

<論 文>

영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가(Ⅱ) —안전주입계통—

김영진* · 석창성** · 김종욱*** · 장윤석***
(1994년 11월 8일 접수)

Evaluation of Material Properties for Yonggwang Nuclear Piping Systems(Ⅱ) — Safety Injection System—

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

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 SA312 TP316 and SA312 TP304 stainless steels and their associated welds manufactured for safety injection system of Yonggwang 3, 4 nuclear generating stations. A total of 62 tensile tests and 46 fracture toughness tests were conducted 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 effect of test temperature on fracture toughness was significant while the effects of pipe size and crack plane orientation on fracture toughness were negligible. Fracture toughness of the weld metal was in general higher than that of the base metal.

기 호 설 명

- a : 균열길이
- Δa : 균열진전량
- b : 시편의 잔여 폭
- b_0 : 시편의 초기 잔여 폭
- C_1, C_2 : 상수
- J : J-적분값
- J_{IC} : J의 임계값
- E : 파괴에너지
- T : 찢김계수
- T_{LOAD} : 작용하중의 찢김계수
- T_{MAT} : 재료의 찢김계수

- S_y : 항복강도
- S_u : 인장강도

1. 서 론

최근 원자력발전소의 배관계통은 탄소성 파괴역학에 바탕을 둔 파단전누설(leak before break : LBB) 개념⁽¹⁾에 의해 설계되고 있다. 1995년부터 가동 예정인 영광 원자력 3, 4호기는 설계 초기단계부터 LBB 개념이 적용되는 세계 최초의 발전소이다. 현재까지 LBB 개념은 1차계통⁽²⁾인 주냉각재 배관(reactor coolant piping), 가압기 밀림관(pressurizer surge piping)과 2차계통⁽³⁾인 안전주입 배관(safety injection piping) 및 정지냉각배관

*정회원, 성균관대학교 기계설계학과

**정회원, 성균관대학교 기계공학과

***정회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

(shutdown cooling piping)에 적용되었다.

일반적으로 LBB 설계절차는 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저 LBB를 적용할 배관계통을 선정하는데 부식, 수격, 피로파손 등이 예상되는 계통은 제외한다. 이어서 LBB 적용배관에 대한 재료물성치, 배관하중, 용접절차 및 위치 그리고 누설 감지장치의 감지능력에 관한 자료를 수집하여 재료물성치와 작용응력의 조합이 가장 열악한 지점에 감지능력에 해당하는 균열이 존재한다고 가정한다. 끝으로 지진하중과 같은 극한하중이 작용하더라도 균열이 불안정성장하기 전에 검출되고 보수될 수 있다는 것을 탄소성 파괴역학해석을 통하여 입증하여야 한다.

배관균열의 안정성평가에는 J-적분과 찢김계수(tearing modulus) T에 바탕을 둔 J/T 평가법⁽⁴⁾과 유동응력(flow stress)에 바탕을 둔 한계하중법(limit load method)⁽⁵⁾이 널리 사용된다. 재료의 특성상 탄소강 배관에는 J/T 평가법을 사용하며 스테인레스강 배관에는 J/T 평가법과 한계하중법을 사용한다. J/T 평가법은 다음 식을 사용하여 배관의 안정성을 해석한다.

$$T_{LOAD} < T_{MAT} \quad (1)$$

식(1)의 좌변을 계산하기 위해서는 배관재료의 응력-변형률(σ - ϵ) 선도가 필요하며, 우변을 측정하기 위해서는 배관재료의 파괴저항(J-R) 선도가 필요하다.

본 논문의 연구대상인 안전주입계통 배관은 직경이 305 mm(12")와 356 mm(14")인 7개 라인들로 구성되어 있다. 본 논문에서는 전보⁽⁶⁾의 정지냉각배관의 재료물성치 평가에 이어 영광 원자력발전소 3, 4호기 안전주입배관용으로 한국중공업(주)이 제작한 SA312 TP316 및 SA312 TP304 스테인레스강과 용접부 재료에 대해, 응력-변형률(σ - ϵ) 및 파괴저항(J-R) 시험을 수행하여 여러 인자들(배관크

기, 시편 채취방향, 시험온도, 용접효과)이 재료물성치에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. LBB 평가를 위한 재료시험 절차

LBB 평가를 위한 재료물성치 평가시험절차는 전보⁽⁶⁾와 동일하다. 즉 배관의 각 히이트(heat)에 대한 충격시험을 수행하여 최저의 충격에너지 값을 갖는 3개의 히이트번호를 선택한 후, NUREG 1061 Vol. 3⁽⁴⁾에 준한 응력-변형률 및 파괴저항 시험을 수행한다.

