

Analysis of Probabilistic Structural Integrity for Reactor Vessel under SBLOCA

Jong-Wook Kim,^a Ji-Ho Kim,^a Tae-Wan Kim,^a Kang-Soo Kim,^a Jong-In Kim,^a Keun-Bae Park,^a
*a Korea Atomic Energy Research Institute, Mechanical Engineering Division, Post Box 105, Yuseong, Daejeon
 kjwook@kaeri.re.kr*

1. 서론

발전소의 운전가능한 잔류수명을 예측하기 위해서는 발전소 운전수명에 큰 영향을 미치는 주요 기기들을 선정하고, 선정된 기기들을 구성하는 재료와 그 밖의 파라미터들의 영향을 고려함으로써 잔류수명을 평가할 필요가 있다. 그러나 원자력 발전소 기기들의 안전성 평가는 그동안의 운전이력, 재료특성의 변화 그리고 손상모델의 불확실성에 관한 정보부족으로 상당한 어려움이 존재한다. 지금까지 기기의 구조적 건전성과 안전성 평가는 여러 가지 파라미터에 대하여 하나의 확정 값을 가지는 결정론적 파괴역학(Deterministic Fracture Mechanics)이 주종을 이루었다[1~2]. 그러나 기기의 건전성과 안전성이 결정론적 파괴역학에만 근거하여 평가되면, 도출된 결과는 발전소 수명의 합리적 평가수행과 모든 관련된 파라미터들의 축적된 여유도로 인하여 수명연장 결정에 상당한 보수성을 가지게 될 것이다. 이러한 관점에서 실제 파괴현상을 지배하는 각종 파라미터의 존재확률인 분산을 고려하여 안전여유를 정량적으로 평가하는 확률론적 파괴역학(Probabilistic Fracture Mechanics)이 기기의 수명평가와 관련하여 중요한 실마리를 제공한다.

본 연구에서는 원자로 압력용기에 축방향 표면균열을 포함한 경우에 대한 결정론적 건전성 평가와 함께 여러 가지 파라미터를 고려한 확률론적 구조 건전성 평가를 수행하고자 한다. 이를 위한 운전조건으로는 소규모 냉각재 상실사고(Small Break Loss of Coolant Accident, SBLOCA)를 대상으로 설정하였다[3]. 또한 확률론적 건전성 평가를 위한 여러 가지 파라미터로 압력용기를 구성하는 재료인 모재에 따른 초기 기준무연성 천이온도(RT_{NDT})와 구리(Cu), 인(P), 및 니켈(Ni)의 함량, 그리고 원자로 내벽에서의 중성자 조사량 등을 고려하였으며, 확률론적 해석은 Monte Carlo 기법을 사용하여 수행하였다.

2. 유한요소 해석모델

본 연구에서는 건전성을 평가하기 위해 내경이 3988mm, 벽두께 200mm, 클래드 두께 7.5mm 인 원자로 압력용기를 해석 대상으로 하였다. 해석 모델은 원자로 압력용기 내벽에 균열깊이비

$a/t = 0.1$, 균열형상비 $a/c = 1/3$ 인 축방향 표면균열이 존재하는 것으로 가정하였으며, Fig. 1 과 같은 3 차원 축대칭 유한요소해석모델을 구현하여 해석에 사용하였다. 본 해석에 적용한 운전조건인 소규모 냉각재 상실사고의 압력, 온도 및 열전달계수이력은 참고문헌[3]을 적용하였다. 해석을 위한 경계조건으로 균열면에서는 내압만을 법선방향으로 작용시켰으며, 물리적 특성을 고려하여 온도변화와 열전달로 인한 열적하중은 무시하였고 외벽은 단열된 상태로 가정하였다.

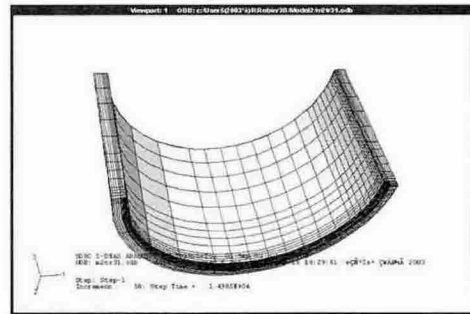


Figure 1. Finite element analysis model.

원자로 압력용기의 구조건전성 평가에 사용된 모재의 초기 기준무연성 천이온도와 각 화학적 조성비는 Table 1 과 같으며, 가동연수에 따른 중성자변화에 기인한 기준무연성 천이온도의 변화량 계산식은 참고문헌[3]을 적용하였다.

