

Type 316N 스테인리스강의 OPR1000 및 APR1400 가압기 밀림관 적용성에 대한 연구

유완[†]·정성훈*·박성호*·손갑현*·이봉상**·김민철**

A Study on Applicability of Stainless Steel Type 316N to the PZR Surge-line of OPR1000 and APR1400

One Yoo, Sung-hoon Jung, Sung-ho Park, Gap-heon Sohn,
Bong-sang Lee and Min-chul Kim

Key Words: Leak-Before-Break(파단전누설), Stainless Steel(스테인리스강), Type 316N, Type 347, J-R Curve(J-R 곡선), Surge-line(밀림관)

Abstract

The applicability of stainless steel type 316N to the PZR surge-lines of OPR1000 and APR1400 is investigated. So far, stainless steel type 347 has been used for the OPR1000 surge-lines. The degree of improvement in the leak-before-break(LBB) and component design margin is evaluated when stainless steel type 347 is substituted by type 316N. For the study, the tensile and J-R tests on type 316N and type 347 stainless steels were performed at 316°C and the microstructure of both types was examined. Stainless steel type 316N shows the higher values on the stress-strain curves, J-R curves and stress intensity, S_m , compared to those of type 347. Therefore, stainless steel type 316N ensures the higher LBB and component design margins. As a result, this study shows that stainless steel type 316N could substitute type 347 for the surge-lines of OPR1000 and APR1400.

1. 서 론

원전의 가압기 밀림관은 가압기와 주냉각재 배관의 고온관을 연결하는 배관으로 운전 중 원자로 계통이 적절한 압력을 유지할 수 있도록 가압기에서 생성한 압력을 원자로계통으로 전달하는 역할을 한다. 그러나 OPR1000 및 APR1400의 밀림관은 국내에서 가동 중인 타 원전과 달리 영광 3호기부터 파단전누설(이후 LBB라 함) 설계를 적

용해 오고 있다. LBB 설계란 배관에 균열이 발생하여 존재하더라도 배관이 완전파단에 이르기 전 균열의 존재를 감지하여 원자로를 안전하게 정지할 수 있도록 하는 설계방법으로 LBB를 설계에 적용하면 해당 배관의 순간양단파단 사고를 설계에서 제외할 수 있어 설계상 및 운전상 다양한 이점을 얻을 수 있다. 그러나 현재 밀림관 재료로 적용중인 Type 347 스테인리스강(이후 Type 347이라 함)은 탄소안정화 스테인리스강으로서 높은 고온강도를 갖고 있어 운전하중이 높은 밀림관에 적합한 재료이지만, 파괴인성이 충분히 높지 못하고 재료마다 파괴인성이 큰 차이를 나타내고 있어 LBB 설계 적용 시 어려움이 있었다. 또한 최근 LBB 설계에 대한 제반 인허가 요건이 강화될 가능성이 있으므로[1] 현재 밀림관에 적용중인 Type 347 재료를 대체할 수 있는 Type 316N 스테인리스강(이후 Type 316N이라 함)이 장

† 한국전력기술(주) 원자로설계사업본부 기계설계처
E-mail : oyoo@kopec.co.kr

TEL : (042)868-4116 FAX : (042)863-4862

* 한국전력기술(주) 원자로설계사업본부 기계설계처

** 한국원자력연구소 재료파괴특성평가분야

기적인 관점에서 필요한 상황이다. 본 논문에서는 Type 316N과 Type 347재료에 대해 파괴인성 및 인장시험과 미세조직관찰을 수행하고 이 자료를 이용 OPR1000 밀립관에 대해 LBB 평가를 수행하여 Type 316N 재료의 OPR1000 및 APR1400의 밀립관에 대한 적용성을 평가해 보고자 한다.

