

〈論 文〉

영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(Ⅲ) —주증기계통—

김영진* · 석창성** · 장윤석*** · 김종욱***

(1994년 11월 8일 접수)

Evaluation of Material Properties for Yonggwang Nuclear Piping Systems (Ⅲ) — Main Steam System —

Y. J. Kim, C. S. Seok, Y. S. Chang and J. W. Kim

Key Words : LBB(파단전누설), J-Integral(J-적분), Tearing Modulus(찢김계수), J-R Curve(파괴저항선도), σ - ϵ Curve(응력-변형률선도)

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the material properties of SA106 Gr. C carbon steel and its associated weld manufactured for main steam system of Yonggwang 3, 4 nuclear generating stations. A total of 43 tensile and 35 fracture toughness tests were performed and the effects of various parameters such as pipe size, crack plane orientation, test temperature, welding on material properties were discussed. Test results show that the effects of crack plane orientation, test temperature, and welding on fracture toughness were significant while the effects of pipe size, specimen orientation and test temperature on tensile properties were negligible. Especially the dependence of J-R curves on the crack plane orientation appears to be the characteristics of carbon steel.

기 호 설 명

a : 균열길이
 a_0 : 피로예비균열의 길이
 Δa : 균열진전량
 b : 시편의 잔여 폭
 b_0 : 시편의 초기 잔여 폭
 C_1, C_2 : 상수
 E : 파괴에너지
 J : J-적분값
 J_{IC} : J-적분의 임계값
 T : 찢김계수

T_{LOAD} : 작용하중의 찢김계수
 T_{MAT} : 재료의 찢김계수
 S_y : 항복강도
 S_u : 인장강도

1. 서 론

1995년부터 가동 예정인 영광 원자력 3, 4호기는 설계 초기단계부터 파단전누설(leak before break : LBB) 개념이 적용되는 세계 최초의 발전소이다. 현재까지 LBB 개념은 1차계통인 주냉각재배관(reactor coolant piping) 및 가압기 밀림관(pressurizer surge piping)과 2차계통인 정지냉각

*정회원, 성균관대학교 기계설계학과
**정회원, 성균관대학교 기계공학과
***정회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

배관(shutdown cooling piping) 및 안전주입배관(safety injection piping)에 적용되었으며, 이와 관련하여 저자들은 전보^(1,2)에서 영광 원자력 3,4호기의 2차계통 배관용으로 사용되는 SA312 TP316 및 SA312 TP304 스테인레스강에 대한 재료물성치 평가시험결과를 보고한 바 있다.

주증기계통(main steam system)은 증기발생기(steam generator)로부터 생성된 증기를 전기발생장치인 증기터빈으로 운반하는 기기로서, 직경이 660 mm(26")와 686 mm(27")인 4개 라인들로 구성되어 있으며 SA106 Gr. C 탄소강으로 제작한다. 주증기계통은 가동중 수격현상 발생사태가 보고된 바 있고, 탄소강은 동적 변형률시효(dynamic strain aging: DSA) 및 역사이클하중(reversed cyclic loading)에 의해 파괴인성치가 저하되는 문제점 등으로 인해 현재까지 LBB가 적용되지 못하고 있다. 그러나 주증기계통에 LBB 개념이 적용되면 주냉각재계통 다음으로 큰 경제적 이익을 얻을 수 있기 때문에, 현재 많은 연구자들에 의해 LBB 개념 적용을 위한 기초 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 주증기계통에 LBB 개념을 적용하기 위한 기초연구의 일환으로 영광 원자력 3,4호기 주증기계통용으로 한국중공업(주)이 제작한 SA106 Gr. C 탄소강과 용접부 재료에 대한 응력-변형률(σ - ϵ) 및 파괴저항(J-R)시험을 수행하여, 여러 인자들(배관크기, 시편 채취방향, 시험온도, 용접효과)이 재료물성치에 미치는 영향에 대하여

고찰하고자 한다. 또한 재료물성치 평가시험 결과를 전보^(1,2)에서 보고한 바 있는 정지냉각계통과 안전주입계통용 스테인레스강 및 캐나다 Darlington 원자력발전소 1차계통 주냉각재배관용 SA106 Gr. B 탄소강의 시험결과와 비교하고자 한다.

2. LBB 평가를 위한 재료시험 절차

LBB 평가를 위한 재료물성치 평가시험 절차는 전보^(1,2)와 동일하다. 즉 배관의 각 히이트(heat)에 대한 충격시험을 수행하여 최저의 충격에너지 값을 갖는 3개의 히이트번호를 선택한 후, NUREG 1061 Vol. 3⁽³⁾에 준한 응력-변형률 및 파괴저항시험을 수행한다.

