'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

국산 SA508-Gr. 3 원자로 압력용기용 강의 J-R 파괴저항특성 평가 (Ⅰ)

Evaluation of J-R Fracture Resistance Characteristics of Korean-made SA508-Gr.3 RPV Steels (Ⅰ)

윤지현, 이봉상, 홍준화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

세 가지 제강법으로 국내에서 제조된 원자로 압력용기용 SA508-Gr.3 강들에 대해 J-R 파괴저항 시험을 실시하였다. 시험된 모든 소재에서 상온부터 288℃ 까지 온도 증가에 따라 파괴저항성이 떨어지는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 파면관찰과 인장시험 결과와 연관하여 동적변형시효에 기인한다는 것이라 확인하였다. 또한 동일 사양의 강들에서도 제강공정에 따라 파괴저항성이 차이가 있었다. 특히 진공탄소탈산법 (VCD) 정련에 의해 제조된 강의 경우에는 상온에서 불안정 취성 파괴가 일어났다. 동일 사양의 SA508-Gr. 3 강들에서 이런 파괴특성의 차이가 발생하는 이유는 제강 공정의 차이에서 기인한 입도 및 미세조직적인 차이 때문인 것으로 판단된다.

Abstract

J-R fracture resistance tests were performed for 3 different domestic SA508-Gr.3 RPV steels which were classified by refining process. It was observed that fracture resistance decreased as temperatere increased from room temperatere to 288℃ in common. It was confirmed that decrease of fracture resistance at high temperature was attributed to dynamic strain aging (DSA) through observation of fractography and tensile tests. Fracture resistances of 3 steels were different from each other. Vacuum carbon deoxidizing (VCD) steel was fractured unstably at room temperature. It was deduced that the difference of fracture resistance in the steels of the same specification was due to difference of grain size and microstructure resulting from difference of steel making process.

1. 서 론

원자로 압력용기는 가압경수형 원전의 압력경계 기기 중 안전성의 측면에서 가장 중요한 기기이며, 원전 수명 기간 중 교체가 불가능하여 압력용기의 건전성 여부가 원전수명을 결정짓는다. 더욱이 원자로 압력용기는 고온, 고압 및 중성자 조사의 가혹한 환경에서 장기간 사용되므로 매우 우수한 재료물성을 가진 재료를 소재로써 적용하여야 한다. 특히 가동 중 고속중성자 조사를 지속적으로 받아서 파괴인성이 저하되고 연성-취성 천이온도구간이 고온 쪽으로 이동하는 중성자 조사취화 현상이 발생하기 때문에, 발전소의 안전운전 여유를 충분히 확보하기 위해서는 우수한 파괴저항특성이 요구된다 [1].

원자로 압력용기용 재료는 많은 변천과정을 거쳐 영광 3/4 호기 이후 국내 원자로에는 국산 SA508-Gr.3 저합금 단조강이 사용되고 있다. 국산 원자로 압력용기 소재는 정련 방법에 따라 크게 3 종으로 나뉘어 진다. 그 각각은 VCD (Vacuum Carbon Deoxidizing), VCD+Al (Al 첨가 결정립 미세화), Si+Al (Si Deoxidizing+Al 첨가 결정립 미세화) 의 3 가지 정련 방법에 의해 제강되었다 [2].

본 연구에서는 원전 건전성에 직접적 영향을 미치는, 3 가지 제강법으로 제조된 국산 원자로 압력용기용 SA508-Gr.3 강 모재 및 일부 용접재의 조사전 상온, 고온 J-R 파괴저항 곡선들을 얻었으며 파면 관찰을 통해 각각의 파괴특성을 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료 및 시편

본 연구에 쓰인 재료는 국내에서 생산된 제강법이 다른 3 종의 원자로 압력용기용 SA508-Gr.3 저합금 탄소강의 모재 및 용접재이다. 표 1 과 2 에 각각의 화학조성과 열처리 공정을 나타내었다. J-R 파괴저항 시편으로는 각 재료에 대해 공히 약 10 인치 두께의 ¼ 지점에서 T-L 방향으로 채취된, 측면 홈이 있는 ASTM 표준 1T-C(T) 시편을 사용하였다.