3. 시험방법

3.1 시험재료

본 연구에서는 전보⁽⁶⁾에서 수행한 정지냉각계통의 재료물성치 평가에 이어, 영광 원자력발전소 3, 4호기 안전주입계통 배관용으로 한국중공업(주) 등이 제작한 SA312 TP316 강과 SA312 TP304 강의 소재와 그 용접재를 시험재료로 사용하였다. 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 공장용접은 현대중공업(주)에서, 현장용접은 현대건설(주)에서 수행하였으며 구체적인 용접조건은 Table 2와 같다.

3.2 시편

본 시험에 사용된 시편은 전보⁽⁶⁾와 같은 조건에서 채취, 제작하였다. 다만 두께가 9.5 mm (0.375")인 SA312 TP304 강의 경우, 채취가능한 최대의 크기인 지름 5 mm의 환봉시편과 두께 8 mm(0.3")의 CT시편을 사용하였다. Table 3은 본 시험에 사용된 재료, 배관의 직경, 시편의 수 그리고 시험온도를 종합적으로 나타낸 것이다. 고온 시험은 직경 12" 배관의 SA312 TP316 강 및 직경 14" 배관의 SA312 TP304 강의 경우 49°C에서, 직경 14"

Table 1 Chemical composition of SA312 TP316 & SA312 TP304 steel(Wt.%)

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
SA312 TP316	0.08	2.00	0.04	0.03	0.75	11.0~14.0	16.0~18.0	2.00~3.00
SA312 TP304	0.08	2.00	0.04	0.03	0.75	8.00~11.0	18.0~20.2	0.00

Table 2 Comparison of welding procedure specification(SA312 TP316 & SA312 TP304)

Welding location	Filler metal		Preheat & PWHT	Shielding gas	Flow rate (l/min)	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

Table 3 Number of LBB test specimens

Material		Size of pipe diameter	No. of σ - ϵ test		No. of J-R test		Temp.(°C)	
			High temp.	Low temp.	High temp.	Low temp.	High	Low
Base	TP316	12"	12	1	4	1	49	20
		14"	12		4		296	
	TP304	14"	12	1	12	1	49	
Weld (Shop)	TP316	12"	3	1	3	1	49	
		14"	3	1	3	1	296	
	TP304	12"	3	1	3	1	49	
Weld (Field)	TP316	14"	3	1	3	1	49	
		14"	3	1	3	1	296	
	TP304	14"	3	1	3	1	49	
Subtotal			54	8	38	8		
Total			62		46			

배관의 SA312 TP316 강의 경우 296°C에서 수행하였는데, 이는 발전소 배관가동온도의 상한범위(upper range) 근처의 온도이다. 또한 재료의 온도의존성을 알아보기 위해 최저의 파괴에너지를 갖는 히이트번호의 재료에 대하여 상온(20°C)시험도 병행하였다.

3.3 시험방법

응력-변형률시험은 전보⁽⁶⁾와 동일하게 ASTM E8과 ASTM E21에 준하여 수행하였고, 파괴저항 시험은 ASTM E813과 ASTM E1152에 따라 단일 시편법(single specimen method)으로 수행하였다. 이때 파괴에너지 E는 모재의 고온시험결과로부터 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$E = \frac{C_1}{C_2 + 1} (0.1b_0)^{C_2 + 1} \quad (2)$$

여기서, C₁, C₂는 상수이며 b₀는 시편의 초기 잔여 폭이다.