3. 시험방법

3.1 시험재료

본 연구에서는 전보^(1,2)에서 수행한 정지냉각계통 및 안전주입계통의 재료물성치 평가에 이어, 영광 원자력발전소 3,4호기 주증기계통용으로 한국중공업(주) 등이 제작한 SA106 Gr. C 탄소강을 시험재료로 사용하였다. 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 시험은 모재 및 용접재 시편에 대하여 수행하였는데, 용접재의 경우 SA106 Gr. C 강을 모재로 수동 GTAW(gas tungsten arc welding)법을 사용하여 공장과 현장에서 각각 수행하였다. 용접조건은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of SA106 Gr. C and SA106 Gr. B steel(Wt. %)

Material	C	Si	Mn	Cr	S	P
SA106 Gr.C steel	0.30	0.10	0.39~1.06	.	0.058	0.048
SA106 Gr.B steel	0.30	0.10	0.29~1.06	0.40	0.025	.

Table 2 Comparison of welding procedure specification (SA106 Gr. C)

Welding location	Filler metal		Preheat Temp. (°C)	PWHT Temp. (°C)	Shielding gas	Flow rate (ℓ/min)	Travel speed (mm/sec)
	AWS No.	Size (mm)					
Shop	ER70S-G	2.39	18	615~625	Argon	12	0.80~1.10
Field	ER70S-2.3.6	2.39~3.96	10	593~621	Argon	5~20	0.55~0.87

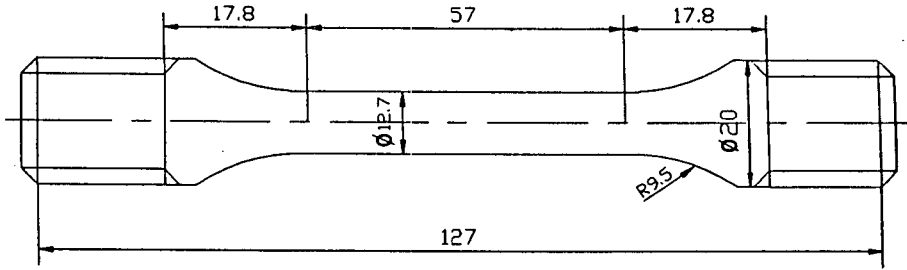


Fig. 1 Specimen for σ - ϵ test

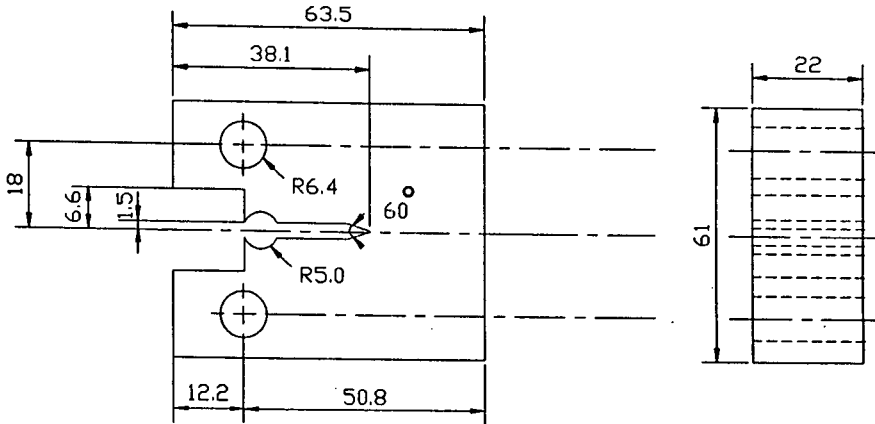


Fig. 2 Specimen for J-R test

3.2 시편

Fig. 1은 응력-변형률시험에 사용된 지름 12.7 mm의 환봉시편의 형상이다. Fig. 2는 파괴저항시험에 사용된 CT(compact tension)시편의 형상으로서, 배관에서 채취 가능한 최대 두께인 22 mm를 사용하였다.

43개의 응력-변형률시험(모재 : 31, 용접재 : 12)과 35개의 파괴저항시험(모재 : 23, 용접재 : 12)을 수행하였으며, 본 시험에 사용된 배관의 크기, 시편의 수를 Table 3과 Table 4에 종합적으로 나타내었다.

