

<연구논문>

# 개선된 SA508-Gr.1a 배관재의 파단전누설평가 여유도 분석

김만원<sup>†</sup>·이요섭<sup>\*</sup>·신인환<sup>\*</sup>·양준석<sup>\*</sup>·김흥덕<sup>\*</sup>

## Leak-Before-Break Assessment Margin Analysis of Improved SA508-Gr.1a Pipe Material

Maan-Won Kim<sup>†</sup>, Yo-Seob Lee<sup>\*</sup>, In-Whan Shin<sup>\*</sup>, Jun-Seog Yang and Hong-Deok Kim<sup>\*</sup>

(Received 29 April 2020, Revised 18 May 2020, Accepted 26 May 2020)

### ABSTRACT

The effect of improving the tensile and J-R fracture toughness properties of SA508 Gr.1a on the LBB margin for the main steam pipe is investigated. The material properties and microstructure images of the existing main steam piping material SA106 Gr.C used in domestic nuclear power plants and the newly selected material SA508 Gr.1a were compared. For each material, LBB margins were calculated and compared through finite element analysis and crack instability evaluation. The LBB margin of the improved SA508 Gr.1a is found to be greatly improved compared to that of the existing SA106 Gr.C and SA508 Gr.1a. This is because of the increased material's strength and J-R fracture toughness compared to the previous materials. In order to analyze the effect of physical property change on the LBB margin, the sensitivity of each LBB margin according to the variation of tensile strength and J-R fracture toughness was analyzed. The effect of the change in tensile strength was found to be greater than that of the change in fracture toughness. Therefore, an increase in strength significantly influenced the improvement of the LBB margin of the improved SA508 Gr.1a.

**Key Words :** Leak-Before-Break(파단전누설), Main Steam Line(주증기배관), LBB Margin(LBB 여유도), SA508 Gr.1a, J-T Analysis(J-T 평가), Material Property Improvement(재료물성 개선), Leakage Crack(누설균열)

### 기호설명

$T_{mat}$  = material's tearing modulus  
 $T_{app}$  = applied tearing modulus  
 $J_{mat}$  = material's J-integral ( $\text{kJ/m}^2$ )  
 $J_{app}$  = applied J-integral ( $\text{kJ/m}^2$ )  
 $E$  = elastic modulus of metal (MPa)  
 $\sigma_f$  = flow stress (MPa)  
 $\alpha, n$  = coefficient and exponent of Ramberg-Osgood equation  
 $Y.S.$  = yield strength (MPa)

T.S. = tensile strength (MPa)  
T.E. = total elongation (%)  
C, m = coefficient and exponent of J-R Curve

### 1. 서론

원전배관 설계 시 파단전누설(leak-before-break; LBB) 개념을 적용하면 배관의 양단파단에 따른 동적하중을 배제함으로써 설계하중을 감소시킬 수 있으며 배관 구속장치나 제트방벽이 필요없는 장점이 있다<sup>(1-3)</sup>. 국내 원전에서는 1994년 이후 건설된 원전의 1차 계통 주요 배관인 원자로냉각재계통 주배관, 가압기 밀림관, 안전주입계통 배관, 정지냉각계통 배관에 LBB가 적용되고 있다.

최근 AP1000, US-EPR, US-APWR 등의 해외 원

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 김만원 한국수력원자력(주) 중앙연구원  
E-mail : maanwon.kim@khnp.co.kr  
TEL: (042)870-5636 FAX: (042)870-5599

<sup>\*</sup> 한국수력원자력(주) 중앙연구원

전 노형에서는 주증기배관에도 LBB 개념을 적용하여 설계하고 있다. 국내 원전의 경우 현재 운영되는 원전의 주증기배관에는 LBB가 적용되지 않았다. 국내에서 주증기배관에 LBB를 적용하기 위한 노력은 1998년에 한빛 5,6호기의 주증기배관을 대상으로 수행된 바 있다. 당시 주증기배관의 소재는 SA106 Gr.C 이며 평가결과, LBB 여유도가 2% 정도로 나타나 충분한 여유도가 확보되지 않았고 누설감지설비의 다중성이 미흡하여 주증기배관에는 LBB가 적용되지 않았다.