2.2. J-R 파괴저항 시험

시험은 ASTM E-1152 표준시험 절차에 따라 단일시편 해중법 (Single specimen unloading compliance method) 으로 상온에서부터 원자로 가동온도인 288℃에 이르는 다양한 온도에서 수행되었다. 시험기로는 500 kN 용량의 MTS 810 유압식 재료 시험기를 사용하였으며, 고온시험 시에는 MTS environmental chamber 를 사용하여 시편의 온도와 목표온도와의 오차가 ±1℃ 내로 유지되도록 하였다.

3. 결과 및 토의

파괴저항시험을 실시하기 전에 각 재료에 대한 기초 물성 파악을 위해 조직시험과 인장시험을 실시한 결과를 표 3 에 나타내었다. 각 재료의 기본적인 조직 (베이나이트+마르텐사이트) 은 같으나 VCD 강, VCD+Al 강, Si+Al 강의 순으로 입자의 크기가 큰 것으로 나타났다. 인장강도 및 항복강도는 모재의 경우, VCD 강과 VCD+Al 강이 유사하고 Si+Al 강은 두 강종에 비해서는 다소 높았다. VCD+Al 강의 용접재의 경우에는 인장강도 및 항복강도가 모두

모재보다 높았다.

그림 1 에 VCD 강 모재에 대한 여러 온도에서의 J-R 파괴저항 곡선을 도시하였다. 온도가 증가할수록 파괴저항 특성이 떨어지는 현상을 보인다. 이러한 현상은 VCD+Al 강과 Si+Al 강에서도 공통적으로 나타났다.

그림 2 의 (a) 와 (b) 에 나타낸 65℃ 와 288℃ 에서의 J-R 시험후 파면을 살펴보면, 65℃에서는 매우 작은 dimple 들이 산재해 있는 전형적인 연성 파괴 양상을 보이는 반면, 288℃에서는 곳곳에 큰 cavity가 존재하는 취약한 파괴 양상을 보이는 것을 관찰 할 수 있다. 각 온도에서의 거시적인 파괴 양상은 파면에 수직한 면을 광학현미경으로 관찰한 그림 3 의 (a) 와 (b) 에 잘 드러나 있다. 65℃ 에서는 전체적으로 파면의 굴곡이 크고 파면 및 입자들이 늘어난 모양을 보이고 있어 균열진전 시에 상당한 소성변형을 동반하고 있으나 288℃ 에서는 파면이 비교적 평활하고 입자들의 변형도 상당히 억제되어 있어 상대적으로 소성 변형량이 적은 파괴가 일어났다는 것을 알 수 있다. 또한 288℃ 에서의 인장시험 결과에서는 serration 이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다 [3, 4]. 이러한 결과들로부터 고온에서의 J-R 파괴저항성의 감소는 동적변형시효 현상에 기인한다는 것을 알 수 있다 [5].

그림 4, 5, 6 에는 각각 상온, 중간 온도인 149℃, 원자로 가동온도인 288℃ 에서의 각 강종에 대한 J-R 파괴저항곡선을 비교하여 도시하였다. 상온에서 Si+Al 강이 VCD+Al 강보다 높은 파괴저항성을 보였고 VCD 강에서는 다른 강들과 달리 상온에서뿐만 아니라 43℃ 에서도 불안정 취성 파괴가 발생하였다. 이는 VCD 강이 상대적으로 연성-취성 천이온도 구간이 고온 쪽에 위치한다는 것을 말해준다. 149℃ 에서는 Si+Al 강, VCD+Al 강, VCD 강의 순으로 파괴저항성이 높은 것으로 나타났으며 288℃ 에서도 그 순서는 마찬가지이다. 288℃에서 국산 원자로 압력용기용강의 파괴저항성은 일본의 Kawasaki 제철의 동종 강에 비해서는 약간 낮으나 다른 외국산 소재와 비교해서는 동등 이상으로 나타났다. 이와 같이 동종의 강임에도 불구하고 각 강들 간의 파괴저항성 차이가 생기는 이유는 표 3 에서 볼 수 있는 바와 같이 제강공정의 차이에서 비롯된 입도 차이, 입자내 packet 의 크기 차이 및, 동 저자들에 의해 이미 보고된 바와 같이, 석출물 morphology 와 분포 및 lath morphology 등의 미세 조직적인 차이 때문인 것으로 사료된다 [2-4].

