

〈論 文〉

영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(1)

-정지냉각계통-

석창성* · 최용식* · 김영진** · 장운석*** · 김종욱***

(1993년 5월 10일 접수)

Evaluation of Material Properties for Yonggwang Nuclear Piping Systems (I)

-Shutdown Cooling System-

C. S. Seuk, Y. S. Choi, Y. J. Kim, Y. S. Chang and J. W. Kim

Key Words : LBB Test (파단전누설시험), Shutdown Cooling System (정지냉각계통), J-R Curve (파괴저항곡선), J_{IC} , σ - ϵ Curve (응력-변형률선도), S_y (항복강도), S_u (인장강도)

Abstract

Leak Before Break(LBB) design concept is applied to piping systems of newly-built Yonggwang 3, 4 nuclear generating stations as a design alternative to the provision of pipe whip restraints, in recognition of the questionable benefits of providing such restraints. The objective of this paper is to evaluate the material properties (tensile and fracture toughness) of SA312 TP316 stainless steel and their associated welds manufactured for shutdown cooling system of Yonggwang 3, 4 nuclear generating stations. Effect of various parameters such as specimen orientation, test temperature, welding on material properties were examined.

기 호 설 명

B : 시편두께

B_N : 시편의 순두께

J : J -적분값

J_{MAX} : J 의 최대값

J_{IC} : J 의 임계값

J_Q : 잠정적인 J_{IC}

L : 연신율

P_L : CT시편의 피로예비균열하중

S_y : 항복강도

S_u : 인장강도

T_R : 찢김 저항계수

W : 시편의 폭

a_o : 피로예비균열의 길이

b_o : 시편의 잔여 폭

n : 가공경화지수

Δa : 균열진전량

α : 상수

ϵ : 진변형률 (true strain)

ϵ_n : 공칭변형률 (nominal strain)

ϵ_o : 항복점에서의 변형률

σ : 진응력 (true stress)

σ_n : 공칭응력 (nominal stress)

σ_y : 유효 항복강도 = (항복강도 + 인장강도) / 2

σ_o : 항복응력

1. 서 론

*정회원, 성균관대학교 기계공학과

**정회원, 성균관대학교 기계설계학과

***정회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

중전의 원자력발전소 배관계통 설계에는 양단순
간파단(double-ended guillotine break : DEGB) 개념

이 적용되어 왔으며,^(1,2) 이를 바탕으로 하여 격납 용기의 크기와 사고 방사선 유출량의 설정 및 비상노심냉각계통(emergency core cooling system)의 크기를 결정하였다. 배관계통 설계에 DEGB개념을 적용할 경우, 가상배관파단시 파손된 배관 주위의 주요부품 및 계통에 미치는 손상을 방지하고 최소화하기 위하여 배관 주위에 육중한 배관휨 구속물(pipe whip restraint)이나 유체방출보호벽(jet impingement shield) 등의 지지물(support)을 설치하도록 법적으로 규제하고 있다.⁽³⁾ 그러나 이같은 보호물들은 제작·설치비용이 클 뿐 아니라 운전중검사 및 보수시 배관 접근을 방해하여 검사요원 및 보수요원들의 방사선 피폭을 증가시키는 요인이 되었으며, 구속물이나 보호물과의 접촉으로 인하여 오히려 배관응력을 증가시킨다는 문제점을 갖고 있다.

최근 탄소성 파괴역학(elastic plastic fracture mechanics: EPFM)의 발전⁽⁴⁻⁶⁾과 원자력발전소의 충분한 운전경험^(9,10)으로부터 결함이 있는 배관은 대부분 파단되기 전에 많은 누설이 발생한다는 결론을 얻었다. 즉, 배관계통에 각종 형태의 작은 결함들이 존재한다고 가정하고 다양한 배관하중 조합하에서 그들의 거동을 해석·실험한 결과에 의하면, 이러한 결함들은 DEGB나 그와 동등한 파단형태에 도달할 수 있는 임계균열길이(critical crack length: CCL)로 성장하기 훨씬 전에 가동중검사(in-service inspection: ISI) 또는 누설감지장치(leak detection system)로 탐지할 수 있으며, 불안정 균열성장에 대해 충분한 안전여유를 갖고 있으므로 대형 파단사고로 발전될 가능성이 극히 낮다는 것이 파괴역학적으로 입증되었다. 이러한 결과를 배관계통설계에 적용한 것이 파단전누설(leak before break: LBB)설계 개념이다.