해외 신형 원전과 국내 APR1400 및 APR+ 노형의 주증기배관 LBB 적용 현황을 Table 1에 정리하였다. 해외 노형의 경우 주증기배관 재료는 SA335 Gr.P11과 SA106 Gr.C로 APR1400의 주증기배관 재료와 유사하거나 같은 탄소강이다. 해외 노형에서 주증기배관에 LBB를 적용할 수 있었던 것은 누설감지설비의 감지능력을 0.1~0.5 gpm 으로 적용하였기 때문인 것으로 생각된다. APR1400의 경우 누설감지능력을 1 gpm으로 적용한 것을 Table 1로부터 알 수 있다. US-EPR과 US-APWR의 경우 원자로냉각재배관 Loop 수가 4개로 APR1400에 비하여 저용량의 증기발생기를 사용함으로써 주증기배관에 걸리는 하중이 APR1400과 비교하여 더 낮으며, AP1000 노형의 경우 2 Loop 원전이지만 APR1400이 1400 MWe 급인 원전임에 비하여 1000 MWe급의 원전이므로 주증기배관에 걸리는 하중이 APR1400 대비 더 낮을 것으로 예상할 수 있다.

해외 노형들이 주증기배관에 LBB를 적용함에 따라 국내 고유노형으로 개발된 APR+ 표준설계<sup>(4)</sup>에서도 경쟁력 확보를 위하여 주증기배관에 LBB를 적용하였다. APR+는 OPR1000 및 APR1400 노형

대비 용량 증가, 지진하중 적용값 증가 등 여러 설계 요인으로 인해 주증기배관에 작용하는 하중이 더 커졌기 때문에 주증기배관에 LBB를 적용하기 위하여 많은 검토가 이루어졌다. 따라서 배관의 치수 및 배치, 지지대 설계에 추가하여 주증기배관의 재료를 기존 OPR1000에서 사용된 SA106 Gr.C 대신 SA508 Gr.1a로 변경하였으며, 누설감지능력을 기존의 1.0 gpm에서 0.5 gpm으로 낮추어 설계하였다.

APR+ 주증기배관과 같이 큰 하중이 작용하는 경우 배관 배치 변경이나 해석 기법의 변경 등을 통해 설계하중을 감소시키는 것에는 한계가 있으므로, LBB 여유도를 확보하는 보다 근본적으로 방안으로 재료의 LBB 물성을 향상시키는 연구가 수행되었다<sup>(5)</sup>. 재료물성 향상 연구에서는 현재 국내의 원전에서 배관재료로 사용되는 7종의 재료로 LBB 시험(인장 시험 및 준정적/동적 J-R 파괴인성 시험) 및 LBB 여유도평가를 수행하고, 제작 및 설계 경험과 경제성, 재료 수급성 등을 함께 검토하여 국내 원전에서 적용할 수 있는 최적 주증기배관 후보재료로 SA508 Gr.1a를 선정하고 합금설계, 열처리 공정 및 제작 공정 개선을 통해 개선된 SA508 Gr.1a 소재를 개발하였다.

본 논문에서는 개선 전후의 SA508 Gr.1a와 기존의 주증기배관 소재인 SA106 Gr.C의 LBB 재료물성을 비교하고 LBB 여유도를 계산하여 비교함으로써 소재의 LBB 관련 물성개선 영향을 정량적으로 파악하였다.

## 2. 주증기배관 재료의 물성 비교

LBB 재료물성을 개선할 주증기배관 재료로 APR+ 설계에서 사용된 SA508 Gr.1a를 선정하였다. 이 재료는 원자로냉각재 고온관 및 저온관 재료로 사용되고 있으며 우수한 인장강도 및 파괴인성 특성을 보유한 재료이다. 주증기배관은 직경이 크므로 기술적으로 SA508 Gr.1a를 단조재로 제작할 수 있으며 주증기배관에 적용 시 증기발생기 출구노즐에서부터 원자로 격납건물 관통구까지가 적용 구간이 된다.

SA508 Gr.1a의 재료물성 개선을 위해 ASME B&PV Code Section II에 제시된 합금성분 범위 내에서 탄소의 함량을 감소시키고 Ni, Cr, Mo, V 등의 합금 원소를 첨가하여 여러 조건의 모델합금을 제작한 후 여러 열처리 조건으로 시험하여 최적의 열처리 조건을 찾았다. 일반적으로 탄소 함량을 감소시키면 강도는 낮아지고 인성은 높아지나, 합금원소 첨가를

