

반경 방향 집합조직을 가진 압력관에서의 K_{IH}

김성수, 주기남, 안상복, 권상철, 김영석, 국일현

한국원자력연구소

Abstract

CANDU 압력관의 집합조직을 원주 방향 집합조직에서 반경 방향 집합조직으로 변화시켜 K_{IH} 를 평가하였다. 집합조직은 평면 변형에 의한 25% 확장 방법으로 변화시켰고 (0002) direct pole figure와 basal pole component (기저면 성분, Kearns number)로 분석하였다. 반경 방향 집합조직의 압력관의 K_{IH} 는 250°C에서 17MPa√m 이상으로 나타났으며, 이것은 상용 압력관의 $K_{IH}=8-10$ MPa√m보다 70% 이상 높은 값이다. 반경 방향 집합조직의 압력관에서 나타나는 K_{IH} 거동을 균열 진전면에서의 기저면 성분과 연계하여 분석하였으며, 평면 변형에 따른 집합조직의 변화는 슬립과 쌍정 기구의 작용으로 설명하였다. 본 연구의 결과는 CANDU 압력관의 delayed hydride cracking (DHC) 저항성 관점에서 반경 방향으로 집합조직을 제어하면 매우 효율적이라는 것을 보여 준다.

1. 서론

중수로 (CANDU) 압력관은 가동중 부식에 의해 발생하는 수소를 흡수하고, 흡수된 수소량이 재료의 수소 고용 한도를 넘으면 수소화물을 석출한다. 수소화물에 응력이 작용하면 응력에 수직인 방향으로 석출 및 파괴되어 수소지연파괴 (delayed hydride cracking, DHC)를 일으키며, 이 현상은 Canada에서 냉각재 누설 사고의 주요 원인중 하나로 작용하였다 [1].

압력관의 DHC를 완화시키기 위해서는 1) 압력관의 부식률을 낮추어 수소의 발생을 줄여서 수소의 침입을 억제하거나, 2) DHC 전파에 영향을 미치는 것으로 알려진 집합조직을 조절하여 예민성을 낮추는 방법이 있을 수 있다.

Canada에서는 전자에 대한 연구로 압력관과 end fitting의 집합 부분(rolled-joint)의 공정 개선이나 Cr 도금을 통하여 수소의 흡수 경로를 차단하기 위한 연구를 진행중이다. 또한 DHC를 일으키는데 필요한 K_{IH} 를 분석하고 DHC 현상 규명을 위한 연구도 진행하고 있다 [2].

그러나, 집합조직의 개선을 통한 DHC 예민성 완화는 매우 유용한 대안이며, 핵연료 피복관에서는 필거링(pilgering)을 통해 반경 방향 집합조직을 형성시켜 DHC의 문제는 발생하지 않는다.

압력관에서도 집합조직을 피복관과 같이 개선하는 것이 DHC에 대한 저항성을 높인다는 것은 여러 연구자에 의해서 제안되어 왔으나[1] 실제로는 이와 같은 집합조직의 개선이 시도된 바가 없다.

본 연구에서는 CANDU 압력관을 확관 함으로써 집합조직을 반경 방향 압력관으로 변화시키고 이를 시험, 평가하여 반경 방향 집합조직의 변화가 K_{IH} 에 미치는 영향을 확인하였으며, 집합조직의 변화에 따른 DHC 거동 변화에 대해서 분석하였다.

2. 실험

시험에 사용한 재료는 상용 압력관 재료를 약 25% 확관하여 반경 방향의 집합조직으로 변화시켰으며 확관후의 압력관의 두께는 3.3mm 정도였다. 상온에서 압력관을 용이하게 확관하기 위하여 약 7-8% 정도의 변형을 한 후 580°C에서 5시간 annealing 처리하였다.

압력관의 변형에 따른 집합조직의 변화는 X-ray 회절법을 이용한 direct pole figure로 확인하였으며, 기저면 성분(F, basal pole component)을 계산하였다.

수용액에서 전해 방법으로 시편의 표면에 수소화물을 형성시킨 후 300°C에서 96시간 동안 균질화 처리하여 300°C에서의 수소 고용도 만큼의 수소를 투입하였다. 균질화 처리후 공랭하였으며, 수소량을 분석한 결과 함유 수소는 60 ppm으로 나타났다.

