

원자로 냉각재 배관용 SA516-Gr.70 강의 파괴저항성에 미치는 온도 및 하중속도의 영향

윤지현, 이봉상, 오용준, 김진원*, 홍준화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

* 현재, 전력연구원 근무

요 약

원자력 발전소 배관계통에 파단전 누설 (LBB) 설계개념의 적용을 위해서는 원자로 가동온도에서의 재료의 파괴저항성 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 국내 원자로의 1차 냉각계통 배관의 엘보우 소재로 사용되는 SA516-Gr.70 강의 파괴저항성에 미치는 DSA (Dynamic Strain Aging, 동적변형시효) 영향을 고찰하였다. 파괴저항성 평가를 위해 원자로 가동온도를 포함한 상온~500°C 온도영역에서 준정적 하중에서부터 지진 하중 정도의 동적 하중까지 하중속도를 달리하여 직류전위차법 (DCPD) 이용하여 J-R 시험을 행하였다. J-R 시험결과, SA516-Gr.70 강은 특정한 온도와 하중속도의 조합에서 파괴저항성이 크게 떨어지는 양상을 보였으며, 낮은 파괴저항성을 나타내는 온도는 하중속도가 증가함에 따라 높은 온도쪽으로 이동하는 전형적인 DSA 감수성을 보였다. 인장시험을 통해서도 큰 폭의 serration 이 관찰되었으며 SA516-Gr.70 강에서 파괴저항성의 변화와 DSA 현상과의 연관성을 고찰하였다.

1. 서 론

최근에 탄소성 파괴역학에 근거한 파단전누설 (LBB) 설계 개념이 원자로 주배관 계통에도 적용되고 있다. LBB 해석에 있어서 균열의 안정성해석을 위해서는 원자로 가동온도에서의 재료의 파괴저항 특성이 반드시 검토되어야 한다. 그럼에도 불구하고 대표적인 원자력용 ferritic 배관재의 하나인 SA516-Gr.70 강의 파괴특성에 대한 계통적인 연구결과는 매우 부족한 형편이다. 특히, 지진 하중과 같은 동적 하중하에서의 파괴저항 특성 자료는 거의 전무하

다고 할 수 있다. 일반적인 탄소강에서는 특정한 온도와 변형속도 범위에서 DSA 현상이 발생하여 강도는 증가하고 연성과 파괴저항성은 감소한다. 본 연구의 목적은 원자로 냉각계통 주배관 엘보우 소재로 쓰이는 SA516-Gr.70 강에 있어서 DSA 효과로 인한 파괴저항성의 감소에 대한 정량적인 평가를 시도하는 것이다. 원자로 가동온도를 포함하는 넓은 온도 범위와 준정적 하중에서 지진 하중 정도까지의 동적 하중에 이르는 넓은 하중속도 범위에서 J-R 시험을 통해 DSA 가 파괴저항성에 미치는 영향을 계통적으로 평가하였고, 인장시험을 통해 얻어진 DSA 민감성과의 연관성을 확인코자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료 및 시편

본 연구에 쓰인 재료는 원자력 1차 배관 엘보우용 ASME SA516-Gr.70 탄소강이며, 86 mm 두께의 열간압연재이다. 불림 (normalizing) 열처리 후 기본적인 재료의 미세조직은 ferrite 와 pearlite 가 층상을 이루는 전형적인 ferrite-pearlite 구조를 보였다. J-R 시험을 위해서 1 inch 두께의 CT 시편을 ASTM E1737 에 따라 가공하였으며, 각 시편은 피로균열을 낸 후, 양 옆면에 각각 두께의 10% 에 해당하는 측면홈을 냈다. 인장시험용으로는 4 mm 직경에 16.5 mm 표점거리의 봉상시편을 사용하였다.

2.2. J-R 시험

상온에서 500℃ 까지 여러 온도와 0.3~1000 mm/min 의 여러 가지 하중선변위 속도 범위에서 직류전위차법 (DCPD Method) 으로 J-R 시험을 행했다. 시험은 100 kN 용량의 MTS 유압식 만능시험기에서 행해졌으며 시편과 시험기는 전기적으로 완전 절연하였다. 전류는 100A 용량의 HP 6672A power supply를 이용하여 정전류로 공급되었다. 시험 중 시편의 온도는 전기로를 이용하여 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 내로 유지되었다. 또한 시험목적에 맞게 특수하게 구성된 data acquisition system 을 이용하여 J-R 해석에 필요한 전압강하, 하중, 하중선 변위등의 신호를 PC 에 정밀하게 기록하였다. 균열길이는 Johnson 식을 이용하여 계산하였다. 모든 시험과정 및 해석은 ASTM E1737-96 의 부록 5 를 따랐다.

