

## 울진 원자력 발전소 3, 4호기 1차계통 배관소재의 파괴저항특성 평가

### Evaluation of Fracture Resistance Characteristic for Primary Piping System of Ulchin 3,4 Nuclear Power Plants

석창성\* · 강병구\*\* · 김수용\*\*\* · 박재실\*\*\* · 윤병곤\*\*\*

C.S. Seok · B.G. Kang · S.Y. Kim · J.S. Park · B.G. Yoon

(1998년 9월 5일 접수, 1998년 12월 20일 채택)

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to evaluate the fracture resistance characteristics of SA508 CL.1a carbon steel, TP347 stainless steel and their associated welds manufactured for primary coolant system of Ulchin 3,4 nuclear power plants. The effect of various parameters such as pipe size, welding method, chemical composition, crack plane orientation, metallography and fractography on the material properties were discussed. Test results showed that the effect of pipe size on fracture toughness is negligible while the effect of welding method on fracture toughness is significant. In addition, the drop of fracture toughness in the field fabrication weld of TP347 stainless steel is probably due to the large amount of  $\sigma$ -phase precipitated on the  $\delta$ -ferrite boundary and the large size dimples.

#### 1. 서 론

근년에 발생한 몇몇 건의 대형 안전사고는 산업설비의 안전성 확보측면에서 경제적 사회적으로 깊은 우려를 낳고 있는 실정이다. 특히 원자력 발전소와 같이 안전성이 중요시되는 시설

에 대하여는 안전성 확보를 위한 더 많은 연구를 필요로 하고 있다. 이러한 원자력 발전소의 중요한 설계개념중의 하나가 파단전부설(LBB) 개념이며 이 개념에 의해 안전성을 평가하기 위하여 반드시 필요한 것이 파괴저항특성이다. 원자력발전소의 배관계통에는 대부분 고인성 재료

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 한국중공업

\*\*\* 성균관대학교 대학원

를 사용하며, 이러한 재료에 대한 신뢰성 및 안정성의 확보는 원자력발전소의 안전과 직결되는 중요한 기초과제이다. 이에 한국원자력연구소<sup>1)</sup>에서는 영광 원자력발전소 3, 4호기 1차계통 배관에 대하여 성형가공방법과 용접방법이 파괴저항특성에 미치는 영향을 보고한 바 있다. 또한 성균관대<sup>2-4)</sup>에서는 영광 원자력발전소 3, 4호기 2차계통 배관에 대하여 배관크기, 용접, 시편채취방향, 그리고 온도가 파괴저항특성과 인장특성에 미치는 영향을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 울진 원자력발전소 3, 4호기 주냉각재 배관용으로 한국중공업(주)이 제작한 ASME SA508 CL.1a 강의 모재와 용접재, TP347 강의 모재와 용접재, 탄소강과 스테인레스강의 연결용접부에 대한 파괴저항특성시험을 수행하고 용접방법, 화학조성, 그리고 재료의 표면형상 및 조직모양 등과 같은 여러 인자들이 파괴저항특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

## 2. 파괴저항 시험

### 2.1 시험절차

NUREG 1061 Vol. 3<sup>5)</sup>의 LBB해석을 위한 시험절차에 따라 재료시험을 수행하였다. NUREG 1061 Vol. 3에 의하면 LBB해석을 위해서는 파괴저항(J-R)곡선을 정상운전의 상한범위(upper range) 부근의 온도에서 측정하도록 되어 있다. 또한 파괴저항시험의 경우 가능한 한 배관과 같은 두께의 시편을 사용하도록 되어 있으나 본 연구에서는 배관과 같은 두께의 시편을 구할 수가 없어서 1T-CT(compact tension) 표준시험편을 사용하였다. 이 밖의 시험절차는 ASTM E1152<sup>6)</sup>(standard test method for determining J-R curves)에 따라 단일시편법으로 수행하였다.

### 2.2 시험장비 및 시험온도

시험기는 25ton 용량의 전기유압식 재료시험기를 사용하였고, 시험시의 제어, 데이터처리 및 결과해석에는 퍼스널 컴퓨터를 사용하였다. 고

온시험을 위해 고온로를 사용하였으며, 시험온도는 1차계통 배관의 가동온도인 316℃로서 강제순환방식에 의하여  $\pm 1^\circ\text{C}$  범위내에서 온도를 조절하였다. 하중선(load line)의 변위측정에는 고온용 COD 게이지와 증폭기(amplifier)를 사용하였다.