각 시편에 대한 E값을 비교하여 최저의 파괴에너지 값을 갖는 히이트번호(heat number)에 대하여 상온시험을 추가로 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 응력-변형률(σ - ϵ)시험결과

4.1.1 배관크기

Fig. 1은 20°C에서의 L-방향에 대한 SA312

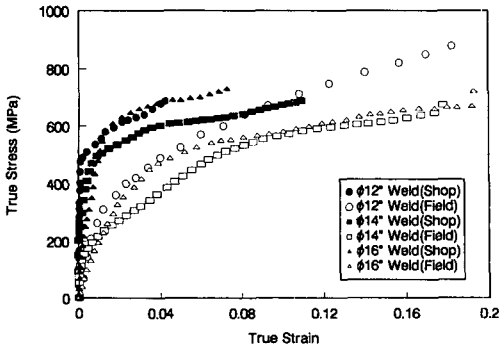


Fig. 1 Effect of pipe size on σ - ϵ curves for SA312 TP316: weld metal at 20°C, L-direction

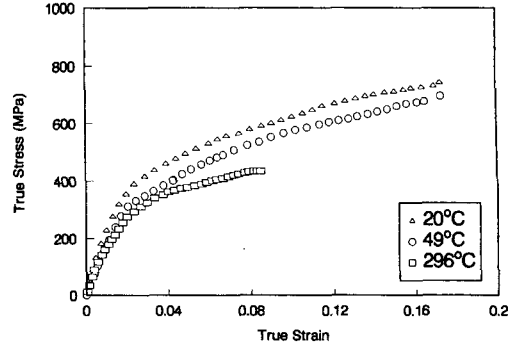


Fig. 2 Effect of test temperature on σ - ϵ curves for SA312 TP316: base metal, L-direction

TP316 강 용접재(현장용접과 공장용접)의 직경 12", 14" 및 16" 배관의 σ - ϵ 선도들을 비교한 것이다. 공장용접재의 경우는 직경 12", 16" 배관의 σ - ϵ 선도가 직경 14" 배관의 선도보다 우수하였으나, 현장용접재의 경우는 직경 12" 배관의 강도가 직경 14", 16" 배관의 강도보다 우수하였다. 따라서 본 시험결과만으로는 배관크기가 재료의 인장특성에 미치는 영향을 명확히 규명할 수 없었다. 다만 공장용접재의 σ - ϵ 선도가 현장용접재의 σ - ϵ 선도보다 높게 나타났다.

4.1.2 시편 채취방향

응력-변형률선도에 미치는 시편 채취방향의 영향을 알아보기 위하여 SA312 TP316 강과 SA312 TP304 강에 대한 σ - ϵ 선도들을 비교하였다. 296°C 에서 시험을 수행한 SA312 TP316 강(직경 14" 배관) 모재의 경우, L-방향의 평균 S_y , S_u 값은 각각 179 MPa과 462 MPa이고, C-방향의 평균 S_y , S_u 값은 각각 165 MPa과 448 MPa이었다. 또한 49°C 에서 시험을 수행한 SA312 TP304 강(직경 14" 배관) 모재의 경우, L-방향의 평균 S_y , S_u 값은 각각 324 MPa과 552 MPa이고, C-방향의 평균 S_y , S_u 값은 각각 310 MPa과 538 MPa이었다. 따라서 시편 채취방향은 재료의 인장특성에 별로 영향을 주지 않음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 전보⁽⁶⁾와 동일하다.

4.1.3 시험온도

SA312 TP316 강 모재의 시험온도에 따른 σ - ϵ 선도를 Fig. 2에 비교하여 도시하였다. 직경 12" 배관은 49°C에서, 직경 14" 배관은 20°C와 296°C에서

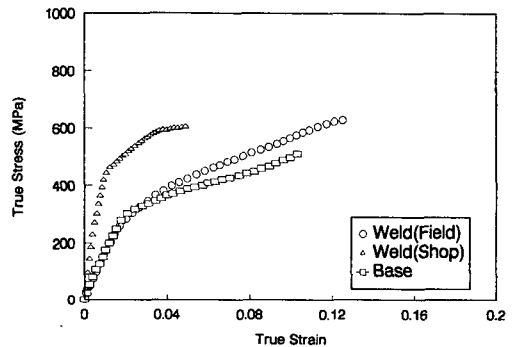


Fig. 3 Effect of welding on σ - ϵ curves for SA312 TP316: 14" pipe at 296°C, L-direction

각각 시험을 수행하였다. 시험온도가 높아짐에 따라 σ - ϵ 선도는 낮아지며, 항복강도와 인장강도도 저하하였다. 특히 296°C의 S_y , S_u 값은 각각 152 MPa, 483 MPa로서 상온인 20°C의 S_y , S_u 값과 비교할때 각각 약 60%, 55%로 저하하였다. 이러한 현상은 전보⁽⁶⁾와 동일하다.