2.3. 인장시험

100~316℃ 의 온도범위에서 $2.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1} \sim 1.33 \text{s}^{-1}$ 의 변형률속도로 ASTM E8 에 따라 인장시험을 실시하였다. MTS environmental chamber 를 이용하여 시험중 시편의 온도를 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 내로 유지하였다. 시험중에 하중과 변위등의 신호가 PC 에 동시에 기록 되게 하였으며,

X-Y 기록계를 함께 이용하여 응력-변형률 곡선을 구했다.

3. 결과 및 고찰

100~500℃ 사이의 다양한 온도에서 0.3 mm/min, 10 mm/min, 1000 mm/min 의 하중 속도로 J-R 시험을 행한 결과를 그림 1 의 (a), (b), (c) 에 각각 나타내었다. 준정적 하중 속도에 해당하는 0.3 mm/min 의 하중속도로 시험한 결과, 그림 1.(a) 에서 보는 바와 같이 100℃ 와 177℃ 사이에서 파괴인성이 급격히 떨어져서 177℃ 에서 가장 낮은 파괴저항성을 보이며 288℃, 316℃ 로 시험온도가 증가함에 따라 파괴저항성이 증가함을 알 수 있었다. 보다 빠른 하중속도인 10 mm/min 와 1000 mm/min 에서는 288℃ 와 400℃에서 각각 최소 파괴저항성을 보였다. SA516-Gr.70 강의 온도와 하중속도에 따른 파괴저항성의 변화를 보다 명확히 이해하기 위해 각 시험조건에서 균열이 0.1 inch 진전 했을때의 J 저항치를 그림 2 에 $J_{0.1}$ 로 표시하여 도시하였다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 특정한 온도 및 하중속도에서 J 저항값이 급격히 감소하여 최소 $J_{0.1}$ 값은 최대값에 비해 약 30 % 에 정도에 지나지 않는다. 그림 2 에서 최소 파괴저항 값을 보이는 온도는 0.3, 10, 1000 mm/min 의 하중속도에 대해 각각 220, 275, 365℃ 부근이었다. 본 재료에서의 균열의 안정성을 평가하기 위해서 온도와 하중속도에 따른 파괴저항 특성의 변화를 tearing modulus 값을 통해 그림 3 에 나타내었다. Tearing modulus 의 변화도 $J_{0.1}$ 값의 변화와 일치하는 양상을 보였다. 이와 같이 파괴저항성이 비교적 일정할 것이라 예상되는 upper shelf 영역에서 특정의 온도 및 변형속도에 따라 J 저항치와 tearing modulus 가 급격히 하락하는 현상은 DSA 의 효과로 알려져 있다. 또한 파괴저항성이 최소로 되는 온도범위가 하중속도의 증가에 따라 고온으로 이동하는 현상도 전형적인 DSA 현상과 일치한다. 따라서 SA516-Gr.70 강의 파괴저항성 감소는 DSA의 효과로 판단되며, 이를 고찰하기 위하여 온도 및 변형률 속도를 달리하여 인장시험을 수행한 후 각 시험조건에서의 하중-변위 곡선 상에서 serration 의 발생 여부를 자세히 관찰하였다. 그림 4 는 177℃ 에서 변형률 속도에 따라 관찰되는 serration 의 정도를 나타내며, 그림 5 는 모든 시험조건에서 DSA 현상의 kinetics 를 나타내어 주는 serration map 이며, 두 개의 직선의 기울기는 DSA 현상에 관련된 미세기구의 활성화에너지를 의미한다. 실험결과로부터 얻어진 활성화에너지 Q_{onset} 과 Q_{disapp} 는 각각 65kJ/mol 과 111kJ/mol 로 탄소강내에서 탄소 및 질소 등 침입형 원소의 확산에 필요한 활성화에너지와 비슷하다. 한편 파괴저항성 평가시험에 사용되는 CT 시편의 균열선단영역에서 국부적 변형률 속도를 EPRI/NP-1931 의 함수를 이용하여 근사적으로 다음과 같이 나타내면 외부의 국부적 변형률 속도를 연관 지을 수 있다.