3.3 시험온도

배관의 σ - ϵ 선도 및 J-R선도의 특성은 정상운전의 상한범위(upper range) 부근의 온도에서 결정되어야 한다. 따라서 고온시험은 주증기계통의 가동온도인 289 °C에서 수행하였으며, 온도 의존성 여부를 알아보기 위하여 최저의 파괴에너지를 갖는 히이트번호의 재료에 대하여 정지온도에서의 저온 시험(121 °C)도 병행하였다.

Table 3 Number of LBB test specimens for base metal

Identification Temp.		HighTemp.				Low	
		σ - ϵ		J-R		σ - ϵ	J-R
Pipe size	Heat No.	L	C	L-C	C-L	L	L-C
		26" pipe	P18018	1	1	1	1
P18049	3		3	1	1	.	.
P18053	1		1	1	1	.	.
27" pipe	P18016	1	1	1	1	.	.
	P18018	1	1	1	1	1	1
	P18019	3	3	1	1	.	.
26" elbow	059046	2	2	2	2	1	1
	027814	2	2	2	2	.	.
Sub-total		28		20		3	3
Total		48				6	

Table 4 Number of LBB test specimens for weld metal

Identification		High Temp.		Low Temp.	
Pipe size	Heat No.	σ - ϵ	J-R	σ - ϵ	J-R
		L	L-C	L	L-C
26" pipe	P18049 (Shop)	3	3	1	1
	P18049 (Field)	3	3	1	1
27" pipe	P18019 (Field)	3	3	1	1
Sub-total		9	9	3	3
Total		18		6	

3.4 시험방법

응력-변형률시험은 전보⁽¹⁾와 동일하게 ASTM E21에 준하여 수행하였다. 단, 탄소강의 저온시험의 경우는 항복점이 뚜렷하므로 하항복점을 항복강도로 취하였고, 고온시험의 경우는 0.2% 오프셋(offset)법을 사용하여 항복강도를 결정하였다.

파괴저항시험은 ASTM E813과 ASTM E1152에 따라 단일시편법(single specimen method)으로 수행하였다. 이때 모재의 고온시험결과로부터 다음과 같이 파괴에너지 E를 계산하여 파괴에너지가 최소인 히이트번호에 대한 저온시험을 수행하였다.

$$E = \frac{C_1}{C_2 + 1} (0.1b_0)^{C_2 + 1} \quad (1)$$

여기서, C₁, C₂는 상수이며, b₀는 시편의 초기 잔여 폭이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 응력-변형률(σ - ϵ) 시험결과

4.1.1 배관크기

Fig. 3은 고온에서의 L-방향에 대한 σ - ϵ 선도들을 나타낸 것으로서, 직경 26", 27"배관의 인장특성은 거의 일치하였으나 직경 26"엘보우의 인장특성은 배관의 값보다 약간 낮았다. 한편 고온에서의 C-방향과 저온에서의 L-방향에 대한 σ - ϵ 선도들도 Fig. 3과 같은 경향을 보였다.

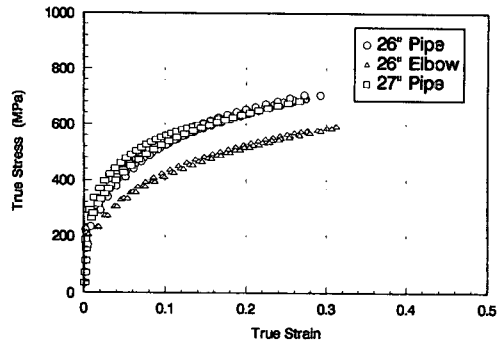


Fig. 3 Comparison of σ - ϵ curves for various product forms : base metal at 289 °C, L-direction

4.1.2 시편 채취방향

σ - ϵ 선도들에 미치는 시편 채취방향의 영향을 알아보기 위하여 직경 26", 27"배관 및 직경 26"엘보우에 대한 σ - ϵ 선도들을 비교하였다. 고온에서의 각 시편 채취방향에 대한 최대, 최소값을 제외한 L-방향의 평균 S_y, S_u 값은 각각 221 MPa과 479 MPa이고, C-방향의 평균 S_y, S_u값은 각각 222 MPa과 479 MPa이었다. 결국 시편 채취방향에 따른 재료물성치의 차이는 거의 없는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 전보^(1,2)와 동일하다.

4.1.3 시험온도

모재 및 용접재의 σ - ϵ 선도들에 대한 온도의 영향을 비교하였으나 고온(289 °C) 및 저온(121 °C)에서의 S_y, S_u 및 σ - ϵ 선도들의 차이가 거의 없었다. 시험온도를 더 낮출 경우에는 전보^(1,2)에서와 같이 σ - ϵ 선도가 더 높게 나타날 것으로 추측되나, 실제 가동 및 정지온도 등을 고려하여 더 이상의 온도의 존성 평가시험은 수행하지 않았다.