**Table 1** State of LBB application on main steam line in advanced reactors

Reactor type	AP1000 (WEC)	US-EPR (AREVA)	US-APWR (MHI)	APR1400 (KHNP)	APR+ (KHNP)
Capacity(MWe)	1117	1600	1700	1400	1500
Loops	2	4	4	2	2
LBB application	○	○	○	X	○
Pipe material	SA335 Gr.P11	SA106 Gr.C	SA333 Gr.6	SA106 Gr.C	SA508 Gr.1a
Leak detection ability (gpm)	0.25-0.5	0.1	0.5	1	0.5

통하여 강도, 충격인성, 파괴인성을 보완하도록 합금 설계를 하였다. 열처리 조건은 템퍼링(tempering) 온도 및 유지시간과 냉각률을 여러 조건으로 시험하여 강도를 유지하고 인성을 높이는 열처리 조건을 선정하였다. 최종적으로 실패관 크기의 시제품을 국내 제작사의 주단조 공장에서 제작하고, 시편을 절취하여 인장 및 J-R 파괴인성 시험을 수행하였다<sup>(5,6)</sup>.

비교를 위하여 기존 OPR1000 및 APR1400 노형의 주증기배관 재료인 SA106 Gr.C의 재료물성은 KEPRI 보고서<sup>(7)</sup>를 참조하였다. KEPRI 보고서에서는 표준형 원전의 보존재로 289°C에서 인장시험 및 J-R 파괴인성 시험을 수행하였다. Table 2는 각 재료의 LBB 평가 재료물성을 나타낸 것이다. Table 2에서 R-O는 Ramberg-Osgood 식, Y.S.는 항복강도, T.S.는 인장강도, T.E.는 총연신율을 의미한다. 인장물성은 준정적 하중속도의 인장시험결과로부터 얻어진 것이며, J-R 곡선은 동적 및 준정적 하중속도로 시험한 결과 중 최저값으로 선정한 것이다. SA508 Gr.1a 시편의 시험 온도는 APR+ 주증기배관 운전온도인 286°C 이다.

Fig. 1과 Fig. 2는 각 재료의 공칭 인장곡선과 J-R 곡선을 나타낸 것이다<sup>(5)</sup>. J-R 곡선은 동적 및 준정적 시험결과 얻어진 6개의 J-R 곡선의 하한계 곡선을

나타낸 것이다. 각 재료의 강도 특성을 살펴보면, SA106 Gr.C 및 개선전 SA508 Gr.1a에 비하여 개선된 SA508 Gr.1a의 항복강도가 크게 향상되었다. SA508 Gr.1a의 J-R 파괴인성은 SA106 Gr.C에 비하여 우수하며, 개선 전후의 차이는 크지 않았다. 따라서 SA508 Gr.1a는 기존 주증기배관 소재인 SA106 Gr.C 대비 강도와 파괴인성이 우수하며, 개선된 SA508 Gr.1a의 파괴인성은 개선 전과 유사하나 강도가 크게 향상된 재료임을 알 수 있다.

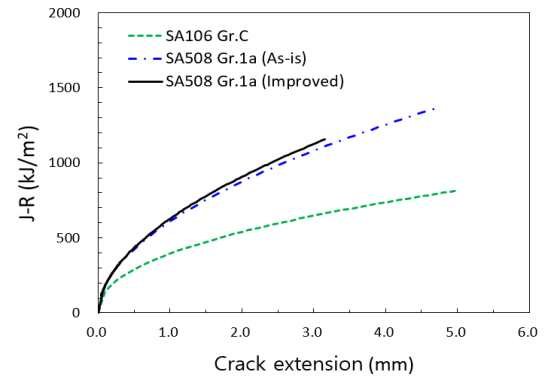


Fig. 2 Comparison of J-R curve

Table 2 Mechanical properties of tested at 286°C

Material	Tensile property			R-O fit		J-R curve J=C(Δa) <sup>m</sup>	
	Y.S.	T.S.	T.E.	α	n	C	m
SA106 Gr.C	226.5	544.7	29.8	1.40	4.30	395.0	0.450
SA508 Gr.1a (As-is)	243.9	496.0	26.7	2.05	4.24	596.7	0.551
SA508 Gr.1a (Improved)	405.6	560.0	23.0	1.05	13.2	627.2	0.532