$$\epsilon_{tip} = \frac{(1.455)^n}{h_3(a/W, n)} \times \frac{\dot{\Delta}_L}{a}$$

그림 5의 사각형 표시점은 이렇게 환산된 CT 시험편의 균열선단 변형률 속도를 최소 파괴저항치를 나타내는 온도에 대하여 도시한 것으로 실험조건 내에서 파괴저항의 감소가 균열선단영역에서의 DSA 현상과 직접적인 관계를 갖음을 보여준다. 또한 파괴저항성이 최소로 되는 조건은 DSA의 끝 지점 부근에 위치하며 이는 인장시험으로부터 인장강도가 최대가 되는 범위와 거의 일치하였다.

4. 결론

원자력 주배관용 SA516-Gr.70 탄소강에 대해 가동온도를 포함하여 상온에서 500°C까지의 온도영역에서 준정적 하중속도로부터 지진하중속도까지 여러 하중속도로 J-R 파괴저항 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험조건에 따라 DSA 현상에 의한 파괴저항성의 감소가 뚜렷하게 발견되었으며, 이때 J 저항값 및 Tearing modulus는 DSA가 일어나지 않았을 경우보다 60~70%까지 감소하였다.
- 2) 하중속도가 증가하면 파괴저항성이 최소로 되는 온도가 고온쪽으로 이동하며, 정상가동온도인 200~320°C 온도범위에서 지진에 의한 동적 하중속도보다는 낮은 하중속도에서 파괴저항성의 감소가 심하였다.
- 3) 시험온도와 변형률 속도를 계통적으로 달리한 인장시험의 특정 조건 범위내에서 DSA의 직접적인 증거인 serration이 뚜렷이 관찰되었으며, 균열선단의 국부적 변형률속도를 고려하여 CT 시험편에서 파괴저항성의 감소를 DSA 현상과 대응하여 설명할 수 있었다.

● 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 사업의 원자로압력경계재료 과제 및 한전/한기 수탁 과제의 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. D., Baird and A., Jamison, 1966. J. Iron Steel Inst. 204, pp.783-803.
2. A. S., Keh et al., 1968. Dislocation dynamics. McGraw-Hill, pp. 381-408.
3. B. C., Li and W. C., Leslie, 1978. Metall. Trans. A. Vol. 9A, pp. 1765-1775.
4. J. K., Chakravartty et al., 1983. J. Nucl. Mater. 119, pp. 51-58.
5. B., Mukherjee, 1988. Int. J. Pres. Ves. & Piping. 31, pp. 363-385.
6. C. W., Marschall et al., 1994. USNRC Report, Battele, NUREG/CR-6226
7. J. W., Kim and I. S., Kim, 1997. Nucl. Eng. Des. 172, pp. 49-59.

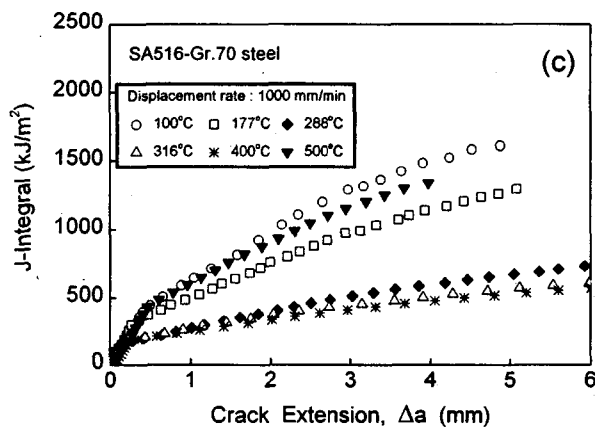
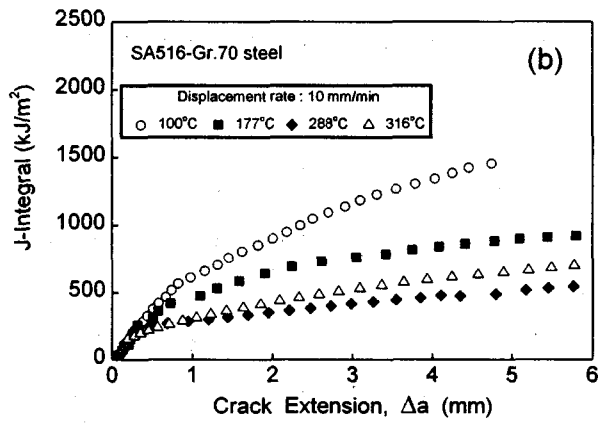
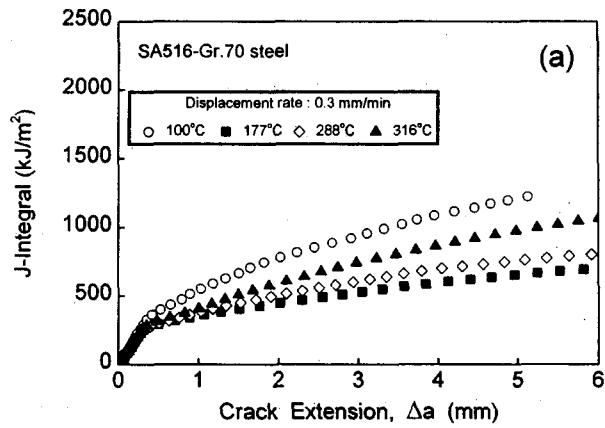