4.1.4 용접효과

용접은 공장 및 현장에서 수행하였으며, 고온에서의 모재 및 용접재에 대한 σ - ϵ 선도들을 직경 26"배관의 경우 Fig. 4에, 직경 26", 27"배관의 S_y, S_u 값들을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 용접재보다는 모재의 경우가, 공장용접보다는 현장용접의 경우가 연성이 좋은 것으로 나타났으며 이러한 현상은 전보⁽¹⁾에서 언급한 바와 같이 실제 용접조건이나 용접기능 등의 차이 때문인 것으로 생각된다. 또한 Fig. 5에서 S_y 값은 용접재의 경우가 크지만 S_u 값은 거의 비

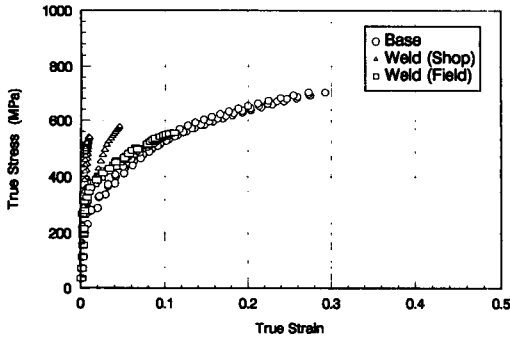


Fig. 4 Comparison of σ - ϵ curves for base and weld metal : 289 °C, L-direction

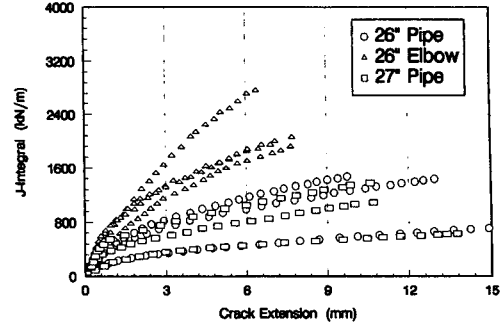


Fig. 6 Comparison of J-R curves for various product forms : base metal at 289 °C, C-L direction

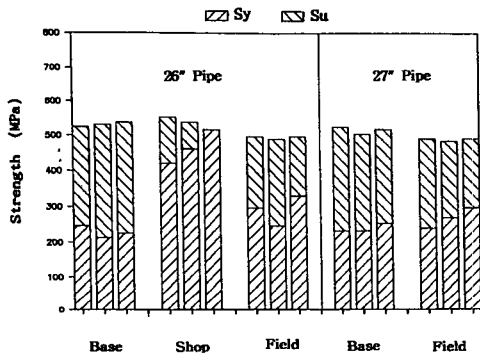


Fig. 5 Comparison of S_y and S_u for various product forms : base and weld metal at 289 °C, L-direction

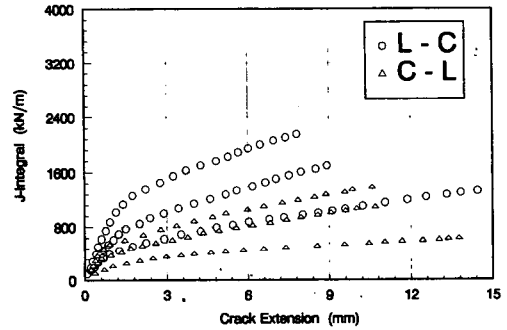


Fig. 7 Effect of orientation on J-R curves : 26 inch pipe base metal at 289 °C, L-C and C-L direction

슷하게 나타났다. 이는 모든 용접재의 경우 변위계(extensometer)가 장착된 용접부에서 파단이 일어나지 않고 모재부분에서 파단이 일어났기 때문이며, 용접부의 위치 및 표점거리는 전보⁽²⁾와 동일하다.

4.2 파괴저항(J-R) 시험결과

4.2.1 배관크기

모재인 경우 고온에서의 직경 26", 27"배관과 직경 26"엘보우의 C-L 방향에 대한 J-R선도들을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 직경 26"엘보우는 직경 26", 27"배관보다 높은 J-R선도를 보이고 있으며, 고온 및 저온에서의 L-C 방향에 대한 J-R선도들도 Fig. 6의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 한편 이러한 파괴저항시험의 결과는 응력-변형률시험의 결과와 일치하지 않았으며, 배관 및 엘보우의 J-R선도가 차이를 보이는 이유는 시편 채

취위치에 따른 배관제작사의 영향이 반영되었기 때문인 것으로 생각된다.

