

# 사용후핵연료 지연수소화균열 평가 요건 설정

홍종대\*, 김효찬, 김주성, 정양일, 김도식, 양용식, 구양현  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
\*jongd@kaeri.re.kr

## 1. 서론

최근 국내에서도 사용후 핵연료를 안전하게 관리하기 위한 방안을 모색하기 위하여 공론화가 활발하게 이루어지며 다양한 방안들이 제시되고 있다. 그러나 이미 습식저장조의 용량이 포화에 이르고 있는 상황에서 단기간 내에 검증과 구현이 현실적으로 가능한 형태는 건식저장이 유일하다. 이에 대한 건전성을 확보하기 위해서는 장시간의 저장기간 동안 장시간 검사나 보수가 힘들기 때문에, 건식저장에 따른 사용후핵연료의 열화에 대한 예측과 평가가 필수적이다. 건식저장 조건하에서 가능한 피복관의 주요 열화기구로는 수소화물에 의한 열화문제가 보고되고 있으며, 그 중에서도 지연수소화균열(DHC, Delayed Hydride Cracking)에 대한 우려가 있다. 이러한 관점에서 건식저장 환경에서 DHC로 인한 사용후핵연료의 열화와 관련된 선행연구 결과를 고찰하였다.

## 2. 본론

### 2.1 건식저장 조건에서의 DHC

DHC를 예측하기 위한 모델은 균열의 성장기구에 따라 Puls 등의 DFM (Diffusion First Model)과 Kim 등의 PFM (Precipitation First Model)이 있으며, 대부분의 연구는 균열성장속도에 초점을 두고 있다. 그러나, 균열성장속도가 상온에서는  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  m/s, 300°C에서는  $10^{-7}$  m/s 이상으로 빠르기 때문에, 일단 균열성장이 시작되면 건식저장 온도조건 하에서는 10~20년 이내에 파단에 이를 수 있다. 따라서, 장기 건식저장 중 DHC 의한 열화를 방지하려면 균열성장 자체를 억제하는 것이 필요하다.

### 2.2 문턱응력확대계수 $K_{IH}$

DHC 균열성장 발생의 기준으로 문턱응력확대계수( $K_{IH}$ , threshold stress intensity factor)가 사용되고 있으며, 수소화물 앞의 균열선단(crack tip)에서의 응력확대계수  $K_I$ 이  $K_{IH}$  이상이어야 균열 성장

이 시작된다.  $K_{IH}$ 는 5~9 MPa $\sqrt{m}$  정도로 알려져 있으며, 항복강도/집합조직/미세조직 등의 재료특성과 온도/조사량/수소 농도 등의 다양한 요인에 영향을 받는다. 온도의 경우 특정온도이하에서는 온도에 따른 영향이 없지만, 300°C 이상의 고온에서는 온도에 따라 급격히 증가한다고 보고되었다(Fig. 1) [1]. 항복강도에 따른 영향은 거의 없으며, 중성자 조사에 따라 감소하지만 그 영향은 미미한 것으로 보고되었다. 일부 연구들이 수행되어 오고 있으나, 각 인자들끼리 서로 상관관계를 갖고 있고, 많은 연구가 수행되지 않아 정량적인 평가가 힘든 실정이다.

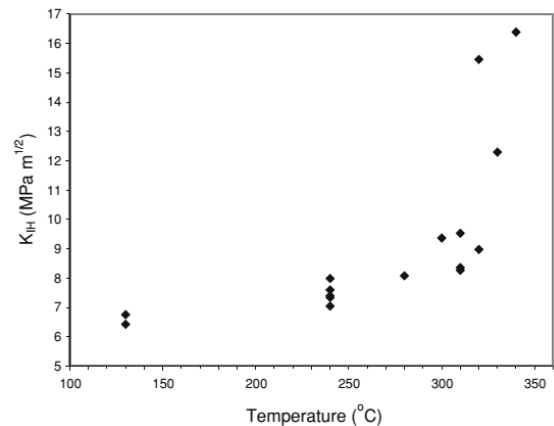


Fig. 1. Temperature dependence of  $K_{IH}$  in irradiated Zr-2.5Nb (w/153 ppm of hydrogen) [1].

#### 2.2.1 기존 예측모델 검토

$K_{IH}$ 는 앞서 설명하였듯이 다양한 인자에 영향을 받는다. 그 중 일부 인자들을 고려하여 Kim 등은 Zr-2.5Nb 합금의  $K_{IH}$ 에 대해 Table 1과 같은 모델을 제시하였다. 비조사재의 경우 300°C 이하의 조건에서는 기존 실험결과와도 일치하는 결과가 보고되었으나 [2], Fig. 2의 예측결과에서 볼 수 있듯이 고온에서 나타나는  $K_{IH}$ 의 급격한 증가를 예측하지 못하고 있다.