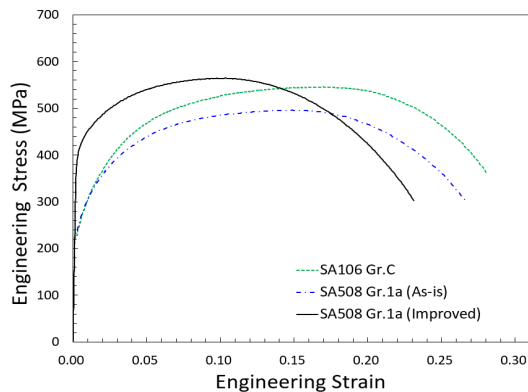
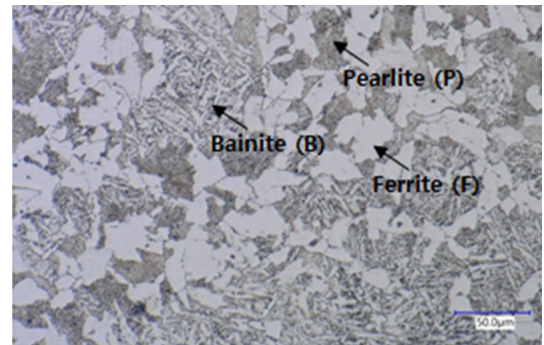
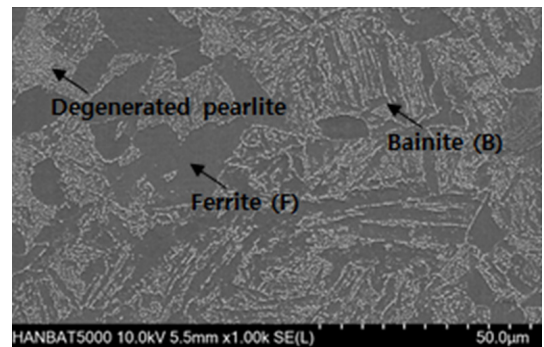


Fig. 1 Comparison of stress-strain curves



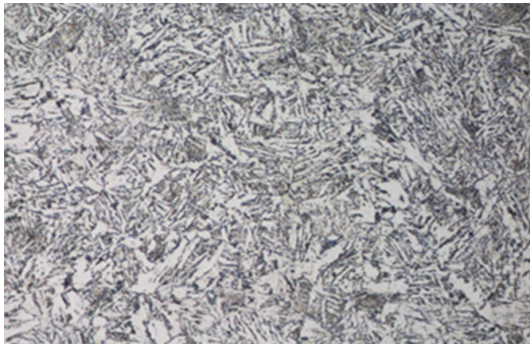
(a) OM image



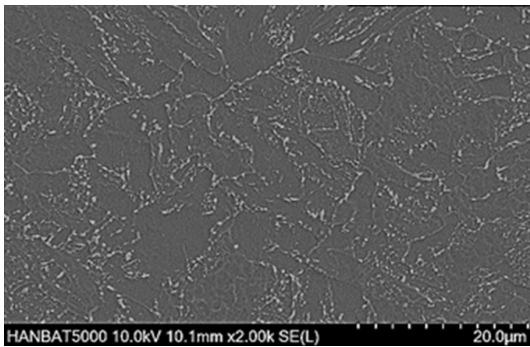
(b) SEM image

Fig. 3 Microscopic observation of SA508 Gr.1a (As-is)

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 SA508 Gr.1a의 개선 전과 개선 후의 미세조직을 광학현미경(optical microscope, OM)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 관찰한 사진이다<sup>(5)</sup>. 개선 전에는 페라이트, 펄라이트, 베이나이트가 혼재된 조직을 가지고 있으며 비교적 큰 결정입도(grain size)를 나타낸 반면, 개선 후에는 페라이트가 조금 섞여있고 다수가 저온변태상인 베이나이트가 형성되어 있으며 베이나이트의 크기가 미세하게 변하였다. 이러한 조직의 변화, 특히 결정입도가 미세하게 바뀐 것과 합금원소 함량 조정에 따라 개선 후의 SA508 Gr.1a의 강도가 크게 향상된 것으로 판단된다.



(a) OM image



(b) SEM image

Fig. 4 Microscopic observation of SA508 Gr.1a (Improved)

### 3. 파단전누설 여유도 평가

#### 3.1 평가 방법

평가 대상소재의 LBB 여유도 계산을 위해 유한요소해석과 균열 안정성평가(stability assessment)를 수행하였다. 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS 6.10<sup>(8)</sup>을 사용하였다. Fig. 5와 같이 균열을 포함한

1/4 대칭 직관 모델을 작성하였다. 두께 방향에 응력분포를 정확히 반영하기 위해 두께 방향으로 6 등분으로 요소를 배치하였다. 요소는 3차원 20절점을 갖는 등방성 이차요소(C3D20R)를 사용하였으며, 균열 선단은 웨지(wedge) 형태의 요소로 모델링하였다.