K_{IH} 측정 시험에 사용한 cantilever 시편은 Fig. 1에 보인 바와 같으며 수소화 처리후 spark wire cutting으로 가공하였다. Cantilever 시편의 선단에는 깊이 약 0.3mm 정도의 피로 균열을 형성시켰으며 피로 균열 선단에서의 최종적인 K_I 는 15MPa√m이하가 되도록 유의하였다.

K_{IH} 시험은 acoustic emission (AE, 음향 방출)을 균열 진전의 매개 변수로 사용하여 3μm의 균열 성장에 따라 약 3% 씩 하중을 감소시키는 방법으로 실시하였으며 [3] 24시간 동안 균열이 진전하지 않는 K_I 를 K_{IH} 로 정의하였다. K_{IH} 는 175-250°C 사이에서 측정되었으며 시험 온도에 이르기 전에 투입된 모든 수소가 재료내에 용해되도록 307°C에서 1시간 동안 soaking 처리한 후 시험 온도로 냉각하였다.

Cantilever 시편에 대한 K_I 의 계산에는 다음의 관계식을 사용하였다.

$$K_I = 4.12 M(X^{-3} - X^3)^{0.5} / BD^{1.5}$$

여기서 M은 bending moment이고, B는 시편의 폭, D는 시편의 살 두께, A는 균열의 깊이, $X=1-A/D$ 이다.

초기에 가해진 K_I 는 17 MPa√m 정도로 시작하였으며 K_{IH} 는 시험이 끝난 시편의 균열 길이를 실측한 후 재계산하여 결정하였다.

3. 결과

본 시험에 사용한 재료의 미세조직은 Fig. 2에 보인 바와 같다. 상용 압력관의 결정립보다는 약간 큰 것으로 보이며 변형에 따른 결성 방향의 변화에 의해 편광에 의해서 contrast가 나타난다.

시험이 끝난 시편에 대해 조사한 수소화물의 분포는 Fig. 3에 보인 바와 같다. 수소화물은 soaking 처리후 노내에서 시험하고 노냉하여 집합조직 변화전의 수소화물과 거의 유사하지만, 약간 다른 방향의 수소화물도 관찰하였다.

확관된 압력관의 (0002) 집합조직을 Fig. 4에 확관 전의 집합조직과 비교하여 나타내었다. 확관 전의 압력관은 transverse 방향으로 (0002) pole이 몰려 있으며, 이것이 압력관이 수소지연과 피 예민성을 가지는 직접적인 이유이다. 반면, 확관된 시편에서 (0002) pole은 관의 반경 방향에서 약 20-30° 정도 기울어진 곳에 몰려 있어 핵연료 피복관의 집합조직과 비슷하다. 이와 같이 확관 과정에 의한 집합조직의 변화는 압력관의 횡 방향으로의 평면 변형으로 발생하는 (10 $\bar{1}$ 2) 및 (1121) 쌍정의 작용과 쌍정된 결정의 슬립 작용에 의한 현상이다 [4]. 왜냐하면, 압력관의 횡 방향이나 횡 방향에 가까운 (0002) pole은 평면 변형중 발생하는 쌍정 변형으로 관의 반경 방향으로 회전하며, 회전한 결정립은 슬립 변형이 용이해지기 때문이다.

확관 전, 후 압력관의 세 방향에 따른 기저면 성분은 Table 1에 비교하였다. Fig. 4의 집합조직과 Table 1에 따르면 확관에 의해 관의 집합조직은 반경 방향의 집합조직을 가졌다는 것을 알 수 있다.

250°C에서 측정된 반경 방향 압력관의 K_{IH} 는 Fig. 5에 상용 압력관의 K_{IH} 와 함께 비교하여 나타내었다. 사용한 시험편의 수가 충분하지 않지만 K_{IH} 최소 값은 17MPa \sqrt{m} 이며 집합조직 변화전에 비하여 70% 이상 높게 나타났다. K_{IH} 는 시험 온도 증가함에 따라 약간 증가하는 것으로 보인다.

4. 논의

Zr 합금에서의 수소지연과 피 현상은 재료내에 존재하는 수소량이 수소의 고용한도를 넘을 때 취약한 수소화물로 석출하고 파괴되는 과정의 반복에 의한 것으로 알려져 있으며, 수소화물은 응력 하에서 응력에 수직인 방향으로 석출하는 특성이 있다. DHC 현상은 수소화물 석출의 habit plane인 (10 $\bar{1}$ 7) 면[5]의 배열과 매우 관계가 깊으며, 따라서 재료의 집합조직은 DHC 거동에 지대한 영향을 미친다.

