

원자로 압력용기강 다층용접열영향부의 인성평가 및 파괴특성

Toughness evaluation and fracture characterization in the multi-pass weld HAZ of nuclear pressure vessel steel

신학수 김주학* 홍준화* 문종걸** 정인상

경북대학교 금속공학과, 대구광역시 북구 산격동 1370

*한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

**한양대학교 금속공학과, 서울특별시 성동구 행당동 17

1. 서론

원자로 압력용기강의 용접열영향부는 다층용접사이클과 용접후열처리(PWHT)에 의해 좁은 영역내에서 매우 다양한 미세조직을 가지며, 이러한 미세조직적 변화가 재료의 파괴인성 및 파괴기구에 큰 영향을 미치게 된다.¹⁾ 원자로 압력용기는 그 특성상 파손에 대한 충분한 안전여유를 확보해야 하며, 구조물의 건전성확보라는 측면에서 볼 때 모재나 용융금속에 비해 취약한 열영향부에 대해 파괴특성 및 파괴기구를 정확히 평가하는 것이 매우 중요하나, 지금까지의 연구결과는 주로 모재에 집중되어왔고 상대적으로 용접열영향부에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는, 실제 구조물의 다층용접열영향부와 최고온도를 기준으로 구분한 재현열영향부의 파괴인성평가 및 파면관찰을 통해 원자로 압력용기강의 파괴특성을 고찰하였고, 균열의 전파거동에 영향을 미치는 미세조직적 인자를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 SA508 Cl.3 강으로 화학적조성은 표 1과 같다. 실제 구조물의 동적파괴인성을 평가하기 위해 용접용융선으로부터 1 mm 간격으로 노치가공 및 피로균열을 낸 시편에 대해 계장화사피충격시험기를 이용하여 0℃에서 5.2 m/s 하중속도로 실험하였고, 해석 및 계산절차는 ASTM E636²⁾을 따랐다. 열영향부 위치별 미세조직과 파괴특성의 관련성을 알아보기 위해 먼저 열영향부조직을 재현한 후 충격인성을 평가하고, 천이온도(T_{30J})로 나타난 -50℃에서 ASTM E1921-97에 따라 0.5 mm/min 하중속도로 3점굽힘시험을 하여 정적파괴인성을 평가하였다. 각 시편의 파면을 SEM 관찰하여 용접열사이클에 따른 파괴특성 변화를 살펴보고, 미세조직과 균열전파의 관련성을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

모재의 미세조직 관찰결과는 그림 1과 같다. 실제 구조물로부터 채취한 용접열영향부 시편의 거리에 따른 파괴인성시험 결과는 그림 2에 나타내었다. 다층용접열영향부는 최고온도 열사이클에 따라 7가지 영역으로 나누어지는데³⁾ 일반적으로 강의 용접열영향부는 첫 번째 열사이클에 의한 CGHAZ, 즉 용접용융선에 인접한 영역의 인성이 모재보다 낮게 나타나지만 본 실험에 사용된 재료는 용융선으로부터 1 ~ 2 mm 떨어진 위치의 시편은 모두 모재에 비해 높은 파괴인성값을 나타낸 반면, 6 mm 위치에서 가장 낮은 인성값을 나타내었다. 파괴인성값에서 큰 차이를 보인 두 시편에 대한 파면관찰결과는 그림 3과 같다. 2 mm 위치 시편(그림 3(a))에서는 피로균열첨단에서부터 전단변형에 의해 완전한 연성파괴가 일어났고, 6 mm 위치 시편(그림 3(b))에서는 피로균열 선단에 약간의 blunting 이 일어난 후 주로 취성에 의한 파괴가 일어났다. 동일한 시험온도에서 파괴형태의 차이가 크게 나타나는 것은 열영향부의 위치별 미세조직이 매우 불균일하기 때문이며 균열의 전파경로와 미세조직의 관련성을 알아보기 위한 수직파면의 관찰결과는 그림 4에 나타내었다. 2 mm 위치 시편은 미소공동(microvoid)의 성장 및 합체에 의해 균열이 전파하는 전형적인 연성파괴기구를 나

타내었으며, 6 mm 위치 시편에서 균열은 결정립의 벽개면을 따라 순간적으로 전파하며 결정립계와 만나면 균열의 전파가 지연됨을 볼 수 있었다. 그림 3(b) 와 같이 취성파면에서 보이는 dimple 은 이러한 기구에 의해 형성된 것으로 생각된다. 미세조직을 보면 2 mm 위치 시편은 6 mm 위치 시편에 비해 결정립이 미세하고 석출물이 균일하게 분포함으로써 석출물과 계면사이에서 발생한 미소공동에 의해 균열침단에 blunting이 일어남으로써 균열의 arrest 확률이 높아짐을 예측할 수 있다. 반면에 6 mm 위치 시편은 불균일한 석출물 분포에 의해 상대적으로 취화된 기지를 따라 균열이 전파된 것으로 관찰되었다. 용접조건 및 재료물성을 고려하여 거리에 따른 최고온도를 계산하면 6 mm 위치는 A₁ 근처의 열사이클을 받게 되는데 Gleeble simulator 를 이용해 이 영역의 조직을 재현한 후 충격시험한 결과는 그림 5에 나타내었다. 재현열영향부 시편의 충격인성은 upper shelf 영역에서 모재에 비해 다소 낮게 나타나지만 천이온도 T_{30J} 는 -50℃로 큰 차이를 나타내지 않은 반면, 그림 6의 3 점굽힘시험에 의한 파괴인성값은 같은 온도에서 모재에 비해 낮게 나타남을 볼 수 있었다. 이것은 재료가 정적인 하중을 받는 조건에서도 균열전단의 국부취화영역은 동적하중에 의한 파괴가 일어나기 때문이며⁴⁾, 미세조직 관찰결과 재현열영향부는 A₁ 이하의 열사이클 및 PWHT 를 받았기 때문에 석출물이 조대해지고, 주로 래스 또는 결정립계에 불균일하게 분포함을 볼 수 있었다. 이러한 석출물 분포에 의해 기지의 고용강화효과가 떨어져 연화되므로 균열전파에 대한 저항성이 감소하고 파괴인성이 낮아지는 것으로 생각된다.