SA312 TP304 강의 경우 고온(49°C)과 상온(20°C)의 시험온도에 큰 차이가 없어 거의 비슷한 σ - ϵ 선도와 강도를 나타내었다.

4.1.4 용접효과

Fig. 3은 296°C에서의 SA312 TP316 강(직경 14" 배관) 모재와 용접재에 대한 σ - ϵ 선도들을 비교한 것이다. 이 그림에서는 모재와 현장용접의 σ - ϵ 선도는 비슷하게 나타났으나 공장용접의 σ - ϵ 선도는 이들보다 높게 나타났다. 또 공장용접이 현장용접보다 항복강도는 크지만 인장강도가 거의 비슷하게 나타났다. 본 연구에서 사용한 환봉시편의 용접부

의 폭은 25~30 mm 정도로서 용접부가 시편중앙에 위치하도록 시편을 채취하여 가공하였으며, 표점거리 10 mm인 변위계(extensometer)를 용접부내에 설치하였다. SA312 TP316 강 용접재시편의 경우, 변위계를 설치한 용접부에서 파단이 발생하지 않고 모재부에서 발생하였다. 따라서 Fig. 3에 나타난 용접시편의 연신율은 용접부의 실제 연신율로 볼 수 없으며, 인장강도도 용접부의 실제 인장강도가 아니라 모재의 인장강도라 할 수 있다.

한편 49°C에서 시험한 SA312 TP304 강의 경우 용접재의 항복강도가 모재의 항복강도보다 약간 높았으나, σ - ϵ 선도와 인장강도 값들은 거의 비슷하였다.

4.2 파괴저항(J-R)시험결과

4.2.1 배관크기

Fig. 4는 20°C에서의 배관크기에 따른 L-C방향의 SA312 TP316 강의 J-R선도들을 비교한 것이다. 직경 14" 배관의 J-R선도가 직경 16" 배관의 J-R선도보다 우수하나, 직경 12" 배관의 J-R선도는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 따라서 본 시험결과만으로는 배관크기가 재료의 파괴저항에 미치는 영향을 명확히 규명할 수 없었다.

4.2.2 시편 채취방향

Fig. 5는 시험온도 296°C인 SA312 TP316 강(직경 14" 배관) 모재의 L-C방향 및 C-L방향 J-R선도들을 비교한 것이다. 시편의 수가 적어 명확한 비교는 불가능하나 두 곡선의 평균으로 볼 때 L-C방향의 평균 J_{IC} 값은 1354 kN/m이고 C-L방향의 평균 J_{IC} 값은 1063 kN/m로서 L-C방향의 값이 C-L방향보다 크며, L-C방향의 J-R선도가 C-L방향의 J-R선도보다 약간 우수한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 시험상의 오차일 수 있으므로 이 배관의 재료특성이라고 단정할 수는 없다.

SA312 TP304 강(시험온도 49°C) 모재의 경우에는 시편 채취방향에 따른 차이가 뚜렷하지 않았다. 이는 SA312 TP304 강의 경우 두께 8mm의 작은 시편을 사용하였기 때문이라고 생각된다.

4.2.3 시험온도

Fig. 6은 SA312 TP316 강(직경 14" 배관) 모재의 20°C 및 296°C의 J-R선도들을 도시한 것으로

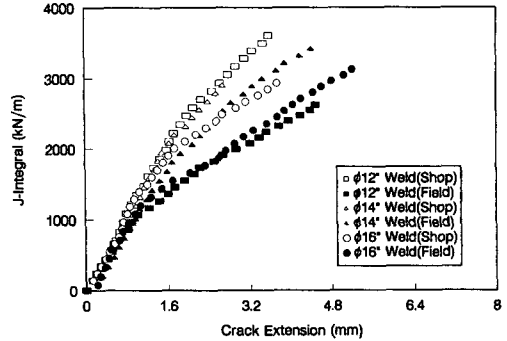


Fig. 4 Effect of pipe size on J-R curves for SA312 TP316 : base metal at 20°C, L-C direction