### 2.3 시험재료 및 시편

Table 1은 본 시험에 사용된 소재(SA508 CL.1a)와 시편의 수를 나타낸 것이며 Table 2는 본 시험에 사용된 용접재의 용접조건과 시편의 수를 나타낸 것이다. 시험에 사용한 시편 형상은 ASTM E1152<sup>6)</sup>의 1T-CT(compact tension) 표준시험편을 사용하였다. 스테인레스강의 모재는 C-L과 L-C 방향시편을, 탄소강의 모재와 용접재 그리고 스테인레스강의 용접재는 모두 L-C 방향시편을 채취하여 실험을 수행하였다. 한편 용접재를 제작할 때, 용접부의 두께가 50.8 mm를 초과하는 용접조인트에는 예열(preheat)을 하였으며, 용접후열처리(post weld heat treatment: PWHT)는  $615 \pm 20^\circ\text{C}$ 에서 40시간 유지시켰다. 이러한 용접절차에 대해서 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Test specimen matrix for base metal

Material	Product name	Specimen orientation	Side groove	No of specimens
SA508 CL.1a	Hot leg pipe	LC	○	6
	Cold leg pipe	LC	○	12
	Loop closure pipe	LC	○	6

## 3. 페라이트계 탄소강의 파괴저항특성

### 3.1 모재의 시험결과 및 고찰

Fig. 1은 주냉각재배관 소재(SA508 CL.1a)의 배관크기에 따른 파괴저항(J-R)특성을 비교한 것인데, 그림 중 실선으로 표시한 선도는 하한치 파괴저항 곡선(lower bound curve)<sup>7)</sup>으로서 1

차계통 배관재 및 용접재에 대한 외국의 데이터베이스 중에서 J-R특성의 하한치이며, 점선은 미국의 EPRI(electric power reserch institute)에서 제시된 영광 원자력 발전소 3, 4호기 주냉각재배관 소재의 제작시에 기대하는 파괴저항치의 참조값(reference curve)<sup>8)</sup>이다. 그림에서와 같이 페라이트계 탄소강의 파괴인성치는 외국의 lower bound curve에 비해 충분히 높았다. 또한, 모재의 모든 J-R곡선이 비슷하게 나타났다.

Table 2 Test specimen matrix for weld metal

Material		Welding method	Side groove	No of specimens
Base	Filler metal			
SA508 CL1a to SA388 CL1a	Wire:L-TEC40	SAW	○	8
	E7016	SMAW (shop)	○	8
	E7016	SMAW (field)	○	6
SA240 TP347 to TP347	ER347	GTAW (shop)	*	4
	ER347	GTAW (field)	○	3

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
GTAW	ERNiCr-3	φ 2.4	16	170	None	7-15
GTAW (Shop)	ER347	φ 2.4	16	176	None	7-15
GTAW (Field)	ER347	φ 2.4	16	170	None	8-15

3.2 용접재의 시험결과 및 고찰

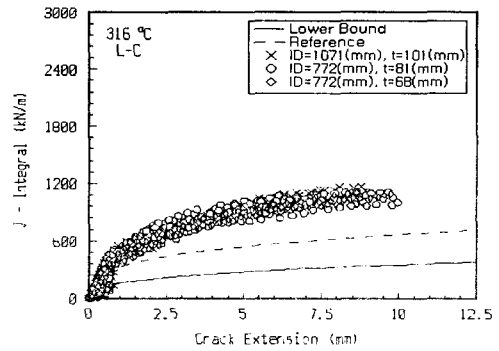


Fig. 1 Effect of pipe size on J-R curve for SA508 CL1a

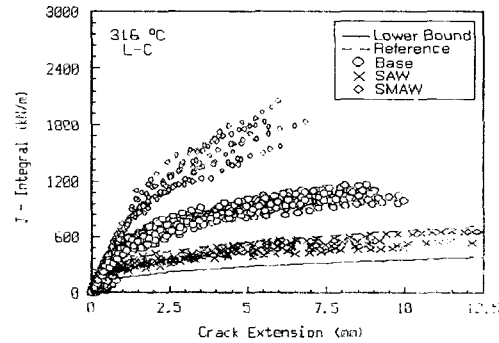


Fig. 2 Comparison of J-R curves for SA508 CL1a base and weld

Fig. 2는 주냉각재배관 용접재의 파괴저항(J-R)특성 결과를 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 용접의 우수성을 알 수 있었다. 반면, SAW 용접법은 SMAW 용접법에 비해 용착속도가 빠르고 용가재(filler metal)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 파괴저항성을 떨어지게 하는 것으로 생각된다. 아직 정확한 원인은 밝혀진 바 없으나 외국의 연구결과에도 SAW 용접재의 파괴저

