

## 원전 가압기 노즐 및 안전단 재료에 대한 기계적 물성시험 연구

### A Study for Experiment to Measure Mechanical Properties of Pressurizer Nozzle and Safety-Ends in Nuclear Power Plant

이경수\*<sup>†</sup>, 이성호\*, 김진원\*\*

Kyoung-Soo Lee\*<sup>†</sup>, Sung-Ho Lee\* and Jin-Weon Kim\*\*

**초 록** 최근 가압경수로형 원전의 가압기 노즐과 안전단 사이의 이종용접부에서 일차수응력부식균열에 대한 건전성 확보가 중요한 관심사항으로 대두되고 있다. 가압기 노즐은 SA508 Gr.3 저합금강이며 안전단은 F316L 스테인리스강으로, 이들 두 재료 사이에 용접재로는 Alloy 82/182가 사용되었다. 재료 결합에 대한 건전성 평가를 위해서는 재료의 기계적 물성치, 특히 인장물성과 파괴물성이 확보되어야 한다. 그러나, 일반적인 재료 규격과 시험성적서에서는 상온의 인장물성이 제공되지만 고온의 인장물성과 파괴인성이 제공되지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 상온과 원전 운전온도에서 SA508 Gr.3과 F316L 스테인리스강에 대한 인장시험과 J-R 파괴인성시험을 수행하고 그 결과를 수록하였다.

**주요용어:** 인장시험, 파괴인성시험, 응력-변형률 선도, J-R 곡선

**Abstract** Recently the primary water stress corrosion cracking(PWSCC) has occurred in the dissimilar metal weld region between pressurizer nozzle and safe-end in nuclear power plants(NPPs). As material of the pressurizer nozzle, SA508 Gr. 3 low alloy steel was used. F316L stainless steel and Alloy 82/182 were used as safe-end and weld metal, respectively. Although mechanical properties are needed for evaluation of the structural integrity against flaw in the material, material specification and standard don't supply those properties. Therefore, the present study conducted tensile and fracture toughness tests on SA508 Gr.3 and F316L stainless steel at ambient temperature and operating temperature of NPPs and reported the tested results.

**Keywords:** Tensile Test, Fracture Toughness Test, Stress-Strain Curve, J-R Curve

#### 1. 서 론

국내 가압경수로형 원전의 압력용기는 대부분 구조용 저합금강으로 제작되고 배관 재료로는 스테인리스강 또는 탄소강이 사용된다. 저합금강과 스테인리스강을 용접할 때 과거에는 Alloy 82/182가 사용되었고 최근에는 Alloy 52/152 용접 재료가 사용되고 있다[1-4]. 최근 해외 원전의 Alloy 82/182 용접부에서 일차수응력부식균열(PWSCC)이 발생됨에 따라 이들 용접부에 대한 많은 관심이 집중되고 있다[5,6]. 이종금속용접부에서 PWSCC 발생은 이종금속간의 접합으로 인한 재료물성치

의 편차에 기인한 높은 잔류응력이 주요 원인인 것으로 알려져 있다[6]. 일차수응력부식균열에 대한 재료의 구조적 건전성을 평가하기 위해서는 균열부위 또는 주변 재료의 재료 물성치에 대한 정확한 정보가 있어야 한다[4,7-9]. 이를 위해서 이종금속용접부를 구성하고 있는 구조용 저합금, 스테인리스강, 용접재에 대한 재료 물성시험이 수행되었다. 재료시험은 상온과 원전 운전온도의 인장시험과 파괴인성시험으로 구성되었다. 본 논문에서는 그 중 원전 가압기 노즐 재료인 SA508 Gr.3 저합금강과 안전단 재료인 F316L 스테인리스강에 대한 연구내용 및 결과를 소개하였다.