4.2.2 시편 채취방향

J-R선도에 미치는 시편 채취방향의 영향을 알아보기 위하여 직경 26", 27"배관 및 직경 26"엘보우에 대한 J-R선도들을 비교하였다. 직경 26"배관에 대한 J-R선도들을 Fig. 7에 나타내었는데, L-C 방향의 J-R선도들이 C-L 방향의 J-R선도들보다 높게 나타났다. 한편 모든 제작형태(직경 26", 27"배관 및 직경 26"엘보우)에 대한 L-C 방향에서의 J_{IC} 값이 C-L 방향에서의 J_{IC} 값보다 크게 나타났다. 고온에서의 L-C와 C-L 방향에 대한 평균 J_{IC} 값은 각각 524 kN/m와 484 kN/m이며, 이와같은 차이는 배관 제작사의 입자유동과 관련되는 것으로 생각된다. 전보^(1,2)의 SA312 TP316 강과는 달리 시편 채취방향에 따라 J-R선도가 뚜렷한 차이를 보이는 것은 탄소강인 SA106 Gr. C 강 특성인 것

으로 생각된다.

4.2.3 시험온도

J-R선도에 미치는 온도의 영향을 알아보기 위하여 모재에 대한 두 시험온도에서의 J-R선도들을 Fig. 8에 나타내었는데, 고온에서의 J-R선도들이 저온에서의 J-R선도들보다 낮게 나타났다. 또한 용접재의 경우도 고온에서의 J-R선도들이 저온에서의 J-R선도들보다 낮게 나타났다.

저온에서의 J_{ic} 값 역시 고온에서의 J_{ic} 값보다 크게 나타났다. 즉 시험온도가 낮아지면 J_{ic} 값은 모재인 경우 35%, 용접재인 경우 36%로 각각 증가하였다. 이와같이 시험온도 증가에 따라 J_{ic}와 J-R선도들이 낮아지는 것은 재료의 동적 변형률시효⁽⁴⁾ 때문인 것으로 생각되며, 이러한 현상은 전보^(1,2)와 동일하다.

한편 시험온도가 서로 다르므로 전보의 SA312 TP316 및 SA312 TP304 스테인레스강과 본 연구에서의 SA106 Gr. C 탄소강에 대한 동적 변형률시효의 절대적인 영향을 비교·평가할 수는 없지만, 지금까지의 결과만을 비교해 볼때 탄소강인 SA106 Gr. C 강에 미치는 영향이 더 큰 것으로 보인다.

4.2.4 용접효과

용접은 공장용접 및 현장용접을 수행하였는데, 모재 및 용접재에 대한 J_{ic} 값을 비교하면 모재보다 용접재의 J_{ic} 값이 더 크게 나타났다. Fig. 9는 고온에서의 직경 26"배관의 J-R선도들을 비교한 것이다. 이 그림에서 모재보다는 용접재가, 용접재 중에서는 현장용접 시편의 J-R선도들이 공장용접 시편의 J-R선도들보다 높게 나타났으며, 이러한 경향은 다른 제작형태(직경 27"배관 및 직경 26"엘보우)의 경우에도 나타났다. 이와 같은 현상은 전보⁽¹²⁾와 동일하다.

한편 응력-변형률시험의 경우 공장용접 시편과 현장용접 시편으로 수행한 시험결과가 뚜렷하지 않았으나, 파괴저항시험의 경우 실제 용접조건이나 용접기법 등의 차이로 인해 예상외로 현장용접 시편의 J-R선도들이 공장용접 시편의 J-R선도들보다 높게 나타났다.

4.3 Ontario Hydro 연구결과와의 비교

캐나다의 Ontario Hydro 연구소⁽⁴⁾에서는 Darlington 원자력발전소 1차계통 주냉각재계통에 LBB

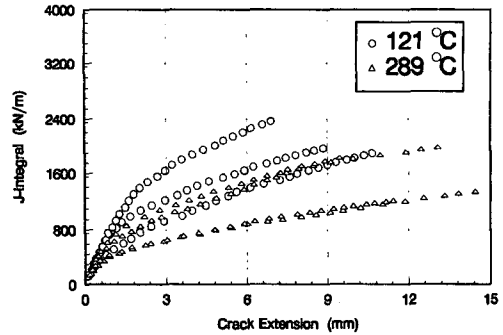


Fig. 8 Effect of test temperature on J-R curves : base metal at 121 °C and 289 °C, L-C direction