USNRC(United States Nuclear Regulatory Commission)에서는 탄소성 파괴역학 연구를 적극적으로 지원하였으며 그 결과, 1984년 발전소 설계시 LBB개념 적용에 대한 기술지침서 NUREG 1061 Vol. 3⁽⁷⁾을 발간하였다. 그 후, 1987년 10 CFR 50 Appendix A GDC-4의 개정으로 LBB개념을 원전 배관계통에 적용하도록 허가하였다. 그 개정내용은 배관 파손가능성이 극히 낮음을 파괴역학적으로 입증하는 경우에는 LBB개념을 설계에 적용할 수 있다는 것이다.

LBB개념을 설계에 적용하기 위해서는 배관계통에 설치된 누설감지장치로부터 감지 가능한 누설량

에 해당하는 균열크기에 최대 하중조합이 작용하더라도 양단파단이 일어나지 않는다는 것이 파괴역학적인 방법으로 입증되어야 한다. 이를 위하여 배관계통의 탄소성 파괴역학 해석을 하여야 하며, 이때 배관재료의 응력-변형률(σ - ϵ) 및 파괴저항(J - R) 특성자료가 필요하다.

본 연구의 목적은 영광 원자력발전소 3/4호기를 위해 한국중공업(주)가 준비한 2차 계통의 정지냉각계통과 안전주입계통 및 주증기계통의 배관용 재료인 SA312 TB316, SA312 TP304, SA106 Gr. C강 및 그의 용접부 재료에 대해, 사용온도 및 상온에서의 응력-변형률 및 파괴저항 특성자료를 획득하는데 있다. 본 보에서는 그 첫번째 연구로 정지냉각계통의 SA312 TP316, 16" 파이프 및 그의 용접부 재료에 대해, 사용온도(327°C) 및 상온(20°C)에서의 응력-변형률 및 파괴저항 특성자료를 얻고자 하며, LBB설계에 필요한 재료물성치 평가 시험절차에 대하여 알아보고 시험결과와 유효성과 시편방향, 온도, 용접의 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. LBB평가를 위한 재료시험 절차

배관의 응력-변형률(σ - ϵ)선도 및 파괴저항(J - R)곡선은 정상운전의 상한범위(upper range) 부근의 온도에서 결정되어야 하므로, 사용온도인 고온에서 적어도 3개의 응력-변형률(σ - ϵ)선도 및 파괴저항(J - R)곡선을 얻어야 한다. 천이온도(DBTT)는 가동온도보다 아래에 있어야 하며, 안전을 고려하여 사용온도(327°C)와 상온(20°C)사이의 천이영역이 없어야 한다. 이를 확인하기 위하여 상온에서도 응력-변형률시험과 파괴저항시험을 하여야 한다. 고온시험에 있어서 동로재료(archival material)를 사용할 경우 1개의 히이트에 대하여 응력-변형률 및 파괴저항시험을 수행하면 충분하지만, 이로재료(nonarchival)를 사용할 경우 동일한 사양의 3개의 히이트에 대하여 최소한 각각 2개의 응력-변형률 및 파괴저항시험을 수행하여야 한다. 상온시험의 경우에는 모재 및 용접재에 대하여 각각 1개의 응력-변형률 및 파괴저항시험을 수행하여야 한다.

응력-변형률시험의 경우, 비례한계로부터 최대하중까지의 응력-변형률(σ - ϵ)선도를 얻어야 하며, 항복강도와 인장강도도 구하여야 한다. 파괴저항시험의 경우, 시편이 파단될 때까지 균열을 진전시켜야 하며, 가능한 한 배관과 같은 두께의 시편을 사용

하여 J - R 곡선과 J_{IC} 를 구하여야 한다.