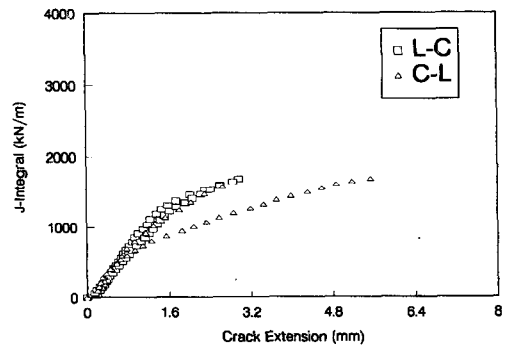


Fig. 5 Effect of specimen orientation on J-R curves for SA312 TP316: 14" pipe, base metal at 296°C

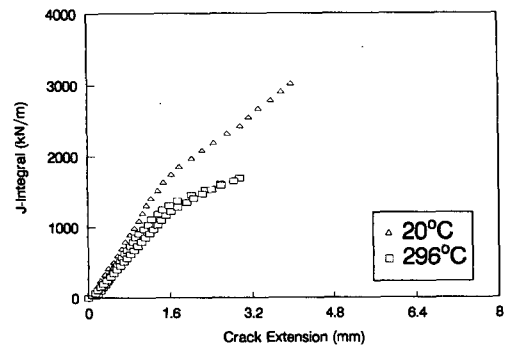


Fig. 6 Effect of test temperature on J-R curves for SA312 TP316 : 14" pipe, base metal, L-C direction

서, 296°C의 J-R선도가 20°C의 선도보다 낮다. 즉, 온도가 높아지면 J-R선도는 낮아지는데, 이러한 현상은 전보⁽⁶⁾와 동일하다.

Fig. 7은 공장용접재의 시험결과를 비교한 것으

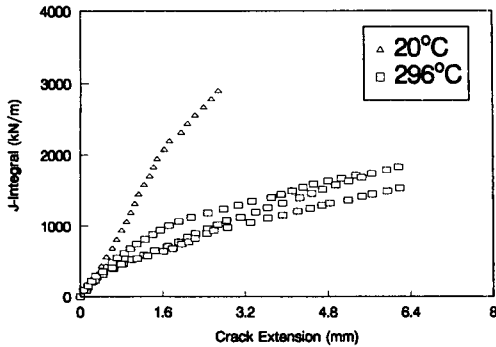


Fig. 7 Effect of test temperature on J-R curves for SA312 TP316 :14" pipe, shop welding, L-C direction

로서 용접재의 경우에는 이러한 현상이 더욱 두드러지게 나타났다. 시험온도가 높아지면 J_{ic} 값도 낮아지는데 모재의 경우 1772 kN/m에서 1378 kN/m으로 약 20%, 용접재의 경우 2385 kN/m에서 447 kN/m으로 약 80% 저하하였다. 이는 특정 온도영역에서 불균일한 균열진전으로 인하여 파괴저항이 떨어지는 재료의 변형률시효(strain aging)때문인 것으로 생각된다.

SA312 TP304 강의 고온(49°C)과 상온(20°C) 시험온도의 경우는 큰 차이 없이 거의 비슷한 J-R선도와 파괴인성값을 나타내었다.

4.2.4 용접효과

Fig. 8은 296°C에서 시험한 SA312 TP316 강(직경 14" 배관)의 모재 및 용접재에 대한 J-R선도를 비교한 것이다. 공장용접재의 J-R선도가 모재의 선도보다 우수하였으며, 현장용접의 J-R선도는 모재보다 다소 낮게 나타났다. 이는 용접기능이나 용접조건의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 49°C에서 시험한 SA312 TP304 강(직경 14" 배관)의 모재 및 용접재에 대한 J-R선도를 도시한 것이다. 이 경우는 SA312 TP316 강의 경우와는 달리 용접재의 J-R선도가 모재의 J-R선도보다 약간 낮으며, 평균 J_{ic} 값은 모재의 경우 1840 kN/m, 용접재의 경우 1464 kN/m로서 모재의 J_{ic} 값이 다소 크다. 일반적으로 용접재의 파괴인성치가 모재의 약 50%정도인 것으로 알려져 있는 SAW(submerged arc welding) 용접법보다는 GTAW용접법을 사용하면 높은 파괴인성치를 얻을 수 있다. 따라서 배관계통에 LBB를 적용하기 위