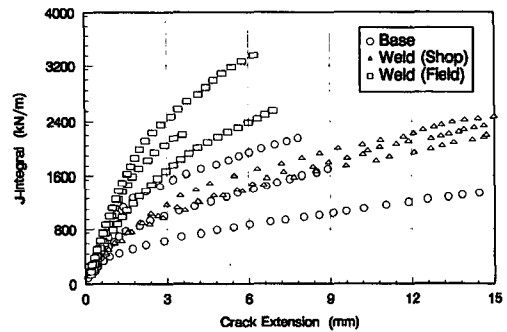


Fig. 9 Comparison of J-R curves for base and weld metal : 26" pipe at 289°C, L-C direction

를 적용하기 위하여 SA106 Gr. B 탄소강에 대한 재료물성치 평가시험을 수행한 바 있는데, 본 연구와 유사하게 배관크기, 시편 채취방향, 시험온도, 용접효과 등을 평가인자로 하여 85개의 파괴저항시험을 수행하였다. Ontario Hydro의 연구에서 사용한 SA106 Gr. B 강은 본 연구에서 사용한 SA106 Gr. C 강과는 망간(Mn) 함유량 등이 약간 다르지만 대체로 비슷한 재료로 볼 수 있으므로, 경향 비교에 주안점을 두고 최저시험결과(lower bound data)를 대상으로 고찰하였다. 두 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Fig. 10은 배관크기에 따른 J-R선도들을 비교한 것이다. 이 그림에서 본 연구를 통해 얻은 J-R선도들은 Ontario Hydro의 J-R선도들보다 약간 우수하였으나, 시험재료의 차이를 고려할 때 배관크기에 따른 영향은 거의 없다고 생각된다. 다만 Ontario Hydro의 J-R선도들은 배관크기에 따라 약간의 차이를 보이고 있으므로, 이에 대한 명확한 규명이 요구된다.

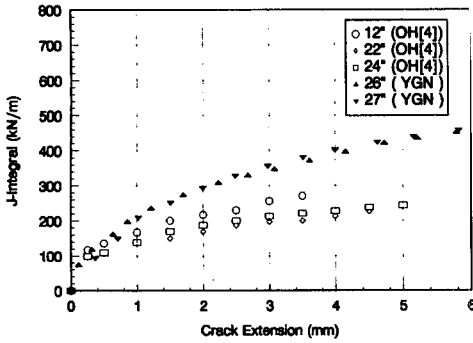


Fig. 10 Comparison of J-R curves for various product forms : base metal, C-L direction

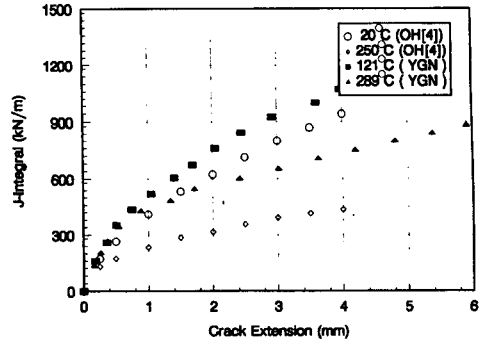


Fig. 12 Comparison of J-R curves for various test temperature : base metal, L-C direction

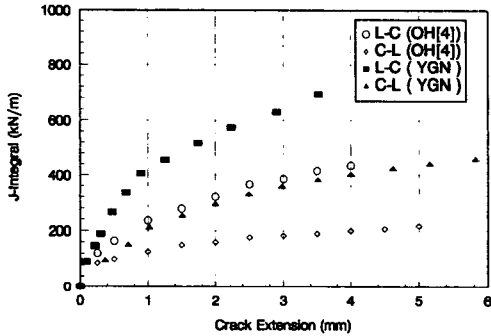


Fig. 11 Comparison of J-R curves for crack plane orientation : base metal, L-C and C-L direction

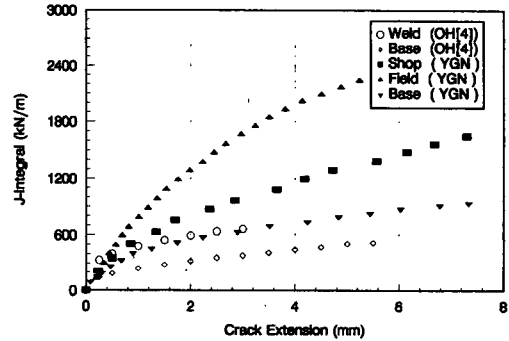


Fig. 13 Comparison of J-R curves for base and weld metal, L-C direction

Fig. 11은 시편 채취방향에 따른 J-R선도들을 비교한 것이다. 그림에 나타난 것처럼 두 재료 모두 L-C 방향의 J-R선도들이 C-L 방향의 J-R선도들보다 우수하였다.