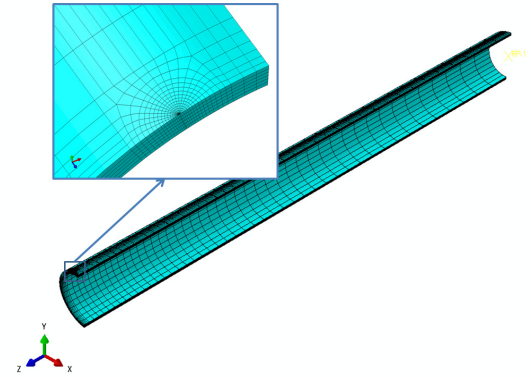


Fig. 5 Finite element model for crack analysis

누설균열길이 계산은 배관 재료의 인장물성과 정상운전 조건에서의 하중조합을 토대로 누설감지설비의 감지능력을 고려하여 누설균열길이를 결정하는 과정이다. U.S. NRC Regulatory Guide 1.45<sup>(9)</sup>에 따르면 LBB 적용을 위해서는 누설감지설비가 1.0 gpm 이하의 누설 감지능력을 보유해야 한다고 제시하고 있다. 누설감지설비의 성능에는 불확실성이 존재하므로 적절한 LBB 여유도를 확보해야 하며 불확실성에 대한 상세한 입증 이루어지지 않는다면 누설감지능력에 여유도 10을 고려해야 한다.

본 논문에서는 누설률 0.5 gpm에 누설감지능력 여유도 10을 곱한 5 gpm 누설에 대한 균열길이를 사용하였다. 누설균열길이 계산을 위해 미국 전력연구원(EPRI)에서 개발한 PICEP<sup>(10)</sup>을 사용하여 계산하였다. 5 gpm의 누설이 발생하는 균열길이를 감지가능누설균열(detectable leak crack; DLC) 길이로 정하고 유한요소모델을 작성하였다.

누설균열길이 계산 및 유한요소해석에서 사용한 축하중과 굽힘모멘트는 APR+ 표준설계<sup>(4)</sup>에서 최소 LBB 여유도를 나타내는 위치에서의 하중과 하중조합을 사용하였으며 세 재료 모두 동일한 값을 적용하였다. 고려된 하중조건은 자중, 열팽창, 지진에 의

한 앵커(anchor) 변위, 안전정지지진하중, 원자로건물 내 재장전수조 하중, 주증기배관 격리밸브 긴급 작동 시 발생하는 증기해머(steam hammer) 하중이며, 하중조합에 따른 작용하중은 Table 3과 같다. 하중조합은 최소자승법(square root of the sum of the squares)으로 조합되었으며 NOP는 정상운전조건설계하중을, MAX는 정상 및 사고 운전조건설계하중을 의미한다. 누설균열길이 계산에는 NOP 하중을 사용하였으며, 유한요소해석 및 균열 안정성 평가에는 MAX 하중을 사용하였다.

**Table 3** Combined load applied for analysis

Load	Axial force (kN)		Moment (N-m)	
	NOP	MAX	NOP	MAX
Value	-227.7	671.9	1290.5	3904.4

균열선단에서의 J-적분값은 Fig. 1에 대한 진응력-진변형률곡선과 Table 3의 MAX 하중 및 내압을 적용한 탄소성 유한요소해석으로 구하였다. 균열면에는 내압의 0.5배의 압력을 가하고 배관 끝단에는 blow-off 하중과 굽힘모멘트 및 축방향 인장력을 가하였다.

균열 안정성평가는 누설균열길이 평가에서 계산된 균열 크기와 평가대상 부위의 정상 및 고장운전 조건에서의 최대하중 조합을 모두 고려하여 균열 성장에 대한 안정성을 평가하는 것이다. 첫 번째로 누설균열길이 크기의 균열에 LBB 최대하중조합의 1.4 배의 하중을 적용시켜 평가한다. 평가에 적용할 하중조합을 각 하중에 대한 절대 합으로 사용하는 경우에는 1.4 대신 1.0을 적용할 수 있다. 다음으로 누설균열길이의 2 배 크기의 균열에 LBB 최대하중조합의 1배 크기의 하중을 적용하여 평가한다. LBB 설계 개념을 적용하기 위해서는 위의 두 가지 평가요건을 모두 만족해야 한다.