2. 시험재료, 재료시험 방법

2.1 시험재료

J-integral Resistance (이후 J-R이라함) 및 인장시험을 위한 시험재료로서 화학조성이 다른 Type 316N 재료 4 종과 Type 347 재료 3 종을 선정하여 판재의 형태로 제작하여 사용하였다. 판재는 진공유도용해(VIM) 방식으로 만든 강괴 30 kg을 열간압연기를 이용하여 4회의 압연과정을 거쳐 표준 1T CT(1T compact tension) 시편의 두께에 근접하는 29 mm가 되도록 한 다음, 1050℃에서 1시간동안 용체화 처리를 하였다. 제작한 판재에 함유된 질소의 양은 밀립관 소재의 일반적인 질소 조성인 약 0.11w%를 유지하였고 중요 원소인 탄소의 함량은 약 0.02w%에서 약 0.06w%의 범위로 조정하였다. 판재의 종류별 주요 화학조성은 표 1과 같다. Type 316N에서 Ni의 함량이 높은 것은 SANDVIK의 원자력 배관 소재와 유사한 조건을 선택하였기 때문이다.

Table 1 The Chemical Composition of Alloys

Element I.D.	Cr	Ni	C	N	Nb	P
316N1	17.28	12.35	0.019	0.10	-	0.008
316N2	17.46	12.36	0.037	0.11	-	0.026
316N3	17.45	12.30	0.046	0.11	-	0.025
316N4	17.44	12.20	0.056	0.11	-	0.024
347S1	18.37	9.80	0.021	0.11	0.28	0.002
347S2	18.45	10.10	0.038	0.11	0.52	0.002
347S3 ¹⁾	17.39	9.98	0.049	0.11	0.69	0.002

Note 1) Mo, 0.29 w% and Co, 0.084 w% are added

2) All compositions are in weight %

3) S contents are below 0.006 wt% for all alloys

2.2 재료시험 방법

2.2.1 인장시험

인장 시험은 판재로부터 L 방향으로 채취한 게이지 직경 6.4 mm, 게이지 길이 25.4 mm인 봉상

인장시편을 이용하여 ASTM E8[2] 및 E21[3]에 따라 변위제어로 원자로 가동온도인 316℃에서 수행하였다. 시험에 사용한 장비는 10톤 용량의 전기유압식 재료시험기(MTS Model 810)이며 적용하중속도는 1 mm/min (strain rate: 약 5×10^{-4} /sec)으로 시험 중에 $\pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였다.

2.2.2 J-R 시험

J-R 시험은 제작한 판재로부터 L-T 방향으로 채취한 1T CT 시편에 대해 ASTM E1820[4]에 따라 수행하였으며, 분당 1 mm의 변위제어 및 탄성해중방법을 이용한 단일시편법을 적용하였다. 시편에는 10%의 측면 홈을 양 측면에 가공하였다. 시험에 사용한 장비는 10톤 용량의 전기유압식 재료시험기(MTS Model 810)이며 시험온도는 원자로 가동온도인 316℃로 시험 중에 $\pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지하였다.

2.2.3 미세조직관찰

광학현미경을 이용한 조직관찰을 100배의 배율로 수행하였다.

3. 인장 및 J-R 시험 결과

3.1 인장시험결과

그림 1은 표 1에 표시한 여러 조성의 Type 316N 및 Type 347 재료에 대한 응력-변형률 선도를 보이며 표 2는 이들에 대한 항복강도 및 인장강도를 나타낸다. 그림 1 및 표 2로부터 Type 316N 및 Type 347 재료 모두에서 탄소의 함량이 증가함에 따라 응력-변형률 선도가 상승하고 항복 및 인장강도 역시 대체적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 347S3를 제외하면 Type 316N의 인장특성이 Type 347보다 나음을 알 수 있다. 347S3의 경우 347S1 및 347S2에 비해 상대적으로 높은 강도를 보이는 데 이것은 재료에 함유된 기타원소(Mo, Co)와 많은 양의 C 및 Nb의 영향으로 판단된다.

