

SA508 CL.1a 탄소강 배관소재의 파괴저항특성 평가

석 창 성* · 강 병 구**
(1998년 10월 29일 접수)

Evaluation of Fracture Resistance Characteristics of SA 508 CL.1a Carbon Steel for Piping System

Seok, Chang-Sung and Kang, Byoung-Gu

Key Words : J-Integral(J-적분), LBB(파단전누설), Primary Piping(주냉각재배관), Fracture Resistance Characteristic(파괴저항특성)

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the fracture resistance characteristics of SA508 CL.1a carbon steel, and their associated welds manufactured for primary coolant piping system of nuclear power plants. The effect of various parameters such as pipe size, welding method and chemical composition on the material properties were discussed. Test results showed that the effect of pipe size on fracture toughness was negligible, while the effect of welding method on fracture toughness was significant. In addition, Fracture toughness for carbon steel was influenced by silicon contents due to the different steel refining processes.

1. 서 론

원자력발전소 배관계통은 일반적으로 양단순간 파단(double-ended guillotine break : DEGB)에 대비한 설계를 하여 왔다. 그러나, 원자력발전소 가동 중에 양단순간파괴가 발생할 가능성은 확률론적으로 매우 희박하다는 것이 입증되었으며, 최근 원자력발전소의 배관계통은 탄소성파괴역학에 바탕을 둔 파단전누설(Leak Before Break : LBB) 개념에 의해 설계되고 있다.⁽¹⁾ LBB 설계개념을 적용하기 위해서는 적용배관에 설치되는 누설감지장치 감지능력의 10배에 해당하는 균열 크기를 결정하고, 여기에 발전소 운전 도중에 발생하는 가장 심각한 하중을 작용시켜 균열의 안정성을 파괴역학적으로 입증하여야 한다. 이러한 균열의

안정성평가는 배관재료의 인장특성과 파괴저항특성을 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 원자력발전소 배관소재의 안정성평가를 위한 파괴저항특성 및 인장 시험을 수행하고 그 결과를 고찰하고자 한다.

원자력발전소의 배관계통에는 대부분 고인성 재료를 사용하며, 이러한 재료에 대한 신뢰성 및 안정성의 확보는 원자력발전소의 안전과 직결되는 중요한 기초과제이다. 한국원자력연구소⁽²⁾에서는 원자력발전소 1차계통 배관에 대하여 성형가공방법과 용접방법이 파괴저항특성에 미치는 영향을 보고한 바 있다. 또한 성균관대^(3~5)에서는 원자력발전소 2차 계통 배관에 대하여 배관크기, 용접, 시편채취방향 그리고 온도가 파괴저항특성과 인장특성에 미치는 영향을 보고한 바 있다.

이 연구에서는 원자력발전소 주냉각계통 배관용으로 한국중공업(주)이 제작한 SA508 CL.1a 강 의 모재와 용접재에 대해 파괴저항특성시험을 수행하고 여러 인자들이 재료물성치에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 또한, 그 결과를 서로 비교하고 외국의 시험결과와도 비교, 분석하고자 한다.

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 한국중공업 (주)

2. 파괴저항특성시험

2.1 시험절차

본 연구에서는 NUREG 1061 Vol.3⁽¹⁾에 따라 시험을 수행하였으며 NUREG 1061 Vol.3에 명시된 재료시험방법을 요약하면 다음과 같다. 배관의 응력-변형률(σ - ϵ)선도 및 파괴저항(J-R)곡선은 정상운전의 상한범위(upper range) 부근의 온도에서 측정한다. 고온시험에 있어서 보관재료(archival material)를 사용할 경우 1개의 히트(heat)에 대하여 최소한 각각 3개의 응력-변형률 및 파괴저항 시험을 수행하면 충분하지만, 보관재료가 없을 경우(nonarchival material)에는 동일한 사양의 3개의 히트에 대하여 최소한 각각 2개의 응력-변형률 및 파괴저항시험을 수행하여야 한다. 또한 시험재료들은 모재와 용접재 모두를 포함하여야 한다. 응력-변형률 시험에서는 비례한계로부터 최대하중까지의 응력-변형률선도를 얻어야 하며, 항복강도와 인장강도도 측정하여야 한다. 파괴저항시험의 경우 가능한 한 배관과 같은 두께의 시편을 사용하여 J-R곡선을 구하여야 한다.