[접수일: 2013. 3. 18, 수정일: 2013. 4. 4, 게재확정일: 2013. 4. 9] \*한수원(주) 중앙연구원 기계재료연구소, \*\*조선대학교 공과대학 원자력공학과 <sup>†</sup>Corresponding Author: Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd., Daejeon 305-343, Korea (E-mail: leekys@khnp.co.kr)

2. 재료 및 시험절차

2.1. 시험 재료

SA508 Gr.3 저합금은 가압기 몸통 및 노즐 재료로 사용되고 있으며, 본 시험에 사용된 SA508 Gr.3은 단조후 퀴칭-템퍼링 것으로 블록 형태로 제작되었다. 노즐 안전단 재료인 F316L은 단조된 오스테나이트계 스테인리스강으로 직경이 200mm인 봉상으로 제작되었다. Table 1은 화학검사를 통해 측정된 SA508 Gr.3 재료의 화학조성을 정리한 것으로, ASME B&PV Code Sec.II [10]에서 요구되는 SA508 Gr.3 재료의 화학 조성요건을 만족함을 확인하였다.

2.2. 인장시편 및 시험방법

인장시험에는 ASTM E8/E8M-06[11]에 따라 설계된 직경이 4 mm이고 게이지 길이가 30 mm인 sub-size 크기의 봉상시편이 사용되었다 (Fig.1). 블록 형태로 제작된 SA508 Gr.3에서는 시편의 방향을 고려하지 않고 시편을 채취하였다. 그러나, 봉상으로 제작된 F316L의 경우에는 배관에서 원주방향 균열이 취약하므로 시편은 하중방향이 배관의 축방향과 일치하도록 채취하였다.

인장시험은 상온과 원전 운전온도(320℃)에서 수행되었으며, 시험온도에 관계없이 변형률 속도가  $\sim 5 \times 10^{-4}/s$ 인 준정적 하중속도가 적용되었다. 시험에는 1톤 용량의 로드셀과 3영역온도 제어가 가능한 분리형 고온로가 설치된 기계식 만능시험기가 사용되었으며, 시편의 변형률은 25 mm 게이지 길이의 고온용 신률계를 이용하여 측정하였다. 고온 시험시 시편의 양단에 열전대를 용접하여 시편내의 온도편차가  $\pm 1^\circ C$  이내가 되도록 고온로 온도를 조절하여 시편의 온도를 제어하였다.

2.3. J-R 시편 및 시험절차

파괴인성 평가를 위한 J-R 시험에는 두께가 0.85T(t=21.6 mm)인 CT시편이 적용되었다. 시편의 형상은 ASTM E1820-06[12]에 따라 Fig. 2와 같이 설계되었다. 1T-CT시편 대신 0.85T-CT시편을 적용한 것은 용접부에서 채취할 수 있는 시편의 최대 크기가 0.85T이었기 때문이다. J-R 시편

은 균열이 봉의 원주방향을 따라 진전하도록 고려하였다(L-C방향). Fig. 2에 도시한 바와 같이 본 시험에서는 Chevron 노치 대신에 기계 가공 후 1.5 mm를 wire cutting 함으로써 피로 예비균열이 일정하게 성장할 수 있도록 유도하였다. ASTM E1820-06의 허용기준에 따라 피로균열을 진전시켰으며, 균열길이에 따라 3단계로 나누어 피로하중을 적용하였다. 피로하중의 크기에 관계없이 0.1의 하중 비와 10 Hz의 주파수가 적용되었다. 피로예비균열 진전 후 균열의 길이는  $a/W=0.59$ 가 되도록 하였다. 피로예비균열 생성 후, 시편의 양 측면에 시편 두께의 10%에 해당하는  $60^\circ$  V-groove를 가공하여 평면변형률 조건을 만족하도록 하였다.