3.2 J-R 시험결과

Type 316N 및 Type 347 재료의 J-R 시험결과를 그림 2에 도시하였다. Type 316N의 경우는 316N2를 제외하고 좁은 범위의 J-R 곡선을 나타내는 반면 Type 347 재료는 넓게 분포하는 J-R

곡선 특성을 보이며 Type 316N의 J-R 곡선이 Type 347의 J-R 곡선보다 높게 위치하고 있다.

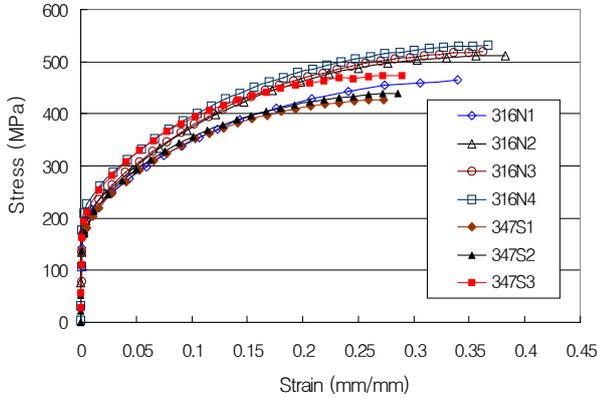


Fig. 1 Stress-strain Curves of Type 316N and Type 347 Stainless Steels at 316°C

4. 재료별 LBB 허용하중 평가

4.1 LBB 평가방법

LBB 평가는 J-integral vs Tearing Modulus (이후 J-T) diagram법[5]을 이용하였다.

4.1.1 Applied J-T

Applied J-integral 및 Applied T는 PICEP[6] 전산코드를 이용하여 구한 원주방향 관통균열의 2배에 대해서 virtual crack extension법[7]에 따라 CE-Mark[8] 전산코드를 사용하여 계산하였다. 이때 원주방향 관통균열의 2배란 OPR1000의 운전 압력인 15.514 MPa하에서 누설속도 37.8 liter/min에 대응하는 균열크기의 2배란 의미이다. 그림 3은 Applied J-T 계산에 사용한 OPR1000 밀림관 직관부의 1/4 FE 모델이며 이때 해석에 적용한 응력-변형을 선도는 그림 1에서 유사한 크기의 선도들을 그룹 1: 316N1, 347S1 및 347S2, 그룹 2: 316N2 및 316N3, 그룹 3: 316N4, 그룹 4: 347S3의 4가지로 구분한 후 각 그룹별로 응력-변형을 선도를 1개씩 선택하여 해석을 수행하였다. 그룹별 대표 응력-변형을 선도는 그룹 1: 347S2, 그룹 2: 316N2, 그룹 3: 316N4, 그룹 4: 347S3이다.

4.1.2 Material J-T

Material J-T를 구하기 위해, 측정된 J-R 자료를 이용하여 ASTM E1820에서 제안한 다음 식 (1)에

따라 곡선 접합하였다.

Table 2 Yield and Tensile Strength of the Type 316N and Type 347 Stainless Steels at 316°C

Property I.D.	Yield Strength ¹⁾	Tensile Strength
316N1	185	464
316N2	184	513
316N3	186	518
316N4	204	524
347S1	164.5	428
347S2	168	440
347S3	203	474

Unit: MPa

Note 1: 0.2% offset yield strength

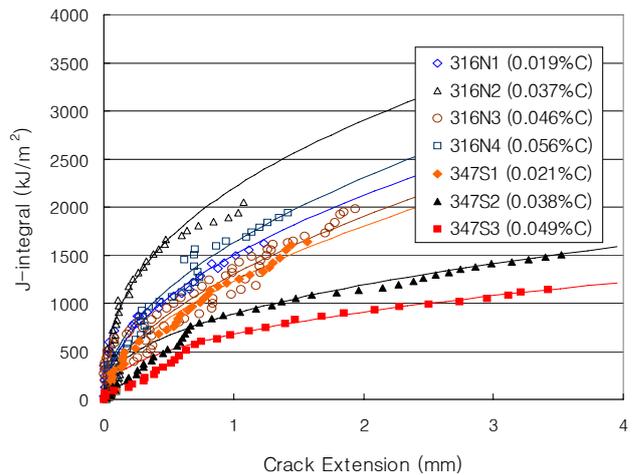


Fig. 2 J-R Test Data and Their Fitted J-R Curves of Type 316N and Type 347 Stainless Steels at 316°C.