그림 7 에 나타낸 바와 같이 VCD+Al 강의 용접부에서도 온도증가에 따라 파괴저항성은 저하되는 현상을 관찰하였다. 또한, 상온에서는 불안정 취성 파괴가 일어났다.

4. 결 론

VCD, VCD+Al, Si+Al 방법으로 정련한 SA508-Gr.3 강의 모재와 용접재들에 대하여 25℃, 149℃, 288℃에서 J-R 파괴저항시험을 행한 결과, 시험된 모든 소재에서 온도가 증가할수록 파괴저항성이 감소하며 이를 파면관찰과 인장시험 결과와 관련하여 동적변형시효에 기인한 것이라 판단하였다. 파괴저항특성은 Si+Al, VCD+Al, VCD 강의 순으로 좋은 것으로 나타났다. VCD 강에서는 상온에서 불안정 취성 파괴 양상을 보였다. SA508-Gr.3 강들에서의 이러한 파괴특성의 차이는 제강 공정의 차이에서 기인한 입도 및 미세조직적인 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

* 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기사업의 원자로압력경계재료 과제 및 한국전력공사/한국중공업주식회사 수탁과제의 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. S.H. Chi, J.H. Hong, S.P. Choi, J. of KNS, Vol. 20, No. 3 (1988) 203-213
2. J.H. Hong et al., KAERI Report, KAERI/RR-1724/96 (1997)
3. J.H. Hong et al., KAERI Report, KAERI/CR-010/95 (1995)
4. J.H. Hong et al., KAERI Report, KAERI/CR-026/97 (1997)
5. J.H. Yoon, B.S. Lee, Y.J. Oh, J.H. Hong, IJPVP, 76 (1999) 663-670

Table 1. Chemical compositions of SA508-Gr. 3 steels for RPV materials.

(wt%)

Element / Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Fe
ASME Spec.	0.25 max	1.20-1.50	0.015 max	0.015 max	0.15-0.40	0.40-1.00	0.25 max	0.45-0.60	0.05 max	0.1 max	-	Bal.
VCD	0.19	1.38	0.007	0.003	0.07	0.78	0.16	0.54	0.007	0.060	0.006	Bal.
VCD+Al	0.18	1.46	0.006	0.003	0.10	0.86	0.15	0.51	0.004	0.030	0.018	Bal.
Si+Al	0.21	1.36	0.007	0.002	0.24	0.92	0.21	0.49	0.005	0.030	0.022	Bal.
VCD+Al Weld (Wire : SFA-5.23 EA3N)	0.08	1.74	0.011	0.002	0.26	0.13	0.05	0.51	0.004	0.03	0.010	Bal.

Table 2. Heat treatment and steel making processes of SA508-Gr.3 steels. for RPV materials.

Material / Heat Treatment	VCD	VCD + Al	Si+Al	Remarks
Normalizing	880℃, 6.5 hr	910℃, 9 hr	900℃, 10 hr	A.C.
Tempering	625℃, 6.5 hr	645℃, 9 hr	650℃, 8.5 hr	A.C.
Austenitizing	885℃, 5.5 hr	880℃, 7.8 hr	880℃, 7 hr	W.Q.
Tempering	655℃, 9 hr	655℃, 10.5 hr	650℃, 9.2 hr	A.C.
PWHT	620℃, 40 hr	610℃, 30 hr	620℃, 30.5 hr	F.C.

Table 3. Grain size and tensile properties of SA508-Gr.3 steels for RPV materials.