본 연구에서는 NUREG 1061 Vol. 3⁽³⁾의 LBB 시험방법에 따라 다음과 같은 절차로 LBB평가를 위한 재료물성치 평가시험을 하였다.

(1) 각 파이프에서 최저의 인성치를 갖는 2개의 히트번호(heat number)를 선택한다. 이때, 인성치(U)는 시편재료의 항복강도(S_y)와 인장강도(S_u) 및 연신율(L)을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$U = (S_y + S_u) \times L \quad (1)$$

(2) 선택된 히트번호에 대하여 L -방향과 C -방향의 고온 응력-변형률시험을 한다.

(3) 선택된 히트번호에 대하여 L -방향과 C -방향의 고온 파괴저항시험을 한다.

(4) L - C 방향의 고온 파괴저항시험에서, 최저의 파괴에너지(fracture energy)를 갖는 히트번호에 대하여 L -방향의 상온 응력-변형률시험과 L - C 방향의 상온 파괴저항시험을 한다.

(5) 각 파이프에서 항복강도(S_y)와 인장강도(S_u)의 합이 평균이 되는 2개의 히트번호를 선정하여, 각각의 히트번호에 대하여 2개씩의 L -방향과 C -방향의 고온 응력-변형률시험을 한다.

3. 시험방법

3.1 시험장비

시험기로는 25톤 용량의 유압식 재료시험기를 사용하였으며, 본 시험을 시작하기 전에 정부지정 검사기관으로부터 교정을 받아 시험기의 정도를 확인하였다. 본 시험에서 사용한 시험장치의 약도는 Fig. 1과 같으며, 시험시의 제어, 데이터의 처리 및 결과해석은 16bit PC를 사용하였다.

고온시험은 가열로를 사용하였으며, 가열로 내의 온도분포가 균일하게 조절되도록 시편의 균열부와 가열로 내에 온도감지기를 설치하여 온도를 감지하고 조절하였다. 응력-변형률시험에서는 고온용 신장계(extensometer)를 사용하여 변위를 측정하였

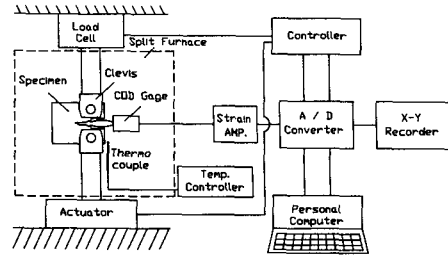


Fig. 1 Schematic diagram of J_{IC} testing system

으며, J_{IC} 시험에서는 고온용 COD게이지와 증폭기(amplifier)를 사용하여 하중선변위를 측정하였다.

3.2 시험재료

본 시험(σ - ϵ 및 J - R)에서는 영광 3, 4호기에 사용될 정지냉각계통의 ASME SA312 TP316 스테인레스강의 소재와 그의 용접재(weld)를 시험재료로 사용하였다. 공장용접(shop welding)은 현대중공업(주)에서, 현장용접(field welding)은 현대건설(주)에서 하였으며, 구체적인 용접조건은 Table 1과 같다. 정지냉각계통에 사용될 파이프의 소재중에서 최저의 인성치를 갖는 2개의 히트번호(105419, 105507)를 선정하였다. 또 다른 하나의 히트번호(105414)의 소재를 공장과 현장에서 용접하여 용접시험소재로 하였다.

3.3 시편

Fig. 2는 시편방향을 나타내고 있다. 응력-변형률시험의 경우 모재에서는 L 및 C 방향으로, 용접재에서는 L 방향으로 시편을 채취하여 실험하였으며, 파괴저항시험의 경우 모재에서는 L - C 및 C - L 방향으로, 용접재에서는 L - C 방향으로 시편을 채취하여 실험하였다.

