149°C 까지 감소하였으나 운전온도 288°C에서는 다시 증가하였다.

4. 기존 호기와의 정적 J-R 특성 비교

지금까지 원자로 소재의 제강방법은 VCD, VCD+Al, Si-killing 으로 개선되어 왔다. 본 절에서는 운전온도 288°C에서의 정적 J-R 특성을 기존 호기 결과와 비교하였다. 그 결과 Fig.8 과 같이 Si-killing (영광 5 호기), VCD+Al (영광 4 호기)¹⁴⁾, VCD(울진 4 호기)¹⁵⁾ 순으로 정적 J-R 특성이 우수하였다.

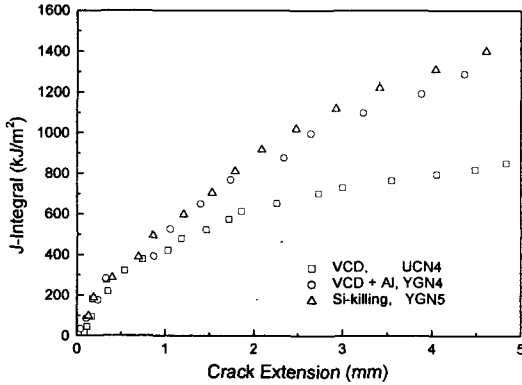


Fig. 8 Comparison of static J-R curves with steel making practices at 288°C

5. 결론

영광 5,6 호기 원자로 소재에 대한 조사전 baseline 시험을 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 영광 5 호기 RT_{NDT} 는 모재 -30°F, 용접재 -60°F, HAZ 부 -70°F 이며, 영광 6 호기는 모재 0°F, 용접재 -60°F, HAZ 부 -70°F 으로 설계수명 40 년에 해당하는 10°F 허용 기준을 만족하였다.
- 2) Si-killing 제강방법에 의해 제작된 본 영광 5,6 호기 소재들은 기존 VCD 및 VCD+Al 제강방법으로 제작된 소재보다 불안정파괴에 대한 저항성 척도인 정적 J-R 특성이 우수하였다.
- 3) 두께에 따른 정적 파괴인성시험 결과 1/2 시편이 1T 시편에 비해 파괴인성치 및 J-R 특성 모두 높은 값을 보였다.

- 4) 고온영역에서 온도가 증가할수록 정적파괴인성은 감소하였으나, 동적파괴인성은 용접재는 일정한 경향을, 모재는 운전온도에서 미소한 감소만을 보였다.

참고문헌

- (1) J.T.Kim, H.K.Kwon, K.C.Kim and J.M.Kim, 1997, "Improved Mechanical Properties of the A 508 Class 3 steel for Nuclear Pressure Vessel Through Steelmaking", STP 1259, pp.18-32.
- (2) J.T.Kim, H.K.Kwon, H.S.Chang and Y.W.Park, 1997, "Improvement of Impact Toughness of the SA508 Class 3 Steel for Nuclear Pressure Vessel through Steel-Making and Heat-Treatment Practices", Nuclear Engineering and Design 174, pp.51-58.
- (3) 김 정태외 12 인, 1999, "영광 5 호기 원자로 압력용기의 조사전 재료특성(Baseline tests)", 한국중공업.
- (4) 김 정태외 5 인, 2000, "영광 6 호기 원자로 압력용기의 조사전 재료특성(Baseline tests)", 한국중공업.
- (5) 영광 원자력발전소 5,6 호기 원자로용기 감시 시험 시험계획서, 2000, 한전, KOPEC.
- (6) ASME B & PV Code, Sec.III, 1992.
- (7) Lai, M.O. and Ferguson, W.G., 1986, "Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness", engineering fracture Mechanics, Vol. 23, No. 4, pp.649-659.
- (8) 홍 준화의 12 인, 1997, "울진 3 호기 원자로 압력용기의 조사전 재료특성(Baseline tests)", 한국원자력연구소.
- (9) 지 세환외 6 인, 1999, "영광 5 호기 원자로 압력용기 재료의 동적파괴인성 평가(Baseline Tests)", 한국원자력연구소.
- (10) A.H.Cottrell, 1953, Phil. Mag., Vol. 44, pp.829.
- (11) 김 인섭, 1993, "발전소 부품재료의 동적 변형 시효와 파괴특성 -탄소강과 오스테나이트 합금", 제 7 회 재료강도 심포지엄, pp.31-44.
- (12) K.Wallen, 1989, "A Simple Theoretical Charpy-V - K_{IC} Correlation for Irradiation Embrittlement", ASME PVP, Vol. 170.
- (13) 이 봉상의 5 인, 1999, "미소시험편의 Master Curve 방법을 이용한 원자로 압력용기 재료의 조사취화 평가", 제 6 회 원전기기 건전성 Workshop, pp.581-591.
- (14) 홍 준화의 12 인, 1995, "영광 4 호기 원자로 압력용기의 조사전 재료특성(Baseline tests)", 한국원자력연구소.
- (15) 홍 준화의 12 인, 1997, "울진 4 호기 원자로 압력용기의 조사전 재료특성(Baseline tests)", 한국원자력연구소.