본 연구에서는 이 방법에 따라 파괴저항시험을 수행하였으며 시험편 크기의 경우에만 배관과 같은 두께의 시편을 구할 수가 없어서 1인치 두께의 1T-CT(compact tension) 표준시험편을 사용하였다.

2.2 시험장비 및 시험온도

시험기는 25ton 용량의 전기유압식 재료시험기를 사용하였고, 시험기의 제어, 데이터(data)처리 및 결과해석에는 32비트 PC를 사용하였다. 고온 시험을 위해 고온로를 사용하였으며, 원자력발전소 1차계통 배관계의 설계온도인 316 °C를 유지하기 위해 강제순환방식에 의하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위내에서 고온로의 시험온도를 조절하였다. 하중선의 변위측정에는 고온용 COD(crack opening displacement)게이지와 증폭기(amplifier)를 사용하였다.

2.3 시험재료 및 시편

Table 1은 본 시험에 사용된 모재의 종류와 시편의 수를 나타낸 것이며, Table 2는 본 시험에 사용된 용접재의 용접조건과 시편의 수를 나타낸 것이다. 파괴저항시험에 사용한 시편은 ASTM E1152⁽⁶⁾의 1T-CT(compact tension) 표준시험편으로서 Fig. 1과 같다. 모재와 용접재 모두 L-C방향으로 시편을 채취하여 실험을 수행하였다. 한편 용접재를 제작할 때, 용접부의 두께가 50.8mm를 초과하는 용접조인트에는 예열(preheat)을 하였으며, 615 \pm 20°C에서 40시간을 유지시켜 용접후열처리(post weld heat treatment : PWHT)를 하였다. 구체적인 용접조건은 Table 3과 같다.

Table 1 Test specimen matrix for base metal.

Plant identification	Product name	Number of specimens
Nuclear Power Plant A	Hot leg pipe	6
	Cold leg pipe	12
	Loop closure pipe	6
Nuclear Power Plant B	Hot leg pipe	6
	Cold leg pipe	12
	Loop closure pipe	6

Table 2 Test specimen matrix for weld metal.

Filler metal	Welding method	Number of specimens	
		Plant A	Plant B
Wire : L-TEC40	SAW	8	-
E7016	SMAW (shop)	8	9
E7016	SMAW (field)	6	-

Table 3 Welding procedure specification.

Welding method	Filler metal		Preheat min. temp. (°C)	Interpass max. temp. (°C)	PWHT Holding time(40h) (°C)	Travel speed (cm/min)
	AWS class	Size (mm)				
SAW	Wire : L-TEC40	φ 2.4	95	60	615± 20 (°C)	20-35
	Flux : L-TEC124	φ 4				30-45
SMAW (Shop)	E7016	φ 4	95	60	615± 20 (°C)	13-18
	E7016	φ 4				13-18
SMAW (Field)	E7016	φ 3.2	95	60	615± 20 (°C)	13-18
	E7016	φ 4				13-18
	E7016	φ 4				13-18

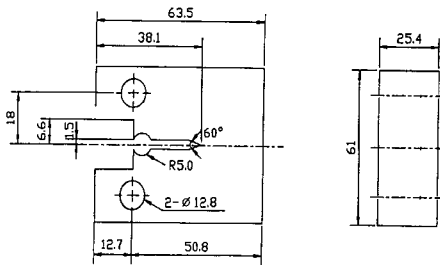


Fig. 1 Configuration of 1T-CT test specimen.