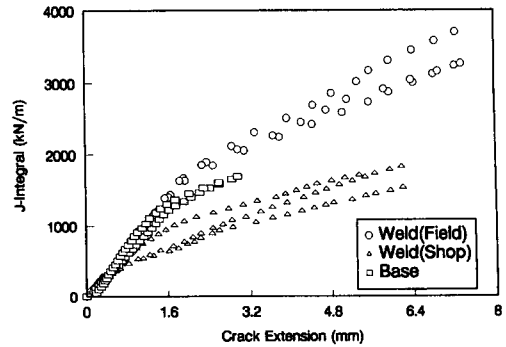


Fig. 8 Effect of welding on J-R curves for SA312 TP316 :14" pipe at 296°C, L-C direction

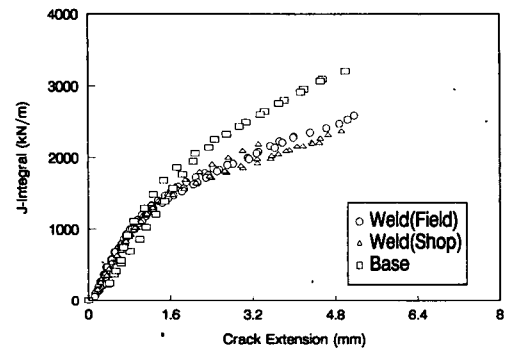


Fig. 9 Effect of welding on J-R curves for SA312 TP304 :14" pipe at 49°C, L-C direction

해서는 GTAW법이 보다 우수한 용접법이라고 생각된다.

4.3 SA312 TP304와 SA312 TP316 강의 비교

본 시험에 사용된 SA312 TP316 강과 SA312 TP304 강의 재료물성치를 비교하여 보았다. Fig. 10은 상온에서 수행한 σ - ϵ 시험결과를 비교한 것으로서 SA312 TP304 강의 인장특성이 SA312 TP316 강의 인장특성보다 우수함을 알 수 있다. Fig. 11은 상온에서 수행한 J-R시험결과를 비교한 것으로서 두 재료의 J-R선도는 대체로 비슷하게 나타났다. 한편, SA312 TP304 강은 배관에서 채취할 수 있는 최대 크기인 0.3T(두께 0.3")의 시편을 사용하였으며, 만약 SA312 TP316 강과 마찬가지로 1T(두께 1")시편을 사용한다면 이보다 낮은 J-R선도가 얻어질 것으로 기대된다. 또 SA312 TP304 강의 경우 작은 시편을 사용하여 재료의 방향성, 온도의 영향 등이 잘 나타나지 않은 것으로

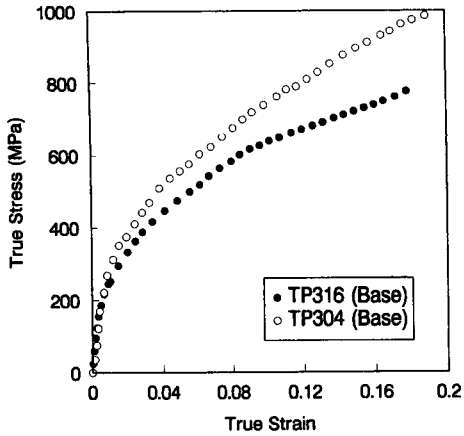


Fig. 10 Comparison of σ - ϵ curves for SA312 TP304 and SA312 TP316 : at 20°C, L-direction

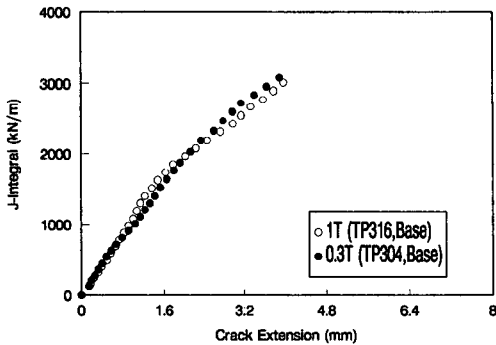


Fig. 11 Comparison of J-R curves for SA312 TP304 and SA312 TP316 : 14" pipe, base metal at 20°C, L-C direction