응력-변형률시험에 사용된 환봉(round bar) 시편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같으며, 파괴저항시험에 사용된 시편의 형상 및 치수는 Fig. 4와 같다. Table 2는 본 시험에 사용된 SA312 TP316강

Table 1 Comparison of welding procedure specifications (SA312 TP316)

Welding location	Filler metal		Preheat & PWHT	Shielding gas	Flow rate (l/m)	Travel speed (mm/sec)
	AWS No.	Size (mm)				
Shop	ER308	3.20	N/A	Argon	12	1.02~3.28
Field	ER308L	2.39~3.18	N/A	Argon	10	0.97~2.20

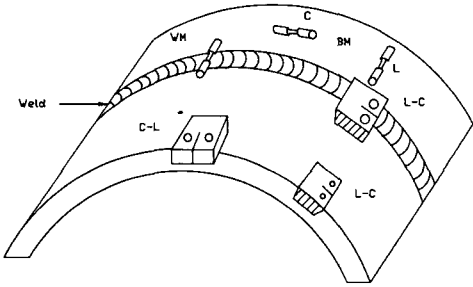


Fig. 2 Specimen orientation with respect to the specimen from a pipe of weld (BM : Base metal WM : Weld metal)

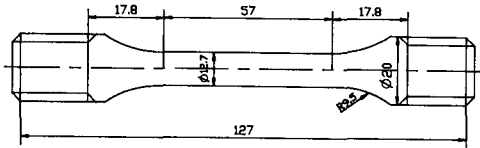


Fig. 3 Geometry for σ - ϵ test specimen

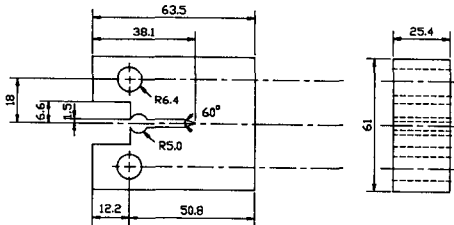


Fig. 4 Geometry for J-R test specimen

의 소재와 용접부, LBB평가 시험절차에 따라 선정된 히트번호, 시편의 수를 나타낸 것이며, Table 3은 본 시험에 사용된 SA312 TP316강의 화학 성분을 나타낸 것이다.

3.4 응력-변형률시험방법 (σ - ϵ)

응력-변형률시험은 ASTM E8-89b(standard test method of tension testing of metallic material)와 E21-79(standard recommended practice for elevated temperature tension tests of metallic materials)에 따라 실시하였다. 고온시험은 시편의 3점에서 온도를 측정하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 에서 정상상태로 2시간 유지시킨 후에 실시하였다. 항복점은 0.2% 오프셋법을 사용하여 결정하였으며, 인장강도는 ASTM E8-89b, 7.5항에 따라 최대하중을 원단면적으로 나누어 결정하였다. 또한 시험에서 얻어진 하중-변위 선도로부터 공칭응력-공칭변형률 선도를 얻었으며,

Table 2 Number of LBB test specimens

Material	σ - ϵ test		J-R test	
	Upper	Lower	Upper	Lower
Lowest toughness base metal	4	1	4	1
Median toughness base metal	8	0	0	0
Shop fab. weld metal	3	1	3	1
Field fab. weld metal	3	1	3	1

Table 3 Chemical composition of SA312 TP316 steel (Wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.08	0.75	2.00	0.04	0.03	06.0	2.00

여기에 다음 식을 적용하여 진응력-진변형률 선도를 구하였다.

$$\sigma = \sigma_n(1 + \epsilon_n) \tag{2}$$

$$\epsilon = 1n(1 + \epsilon_n) \tag{3}$$

진응력-진변형률 선도를 다음의 Ramberg-Osgood 식으로 곡선맞춤(curve fitting)하여 상수항 α , n 을 결정하였다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^n \tag{4}$$

3.5 파괴저항시험방법(J-R)

파괴저항시험은 ASTM E813-87(standard test method for J_{IC} , a measure of fracture toughness)과 E1152-87(standard test method for determining J-R curves)에 따라 단일시편법(single specimen method)으로 수행하였다.