Fig. 12는 시험온도에 따른 J-R선도들을 비교한 것이다. 두 재료 모두 고온에서의 J-R선도들이 저온에서의 J-R선도들보다 낮았으며, 시험온도가 높아질수록 선도의 크기 차이도 증가하였다.

Fig. 13은 용접효과에 따른 J-R선도들을 비교한 것이다. 이 그림에서 Ontario Hydro의 시험결과를 자세히 명시하지 못한 것은 Ontario Hydro에서 수행한 정확한 용접방법을 알 수 없었기 때문이다. 그러나 모재와 용접재의 J-R선도들을 단순 비교한 결과, 두 재료 모두 용접재의 J-R선도들이 모재의 J-R선도들보다 우수하였다.

종합적으로 본 연구결과가 Ontario Hydro에서 수행한 연구결과보다 우수하고, 각 시험변수에 대한 경향은 대체로 일치하였다.

4.4 파괴저항 시험결과의 유효성

전보⁽¹⁾에서 설명한 6가지 항목에 대한 시험결과의 유효성을 검토하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 여기서 시험상의 오차를 확인하는 조건인 Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ, Ⅵ은 대체로 잘 만족하였으나 시편크기의 타당성 여부를 확인하는 조건인 Ⅰ, Ⅱ는 대부분 만족하지 못하였는데, 이는 전보^(1,2)에서 보고한 바와 같이 재료의 인성(toughness)이 극히 우수하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 Table 5에서 조건 Ⅰ, Ⅱ를 만족하는 10개 시편의 경우는 파괴인성치가 다른 시편에 비해 상대적으로 떨어지는 경우이며, 이 때 파괴인성치는 고온(289°C)에서의 탄소강 시편 평균값의 30~70% 정도이다.

4.5 J-R선도의 유효범위

J-R선도로부터 J-T_R선도를 구할 때 J-제어 균열성장(J-controlled crack growth)을 만족하기 위하여는 $\omega [= (dJ/da)(b/J)] \gg 1$ 이어야 한다. 따라

Table 5 Validity check for J_{IC} data

Identification				Validity					
Temp.	Heat No.	Specimen	Orient.	I	II	III	IV	V	VI
High	P18018	ME06	L-C	○	○	○	○	○	○
		ME09	C-L	○	○	○	○	○	○
	P18049	ME16	L-C	×	×	○	○	○	○
		ME19	C-L	○	○	○	○	○	○
	P18016	MG06	L-C	×	×	○	○	○	○
		MG09	C-L	○	○	○	○	○	○
	P18018	MG16	L-C	×	×	○	○	○	○
		MG19	C-L	○	○	○	○	○	○
	P18019	MG26	L-C	○	○	○	○	○	○
		MG29	C-L	○	○	○	○	○	○
	P18049	ML06	L-C	○	○	○	○	○	○
		ML07	L-C	○	○	○	○	○	○
		ML08	L-C	○	○	○	○	○	○
	Others				×	×	○	○	○
	Low	All			×	×	○	○	○

* Note : I. Specimen size
 II. J_{max}
 III. Data spacing
 IV. Regression line
 V. Crack shape
 VI. Crack extension

서 $\omega \gg 1$ 의 조건을 만족하는 최대의 Δa 값을 구하였으며, $0.1b_0$ 와 $0.3b_0$ 값이 Δa 의 유효범위 내에 있는지도 확인하였다. 이 결과를 정리하면 Table 6과 같다. Table 6에 나타난 바와 같이 $0.1b_0$ 까지 $\omega > 1$ 의 조건을 만족하므로 이 영역안에서 J-T_R 선도가 유효하며, 이러한 현상은 전보^(1,2)와 동일하다. 그러나 스테인레스강과는 달리 $0.3b_0$ 까지 $\omega > 1$ 의 조건을 만족하지 못하는 경우가 발생하였는데, 이러한 현상은 $0.1b_0$ 이후의 영역에서 불안정한 균열성장이 발생하기 때문이며 탄소강인 SA106 Gr. C 강의 특성인 것으로 생각된다.

4.6 LBB 개념 적용 타당성 검토

배관계통에 LBB 개념을 적용하기 위해서는 J/T 평가법에 근거한 다음 식을 만족하여야 한다.