	VCD	VCD+Al		Si+Al
Grain Size (ASTM #)	6	7.5		8
Tensile Properties (MPa)	Base	Base	Weld	Base
	YS : 431 UTS : 567	YS : 428 UTS : 562	YS : 529 UTS : 626	YS : 446 UTS : 595

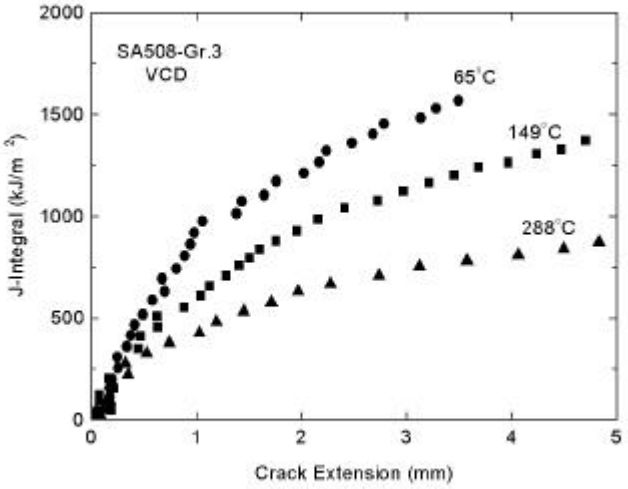
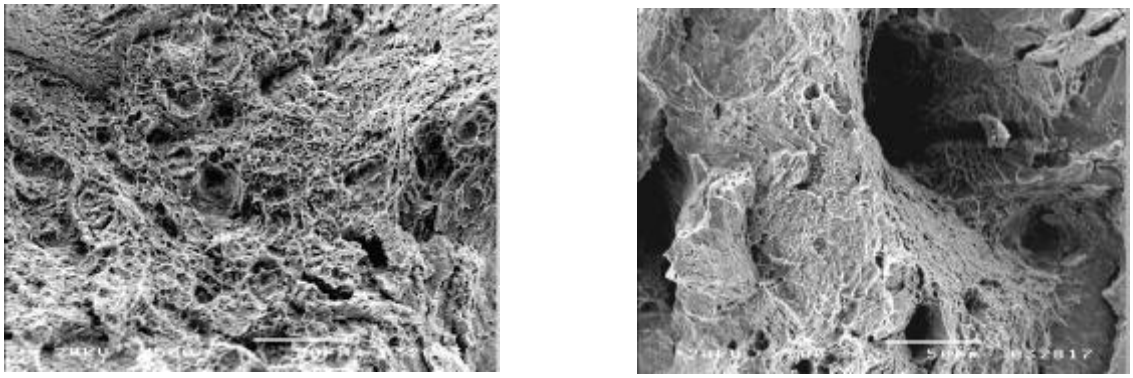
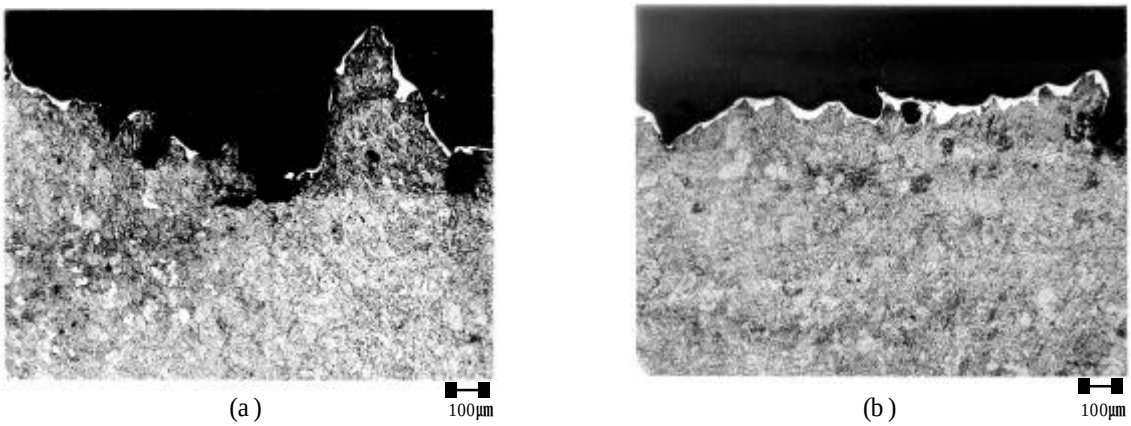


Fig. 1. J-R curves of SA508-Gr.3 steel made by VCD refining process at various temperatures.



(a) (b)

Fig 2. SEM fracture surfaces of SA508-Gr.3 steel made by VCD method after J-R tests at (a) 65℃ and (b) 288℃.



(a) (b)

Fig. 3. Cross-sections of fracture surfaces of SA508-Gr.3 steel made by VCD method after J-R tests at (a) 65℃ and (b) 288℃.