3.5.1 피로예비균열

파괴저항 시편의 노치선단에 ASTM E1152-87의 7.6항에 따라 피로예비균열을 만들었다. 상온에서 피로하중을 작용시켜 폭에 대한 피로예비균열의 비(a_0/W)가 0.6이 되도록 하였다.

3.5.2 측면홈 가공

시편에 피로예비균열을 만든 후 ASTM E1152-87, 7.5항에 따라 균열이 직진하도록 시편두께(B)의 10%씩, 양면에 측면홈(side groove)가공을

하였다. 측면홈은 45°각도의 노치커터를 사용하여 피로예비균열과 일치하도록 가공하였다. 따라서 시편의 두께가 25.4 mm인 경우 시험에 사용한 시편의 순두께(B_N)는 경우 20.3 mm이다.

3.5.3 J-R곡선의 결정

제하 컴플라이언스(unloading compliance)법으로 하중-하중선변위 선도를 작성하여 제하시의 컴플라이언스(unloading compliance)로부터 균열길이를 산출하고, 하중-하중선변위 선도의 아래 면적으로부터 J -적분값을 구하였다. 이 시험결과를 J 와 균열진전량과의 관계로 나타낸 후, 이를 다음과 같은 식으로 곡선맞춤을 하여 J -저항(J -R)곡선을 구하였다.

$$J = C_1 (\Delta a)^{0.2} \quad (5)$$

3.5.4 J_{IC} 의 결정

위의 식 (5)의 형태로 회귀분석하여 구한 J -저항 곡선과 둔화선(blunting line, $J=2\Delta\sigma\sigma_y$)의 0.2 mm 오프셋선(offset line)이 만나는 점의 J 값을 J_{IC} 로 하였다.

3.5.5 균열길이 측정

제하 컴플라이언스법으로 산출된 균열길이와 실제의 균열길이와 일치하는지를 검토하여야 한다. 시편파단면의 피로예비균열과 진전된 균열의 식별을 용이하게 하기 위하여, 상온에서 실험한 시편에는 ASTM E813-87의 8.4.3.8항에 따라 가열착색(heat tinting)을 하였으며, 고온(327°C)에서 실험한 시편은 실험중에 가열착색이 되었으므로 별도의 착색을 하지 않았다. 이렇게 가열착색이 된 시편에 피로하중을 작용시켜 시편을 파단시켰다. 50배율의 이동식 현미경(travelling microscope)을 이용하여, 시편파단면의 등간격 9점에서 초기 균열길이와 균열진전량을 측정하고, 이를 제하 컴플라이언스법으로 해석한 시험결과와 비교, 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 고온시험 결과

최저의 인성치를 갖는 2개의 히트번호(105418, 105419)에 대하여 각각 L -방향과 C -방향의 고온(327°C) 응력-변형률시험을 하였으며 L - C 와 C - L

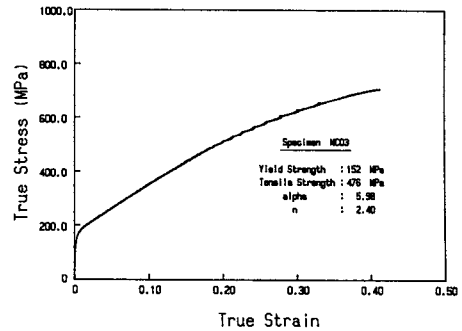


Fig. 5 Tensile test result for MC03 specimen

방향의 고온 파괴저항시험을 하였다. 또, 평균 인성치를 갖는 2개의 히트번호(105419, 105507) 각각에 대하여, 2개의 L -방향과 2개의 C -방향의 고온(327°C) 응력-변형률시험을 하였다.

MC03 시편을 이용한 응력-변형률시험의 경우, 3.4절의 절차에 따라 Fig. 5와 같은 진응력-진변형률(true stress-true strain)선도를 구하였다. 이 결과를 식(4)에 적합하여 α 와 n 값을 구하였다. 같은 방법으로 모재와 용접재에 대한 시험결과로부터 구한 항복강도, 인장강도, α , n 값을 정리한 결과는 Table 4와 같다.