3. 파괴저항특성 시험결과 및 고찰

3.1 모재의 시험결과 및 고찰

Fig. 2는 원전의 주냉각계통 배관소재로 사용하는 페라이트계 SA508 CL.1a 탄소강의 배관크기에 따른 파괴저항(J-R)특성을 비교한 것인데, 이 그림은 페라이트계 탄소강의 파괴인성치로 101, 81, 68mm 두께의 hot leg pipe, cold leg pipe, loop closure pipe의 소재를 사용하여 각 파이프에 대해 2개, 4개, 2개의 히트에 대해 히트당 3회의 시험을 수행하였다. 그림 중 실선으로 표시한 선도는

같은 재질의 1차 계통 배관재 및 용접재에 대한 외국의 데이터베이스 중에서 J-R곡선의 하한치이며,⁽⁷⁾ 점선은 같은 재질의 국내 원자력발전소 주냉각계통 배관소재의 제작시 예상되는 J-R곡선의 하한치로 원자력발전소 설계의 참조값(reference curve)⁽⁸⁾이다. 이 그림에서와 같이 파괴인성치는 외국의 하한치(lower bound curve)와 국내의 설계 참조값에 비해 충분히 높게 나타났다. 또한, 배관의 크기에 따른 J-R곡선은 모두 비슷하게 나타났다.

3.2 용접재의 시험결과 및 고찰

Fig. 3은 주냉각계통 배관 용접재의 파괴저항(J-R)특성 시험결과를 나타낸 것인데, SMAW (shielded metal arc weld)에 의한 용접재는 모재보다 파괴인성치가 높게 나타났으며 SAW (submerged arc weld)에 의한 용접재는 모재보다 파괴인성치가 낮게 나타났다. 저수소계 용접봉을 사용한 SMAW 용접법은 가장 널리 활용되는 용접법으로서 탄소강에 대한 이 용접법의 우수성을 알 수 있었다. 반면, SAW 용접법은 SMAW 용접법에 비해 용착속도가 빠르고 용가재(filler metal)

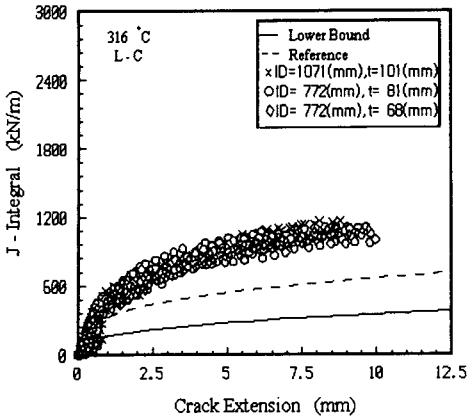


Fig. 2 Effect of pipe size on J-R curve for SA508 CL.1a.

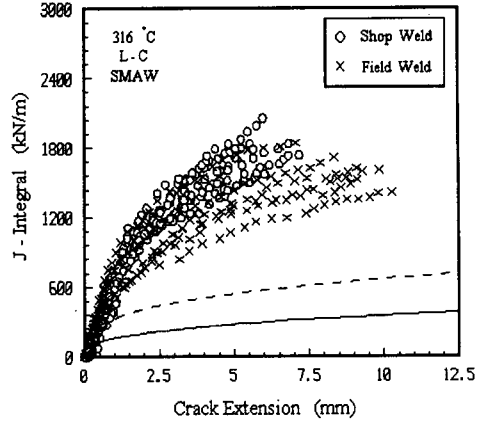


Fig. 4 Effect of shop and field welding on J-R curve for SA508 CL.1a.