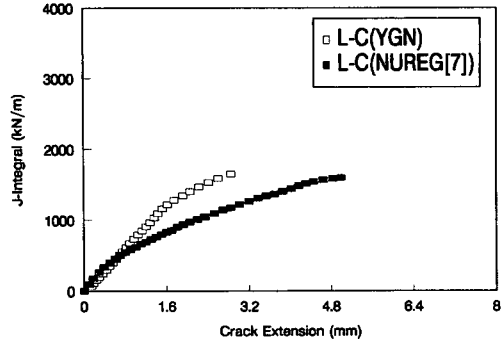


Fig. 12 Comparison of J-R curves for specimen orientation : SA312 TP316 14" pipe, base metal at 296°C

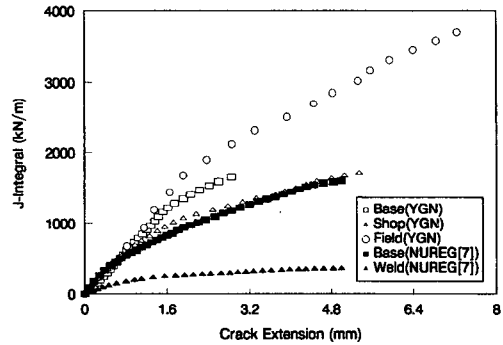


Fig. 13 Comparison of J-R curves for base and weld metal : SA312 TP316 14" pipe at 296°C, L-C direction

생각된다.

4.4 NUREG 보고서와의 비교

미국 원자력규제위원회(USNRC)에서는 원자력발전소 배관용으로 사용되는 재료에 대하여 다양한 시험변수에 대한 LBB 특성평가를 수행하여 NUREG 보고서^(7,8)로 보고한 바 있다. USNRC에서 사용한 재료 및 시험조건은 본 연구의 경우와 약간 다르기는 하지만 경향비교에 주안점을 두고 관찰하였다.

Fig. 12는 고온에서 수행한 SA312 TP316 강에 대한 L-C방향 시험에 대한 시험결과를 비교한 것이다. 본 연구의 시험온도는 296°C이고 NUREG보고서의 시험온도는 288°C로서 약간 다르기는 하지만 본 시험결과가 NUREG 시험결과보다 다소 우수하였다.

Fig. 13은 SA312 TP316 강에 대하여 J-R선도에 미치는 용접의 영향을 비교한 것이다. 시험온도가 288°C인 NUREG보고서에서는 SAW용접을 사용하였기 때문에 모재의 파괴인성에 비해 용접재의 값이 절반정도로 저하하였다. 그러나 GTAW용접을 사용한 본 시험에서는 용접재의 파괴인성이 모재의 값과 비슷하거나 다소 우수하였다. 따라서 파괴인성측면에서 보면 GTAW용접법이 SAW용접법보다 우수하다고 할 수 있다.

4.5 파괴저항 시험결과의 유효성

전보⁽⁶⁾에서 설명한 6가지 항목에 대한 시험결과와 유효성을 검토하였으며, 그 결과를 재료에 따라 Table 4에 정리하였다. 시험상의 오차를 확인하는 조건인 III, IV, V, VI은 대체로 잘 만족하였으나,

Table 4 Validity check for J_{IC} data at high temperature

Identification			Orient.	Validity					
Type	Size	Specimen		I	II	III	IV	V	VI
TP316	14"	MB06	L-C	x	x	o	o	o	x
		MI06	L-C	o	o	o	o	o	o
	12"	MM07	L-C	x	x	o	o	o	x
		MM08	L-C	x	x	o	o	o	x
TP304	14"	MD48	L-C	x	x	o	o	o	x
Other specimens			L-C	x	x	o	o	o	o

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

Table 5 Validity check for J-R curve

Identification		Orientation	Temperature(°C)	$\omega > 1$	
Heat No.	Specimen			0.1 b_o	0.3 b_o
105411	MB17	L-C	296	o	x
090617	MK07	L-C	49	o	x
Other specimens		L-C	49 or 296	o	o

* Note : o : Valid x : Invalid

시편크기의 타당성 여부를 확인하는 조건인 I, II는 대부분 만족하지 못하였다. 이는 재료의 인성(toughness)이 매우 높기 때문이라고 생각된다.