한편 LBB 해석에 사용되는 균열크기를 결정하기 위한 평균인성치를 갖는 재료의 시험결과를 Table 5와 같다.

MC07 시편을 이용한 파괴저항시험의 경우, 하중-하중선변위(load-load line displacement)선도로부터 Fig. 6과 같은 J -R 선도를 구하였다. 이 J -R 데이터를 식(5)의 형태로 적합하여 C_1 과 C_2 를 구하였으며 ASTM의 방법에 따라 J_{IC} 를 구하였다. 파괴에너지(fracture energy)는 J -R 데이터를 적합한 J -R 곡선식의 아래 면적을 계산하여 얻었다. 이 때 균열진전량의 유효범위인 $0.1b_0$ 까지의 면적을 계산하였다.

같은 방법으로 구한 모재 및 용접재에 대한 J_{IC} , C_1 , C_2 및 파괴에너지 값을 정리하면 Table 6과 같다.

4.2 상온시험 결과

일반적으로 내압만 작용할 경우 C -방향 또는 C - L 방향의 파괴의 위험성이 크다. 배관재에는 내압 이외에 굽힘응력이나 열응력 등이 작용하므로 L -방향의 조합응력이 크다고 알려져 있고, 파괴의 사

Table 4 Summary of σ - ϵ test results at upper temperature for lower bound value

Identification			Orient.	S_y (MPa)	S_u (MPa)	α	n
Material	Heat No.	Specimen					
Base metal	105418	MC03	L	152	476	5.98	2.40
		MC04	C	159	462	4.75	2.48
	105419	MC11	L	159	469	3.19	2.53
		MC14	C	138	462	8.21	2.20
Shop fab. weld metal	105414	MJ01	L	241	483	0.21	6.20
		MJ02	L	221	483	1.49	4.61
		MJ03	L	241	483	0.65	4.79
Field fab. weld metal	105414	MO01	L	179	483	5.02	2.77
		MO02	L	186	476	7.14	2.68
		MO05	L	172	476	6.09	2.77

Table 5 Summary of σ - ϵ test results at upper temperature for median value

Identification		Orient.	S_y (MPa)	S_u (MPa)	α	n
Heat No.	Specimen					
105419	MC21	L	166	476	8.21	2.38
	MC22	L	131	469	6.87	2.40
	MC24	C	145	469	6.38	2.27
	MC25	C	138	455	5.30	2.25
105507	MC27	L	131	469	6.86	2.40
	MC28	L	166	469	5.87	2.56
	MC30	C	173	476	5.44	2.63
	MC31	C	173	476	7.01	2.62

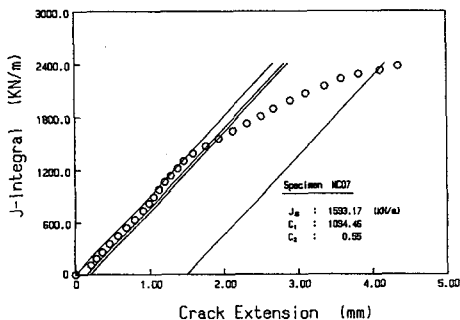


Fig. 6 Fracture toughness test result for MC07 specimen

레도 L-방향 또는 L-C방향의 파괴가 대부분이다. 따라서 상온시험에서는 L-방향의 응력-변형률시험과 L-C방향의 파괴저항시험을 하였다.

시험대상 재료로는 모재의 경우 4.1.2절에 수록한 파괴저항시험 결과에서 파괴에너지가 최소인 히트번호인 '105419'를 선정하였으며, 용접재의 경우 각 히트번호마다 한개씩의 시편을 선정하였다.

이들 시편을 이용하여 상온(lower temperature, 20°C)에서 응력-변형률시험을 수행하여 구한 항복강도, 인장강도, α , n값은 Table 7과 같다.