J-R 파괴인성시험은 상온과 원전 운전온도(320℃)에서 수행되었으며, 모든 시험은 준정적 하중속도인 0.5 mm/min의 하중 선속도로 수행되었

Table 1 Chemical composition of SA508 Gr.3(wt%)

원소	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
1st	.18	.26	1.22	.004	.004	.77	.15	.47	.03	.03	.01
2nd	.18	.12	1.22	.002	.005	.74	.15	.47	.03	.02	.01
ASME	.25 max	.15 -.40	1.20 -1.5	.025 max	.025 max	.40 -1.0	.25 max	.45 -0.6	-	-	.05 max

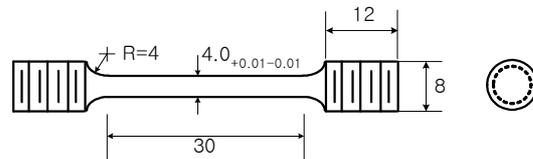


Fig. 1 Dimension of tensile specimen (unit: mm)

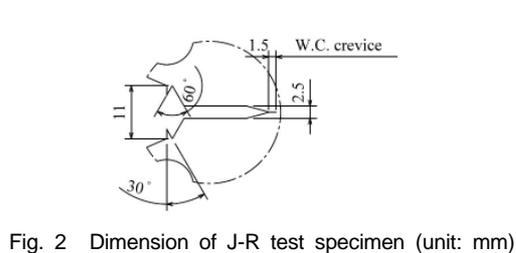
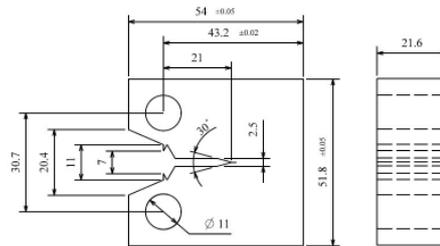


Fig. 2 Dimension of J-R test specimen (unit: mm)

다. 시험에는 5톤 용량의 로드셀과 3영역온도 제어기가 가능한 분리형 고온로가 설치된 기계식 만능시험기가 사용되었다. 고온시험 시 시편의 양면에 열전대를 용접하여 시편의 온도를 측정하고 고온로를 제어하였다. 본 시험에서는 하중작용에 따른 균열길이를 측정하기 위해 DCPD 방법을 적용하였다. 균열 진전에 따른 전압강하 측정에는 1  $\mu$ V까지 측정이 가능한 나노 볼트미터가 사용되었으며, 최대 20A 용량의 직류를 공급할 수 있는 직류전류공급기가 사용되었다. 측정된 전압강하로부터 균열진전길이는 Johnson 식[13]을 이용하여 계산하였으며, 최종적으로 시험 후 시편의 파단면에서 측정된 초기 균열길이와 최종 균열길이를 이용하여 보정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 인장시험 결과

상온과 원전 운전온도(320 $^{\circ}$ C) 조건에서 인장시험이 수행되었으며, 각 조건별로 3개 또는 4개의 시편을 사용하여 최소 3개의 유효 데이터를 확보하였다.

##### 3.1.1. 공칭응력-변형률 곡선

Figs. 3과 4는 인장시험 결과 주어진 상온과 원전 운전온도에서의 SA508 Gr.3과 F316L 시편의 공칭 응력-변형률 곡선을 정리하여 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 SA508 Gr.3의 경우 상온과 고온에서 모두 네킹 이전까지 데이터 편차는 거의 없었다. 네킹 이후에는 고온시험의 경우 공칭 응력-변형률 곡선 간의 편차를 보였으나, 상온시험의 경우 총 연신률의 편차가  $\pm 0.01$  정도로 커지 않았다. F316L의 경우에는 상온에 비해 고온시험 결과에서는 시편 사이의 편차가 크지만, 전체적으로 시편 간 편차가 거의 없었다. 따라서, 본 연구에서 수행된 인장시험 결과는 전체적으로 시험의 재현성과 신뢰성이 우수한 것으로 판단된다.