Table 6 Validity check for J-R curve

Identification				$\omega > 1$		
Temp.	Heat No.	Specimen	Orient.	Δa (mm)	$0.1b_0$	$0.3b_0$
High	P18018	ME06	L-C	6.350	○	×
		ME09	C-L	7.112	○	○
	P18049	ME16	L-C	7.620	○	○
		ME19	C-L	6.350	○	×
	P18053	MG26	L-C	6.350	○	×
		MG29	C-L	5.842	○	×
	027814	MF22	L-C	6.604	○	×
		MF23	L-C	6.350	○	×
		MF26	C-L	7.620	○	○
		MF27	C-L	7.366	○	○
	P18018	MG16	L-C	6.096	○	×
		MG19	C-L	7.366	○	○
	P18049	MR06	L-C	6.604	○	×
		MR07	L-C	7.112	○	○
		MR08	L-C	7.112	○	○
Others					○	○
Low	All				○	○

$$T_{LOAD} < T_{MAT} \tag{2}$$

그러나 영광 원자력발전소 3,4호기 주증기계통의 경우에는 운전중증 발생할 수 있는 모든 사고를 가정하여 하중을 설정하고, 또한 지나치게 보수적인 J-R 선도를 선정하였기 때문에 LBB 개념을 적용할 수 없었다.

주증기계통에 LBB 개념을 적용하기 위해서는 많은 운전경험이나 실험결과에 근거한 정량적인 평가를 통해 T_{LOAD}, T_{MAT} 계산의 지나친 보수성을 줄여야 한다. T_{LOAD} 계산의 지나친 보수성을 줄이기 위해서는 균열발생부위의 강성(stiffness)변화를 고려하여 실제 작용하중을 계산하고, 이를 안정성 평가에 이용하는 하중감소법(load reduction method)⁽⁵⁾이 제안되고 있다. 또한 안전주입계통의 경우에는 수격현상 방지를 위한 장치를 설치하여 수격하중을 배제한 바 있는데 주증기계통에도 유사한 장치를 설치한다면 T_{LOAD} 값을 대폭 줄일 수 있

우리라 생각된다. 한편 T_{MAT} 의 지나친 보수성을 줄이기 위해서는 2T, 3T, 4T-CT 등의 대형시편 및 실제 배관에 대한 J-R 시험을 수행하여 균열 선단의 구속효과(constraint effect)를 규명할 필요가 있는데, 이는 일반적으로 CT시편이 실제 배관보다 보수적인 결과를 보여주고 있기 때문이다. 이와 관련된 연구는 현재 울진 원자력 3, 4호기 및 차세대 원자로 LBB 설계와 더불어 저자들에 의해 진행되고 있으며, 추후 종합하여 보고할 예정이다.

5. 결 론

원자력발전소 2차계통인 주증기계통의 배관용 소재와 그의 용접부 재료에 대하여, 가동온도(289℃)와 정지온도(121℃)에서 LBB 평가를 위한 재료물성치 평가시험 절차에 따라 응력-변형률 시험 및 파괴저항시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배관크기(직경 26", 27"배관 및 엘보우)가 인장특성과 파괴인성에 미치는 영향은 미미하였다.
- (2) 응력-변형률 시험결과는 시편 채취방향과 무관하였으며, 파괴저항시험의 경우 모재에 대한 L-C 방향의 파괴인성(J_{IC} 및 J-R 선도)이 C-L 방향의 값보다 우수하였다.
- (3) 모재 및 용접재에 대한 응력-변형률시험의 경우 온도의 영향이 뚜렷하지 않았으나, 파괴저항시험의 경우 가동온도(289℃)에서의 파괴인성값이 정지온도(121℃)에서의 값보다 작았다.
- (4) 용접재의 재료물성치가 모재의 값보다 우수하였으나, 공장용접 및 현장용접에 따른 차이는 명

확하지 않았다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 석창성, 최용식, 김영진, 장윤석, 김종욱, 1994, "영광 원자력 배관소재의 재료물성치 평가(I)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1106~1116.
- (2) 김영진, 석창성, 김종욱, 장윤석, 1995, "영광 원자력 배관소재의 재료물성치 평가(II)," 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. .
- (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) Mukherjee B., 1988, "The J-Resistance Curve Leak-Before-Break Test Program on Material for the Darlington Nuclear Generating Station," *Int. Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 31, pp. 363~385.
- (5) Yu, Y. J. Kim Y. and Park, S. H. 1993, "Evaluation of Large Leakage Crack Effect on the Distribution of Loads in a Small Diameter Pipe," *Trans. of the 12th SMiRT Conference*, Vol. G, pp. 75~79.