또, 이들 시편을 이용하여 상온(room tempera-

Table 6 Summary of J-R test results at upper temperature for lower bound value

Identification			Orient.	J _{1c} (KN/m)	C ₁	C ₂	Fracture energy (N)
Material	Heat No.	Specimen					
Base metal	105418	MC07	L-C	1594	1094	0.55	2549
		MC10	C-L	1760	1220	0.47	2763
	105419	MC17	L-C	800	718	0.61	1811
		MC20	C-L	1113	933	0.41	2118
Shop fab. weld metal	105414	MJ06	L-C	956	890	0.60	-
		MJ07	L-C	756	777	0.71	-
		MJ08	L-C	885	843	0.58	-
Field fab. weld metal	105414	MO06	L-C	1665	1175	0.48	-
		MO07	L-C	2044	1272	0.55	-
		MO08	L-C	452	569	0.57	-

Table 7 Summary of σ - ϵ test results at room temperature

Identification			Orient.	S _y (MPa)	S _u (MPa)	α	n
Material	Heat No.	Specimen					
Base metal	105419	MC12	L	255	545	6.17	2.88
Shop weld metal	105414	MJ04	L	386	579	0.47	6.66
Field weld metal	105414	MO04	L	269	566	7.19	3.13

Table 8 Summary of J-R test results at room temperature

Identification			Orient.	J _{1c} (KN/m)	C ₁	C ₂
Material	Heat No.	Specimen				
Base metal	105419	MC16	L-C	1804	892	0.50
Shop weld metal	105414	MJ09	L-C	1883	742	0.54
Field weld metal	105414	MO09	L-C	1316	947	0.50

ture, 20°C)에서 파괴저항시험을 수행하였으며, 시험결과를 정리하여 구한 J_{1c}, C₁, C₂값은 Table 8과 같다.

4.3 고찰

4.3.1 J_{1c} 데이터의 유효성

E813-87에 의하면 J_q가 J_{1c}로 인정되기 위하여는 다음의 6가지 항목의 조건을 만족시켜야 한다.

I. Specimen size

II. J_{MAX}

III. Data spacing

IV. Regression line

V. Crack shape

VI. Crack extension

이상의 6가지 항목의 조건에 대한 시험결과와 유효성을 검토하였으며, 그 결과를 Table 9에 정리하였다. 여기서, 실험상의 오차를 확인하는 조건 III, IV, V, VI은 대체로 잘 만족하였으나, 조건 I, II는 대부분 만족시키지 못하였다. 이는 재료