한편, 상온시험 결과와 원전 운전온도의 시험 결과를 비교하여 살펴보면, SA508 Gr.3의 경우 상온에 비해 320 $^{\circ}$ C에서 총 연신률은 약간 감소하

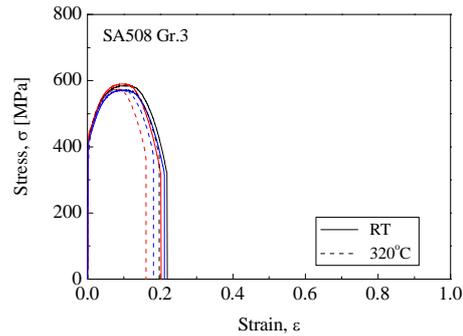


Fig. 3 Engineering stress-strain curve of SA508 Gr.3

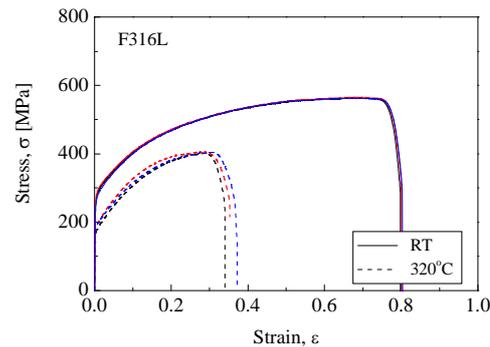


Fig. 4 Engineering stress-strain curve of F316L

였으나, 네킹 이전 영역에서는 시험 온도에 관계없이 거의 유사한 공칭 응력-변형률 거동을 보였다. 그러나, F316L 스테인리스강의 경우에는 상온시험 결과에 비해 원전 운전온도에서 총연신률과 균일연신률이 크게 감소하였으며, 전체적으로 공칭 응력-변형률 곡선에서 응력이 뚜렷이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 노즐 재료인 SA508 Gr.3에 비해 안전단의 재료인 F316L 스테인리스강의 인장물성치가 온도에 따라 민감하게 변화한다는 것을 알 수 있다.

##### 3.1.2. 인장물성치

인장시험 결과로부터 인장물성치를 정량적으로 비교하기 위해서, Figs. 3와 4의 공칭 응력-변형률 곡선에서 항복강도( $\sigma_{ys}$ )와 인장강도( $\sigma_{uts}$ ), 그리고 연신률을 각각 구해 비교하였다.

Figs. 5와 6은 이들 결과를 비교하여 나타낸 것으로 각 조건 별로 시험 결과의 평균과 표준편차를 표시하였다. 그림에 나타낸 것과 같이 SA508

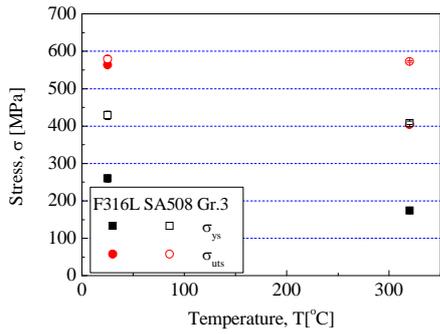


Fig. 5 Tensile strength and yield strength of SA508 Gr.3 and F316L

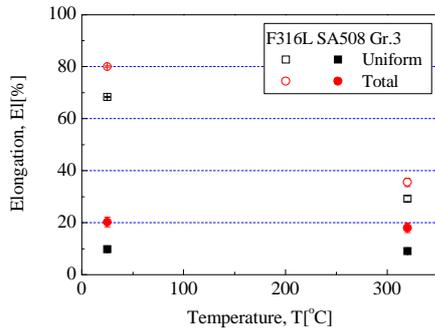


Fig. 6 Uniform and total elongations of SA508 Gr.3 and F316L

Gr.3의 경우 상온과 비교하여 원전 운전온도에서 항복강도는 약간 감소하였으나 인장강도는 거의 동일한 값을 보였다. 연신률 역시 상온에 비해 약간 감소하는 경향을 보였으나 감소 정도는 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, F316L 스테인리스강의 경우에는 상온과 비교하여 원전 운전온도에서 항복강도와 인장강도가 크게 감소하였으며, 특히 총연신률과 균일연신률 모두 약 50% 이상 감소하였다.