상용 압력관의 경우에는 압출과 인발에 의하여 제조되는 과정에서 관의 횡 방향에 (0002) pole이 집중되어 있으며, (0002) 면과 (10 $\bar{1}$ 7) 면과는 약 14.7° 이므로 압력관의 기하학적 구조와 관련하여 상용 압력관은 수소지연과 피에 높은 예민성을 가질 수밖에 없다. 실제로 많은 중수로 압력관이 이와 같은 현상을 보이고 있고 냉각재 누설 사고를 일으킨 바 있다.

압력관의 집합조직을 반경 방향 집합조직으로 변화시킨다면 수소지연과 피에 대한 예민성을 크게 완화시킬 수 있을 것이라는 점은 예측과 지적이 있었다 [1, 3]. 그러나 핵연료 피복관의 경우와는 달리 pilgering을 적용하는 것이 용이하지 않아 아직까지 반경 방향 집합조직의 압력관을 제조하지 못하고 있는 실정이다.

압력관과 유사한 집합조직의 판재에 대한 교차 압연이 판재에 수직인 방향에서의 집합조직으로 변화시키는 효과를 이용하기 위하여 압력관을 평면변형 조건으로 변형하여 압력관의 집합조직을

반경 방향으로 변화시키고 시험한 결과, 상용 압력관에 비하여 높은 K_{IH} 를 나타내었다. 이는 수소지연파괴 기구에 비추어 보면 균열 진전면에서의 기저면의 밀도가 낮아져 수소지연파괴 기구에 다른 균열의 진전이 용이하지 않기 때문으로 잘 설명할 수 있다.

5. 결론

횡 방향 집합조직의 압력관을 25% 확장하여 반경 방향 집합조직으로 변화시켜 K_{IH} 를 측정한 결과, 반경 방향 집합조직 압력관에서 수소지연파괴를 일으키기 위한 임계응력확대계수 K_{IH} 는 250°C에서 상용 압력관에 대한 것보다 약 70% 이상 높은 $17\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이상으로 확인하였다. 이것은 집합조직의 변화에 의해 균열 진전면에서 수소화물의 석출이 용이한 결정립의 감소하기 때문에 나타나는 현상이며 집합조직의 변화에 따른 예측과 잘 일치한다. 반경 방향 집합조직의 압력관은 횡 방향에서의 기저면 성분을 낮추어 수소지연파괴 저항성을 높이는데 유용하다.

참고문헌

1. Coleman, C. E. and Ambler, J. F. R., ASTM STP 633, 1977, pp.589-607
2. Coleman, C. E., Cheadle, B. A., Cann, C. D., and J. R. Theaker, ASTM STP 1295, 1996, pp. 884-898
3. Sagat, S. Ambler, J. F. R., and Coleman, C. E., AECL-9258, 1986
4. Tenckhoff, E., ASTM STP 966, 1988
5. Perovic, V., Weatherly, G. C., and Simpson, C. J., Acta Metallurgica Vol. 31. No.9, 1983, pp. 1381-1391

표 1. 확장 전, 후의 기저면 성분

방향 압력관 조건	F_R	F_T	F_L
상용 압력관	0.32	0.59	0.09
25% 확장 압력관	0.48	0.32	0.20

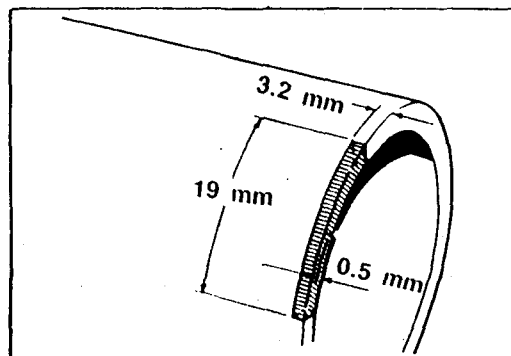


Fig. 1. Dimension of Cantilever Specimen.