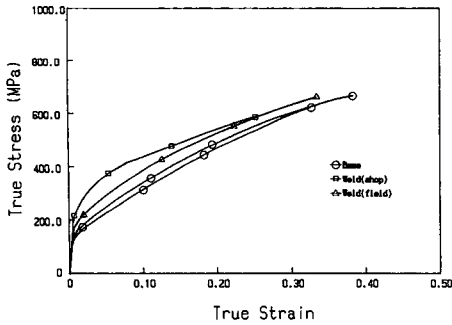


Fig. 11 Comparison of σ - ϵ curves for welding effect

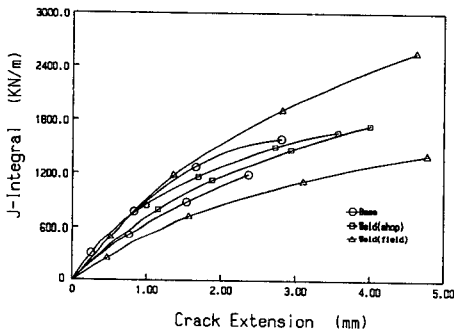


Fig. 12 Comparison of J-R curves for welding effect

4.6 용접효과

용접은 공장용접 및 현장용접을 수행하였는데, 이를 비교하기 위하여 Fig. 11과 같은 σ - ϵ 선도의 비교와 Fig. 12와 같은 J-R 곡선의 비교를 하였다. Fig. 11에서 용접재보다는 모재의 경우가, 공장용접보다는 현장용접의 경우가 연성이 좋은 것으로 나타났다. 또한 Table 4와 Fig. 11에 보인 바와 같이 항복강도는 용접재의 경우가 크지만 인장강도는 거의 비슷하게 나타났는데, 이는 계이치가 장착된 용접부에서 파단이 일어나지 않고 모재부분에서 파단이 일어났기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 12와 Table 6에서 모재 및 용접재에 대한 J_{IC} 값을 비교할 때, 모재와 용접재의 J_{IC} 값이 거의 비슷하게 나타났으며, 모재보다는 용접재의 분산이 크게 나타났다. 이는 실제적인 용접조건이나 용접 기능 등의 차이 때문이라고 생각된다.

5. 결 론

원자력발전소의 2차계통인 정지냉각계통의 배관용 소재와 그의 용접부 재료에 대하여, 고온

(327°C)과 상온(20°C)에서 LBB평가를 위한 재료물성시험절차에 따라 응력-변형률시험과 파괴저항시험을 하여, LBB평가를 위한 기초자료를 제시하였다. 또 그 결과의 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 항복강도, 인장강도, σ - ϵ 선도 등은 ASTM의 표준시험법에 따라 구할 수 있었으나, J_{IC} 시험에서는 시험재료의 연성이 우수하여 ASTM의 조건을 만족하는 J_{IC} 값을 구할 수 없었다.

(2) 온도의 영향을 정확히 고찰할 수는 없었으나, 파괴저항시험의 결과나 응력-변형률시험의 결과는 상온(20°C)의 경우가 고온(327°C)의 경우보다 우수한 것으로 나타났으며, 연성-취성 천이저동은 관찰되지 않았다.

(3) 응력-변형률시험의 결과와 파괴저항시험의 결과 모두에서 시편 채취방향의 영향은 거의 없었다.

(4) 응력-변형 및 파괴저항시험의 결과로부터 용접재의 재료물성치가 모재의 것보다 우수한 것을 알 수 있었으며, 용접조건이나 기능 등의 차이로 용접재의 시험결과와 분산이 모재의 경우 보다 크게 나타났으며, 공장용접 및 현장용접에 따른 차이는 명확하지 않았다.

후 기

본 연구에 많은 협조를 해주신 한국중공업(주)과 한국전력기술(주)의 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 10 CFR Part 50, 1986, *Appendix A-General Design Criteria for Nuclear Power Plants*, USNRC.
- (2) 송희갑, 손갑현 외 7인, 1987, "지지구조물 단 순화 방안 검토 (NP 62)," 한국원자력연구소.
- (3) 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.
- (4) Kumar, V., German, M. and Shih, C. F., 1981, *An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis*, EPRI Report NP-1931, Electric Power Research Institute.

- (5) Paris, P. C. and Tada, H., 1983, *The Application of Fracture Proof Design Methods Using Tearing Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Throughwall Cracks*, NUREG/CR-3464, Nuclear Regulatory Commission.
- (6) Gudas, J. P. and Davis, D. A., 1982, "Evaluation of the Tentative *J-R* Curve Testing Procedure by Round Robin Tests of HY-130 Steel," *J. of Testing and Evaluation*, Vol. 10, pp. 252~262.
- (7) Kanninen, M. F. et al., 1983, *The Development of a Plan for the Assessment of Degraded Nuclear Piping by Experimentation and Tearing Instability Fracture Mechanics Analysis*, NUREG/CR-3142, Vol. 1 and 2, U. S. Nuclear Regulatory Commission.
- (8) Zahoor, A. and Gamble, R. M., 1984, *Leak Before Break Analysis for BWR Recirculation Piping Having Cracks at Multiple Weld Location*, EPRI NP-3522-LD, Electric Power Research Institute.
- (9) Westinghouse, 1982, *Mechanistic Fracture Evaluation of Reactor Coolant Pipe Containing a Postulated Circumferential Throughwall Crack*, WCAP-9558.
- (10) Westinghouse, 1982, *Tensile and Toughness Properties of Primary Piping Weld Metal for Use in Mechanistic Fracture Evaluation*, WCAP 9787.