균열 안정성평가는 찢김계수(tearing modulus)를 구하여 J-T 평가법으로 평가하였다. 이때 찢김계수는 물리적인 의미로 균열길이의 변화에 따른 J-적분값의 변화율로 정의되며, Fig. 2에 제시된 각 재료의 J-R 선도, 탄성계수 및 유동응력(flow stress)을 이용하여 다음의 식 (1) 및 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T_{mat} = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_{mat}}{da} \quad (1)$$

$$T_{app} = \frac{E}{\sigma_f^2} \frac{dJ_{app}}{da} \quad (2)$$

여기서  $J_{mat}$ 와  $T_{mat}$ 은 각각 재료 물성시험 등을 통해 구한 재료의 J-적분과 찢김계수이며,  $J_{app}$ 와  $T_{app}$ 은 각각 유한요소해석으로 계산된 J-적분과 찢김계수이다. J-T 평가법에서 균열이 불안정하게 성장하는 조건은 식 (3)과 같다.

$$T_{app} \geq T_{mat} \quad (3)$$

### 3.2 평가 결과 및 고찰

유한요소해석 및 J-T 평가 결과, 각 소재별 5 gpm의 누설이 발생하는 균열길이(DLC), 최대 작용하중, 균열 불안정성장이 시작되는 하중 및 여유도를 계산하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 불안정한 균열 성장이 발생하는 하중을 INST로, 설계 최대 작용하중을 MAX로 표시하였다. LBB 여유도는 INST/MAX로 정의된 값이다.

각 재료별 LBB 여유도는 모두 2 배의 균열길이보다 1.4 배의 작용하중을 고려한 경우에 더 큰 LBB 여유도가 나타났다. 균열길이가 1×DLC 인 경우를 기준으로 LBB 여유도 값을 비교할 때, 여유도의 크기는 개선된 SA508 Gr.1a > 개선전 SA508 Gr.1a > SA106 Gr.C 순으로 나타났다.

**Table 4** Result of J-T analysis

Material	DLC length (mm)		Bending moment (kN-m)		LBB margin (INST/MAX)
			MAX	INST	
SA106 Gr.C	221.1	1×DLC	5,468.4	5,567.6	1.018
		2×DLC	3,906.0	4,161.8	1.065
SA508 Gr.1a (As-is)	222.1	1×DLC	5,468.4	6,441.2	1.178
		2×DLC	3,906.0	4,769.5	1.221
SA508 Gr.1a (Improved)	232.4	1×DLC	5,468.4	8,152.6	1.491
		2×DLC	3,906.0	6,059.2	1.551

SA106 Gr.C와 개선전 SA508 Gr.1a를 비교하면, 강도특성의 차이가 크지 않아 누설균열길이가 유사하게 나타난 반면, Fig. 2에서 알 수 있듯이 큰 파괴인성 특성의 차이로 인하여 개선전 SA508 Gr.1a의 LBB 여유도가 SA106 Gr.C의 LBB 여유도보다 16% 높게 나타났다. SA106 Gr.C와 개선된 SA508 Gr.1a를 비교하면, 개선된 SA508 Gr.1a가 강도와 파

파괴인성 특성이 크게 향상되어 LBB 여유도는 SA106 Gr.C 보다 47.3% 높게 나타났다.

SA508 Gr.1a의 개선 전과 후를 비교하면, 개선 후에 LBB 여유도가 31.3% 향상되었다. 이것은 개선 전과 후의 파괴인성은 유사하나 Fig. 1과 Table 1에서 알 수 있듯이 개선된 재료의 항복강도가 많이 향상되었기 때문인 것으로 판단된다. 보통의 저합금강에서는 강도가 증가하면 인성이 감소하지만 본 개선재의 경우 인성을 유지한 채 강도를 높여 LBB 여유도가 증가하였다. 이것은 합금조성의 조정과 다양한 시험 조건의 열처리 방법에 대한 연구결과로 얻어진 것이다.

평가 결과에서 알 수 있듯이 강도와 J-R 파괴인성의 증가가 LBB 여유도에 영향을 미친다. 강도와 파괴인성이 각각 어느 정도의 영향을 미치는지 정량적으로 살펴보기 위하여, 앞에서와 동일한 유한요소모델과 작용하중으로 재료의 강도만 변화시킨 경우와 파괴인성만 변화시킨 경우에 대하여 LBB 여유도를 계산하여 비교하였다.