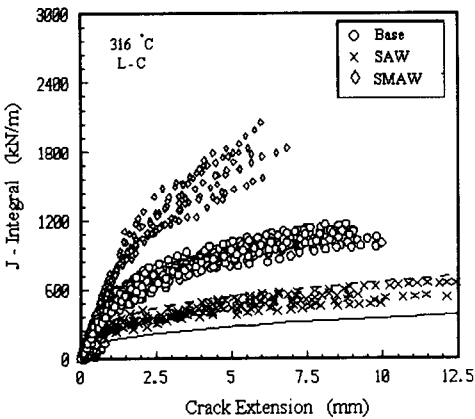


Fig. 3 Comparison of J-R curves for SA508 CL.1a base and weld.

를 적게 사용할 수 있는 등의 장점이 있지만 다른 용접법에 비해 불순물의 유입이 쉽고 기공을 야기시킬 수 있는 플럭스(flux)의 사용 등으로 인해 재료의 파괴저항성이 떨어지는 것으로 생각된다. 아직 정확한 원인은 밝혀진 바 없으나 외국의 연구결과에도 SAW 용접재의 파괴저항곡선이 모재에 비하여 현저히 낮다고 보고되어 있다. 구체적으로 SA106 Gr.B 탄소강 용접재의 파괴저항곡선은 모재보다 약 25% 정도 낮고, SA358 TP304 스테인레스강 용접재의 파괴저항곡선은 모재보다 약 50% 정도 낮게 나타났다고 보고되었다⁹⁾. 본 연구결과에서도 SAW 용접재의 파괴저

항특성이 모재에 비하여 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 같은 재질 배관소재의 외국의 하한치(lower bound curve)보다는 높게 나타났으며, 국내 원자력발전소 설계 참조치와 비슷하였다.

Fig. 4는 SMAW 용접재 중 공장용접재와 현장용접재의 파괴저항시험 결과를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 공장용접재(shop weld)의 J-R곡선이 현장용접재(field weld)의 J-R곡선보다 조금 높게 나타났다. 이는 용접 환경의 차이로 인한 석출물, 불순물 등과 냉각속도의 차이로 인한 미세 조직의 차이 때문이라 생각된다. 이러한 결과로부터 SA508 CL.1a 탄소강 용접재의 파괴저항특성은 용접방법에 따라 크게 다르게 나타나며 파괴저항특성 관점에서 볼 때 SMAW 용접법은 SAW 용접법보다 우수하다고 생각된다. 또한 현장 또는 공장에서의 SMAW 용접법은 원자력발전소용 페라이트계 배관소재에 대해 우수한 용접법이라고 생각된다.

3.3 모재 시험결과의 비교

모재의 파괴저항시험 결과를 비교하기 위하여 2기의 원자력발전소 3가지 배관소재에 대하여 시험을 수행하였다.

Figs. 5~7은 SA508 CL.1a 탄소강 주냉각계통 배관소재에 대한 파괴저항시험 결과를 배관별로 나누어 비교한 결과이다. 그림에 나타난 것처럼 모든 경우의 파괴저항특성은 외국의 하한치에 비

해 충분히 높았다. 또한, 원자력발전소 A의 파괴저항특성이 원자력발전소 B의 파괴저항특성치 중에서 하한치와 유사하지만, 원자력발전소 B의 파괴저항특성은 히트별로 재료특성변화의 범위가 크고 원자력발전소 A의 파괴저항특성은 히트별로 재료특성변화의 범위가 크지 않았다.

Table 4는 원자력발전소 A 주배관 모재의 화학성분표이며 Table 5는 원자력발전소 B 주냉각계통배관모재의 화학성분표이다. 이들 표를 비교할 때 규소(Si)를 제외한 나머지 화학조성들은 서로 비슷함을 알 수 있다. 원자력 구조용강에는 고도의 건전성을 유지, 확보하기 위해 모든 재료의 화학조성을 규정에 따라 엄격히 규제하고 있다.