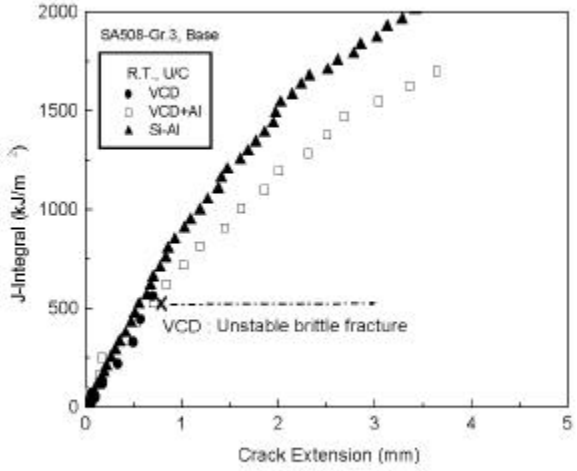


Fig. 4. J-R curves of various SA508-Gr.3 steels at room temperature.

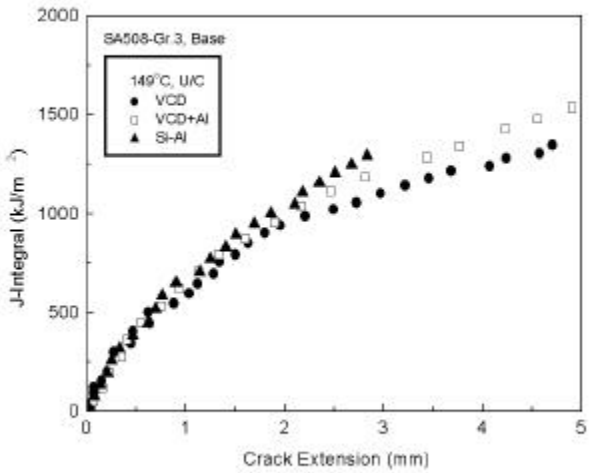


Fig. 5. J-R curves of various SA508-Gr.3 steels at 149℃.

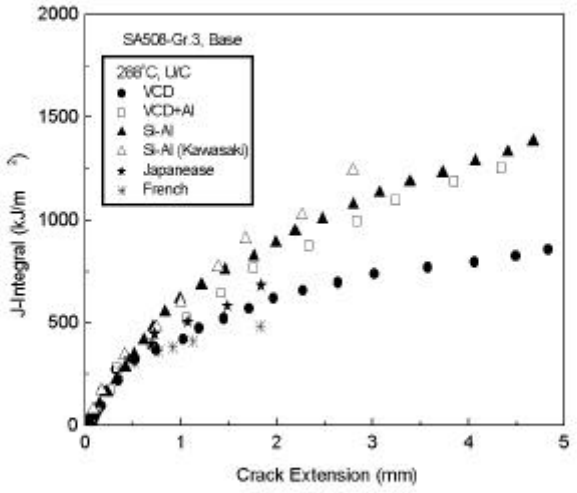


Fig. 6. J-R curves of various SA508-Gr.3 steels at 288℃.

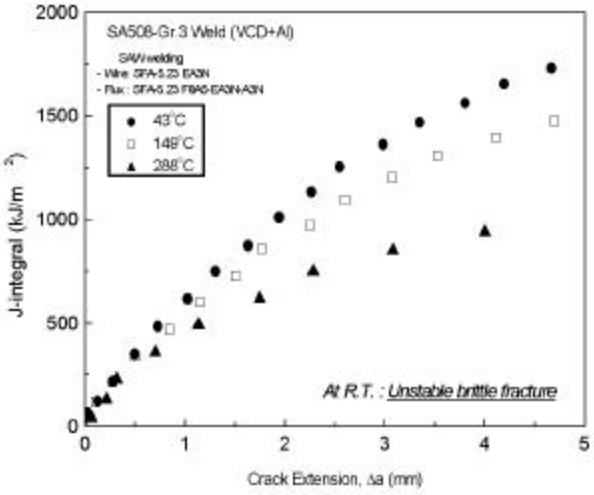


Fig. 7. J-R curves of SA508-Gr.3 steel weldments at various tempreratures.