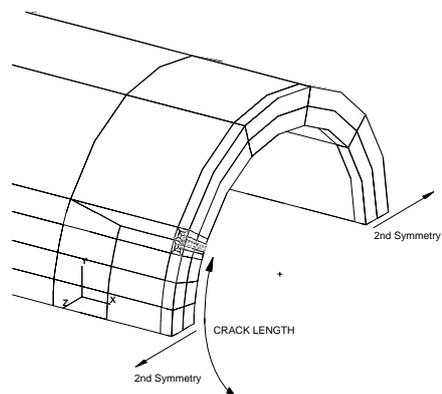


Fig. 3 Finite Element Pipe Model

표 1의 각 재료별 J-R 시험결과에 대해 곡선접합한 결과를 J-R 시험결과와 함께 그림 2에 실선으로 도시하였다. Material Tearing Modulus는 식 (1)을 균열 진전량에 대해 1차 미분하여 얻는다.

$$\text{Material J-integral} = C_1(da)^{C_2} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, da: 균열진전량 (mm), C_1 및 C_2 : 계수로 C_1 은 kJ/m^2 , C_2 는 무차원의 값을 갖는다.

4.2 J-T diagram 평가 결과

그림 4는 표 1의 Type 316N 및 Type 347 재료에 대한 J-T diagram 평가결과이다. 그림 4에서 Applied J-T와 Material J-T가 교차하는 점에 대응하는 배관하중이 허용 LBB 하중이 된다. 재료별 허용 LBB 하중값을 표 3에 기술하였다. 이때 Applied J-T는 대표 응력-변형을 선도에서 구한 값을 각 그룹에 대해 공통으로 사용하였다.

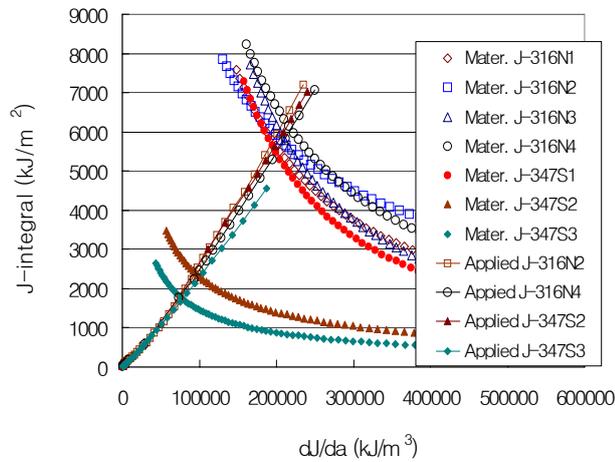


Fig. 4 Stability Evaluation of Type 316N and Type 347 Stainless Steels

Table 3 Acceptable LBB Loads of the Type 316N and Type 347 Stainless Steels

Identification	316N1	316N2	316N3	316N4
LBB load	319	345.2	347.4	362.5
Identification	347S1	347S2	347S3	-
LBB load	317.7	247.8	257.1	-

Unit: kN-m

5. Type 316N 재료의 적용성 고찰

5.1 재료강도 측면

가압기 밀림관은 고온, 고압 하에서 운전될 뿐만 아니라 운전특성상 열성층현상이 쉽게 발생하므로 높은 정상운전하중을 받으며 지진하중이나 분기관 파단하중 등 기타 다양한 하중을 받으므로 운전온도에서 높은 설계응력강도(S_m)를 유지하여야 한다. 표 4는 SA376 TP316N 및 TP347에 대해 KEPIC Code[9]에서 기술하고 있는 설계응력강도를 비교한 것이다. 상온에서 350°C까지 모든 온도범위에서 Type 316N 자재의 설계응력강도가 Type 347 재료보다 약 7% ~ 17% 높음을 알 수 있다. 따라서 재료강도의 측면에서 Type 347 재료를 Type 316N 재료로 대체가 가능하다.