한편, Shi, Puls [3,4] 등의  $K_{IH}$  모델에 따르면, 이론적인  $K_{IH}$ 의 최소값  $K_{IH}^\infty$ 는 식 (1)과 같이 예측하였으나

Table 1. Prediction model and values of  $K_{IH}$  for unirradiated Zr-2.5Nb alloy

Condition	$K_{IH}$ model [2]	Predicted Values (MPa√m)				
		50°C	100°C	200°C	300°C	350°C
Plane strain	$K_{IH} = \left\{ \frac{\sigma_{ys} E \epsilon_{\perp} t_{hyd}}{2\kappa(1-\nu^2)(1-2\nu)^2 \left( \frac{1+\kappa}{1-2\nu} - \frac{\sigma_f^h}{\sigma_{ys}} \right)} \right\}^{1/2}$	12.71	12.55	12.72	12.25	11.67
Plane stress	$K_{IH} = \left\{ \frac{\sigma_{ys} E \epsilon_{\perp} t_{hyd}}{2\kappa(1+\kappa - \frac{\sigma_f^h}{\sigma_{ys}})} \right\}^{1/2}$	6.10	6.66	7.81	7.82	7.65
Mixed plane	$K_{IH} = \left\{ \frac{\sigma_{ys} E \epsilon_{\perp} t_{hyd}}{2\kappa(1-\nu^2) \left( \frac{1+\kappa}{1-2\nu} - \frac{\sigma_f^h}{\sigma_{ys}} \right)} \right\}^{1/2}$	3.64	4.16	5.17	5.46	5.45

사용후핵연료 저장 초기 온도 조건인 400°C이하에서는 1MPa√m 이하의 낮은 값이 예측되어 실용적인 큰 의미는 없다고 판단된다.

$$K_{IH}^{\infty} = \left\{ \frac{\sigma_{ys} E \epsilon_{yy}^T t_{hyd}}{8\pi(1-\nu^2)(1-2\nu)^2 \left( \frac{1}{1-2\nu} \sigma_{ys} - \sigma_f^h \right)} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

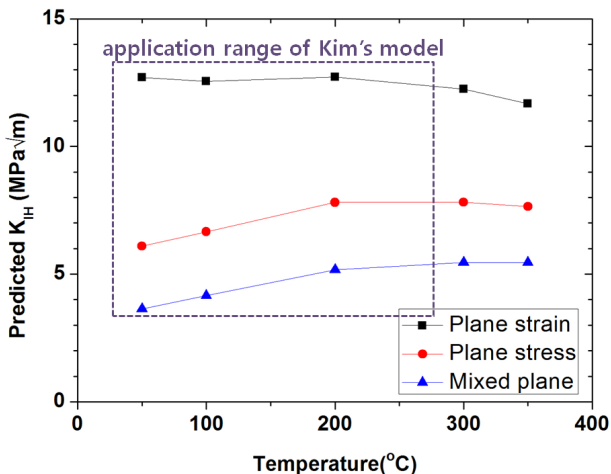


Fig. 2 Predicted  $K_{IH}$  for unirradiated Zr-2.5Nb alloy depending on temperature by Kim's model.

### 2.2.2 DHC 평가기준 적용 한계

기존의  $K_{IH}$  예측모델을 검토하였으나 재료/적용 조건의 한계로 그대로 적용이 힘들 것으로 판단된다. 사용후 핵연료로의 적용을 위해서는 피복관에 사용되고 있는 지르코늄 합금에 대한 모델이 별도로 필요할 것으로 판단된다. 별도의 실험을 통해 재료이외에도 수소농도/조사/고온(300°C 이상)의 영향을 고려한  $K_{IH}$ 의 예측식을 확보하여야 한다. 또한,  $K_{IH}$ 과 비교하기 위한 현실적인  $K_I$  값을 예측하기 위해 ( $K_I = S\sigma\sqrt{\pi a}$ , a:균열길이) 기존에 생성된 균열이나 결함의 크기와 형상을 분석하여, 대표할

수 있는 값(S, 형상인자)을 선정해야 한다. 이를 위해서 실제 사용후 핵연료의 균열검사를 통한 데이터베이스 확보가 필요하다.

### 3. 결론

DHC를 평가하기 위한 모델들이 제시되어 왔으나, 건식저장환경에 그대로 적용하는 데에 한계가 있다. 건식저장 환경에서의 사용후 핵연료의 건전성을 확보하기 위해, 보수적인 기준으로 균열성장의 문턱응력확대계수 적용이 적합할 것으로 판단되나, 이를 위해 다양한 조건에서의 피복관 재료의  $K_{IH}$ 모델과 사용후 핵연료의 균열 데이터베이스 확보가 필요하다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20141710201660)

### 5. 참고문헌

- [1] L.M. Resta, M.P. Puls, 18th SMiRT, Paper G10-3 (2005).
- [2] Y.S. Kim, Y.G. Matvienko, Y.M. Cheong, S.S. Kim, S.C. Kwon, J. Nucl. Mater. 278, 251-257 (2000).
- [3] S.Q. Shi, M.P. Puls, J. Nucl. Mater. 208, 232-242 (1994).
- [4] S.Q. Shi, M.P. Puls, J. Nucl. Mater. 218, 30-36 (1994).