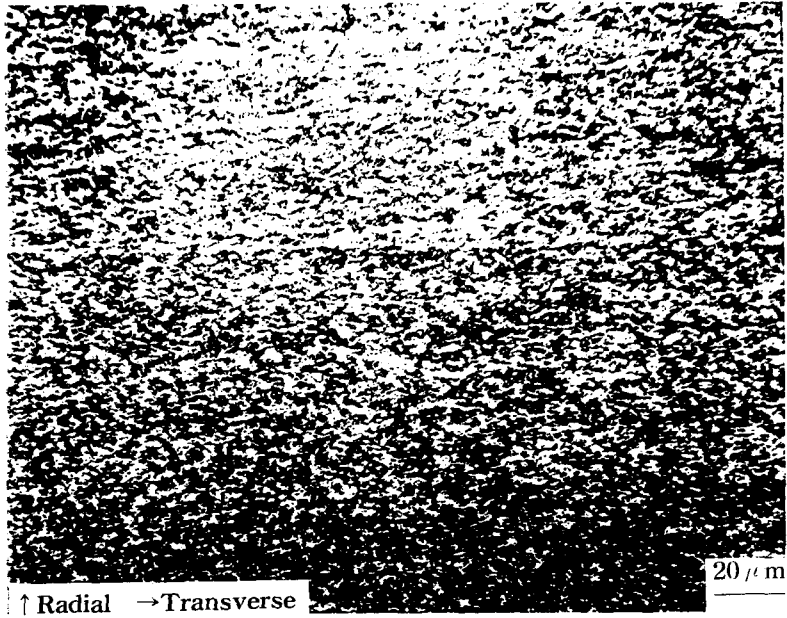


Fig. 2. Optical Micrographs of Radial Textured Tube.



Fig. 3. Hydride Morphology of Radial Textured Tube.

a) Commercial CANDU Pressure Tube

b) 25% Expanded Tube

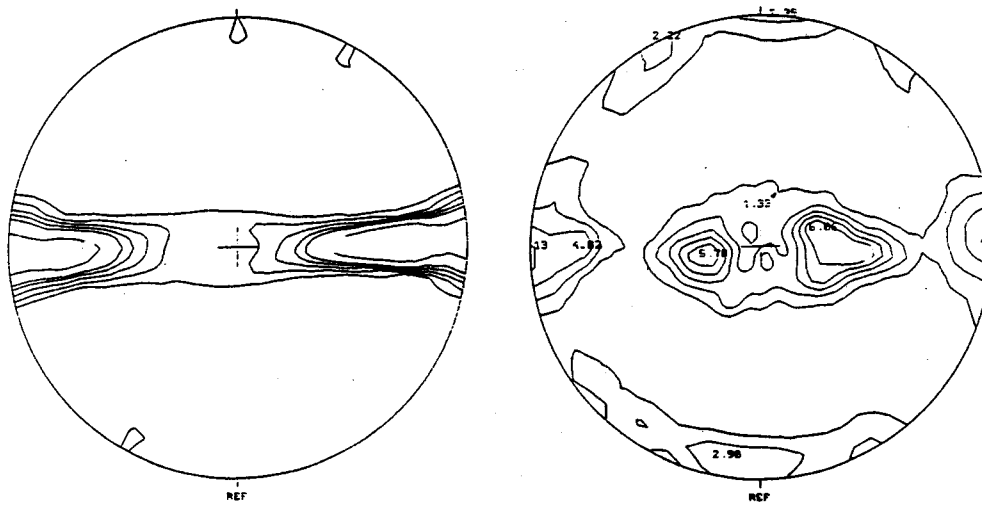


Fig. 4. (0002) Pole Figures for CANDU and Radial Textured Tubes.

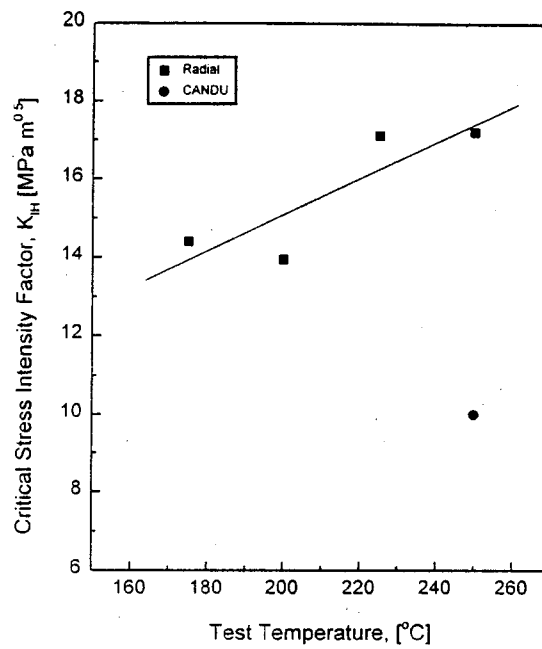


Fig. 5. K_{IH} for CANDU and Radial Textured Tubes at 250°C.