먼저 인장시험 값을 고정하고, J-R 파괴인성 값을 Fig. 6과 같이 -20%, -10%, 0%, 10%, 20%로 변화시키면서 LBB 여유도를 계산하였다. 이때 기준 J-R 파괴인성곡선(0%)은 개선전 SA508 Gr.1의 289°C 준정적 및 동적 J-R 파괴인성 시험곡선 중 가장 낮은 값을 보이는 시편 시험결과를 사용하였다. 인장물성은 Table 2의 SA508 Gr.1(As-is)의 값을 사용하였다. 평가 누설균열길이는 2×DLC인 경우에 대하여 분석하였다. Table 5는 J-R 파괴인성 변화에 따른 LBB 여유도 변화를 나타낸 것이다. 파괴인성이 -10% 에서 10%로 20% 향상되면 LBB 여유도는 19.6% 에서 24.0%로 약 4.4% 증가 하였다.

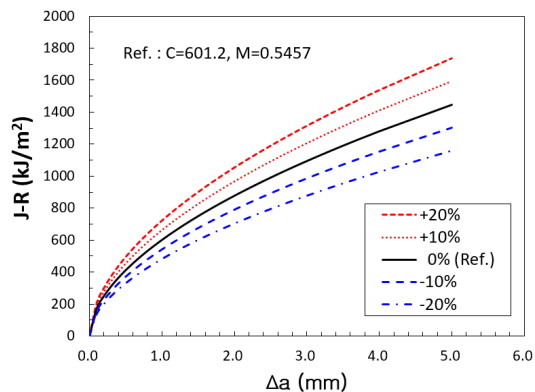


Fig. 6 J-R curve for sensitivity analysis

Table 5 LBB margin according to J-R curve variation

J-R curve	-20%	-10%	0%	10%	20%
LBB margin	1.171	1.196	1.219	1.240	1.260

다음으로 J-R 파괴인성 값을 고정하고, 인장시험 결과를 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 -10%, -5%, 0%, 5%, 10%로 변화시키면서 LBB 여유도를 계산하였다. 이때 기준 응력-변형률곡선(0%)은 개선전 SA508 Gr.1a의 준정적 인장시험결과를 Ramberg-Osgood 식으로 적합한 평균값을 사용하였다. J-R 파괴인성 값은 Fig. 3의 기준 J-R 파괴인성곡선(0%)을 사용하였다. 평가 누설균열길이는 2×DLC인 경우에 대하여 분석하였다. Table 6은 인장물성 변화에 따른 LBB 여유도 변화를 나타낸 것이다. 인장물성이 -10%에서 10%로 20% 향상되면 LBB 여유도는 13.4% 에서 34.3%로 20.9% 증가하였다.

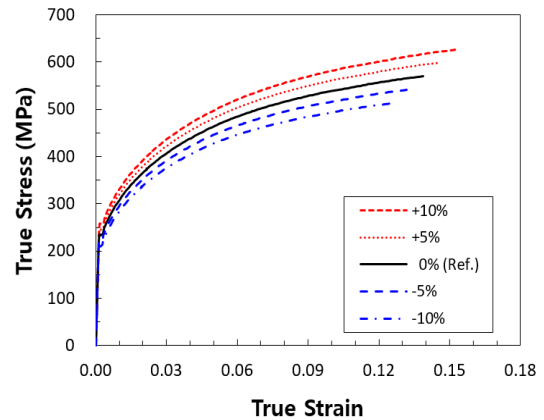


Fig. 7 Stress-strain curve for sensitivity analysis

Table 6 LBB margin according to stress-strain variation

σ-ε curve	Change	-10 %	-5 %	0 %	5 %	10 %
	α	2.3593	2.3794	2.3969	2.4151	2.4266
n	4.2625	4.2441	4.2281	4.2125	4.2026	
DLC (mm)		224.4	222.6	220.5	218.1	215.4
LBB margin		1.134	1.185	1.238	1.301	1.343

이상과 같이 인장 물성과 J-R 파괴인성 각각의 민감도를 분석한 결과, 인장물성의 변화가 J-R 파괴인성의 변화에 비하여 LBB 여유도에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. Table 4의 LBB 여유도 평가 결과와 민감도 분석결과를 연관지어 생각해 보면, SA508 Gr.1a 개선재는 SA106 Gr.C와 비교할 때 강