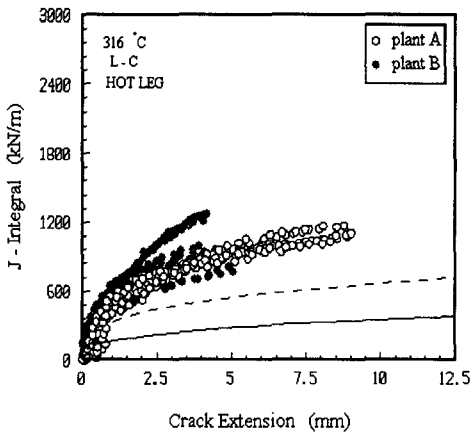


Fig. 5 Comparison of plant A and plant B hot leg pipe J-R curves for SA508 CL.1a.

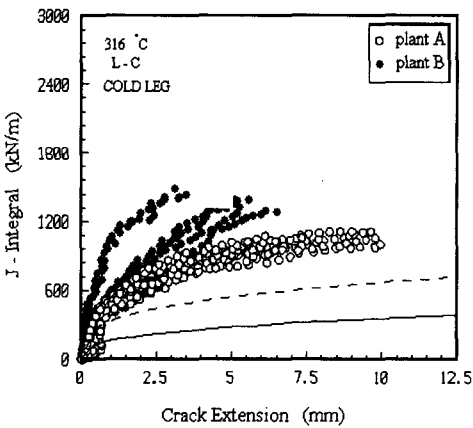


Fig. 6 Comparison of plant A and plant B cold leg pipe J-R curves for SA508 CL.1a.

본 연구에서는 두 발전소 소재의 성분 중 차이가 나는 규소함량이 파괴저항특성에 영향을 미치는 것으로 판단하고 그 영향을 알아보기 위하여 원자력발전소 A와 B의 배관소재의 파괴저항특성 결과를 비교, 분석하였다. Table 4와 Table 5에서 원자력발전소 A의 규소함량은 0.07%이하이고 원자력발전소 B의 규소함량은 0.20~0.24%로 원자력발전소 A에 비하여 매우 높은 함량이다. Fig. 8에 규소함량에 따른 파괴저항시험 결과를 함께 나타내었는데, 규소함량이 비교적 적은 원자력발전소 A의 파괴저항곡선이 원자력 발전소 B의 파괴저항곡선보다 낮게 나타났음을 볼 수 있다.

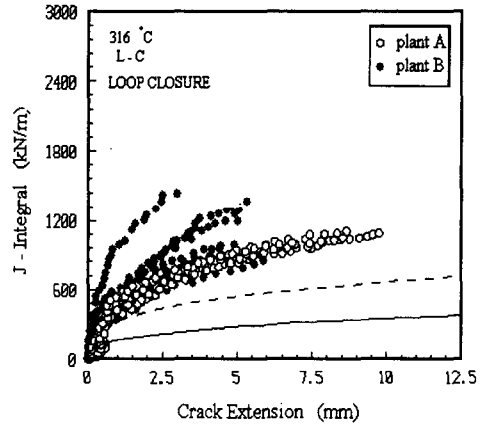


Fig. 7 Comparison of plant A and plant B loop closure pipe J-R curves for SA508 CL.1a.

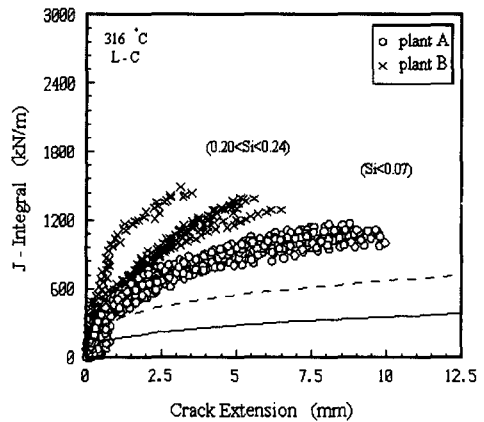


Fig. 8 Comparison of plant A and plant B J-R curves based on silicon contents.

Table 4 Chemical compositions of SA508 CL.1a steels for primary pipings of nuclear power plant A.