Table 4 Design Stress Intensity Values, S_m for Type 316N and Type 347 Stainless Steels

	RT	100°C	200°C	300°C	350°C
TP316N	161	161	161	147	140
TP347	138	138	138	135	130

Unit: MPa

5.2 LBB 평가 측면

5.2.1 응력-변형을 선도 비교

LBB 평가에 중요한 요소인 Applied J-integral은 Park[10] 등이 보고한 바와 같이 응력-변형을 선도의 형상에 영향을 받는다. 즉, 항복응력이 높을수록 또한 응력-변형을 선도가 높은 유동응력을 보일수록 낮은 Applied J-integral이 계산된다. 그림 5는 그림 3에 나타난 밀림관 FE 모델에 배관하중을 가할 때, 균열선단에 생성되는 Applied J-integral의 크기에 대한 응력-변형을 선도의 영향을 보여준다. 동일한 배관하중을 가했을 때 항복강도와 응력-변형을 선도가 가장 높은 316N4의 Applied J-integral이 가장 작게 나타나고, 항복강도와 약 8%까지의 응력-변형을 선도가 316N4와 거의 동일한 347S3이 두 번째, 15% 이후의 응력-변형을 선도는 347S3 보다 높으나, 응력-변형을 선도가 전체적으로 316N4보다 약간 낮은 316N2가 3번째, 항복강도와 응력-변형을 선도가 모두 가장 낮은 347S2에서 가장 높은 Applied J-integral가 생성되었다. 이것은 Park[10] 등이 보고한 결

과와 잘 일치하는 결과이다. 따라서 항복강도와 응력-변형률 선도가 일반적으로 높은 Type 316N 재료가 Type 347 재료보다 LBB 평가에 더 유리할 것으로 판단되었다. 또한 Type 316N으로 대체 사용하는 경우, 파괴인성 특성에 손상을 주지 않는 범위에서 Type 316N의 항복강도 및 인장강도를 가능한 높이는 것이 바람직하며 이를 위해 Type 316N은 0.035wt%C 이상의 탄소를 함유하는 것이 타당할 것으로 분석되었다.

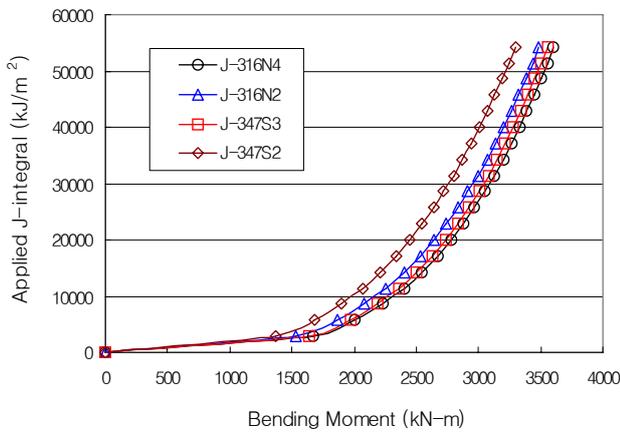


Fig. 5 Effect of Mechanical Properties on Applied J-integrals Induced by Bending Moments