3.2. J-R 파괴인성시험 결과

SA508 Gr.3과 F316L 스테인리스강 모재에 대한 J-R 파괴인성시험을 상온과 원전 운전온도에서 각각 수행하였다. 시험에는 각 조건별로 3~5개의 시편이 사용되었으며, 이들 결과로부터 각 조건별로 3개 이상의 유효한 파괴인성 데이터를 취득하였다. 시편에 하중이 가해지는 동안 하중, 변위, 그리고 시편에서의 전압강하가 측정되었으

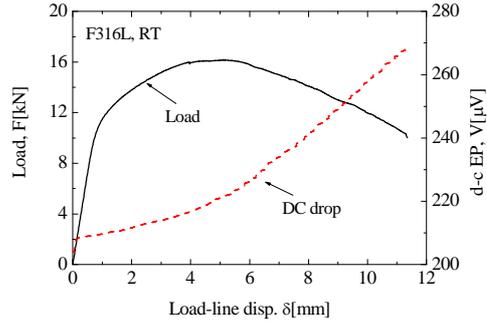


Fig. 7 Load-displacement and voltage-displacement curve

며, Fig. 7은 시험과정에 취득된 데이터의 예를 보여주고 있다.

3.2.1. 하중-변위 곡선

Fig. 8 ~ Fig. 11은 각 시험조건에서 구한 하중-변위 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 일반적으로 실험결과에서 재료의 파괴인성은  $K_{Ic}$ ,  $J_{Ic}$ , 또는 J-R 곡선의 기울기 등으로 정량화된다. 그러나, 시험과정에 주어진 하중-변위 곡선을 관찰함으로써 재료의 파괴거동을 대략적으로 파악할 수 있다. Figs. 8과 9는 상온과 원전 운전온도에서 시험된 SA508 Gr.3 재료의 하중-변위 곡선들을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 상온에서 수행된 모든 시편의 하중-변위 곡선에서는 변위가 증가함에 따라 하중이 갑자기 떨어지는 거동을 보였다. 3개의 시편 중 1개는 최대하중 이전, 1개는 최대하중 부근, 나머지 1개는 최대하중을 지나서 하중이 급격히 감소하였다. 즉, 상온에서 취성파괴 거동을 보였다. 원전 운전 온도에서는 4개의 시편이 모두 유사한 하중-변위 곡선을 보였다. 모든 시편에서 하중이 변위에 따라 증가하다 감소하였으며, 균열이 충분히 성장할 때까지 하중의 급격한 천이현상은 관찰되지 않았다. 즉, 원전 운전온도에서는 SA508 Gr.3가 연성파괴거동을 보였다. 상온의 하중-변위 곡선과 비교하여 최대하중이 약 5 kN 정도 낮았으며, 최대하중이 관찰되는 변위가 상온의 시험 결과에 비해 약간 감소하였다.

한편, F316L 스테인리스강의 경우, Fig. 10에서 알 수 있는 것과 같이 상온에서 수행된 5개의 하중-변위 곡선 중 4개는 거의 유사한 거동을 보였