Pipe name	Heat number	Chemical composition (wt.%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
Hot leg	2B27871	0.240	0.060	1.310	0.006	0.002	0.270	0.210	0.020	0.003	0.002	0.040
	2B27910	0.230	0.030	1.290	0.006	0.003	0.320	0.180	0.020	0.005	0.004	0.030
Cold leg	2B27870	0.240	0.030	1.350	0.007	0.002	0.290	0.190	0.030	0.003	0.003	0.030
	2B28142	0.240	0.030	1.350	0.007	0.003	0.300	0.210	0.030	0.003	0.005	0.050
	2B27928	0.230	0.030	1.290	0.006	0.003	0.290	0.190	0.010	0.004	0.005	0.040
	2B28266	0.230	0.030	1.330	0.006	0.003	0.290	0.180	0.030	0.003	0.003	0.050
Loop closure	2B28203	0.250	0.060	1.260	0.007	0.003	0.300	0.220	0.020	0.003	0.005	0.050
	2B28107	0.230	0.020	1.340	0.006	0.003	0.310	0.210	0.030	0.003	0.004	0.040

Table 5 Chemical compositions of SA508 CL.1a steels for primary pipings of nuclear power plant B.

Pipe name	Heat number	Chemical composition (wt.%)										
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
Hot leg	2B94687	0.210	0.230	1.200	0.006	0.004	0.300	0.150	0.040	0.002	0.006	0.040
Cold leg	2B94785	0.210	0.210	1.250	0.005	0.003	0.280	0.140	0.010	0.004	0.004	0.040
	2C94906	0.225	0.210	1.210	0.006	0.004	0.290	0.160	0.010	0.003	0.004	0.045
Loop closure	2B94686	0.210	0.230	1.200	0.006	0.004	0.300	0.150	0.010	0.002	0.006	0.040

한편 규소의 함량이 인장특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 파괴저항시험을 수행한 316°C에서 인장 시험을 수행하였으며 그 결과를 Table 6과 Table 7에 나타내었다. Table 6, 7에 나타난 것처럼 규소함량이 많은 원자력 발전소 B의 재료가 규소함량이 적은 원자력 발전소 A의 재료에 비하여 인장강도는 유사하나 항복강도는 비교적 낮고, 연신률 및 단면수축률은 높게 나타났다. 이처럼 규소 함량에 따라서 파괴저항특성이 다르게 나타나는 이유는 재료의 제작 시 탈산 처리 과정에서 규소의 사용유무에 따른 미세 조직의 차이 때문이라고 생각된다. 즉 미세 조직의 변화로 인하여 재료의 연성이 증가하여 파괴저항특성이 향상된 것으로 생각된다.⁽¹⁰⁾

3.4 용접재 시험결과와의 비교

Fig. 9는 본 연구에서 사용한 원자력발전소 A

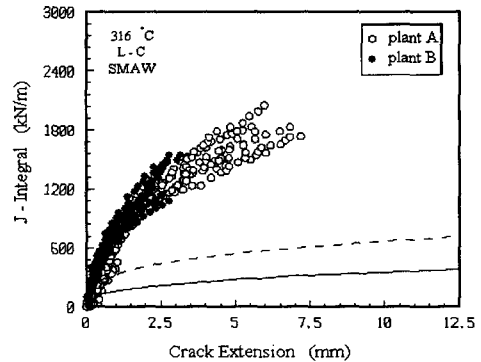


Fig. 9 Comparison of plant A and plant B J-R curves of weld metal for SA508 CL.1a.

와 B 배관소재의 주냉각계통배관 용접재의 파괴 저항특성 시험결과이다. 용접방법은 SMAW 용접으로 수행되었으며, 원자력발전소 A 소재에 대하여는 2개의 히트에 대해 히트당 4회, 원자력발

Table 6 Base materials data summary of $\sigma - \epsilon$ test results for primary pipings of nuclear power plant A (Si < 0.07 wt.%) at 316°C.