항곡선이 모재에 비하여 현저히 낮다고 보고되어 있다<sup>9)</sup>. 구체적으로 U.S. NRC(U.S. nuclear regulatory commission)의 보고서에 의하면 SA106 Gr.B 탄소강 용접재의 파괴저항곡선은 모재보다 약 25%정도 낮고, SA358 TP304 스테인레스강 용접재의 파괴저항곡선은 모재보다 약 50%정도 낮게 나타났다고 보고 되었다. 본 연구 결과에서도 SAW 용접재의 파괴저항특성이 모재에 비하여 현저히 감소되었다. 그러나 외국의 lower bound curve보다는 높게 나타났으며, 영광 원자력발전소 3, 4호기의 참조치와 비슷하였다.

Fig. 3은 SMAW 용접재 중 공장용접재와 현장용접재의 파괴저항시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 공장용접재의 J-R곡선이 현장용접재의 J-R곡선보다 조금 높게 나타났다. 이러한 차이는 현장용접이 공장용접보다 열악한 환경에서 수행되기 때문이라 생각된다. 따라서 SA508 CL.1a 탄소강 용접재의 파괴저항특성은 용접방법에 따라 크게 달랐으며 파괴저항특성 관점에서 볼 때 SMAW 용접법은 SAW 용접법보다 우수하며, 현장 또는 공장에서의 SMAW 용접법은 원자력발전소용 페라이트계 배관소재에 대해 우수한 용접법이라고 생각된다.

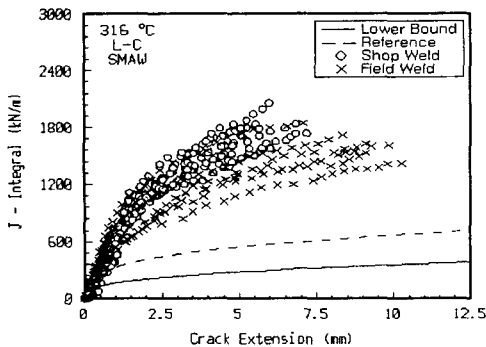


Fig. 3 Effect of shop and field welding on J-R curve for SA508 CL.1a

#### 4. 오스테나이트계 스테인레스강의 파괴저항특성

##### 4.1 모재의 시험결과 및 고찰

원자력발전소의 배관재료는 일반적인 재료의 필요성질 외에 원자력특유의 환경에 맞는 재료 특성을 가져야 하기 때문에 많은 부분이 스테인레스강으로 구성되어 있다. 초창기에는 주로 304 스테인레스강을 사용하였으나 재강법이 발전하면서 용접성 관점에서 보다 신뢰성 높은 스테인레스강들이 개발되고 있다<sup>10)</sup>. 본 논문에서는 스테인레스강 중에서 오스테나이트계 TP347 스테인레스강의 파괴저항특성 결과를 고찰하였다. 동일 배관의 두 부분에서 방향이 각각 다른 L-C와 C-L 방향으로 시편을 채취하여 시험을 수행하였고 그 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 보이는 것처럼 균열진전량 2.5mm를 기준하였을 때, C-L 방향의 파괴저항특성이 L-C 방향의 파괴저항특성보다 약 40% 떨어진, 참조치 선상에 나타났다. 따라서 오스테나이트계 TP347 스테인레스강에서도 C-L 방향 파괴저항특성치가 L-C 방향의 파괴저항특성치보다 낮았다. 또한 TP347 스테인레스강은 외국의 lower bound curve에 비하여 충분한 파괴인성치를 나타냈다.

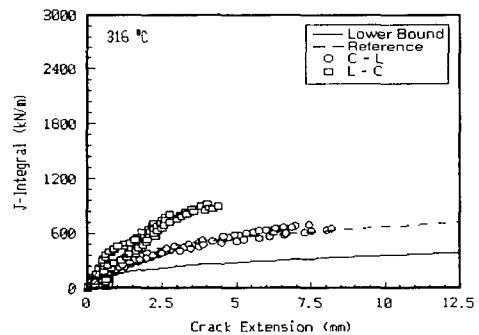


Fig. 4 Comparison of L-C and C-L direction J-R curves for TP347 stainless steel

##### 4.2 용접재의 시험결과 및 고찰

Fig. 5는 TP347 스테인레스강의 GTAW(gas tungsten arc weld)와 SMAW 용접재에 대한 파괴저항특성 결과이다. SMAW 용접재는 영광 원자력발전소 3, 4호기용 재료로서 측면가공을 한 것이고 GTAW 용접재는 울진 원자력발전소 3, 4호기용 재료로서 측면가공을 하지 않은 것이다. 일반적으로 측면가공을 수행하면 파괴저