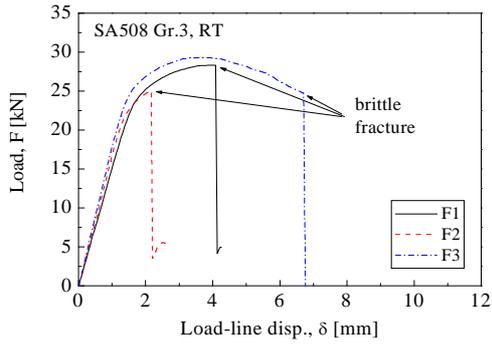


Fig. 8 Load-displacement curve of SA508 Gr.3 at RT

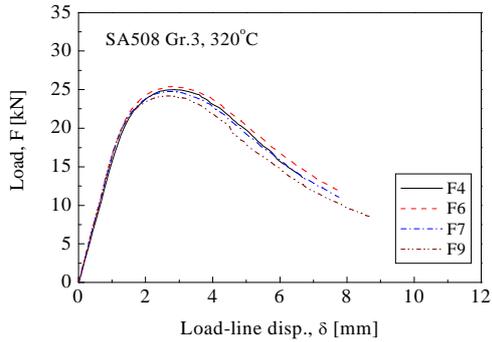


Fig. 9 Load-displacement curve of SA508 Gr.3 at 320°C

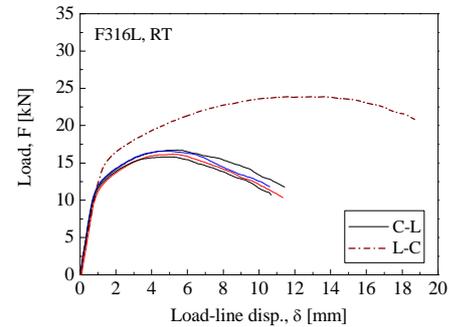


Fig. 10 Load-displacement curve of F316L at RT

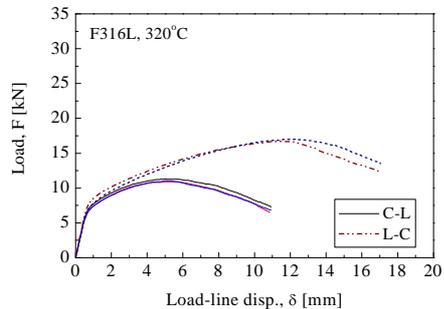


Fig. 11 Load-displacement curve of F316L at 320°C

으나 1개 시편의 하중-변위 곡선은 나머지 시편과 큰 차이를 보였다. 원전 운전온도에서도 5개의 하중-변위 곡선 중 3개는 거의 유사하지만, 2개의 시편은 다른 하중-변위 곡선을 보였다. 즉, 다른 곡선에 비해 최대하중이 50% 이상 높고, 최대하중이 나타나는 변위가 2배 이상 큰 값을 보였다. 각 온도에서 서로 다른 하중-변위 곡선을 보이는 시편에 대한 이력을 검토한 결과, 시편의 방향이 다른 것을 확인하였다. 추가시편을 가공하여 확인시험을 수행한 결과 하중-변위 곡선이 높게 나타나는 시편이 L-C 방향 시편이며, 하중-변위 곡선이 낮게 나타나는 시편이 C-L 방향인 것을 확인하였다. 그러나, 시편의 방향에 관계없이 전형적인 연성과파괴거동의 하중-변위 곡선을 보였다.

각각의 시편 방향별로 상온시험 결과와 하중-변위 곡선을 비교하면 원전 운전온도에서 전체적으로 30% 정도 하중이 감소하였다. SA508 Gr.3의 하중-변위 곡선과 비교하여 살펴보면, F316L은 시험 온도에 관계없이 최대하중이 SA508 Gr.3에 비해 50% 정도 낮은 값을 보였다. 반면, 하중이 감소하기 시작하는 변위의 크기가 SA508 Gr.3에 비해 상당히 큰 것을 알 수 있다.

### 3.2.2. J-R 곡선

Fig. 12와 Fig. 13은 SA508 Gr.3와 F316L 재료의 J-R 곡선을 시험 온도에 따라 비교하여 나타낸 것이다. SA508 Gr.3의 경우, 상온시험에서 취성과파괴 모드를 보임에 따라 1개의 시편을 제외하면 균열진전길이가 짧아 J-R 곡선을 구하는 것이 불가능했다. 따라서, 1개 시편에 대한 J-R 곡선만 주어졌다. F316L 스테인리스강의 경우에는 시편의 방향에 따라 J-R 곡선의 차이가 크게 나타나므로 여기서는 각각의 시편 방향에서 온도에 따른 J-R 곡선을 비교하였다.