Material	Pipe name	Heat number	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation(%)	Reduction of area (%)
SA508 CL.1a	Hot leg pipe	2B27871	271	471	31	64
		2B27910	294	466	27	63
	Cold leg pipe	2B27870	280	479	28	62
		2B27928	285	473	28	64
		2B28266	282	455	24	65
		2B28142	259	471	28	65
	Loop closure pipe	2B28203	269	473	27	64
		2B28107	295	469	22	63

Table 7 Base materials data summary of $\sigma - \epsilon$ test results for primary pipings of nuclear power plant B (0.20 < Si < 0.24 wt.%) at 316°C.

Material	Pipe name	Heat number	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation(%)	Reduction of area (%)
SA508 CL.1a	Hot leg pipe	2B94687	227	475	40	77
	Cold leg pipe	2B94785	254	489	36	75
		2C94906	275	475	36	77
	Loop closure pipe	2B94686	241	468	37	79

전소 B 소재에 대하여는 3개의 히트에 대해 히트당 3회의 파괴저항시험을 수행하였다. 그림에서 보이는 것처럼 균열진전량 2.5mm를 기준으로 했을 때 원자력발전소 A와 B의 배관 소재의 파괴저항특성은 거의 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 주냉각계통 배관에 대한 SMAW 용접재의 파괴저항특성은 모두 유사하게 나타났으며 원자력용으로 그 특성이 우수하다고 생각된다.

4. 결론

원자력발전소 SA508 CL.1a 탄소강 주냉각계통 배관의 모재와 용접재에 대하여 파괴저항시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파괴저항시험결과의 최소치는 외국자료의 하한치(lower bound curve)나 국내 원자력발전소의 설계 참조치보다 높게 나타났다.

(2) 탄소강에 대한 SMAW 용접재의 파괴저항특성은 SAW 용접재보다 우수하였으며, SMAW 용접재 중에서 공장용접재의 파괴저항특성은 현장용접재보다 우수하였다.

(3) 원자력발전소 A와 B의 주냉각계통 배관의 파괴저항특성은 발전소 별로 약간의 차이가 있었으며 그 원인은 재료 제작시 탈산과정의 규소 사용 유무에 따른 미세조직의 차이에 의한 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) U.S. NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," *Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee*, NUREG-1061, Vol. 3.
- (2) 홍준화, 이봉상, 오종명, 1993, "영광3/4호기 1

- 차계통 배관소재의 파괴저항(J-R)특성,” 제1회 배관건전성 평가기술 Workshop 논문집, 한국원자력안전기술원, pp. 41~52.
- (3) 석창성, 최용식, 김영진, 장윤석, 김종욱, 1995, “영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(I),” 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1106~1116.
- (4) 김영진, 석창성, 김종욱, 장윤석, 1995, “영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(II),” 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1451~1459.
- (5) 김영진, 석창성, 장윤석, 김종욱, 1995, “영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(III),” 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1460~1468.
- (6) American Society for Testing and Materials, 1987, E1152, “Standard Test Method for Determining J-R Curves.”
- (7) Chexal. V. K, Norris. D. M, and Server. W. L. 1988, “Leak-Before-Break : An Integrated Approach for High Energy Piping,” *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 43, pp. 237~254.
- (8) KHIC, 1988, “Design-, Purchase- Specification for Reactor Coolant Pipe and Fittings for Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 3/4”.
- (9) U.S. NRC Piping Review Commission, 1993, “Loading Rate Effects on Strength and Fracture Toughness of Pipe Steels Used in Task1 of IPIRG Program,” NUREG/CR-6098 BMI-2175.
- (10) B.S. Lee, Y.J. Oh, J.H. Yoon, I.H. Kuk, J.H. Hong, 1999, “J-R Fracture Properties of SA508-1a Ferritic Steels and SA312-TP347 Austenitic Steels for PWR Primary Coolant Piping,” *Nuclear Engineering and Design*, 게재 예정.