5.2.2 J-R 선도 비교

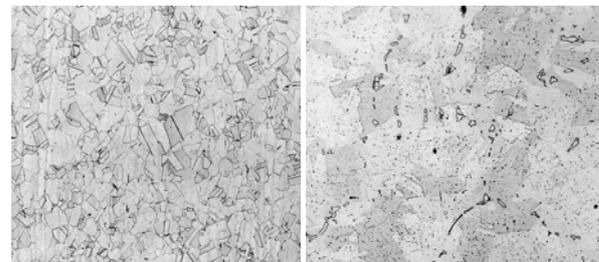
5.2.2.1 화학조성(탄소)의 영향 비교

그림 2는 Type 316N 재료와 Type 347재료의 J-R 곡선을 보여준다. Type 316N 재료의 J-R 곡선은 탄소함량 0.019wt% ~ 0.056wt%의 넓은 범위에서 Type 347 재료의 상한(347S1)과 최소한 유사하거나 높게 위치하며 탄소의 함량과는 선형적인 관계를 보이지 않는다. 특히 탄소함량 0.037wt%의 316N2를 제외하고는 측정한 J-R 곡선 간 차이가 그다지 크지 않다. 반면, Type 347 재료의 J-R 곡선은 특성이 가장 좋은 347S1 (0.021wt%C)로부터 탄소함량이 증가함에 따라 급격하게 J-R 곡선이 낮아지고 있음을 알 수 있다. Type 347 재료의 J-R 곡선이 탄소함량에 따라 크게 영향을 받는 것은 Yoo[11] 등이 보고한 바와 같이 기지 내에 존재하는 탄화물 Nb(CN) 때문이다. 그림 6은 316N4과 347S3의 조직사진으로 347S3의 조직에서는 조대한 탄화물을 관찰할 수 있는 반면, 316N4의 조직은 큰 석출물이 분포하지 않으며 조직이 균질하다. 이러한 미세조직상의 차이는 Type 316N 재료의 파괴인성이 높게

나타나는 이유를 설명해주는 동시에 가공으로 인해 발생할 수 있는 재료물성의 이방성이 낮을 것임을 예상할 수 있게 한다. 따라서 Type 316N 재료를 밀림관 재료로 대체 사용하는 경우 Type 347 재료에서 나타난 구매 재료별 J-R 곡선의 심한 편차 때문에 겪었던 LBB 평가시의 어려움을 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2.2.2 균열진전량 비교

그림 2에서, 347S1 (0.021wt%C)의 균열진전량은 Type 316N 재료와 유사한 1.5mm 내외이나 탄소량이 증가한 347S2 및 347S3는 균열진전량이 3.5mm 정도로 대폭 증가한 것을 알 수 있다. J-R 시험 시 균열진전량은 균열에 대한 재료의 예민성을 보여주는 것으로 Type 316N의 파괴인성이 상대적으로 Type 347 보다 높음을 보여주는 간접적인 증거이다. 반면, Type 316N 재료의 작은 균열진전량은 J-R data의 곡선접합을 어렵게 하여 Material J-T 생성 시 불확실도를 높이는 원인이 될 수 있다. 따라서 높은 파괴인성 특성과 작은 균열진전량을 보이는 Type 316N 재료에 대해 보다 정확한 곡선접합을 할 수 있도록 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.



(a) 316N4 (b) 347S3

Fig. 6 Optical Micrographs of Specimen 316N4 and 347S3

5.2.3 LBB 허용 하중 비교

LBB 설계를 밀림관에 적용하기 위해서는 열성층 하중을 포함한 정상운전하중과 안전정지지진 하중을 고려한 최대 배관하중 하에서 배관의 원주방향으로 가정된 관통균열이 안정적으로 거동하는 것을 보여야 한다[5]. 즉, 최대 배관하중이 표 3에 기술한 LBB 허용하중보다 작아야 한다. 분석결과 표 3의 LBB 허용하중은 참고문헌[12]에 제시되어 있는 울진 3,4호기의 밀림관 배관하중