온도에 따른 J-R 곡선을 비교하기에 앞서 각 시험조건 별로 J-R 곡선을 살펴보면 하중-변위 곡선에 비해 곡선 간의 편차는 크지만 전체적으로 동일한 시험조건에서 거의 유사한 J-R 곡선을 보였다. 따라서, 본 연구에서 수행된 파괴인성시험 결과의 재연성은 충분히 높은 것으로 판단된다.

시험 온도에 따라 J-R 곡선을 비교하여 살펴보면, 그림에서 알 수 있는 것과 같이 재료의 종류

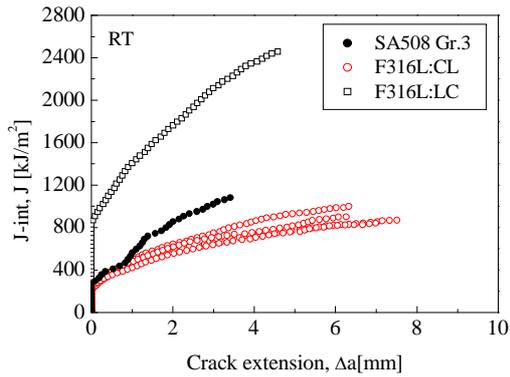


Fig. 12 J-R curve of SA508 Gr.3 and F316L at RT

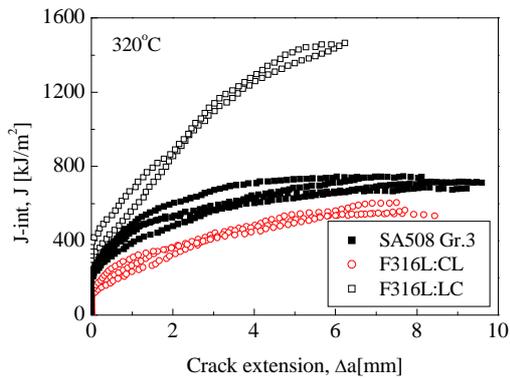


Fig. 13 J-R curve of SA508 Gr.3 and F316L at 320°C

와 시편의 방향에 관계없이 상온에 비해 원전 운전온도에서 파괴인성이 감소하였다. 상온에서 취성파괴가 발생한 SA508 Gr.3에서는 데이터의 정량적 비교가 명확하지 않을 수 있으나, 전체적으로 연성모드의 파괴거동을 보인 F316L의 결과를 살펴보면 원전 운전온도에서 J-R 곡선이 상온에 비해 약 40% 정도 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다. SA508 Gr.3에서 상온에 비해 원전 운전온도에서 J-R 곡선이 낮은 것은 인장시험 결과에서 연신률의 감소와 관련이 있는 것으로 판단되며, F316L이 원전 운전온도에서 낮은 파괴인성을 보이는 것은 온도 증가에 따른 강도 감소와 연신률 감소와 관련이 있는 것으로 판단된다.

F316L 스테인리스강의 시편 방향에 따른 J-R 곡선을 살펴보면, 그림에서 알 수 있는 것과 같이 시험 온도에 관계없이 축 방향을 따라 균열이 진전하는 C-L방향이 붕의 원주방향을 따라 균열이 진전하는 L-C방향 시편에 비해 낮은 J-R 곡선