항곡선이 20%정도 낮아진다고 보고되고 있다. 이러한 측면가공의 영향을 고려하더라도 SMAW 용접재보다는 GTAW 용접재의 파괴인성치가 높다. 오스테나이트계 스테인레스강에 대한 용접방법 중 SAW 방법은 페라이트계 탄소강의 용접과 마찬가지로 그 용접방법의 효과가 좋지 않다는 것은 외국의 사례<sup>11)</sup>를 보면 충분히 알 수가 있고, 실제로 모재보다 약 60%이상 떨어진다고 보고되어 있다. 또한, SAW 용접법보다는 비교적 우수하다고 평가되고 있는 SMAW 용접법이 있으나, 용접시 불순물의 침투를 보다 효과적으로 막기에는 미비한 점이 있다. 이러한 점을 보완하여 개발, 적용된 것이 GTAW 방법이다. GTAW방법은 플럭스를 사용하지 않고 차폐 불활성가스의 사용으로 용접개재물의 유입을 보다 효율적으로 막을 수 있어 SMAW방법에 비하여 우수한 성질을 나타낸 것으로 생각된다.

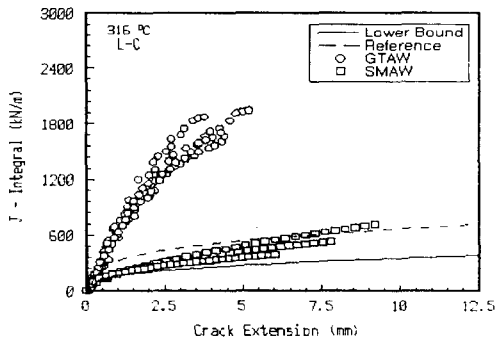


Fig. 5 Comparison of GTAW and SMAW J-R curves for TP347 weld metal

SMAW 용접재는 영광 원자력발전소 3, 4호기용 재료로서 측면가공을 한 것이고 GTAW 용접재는 울진 원자력발전소 3, 4호기용 재료로서 측면가공을 하지 않은 것이다. 역시 측면가공의 영향을 고려하더라도 SMAW 용접재보다는 GTAW 용접재의 파괴인성치가 높다. 따라서 파괴저항특성 관점에서 볼 때, 스테인레스강의 GTAW 용접법은 SMAW 용접법보다 우수한 용접법이라 생각된다.

Fig. 6은 밀림관의 용접에 사용되는 TP347 현장용접재와 공장용접재의 파괴저항시험 결과이

다. 용가재는 ER347로 동일하지만 파괴저항시험을 수행한 결과, 현장용접재의 파괴인성치가 공장용접재의 값보다 크게 떨어졌고 참조치 선상에 그 값이 나타나 있다. 물론 공장용접재는 측면가공을 한 것이고 현장용접재는 측면가공을 하지 않았다. 그러나, 측면가공의 영향을 생각하더라도 현장용접재의 파괴인성치는 공장용접재의 파괴인성치보다 훨씬 낮다. 또한 Table 4에서 인장시험결과를 살펴보면 현장용접재와 공장용접재 모두 인장강도값은 유사하나 현장용접재의 항복강도값이 공장용접재의 항복강도값에 비하여 비정상적으로 높다. 이러한 결과에 대해 추정되는 원인으로는 현장용접이 공장용접보다 열악한 환경에서 수행되기 때문이라 생각되지만 이것만으로 파괴인성치의 큰 차이를 설명하기에는 부족한 점이 많다. 따라서 공장용접재와 현장용접재의 파면형상과 조직모양을 관찰하면서 그 원인을 추적해 보았다.