4. 결론

원자로 압력용기강 용접열영향부에 대해 파괴인성을 평가한 결과 용접용융선 + 6 mm 위치에서 인성이 가장 낮게 나타났는데 이 부분은 A₁ 부근의 열사이클을 받은 영역으로, 파면 관찰 결과 석출물의 불균일한 분포로 인해 취화된 결정립의 벽개면을 따라 불안정한 균열의 전파가 일어남을 볼 수 있었다. 인성값이 가장 높게 나타난 2 mm 위치와 비교했을 때 결정립이 미세할수록 균열의 arrest 확률이 높아지고, 석출물이 균일하게 분포할수록 기지의 취화정도가 적어 균열전파에 대한 저항성이 높아지는 것으로 나타났다. 재현열영향부에 대한 충격시험결과에서 천이온도 T_{30J} 는 -50℃로 모재와 비슷했으나 정적파괴인성값은 이 온도에서 차이를 보였다.

5. 후기

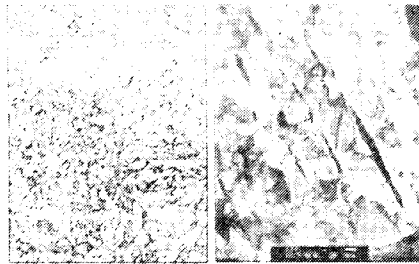
본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업 중 원자로압력경계재료과제의 일환으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- 1) B. C. Kim et al., Metall. Trans. A, vol 22A, Jan. 1991, p139
- 2) ASTM standard E-636, 1983
- 3) 김주학 등, 대한금속학회지, 제 36권, 8호, 1998, p1329
- 4) D. R. Ireland, 5th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Aug. 1979, p1

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

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	V	Al	Sn
0.19	0.1	1.4	0.007	0.003	0.89	0.51	0.15	0.003	0.01	0.03



a) b)

Fig. 1 Microstructure of the base metal of SA508 Cl.3 steel a) OM and b) TEM

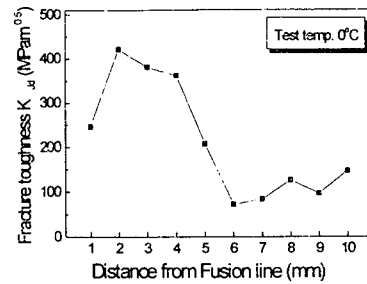
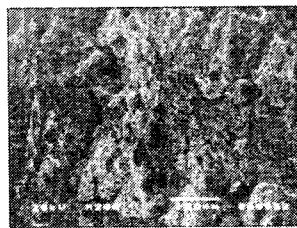
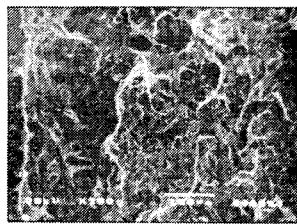


Fig. 2 Fracture toughness variations with distance from weld fusion line of SA508 Cl.3 steel

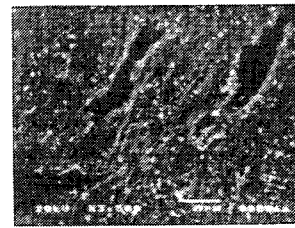


a)

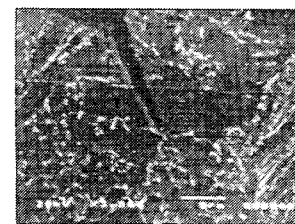


b)

Fig. 3 Fractured surfaces of a) 2 mm and b) 6 mm from weld fusion line of SA508 Cl.3 steel



a)



b)

Fig. 4 Perpendicular sections to fractured surfaces of a) 2 mm and b) 6 mm from weld fusion line of SA508 Cl.3 steel

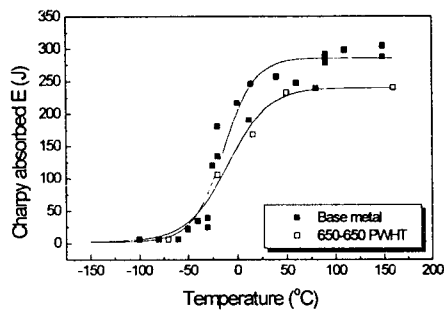


Fig. 5 Toughness curve variations with test temperature of simulated HAZ and base metal of SA508 Cl.3 steel

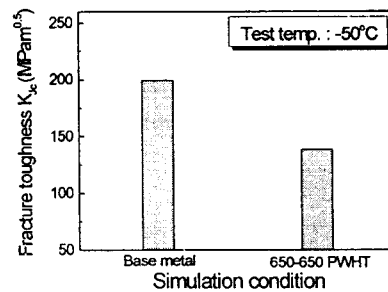


Fig. 6 Fracture toughness of simulated HAZ and base metal of SA508 Cl.3 steel