을 보였으며, 시편 방향에 따른 J-적분 값이 3배 이상 차이를 보였다. F316L 재료에서 시편 방향에 따라 파괴인성이 큰 차이를 보이는 것은 시험에 사용된 재료가 단조를 통해 붕상으로 제조되었기 때문으로 판단된다. 즉, 붕상 형태의 단조를 통해 재료의 미세조직이 특정한 방향으로 형성됨에 따라 재료물성치에서 방향성을 갖는 것이다. 이를 확인하기 위해서는 향후 재료의 방향에 따른 미세조직 관찰과 추가의 인장시험 수행이 필요할 것으로 판단된다. 이들 결과로부터 본 시험에 사용한 것과 같이 1방향 단조를 통해 제작된 재료의 경우에는 시편의 방향에 따라 파괴인성이 큰 차이를 보일 수 있으며, 이들 재료에 대한 균열안정성 평가에는 재료의 방향성을 고려한 재료물성치 적용이 필요한 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서 원전 가압기 노즐-안전단 이중급속용접부 모재인 SA508 Gr.3 저합금강과 F316L 스테인리스강에 대한 인장물성치와 파괴물성치를 상온과 원전 운전온도(320°C)에서 평가하였다. 시험을 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) SA508 Gr.3 저합금강은 원전 운전온도에서 총연신률이 약간 감소하는 것을 제외하면, 상온과 거의 유사한 항복강도와 인장강도, 그리고 균열연신률을 보였다. 반면, F316L 스테인리스강은 상온시험 결과와 비교하여 원전 운전온도에서 항복강도와 인장강도가 뚜렷이 감소하였으며, 연신률도 50% 이상 감소하였다.
- (2) J-R 시험 결과, SA508 Gr.3 저합금강은 상온에서 취성모드의 파괴거동을 보였으며 원전 운전온도에서는 연성모드의 파괴거동을 보였다. F316L 스테인리스강은 시편의 방향에 따라 재료의 파괴인성이 큰 차이를 보였으며, L-C방향에 비해 C-L방향의 시편에서 파괴인성이 50% 이상 감소하는 경향을 보였다. 두 재료 모두 상온에 비해 원전 운전온도에서 낮은 파괴인성을 보였으며, 특히 F316L은 시편 방향에 관계없이 원전 운전온도에서 약 40% 정도 J-R 곡선이 감소하였다.

## 참고문헌

- [1] C. Jang, J. Lee, J. S. Kim and T. E. Jin, "Technical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel," *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 85, pp. 635-641 (2008)
- [2] J. W. Kim, J. H. Lee, J. S. Kim and T. E. Jin, "Valuation of local tensile properties of dissimilar metal weld joint at ambient and operating temperatures," *Proceeding of Korean Nuclear Society Spring Meeting*, (2007)
- [3] J. W. Kim, J. S. Kim, K. S. Lee and T. S. Byun, "Local mechanical properties of alloy 82/182 dissimilar weld joint between SA508 Gr.1a and F316 SS at RT and 320°C," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 384, pp.212-221 (2009)
- [4] N. Taylor, C. Faigy, and P. Gilles, "Assessment of dissimilar weld integrity: final report of the NESC-III Project," EUR22510 EN
- [5] USNRC, Information Notice 2000-17, "Rack in weld area of reactor coolant system hot leg piping at V.C. summer," Oct. 18, (2000)
- [6] J. I. Bennetch, G. E. Modzelewski, L. L. Spain and G. V. Rao, "Root cause evaluation and repair of alloy 82/182 J-groove weld cracking of reactor pressure vessel head penetrations at North Anna Unit 2," *Pressure Vessel and Piping*, Vol. 437, ASME 2002, P.S. Lam, ed., ASME, New York, pp. 179-185 (2002)
- [7] A. Laukkanen, P. Nevasmaa, U. Ehrnsten and R. Rintamaa, "Characteristics relevant to ductile failure of bimetallic welds and evaluation of transferability of fracture properties," *Nuclear Engineering & Design*, Vol. 237, pp. 1-15 (2007)
- [8] A. Celik, A. Alsaran, "Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints," *Materials Characterization*, Vol. 43, pp. 311-318 (1999)
- [9] R. Stoenescu, R. Schaeublin, D. Gavillet and N. Baluc, "Mechanical properties-microstructure correlation in neutron irradiated heat-affected zones of austenitic stainless steels," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 362, pp. 287-292 (2007)
- [10] ASME, ASME B&PV Sec.II Part A "Ferrous material specifications," (1998)
- [11] ASTM, ASTM E8/E8M-06, "Standard test methods for tension testing of metallic materials," (2006)
- [12] ASTM, ASTM E1820-06, "Standard test methods for measurement of fracture toughness," (2006)
- [13] H. H. Johnson, "Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth," *Materials Research and Standards*, pp. 442-445 (1965)