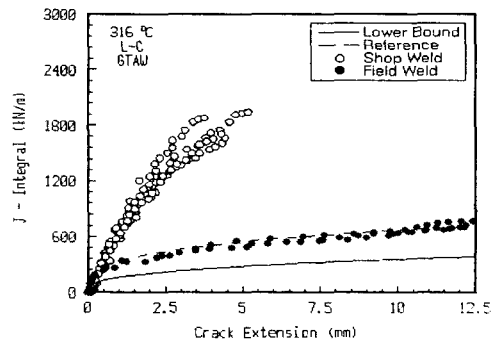


Fig. 6 Comparison of shop and field weld metal J-R curves for TP347 stainless steel

Fig. 7은 공장용접재와 현장용접재의 파면형상을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 공장용접재의 파면에서는 미세한 덩플(dimple)들이 관찰되었으나, Fig. 7(b)의 현장용접재의 파면에서는 큰 덩플들이 관찰되었다. 같은 연성재료에서 덩플의 크기가 다를 수도 있지만, 일반적으로 덩플의 크기가 클수록 취성적인 성질을, 작을수록 연성적인 성질을 갖는다고 할 수 있다. 현장용접재의 경우 덩플의 크기로 보아 공장용접재보다 취성적인 성질을 갖는다고 할 수 있다. 덩플

의 형성은 재료속의 석출물이나 개재물 등을 핵으로한 입자들이 성장, 합체하여 이루어지게 되며, 열처리시 냉각속도에 따라 그 크기가 달라질 수 있다. 한편 GTAW 방법은 보호가스에 의해 용접하기 때문에 현장작업이나 통풍이 잘 되는 곳에서는 사용이 금지되기도 하며, 0.5mm/sec.의 실바람(light air)에서도 적당한 가리개나 보호막을 설치하지 않으면 차폐가스효율에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>12)</sup>. 따라서 현장용접의 열악한 환경조건이 현장용접재의 열처리 냉각속도에 영향을 미친 것으로 생각된다.

Table 4  $\sigma$ - $\epsilon$  test results for test materials

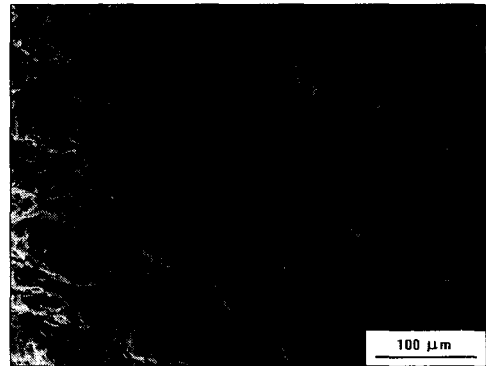
Material	Product name	Specimen identification	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
SA508 CL1a	Hot leg pipe	GB	280	471
		GC	295	466
	Cold leg pipe	GE	280	450
		GG	279	473
		GL	283	455
		GI	259	471
	Loop closure pipe	GQ	269	473
GM		295	469	

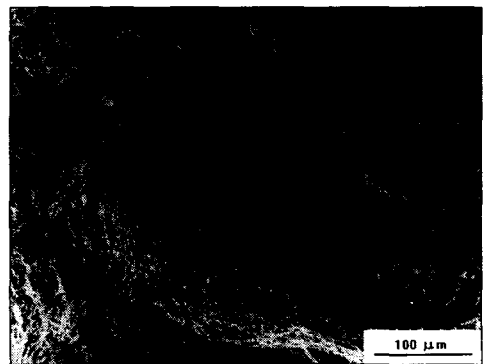
Material		Welding method	Specimen identification	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Base	Filler metal				
TP347	ER347	Shop weld (GTAW)	W3868-1	345	537
			W3868-2	351	537
			W3868-3	358	537
		Field weld (GTAW)	HJ1-1	489	524
			HJ1-2	469	524
			HJ1-3	475	531

Fig. 8(a), (b)는 현장용접재와 공장용접재의 미세조직을 각각 나타낸 것으로서 모두 오스테나이트조직속에 수지상의  $\delta$ -페라이트가 분포되어 있다. 그림에서 나타났듯이 현장용접재의  $\delta$ -페라이트양이 공장용접재의  $\delta$ -페라이트양보다 조금 많이 분포되어 있다. 또한  $\delta$ -페라이트 경계에 석출되어있는 현장용접재의 시그마상은 공장용접재의 시그마상보다 그 양이 매우 많다. 따라서 현장용접재의 경우  $\delta$ -페라이트 경계에

석출되어있는 많은 양의 시그마상에 의해 파괴 인성이 저하된 것으로 생각된다.