Fig. 1. Variation in J-R curve with temperature at displacement rate of (a) 0.3, (b) 10 and (c) 1000 mm/min.

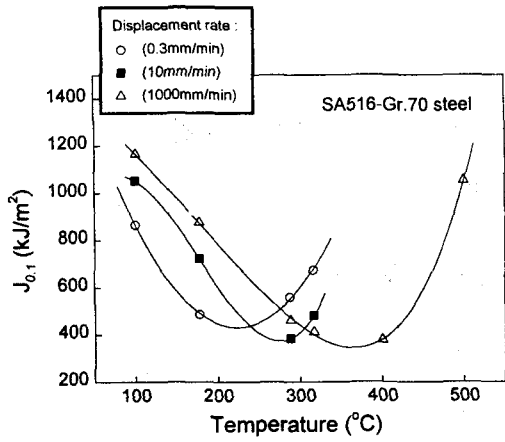


Fig. 2. Variation in J-integral value at 0.1 inch crack extension with temperature and displacement rate.

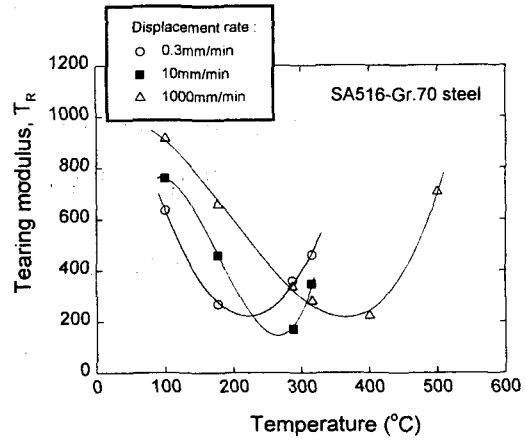


Fig. 3. Variation in tearing modulus with temperature and displacement rate.

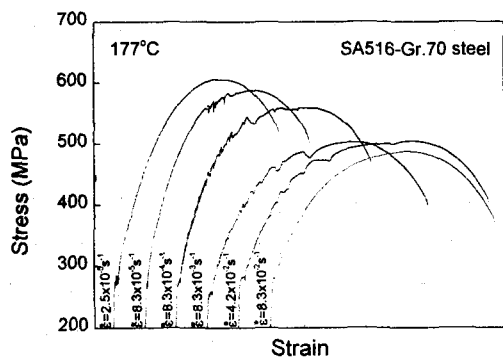


Fig. 4. Stress-strain curves at various strain rates at 177°C.

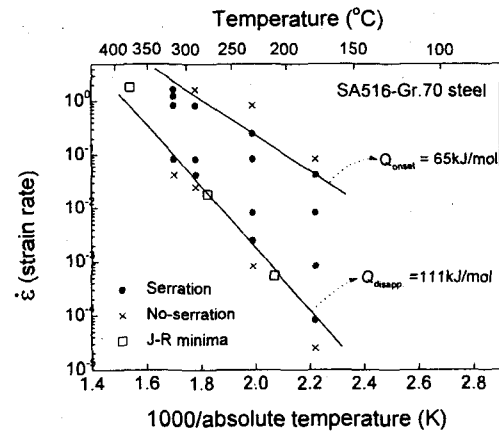


Fig. 5. Serrated flow region and activation energy of solute diffusion in SA516-Gr.70 steel.