보다 높으며 347S1을 제외한 347S2 및 347S3의 LBB 허용하중이 참고문헌에 언급된 최대배관하중에 비해 그다지 높지 않은 것으로 확인되었다. 반면, Type 316N 재료의 경우는 허용 LBB 하중이 Type 347 재료에 비해 상대적으로 커서 Type 316N 재료를 밀림관으로 대체 사용하면 최소 50%이상의 높은 LBB 설계 여유도를 확보할 수 있는 것으로 평가되었다. Type 316N 재료를 사용하여 충분한 LBB 설계 여유도를 확보하게 되면 현재 배관하중을 줄이기 위해 복잡한 형상으로 설계하고 있는 밀림관에 형상설계의 관점에서 긍정적인 효과를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

현 OPR1000 및 APR1400의 밀림관 재료인 Type 347 재료를 대체하는 재료로서 Type 316N의 적용성을 재료강도의 측면과 LBB 평가 측면에서 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Type 316N의 설계응력강도, S_m 은 Type 347보다 약 7 ~ 17% 더 높아서 Type 316N 재료가 기기설계측면에서 더 유리하였다.
2. 0.035w%C 이상의 탄소를 포함하는 Type 316N 재료는 본 연구에서 사용한 Type 347 재료 중 가장 높은 탄소를 함유한 경우보다 높은 응력-변형률 선도를 보이며 항복강도도 비교적 높으며 따라서 Type 316N 재료가 LBB 평가에서 더 유리함이 확인되었다.
3. Type 316N 재료는 Type 347 재료에서 보이는 조직 내 조대한 석출물이 없어 이로 인한 파괴인성의 저하가 없고 재료 가공 시 이방성이 적을 것으로 사료되었다.
4. Type 316N 재료의 LBB 허용하중의 설계 여유도는 최소 50% 정도로 LBB 설계의 안정적인 적용뿐만 아니라 밀림관의 형상설계개선에도 유리할 것으로 판단되었다.
5. Type 316N 재료는 높은 파괴인성 대비 작은 균열진전량의 J-R 곡선 특성을 보였으며 따라서 J-R 곡선접합 시 어려움이 있었다. 이에 대한 추

가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] Scott, P.M., Olson, R.J., and Wilkowski, G.M., 2002, "Development of Technical Basis for Leak-Before-Break Evaluation Procedures," *NUREG/CR-6765*
- [2] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Materials," *ASTM E8*
- [3] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method of Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials," *ASTM E21*
- [4] American Society for Testing and Materials, "Standard Test for Measurement of Fracture Toughness," *ASTM E1820*
- [5] Chou C.K. et al., 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Break," *U.S. NRC NUREG-1061*, Vol.3, pp.A-1~A-8
- [6] Electric Power Research Institute, 1987, "PICEP: Pipe Crack Evaluating Computer Program," EPRI NP-3596-SR Rev.01
- [7] Anderson, T.L., "Fracture Mechanics," *Tayer & Francis*, pp.560~563
- [8] Combustion Engineering, 1988, "CE-Mark Computer Program Ver. 1, User's Manual," *Westinghouse Internal Report*
- [9] Korea Electric Association, 2007, "Allowable Stress," *KEPIC MDP*
- [10] Park, W.B., Yoo, O., Lee, B.S. et al., 2003, "The Influence of Material Properties on the LBB Evaluation of Surge-line Piping in KSNP," *Trans. of the KNS Spring Meeting*, pp.241.2~241.2
- [11] Yoo O., Oh, Y.J., Lee, B.S., Nam, S.W., 2005, "The Effect of the Carbon and Nitrogen Contents on the Fracture Toughness of Type 347 Austenitic Stainless Steel," *Mater. Sci. & Eng.(A)*, Vol. 405, pp.147~157
- [12] KAERI, 1996, "LBB Evaluation of the Ulchin Nuclear Power Plant Unit 3 and 4 Main Coolant Loop and Surge-Line Piping," *KAERI Internal Report*