(a) shop weld



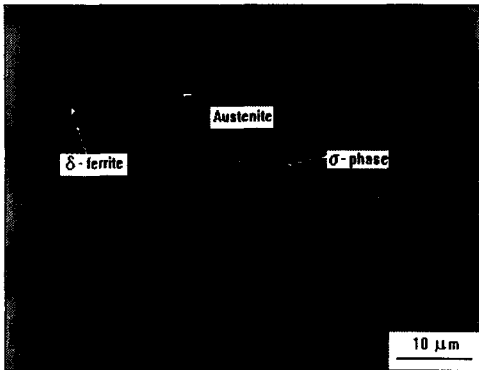
(b) field weld

Fig. 7 Fractography of shop and field weld for stainless steel at 316°C using ER347 filler metal

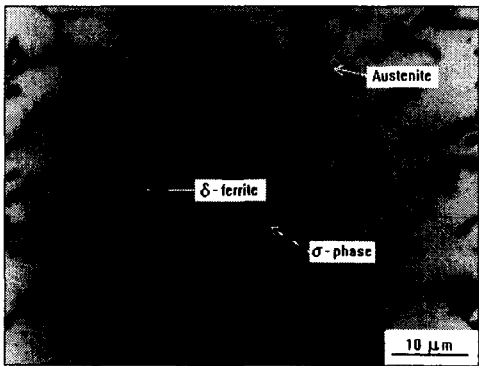
### 5. 결 론

본 연구에서는 울진 원자력발전소 3, 4호기의 주냉각재배관계통의 모재와 용접재에 대한 파괴 저항시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모재와 용접재의 모든 파괴저항시험결과의 최소치는 외국자료의 lower bound curve보다 높은 수준에 나타났다.
- 2) 탄소강에 대한 SMAW 용접재의 파괴저항특성은 SAW 용접재보다 우수하였으며, SMAW 용접재 중에서 공장용접재의 파괴저항특



(a) shop weld



(b) field weld

Fig. 8 Microstructures of shop and field weld for stainless steel at 316°C using ER347 filler metal

성은 현장용접재보다 우수하였다.

- 3) 스테인레스강에 대한 GTAW 용접재의 파괴저항특성은 SMAW 용접재보다 우수하였으며, GTAW 용접재 중에서 공장용접재의 파괴저항특성은 현장용접재보다 우수하였다. 현장용접재의 경우 δ-페라이트 경계에 석출된 시그마상과 파단면에 형성된 큰 덩이를 확인할 수 있었다.
- 4) 본 연구의 실험결과 파괴저항곡선이 미국의 EPRI에서 제시된 파괴저항치의 참조값이나 하한치 파괴저항곡선 보다 높게 나타났다. 따라서 이러한 시험결과는 울진 원자력발전소 3,4호기 주냉각배관의 LBB평가시 안전성평가 단계에서 기초 자료로 사용될 수 있다.

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) 홍준화, 이봉상, 오종명, “영광3/4호기 1차계통 배관소재의 파괴저항(J-R)특성”, 제1회 배관건전성 평가기술 Workshop 논문집, 한국원자력안전기술원, pp. 41~52, 1993.
- 2) 석창성, 최용식, 김영진, 장윤석, 김종욱, “영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(I)”, 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1106~1116, 1995.
- 3) 김영진, 석창성, 김종욱, 장윤석, “영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(II)”, 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1451~1459, 1995.
- 4) 김영진, 석창성, 장윤석, 김종욱, “영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(III)”, 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1460~1468, 1995.
- 5) U.S. NRC Piping Review Commission, “Evaluation of Potential for Pipe Break”, Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061, Vol. 3, 1983.
- 6) American Society for Testing and Materials E1152.
- 7) V.K. Chexal, D.M. Norris and W.L. Server, “Leak-Before-Break: An Integrated Approach for High Energy Piping”, Int. J. Pres.Ves. & Piping, Vol. 43, pp. 237~254, 1988.
- 8) KHIC, “Design-, Purchase- Specification for Reactor Coolant Pipe and Fittings for Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 3/4”, 1988.
- 9) U.S. NRC Piping Review Commission, “Loading Rate Effects on Strength and Fracture Toughness of Pipe Steels Used

- in Task1 of IPIRG Program”, NUREG/  
CR-6098 BMI-2175, 1993.
- 10) 홍준화 등, “원자력용 스테인레스강 개발”,  
한국원자력연구소 연구보고서, 1993.
- 11) U.S. NRC Piping Review Commission,  
“Predictions of J-R Curves with Large  
Crack Growth from Small Specimen Data”,  
NUREG/CR-4575, 1986.
- 12) 윤두근, “자동 특수용접공학”, 성안당, pp.  
13~14, 1993.
-