4.6 J-R곡선의 유효범위

J-R선도로부터 J-T_{MAT}선도를 구할 때, J-controlled 균열성장을 만족하기 위하여는 $\omega = (dJ/da) \cdot (b/J) \gg 1$ 이어야 한다. 따라서 $\omega \gg 1$ 의 조건을 만족하는 최대의 Δa 값을 구하였으며, 0.1 b_o 와 0.3 b_o 값이 Δa 의 유효범위 내에 있는지도 확인하였다. 이 결과를 재료에 따라 Table 5에 정리하였다. 검토결과 SA312 TP316 강 모재의 MB17과 SA312 TP304 강 용접재의 MK07 시편을 제외한 모든 시편이 전보⁽⁶⁾와 같이 0.3 b_o 까지 $\omega > 1$ 의 조건을 만족하였다. 따라서 0.3 b_o 까지 J-T_{MAT}선도가 유효하다고 볼 수 있다.

5. 결 론

원자력발전소 안전주입배관의 소재와 용접부 재

료에 대하여, 가동온도(49°C, 296°C)와 정지온도(20°C)에서 LBB평가를 위한 재료물성치 측정시험 절차에 따라 응력-변형률시험과 파괴저항시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배관크기(직경 12", 14" 및 16")와 시편 채취 방향이 인장특성과 파괴인성에 미치는 영향은 명확하지 않았다.
- (2) 시험온도가 높아질수록 인장특성(항복강도, $\sigma\text{-}\epsilon$ 선도)이 낮아졌으며, 파괴인성(J_{IC} 및 J-R선도)도 낮아졌다.
- (3) 용접재의 인장특성이 모재보다 우수하였으며, 용접재의 파괴인성이 모재의 값보다 우수하였다.
- (4) SA312 TP304 강의 인장특성이 SA312 TP316 강의 값보다 우수하였으며, 파괴인성은 두 재료가 대체로 비슷하였다.
- (5) 파괴저항시험의 경우 배관재료의 우수한 인성때문에, ASTM E 813에서 요구하는 시편의 크기조건을 만족하지 못하였다.

후 기

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

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) Yu, Y. J., Ayres, D. J. and Fabi, R. J., 1989, "Demonstration of Leak Before Break for Main Loop and Surge Line Piping of YGN 3 and 4," *Proceedings of the International Symposium on Pressure Vessel Technology and Nuclear Codes & Standards*, Section 15, pp. 10~34.
- (3) Yang, K. M., Kim, Y. J. and Field, R. M., 1993, "Leak Before Break Evaluation of BOP Piping Systems for the Yonggwang 3 & 4 Nuclear Generating Station," *Trans. of 12th Structural Mechanics in Reactor Technology*, Vol. G, pp. 465~470.
- (4) 유영준, 김지호, 김 일, 박성호, 손갑현, 1993, "원자력발전소 배관에 대한 파단전누설개념," 제1회 배관건전성 평가기술 Workshop논문집, 한국원자력안전기술원, pp. 3~13.
- (5) 지계광, 여인선, 라인식, 1993, "극한 하중범에 의한 LBB분석," 제1회 배관건전성평가기술 Workshop논문집, 한국원자력안전기술원, pp. 33~40.
- (6) 석창성, 최용식, 김영진, 장윤석, 김종욱, 1994, "영광원자력 배관소재의 재료물성치 평가 (I)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1106~1116.
- (7) U. S. NRC Piping Review Commission, 1993, "Loading Rate Effects on Strength and Fracture Toughness of Pipe Steels Used in Task 1 of IPIRG Program," *NUREG/CR-6098 BMI-2175*.
- (8) Beaudoin, B. F., Quinones, D. F. and Hardin, T. C., 1990, "Leak-Before-Break Application in US Light Water Reactor Balance-of-Plant Piping," *Int. J. Pres. Ves. & Piping* 43, pp. 67~83.