도와 J-R 파괴인성이 모두 크게 향상되었고 개선전 SA508 Gr.1a와 비교할 때 강도가 크게 향상되었으므로 재료물성 개선의 효과 중 강도 향상의 효과가 SA508 Gr.1a 개선재의 LBB 여유도를 높이는 데 더 큰 역할을 한 것임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

주증기배관 제작에 사용할 목적으로 재료물성을 개선한 SA508 Gr.1a 소재의 LBB 여유도 분석을 위해 OPR1000 및 APR1400 원전에 사용된 SA106 Gr.C와 APR+ 표준원전 설계에 사용된 SA508 Gr.1a의 인장 및 J-R 파괴인성 시험 결과를 비교하여 물성 특성을 분석하고 각 재료의 LBB 물성에 따른 LBB 여유도를 계산하였다. LBB 여유도를 계산하기 위하여 누설균열길이에 대한 탄소성 유한요소해석과 J-T 평가법을 사용한 균열 안정성평가를 수행하였다. 각 재료에 대하여 계산된 LBB 여유도와 재료 물성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개선된 SA508 Gr.1a는 OPR1000 및 APR1400 노형에 적용된 SA106 Gr.C 보다 47.3% 높은 LBB 여유도를 나타냈다. 또한 APR+ 노형에 적용된 개선전 SA508 Gr.1a 보다 31.3% 높은 LBB 여유도를 나타냈다.

(2) 각 재료의 LBB 물성을 비교하면, 개선된 SA508 Gr.1a는 개선전 SA508 Gr.1a 대비 강도가 우수하였고 SA106 Gr.C 대비 강도와 파괴인성이 모두 우수하였다.

(3) 개선된 SA508 Gr.1a의 LBB 여유도가 SA106 Gr.C 및 개선전 SA508 Gr.1a의 LBB 여유도보다 더 크게 나타난 것은 강도와 J-R 파괴인성 특성이 향상되었기 때문이다.

(4) 강도 변화와 파괴인성 변화가 LBB 여유도에 미치는 영향에 대한 각 물성의 민감도 분석 결과, 강도 변화가 J-R 파괴인성 변화 보다 LBB 여유도 향상에 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) Song, M. S., 2006, "The Effect of Weld Residual Stress on Crack Opening Displacement and LBB Evaluation for OPR1000 Surge Line," *Trans. of the KPVP*, Vol. 2, No. 1, pp. 66-74.
- (2) Lee, S. Y., Kim, N. H., Koo, G. H., Kim, S. K. and Kim, Y. J., 2016, "Preliminary Leak-before Break Assessment of Intermediate Heat Transport System Hot-Leg of a Prototype Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor," *Trans. of the KPVP*, Vol. 12, No. 1, pp. 126-133. doi: <http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2016.12.1.126>
- (3) Kim, M. W. and Park, Y. S., 2013, "A Simple Finite Element Modeling Method for Leak-Before-Break Crack Analysis of Pipe with Overlay Dissimilar Metal Weldments," *Trans. of the KPVP*, Vol. 9, No. 1, pp. 70-76.
- (4) KEPCO-E&C, 2012, "Technical Report : Leak-Before-Break for Main Steam Line," KEPCO Engineering & Construction Company, INC, Kimcheon-si, 9-037-N460 -001 Rev.0.
- (5) KHNP, 2019, "Development of Technologies for Improving Mechanical Properties of Main Steam Piping: Final Report," Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Daejeon, 2019-50003339-전-0917FR.
- (6) Kim, J. W., Cho, H. G., Kim, M. W. and Kim, H. D., 2017, "Analysis of Tensile and J-R Fracture Toughness Data for LBB Evaluation of Low-alloy Steel Pipes," *Proc. of 2017 KPVP Conference*, Changwon, Nov. 23- 24, pp. 227-228.
- (7) KEPRI, 2011, "Material Property Test for Main Steam Pipe of APR-1000 (Final Report)," Korea Electric Power Research Institute, Daejeon.
- (8) ABAQUS/CAE Ver.6.10-3, 2010, © Dassault Systemes Simulia Corp., USA.
- (9) USNRC, 2008, "Guidance on Monitoring and Responding to Reactor Coolant System Leakage," Regulatory Guide 1.45 Revision 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- (10) EPRI, 1987, "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program (Revision 1) Special Report," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, NP-3596-SR Rev.1.