Table 1. Chemical composition and initial RT_{NDT}

Initial RT_{NDT}	1 SD uncertainties	% Cu	2 SD uncertainties
-20□	9□	0.086	0.02
% P	2 SD uncertainties	% Ni	2 SD uncertainties
0.0137	0.002	0.72	0.1

3. 해석결과 및 검토

Fig. 2 는 소규모 냉각재 상실사고 운전조건에 대한 해석결과로, 유한요소해석으로부터 구한 응력확대 계수 K_I 과 중성자조사에 따른 K_{IC} 를 함께 도시한 것이다. 해석으로부터 구한 응력확대계수 K_I 선도는 시간이 경과함에 따라

점점 증가하여 소규모 냉각재 상실사고 발생 후 약 1500 초 경과 후에 최대응력 확대계수를 나타내었다. 중성자조사에 따른 K_{IC} 선도는 가동연수가 증가함에 따라 점점 좌측으로 이동하여, RT_{NDT} 값이 200인 경우 해석으로부터 구한 최대응력확대계수에 비하여 낮아져 압력용기의 파괴인성이 점차 낮아지는 경향을 나타내었다. Table 2는 초기 기준무연성 천이온도, 구리, 니켈, 인의 함량과 RT_{NDT} shift 그리고 플루언스를 난수 파라미터로 설정하여 구한 모재의 RT_{NDT} 평균값과 분산이다. 검토 결과, 가동초기에 비하여 가동연수가 증가함에 따라 RT_{NDT} 평균값과 분산이 점차 증가하는 것으로 계산되었다. Fig. 3은 시간에 따른 균열개시 빈도 확률을 나타낸 것이다. 균열발생빈도는 사고발생 후 약 2400 초에서 최대를 나타냈으며, 가동연수가 증가함에 따라 균열발생빈도확률이 점차 높아졌다.

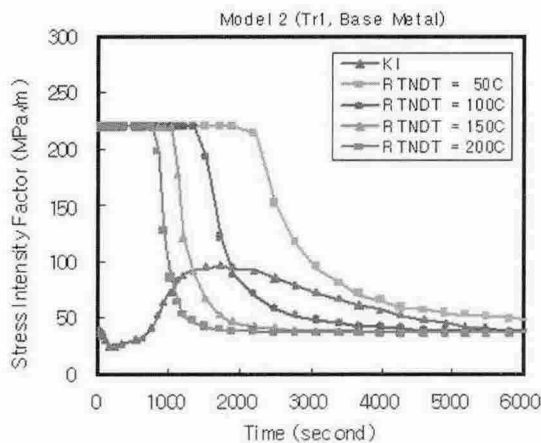


Figure 2. Stress intensity factor curve for SBLOCA condition.

Table 2. Mean RT_{NDT} and standard deviation

RPV age in year	Mean fluence value	Mean RT_{NDT}	1 SD value
10	3	33.6843	14.2901
20	5	44.1683	14.6297
40	7.5	53.9152	15.1597
60	10	61.7317	15.5116

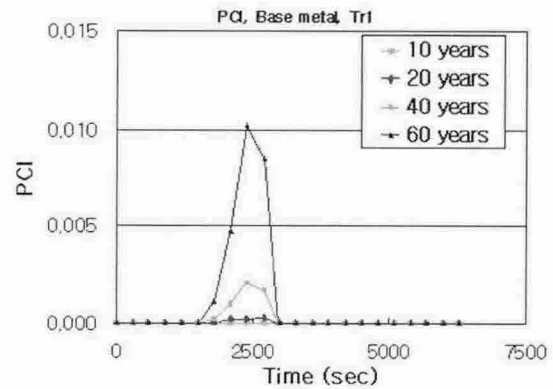


Figure 3. Probability of crack initiation for SBLOCA condition.

3. Conclusion

본 연구에서는 소규모 냉각재 상실사고하의 축방향 표면균열을 포함한 원자로 압력용기에 대한 확률론적 구조건전성 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 중성자조사에 따른 응력확대계수 선도는 가동연수가 증가함에 따라 점차 파괴인성이 낮아지는 경향을 보였다.
- 2) 초기 기준무연성 천이온도, 구리, 니켈, 인의 함량과 중성자 조사량의 평균과 분산에 따른 영향을 평가한 결과, 가동연수가 증가함에 따라 무연성 천이온도 평균값과 분산이 점차 증가하였다.
- 3) 가동연수가 증가함에 따라 균열발생빈도확률이 점차 높아졌다.

ACKNOWLEDGEMENT

This project has been carried out under the Nuclear R&D Program by MOST.

REFERENCES

[1] 김종욱, 이규만, 최순, 박근배, "가압열충격에 대한 일체형원자로 SMART의 구조건전성 평가," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.441-446, 2001.
 [2] 김종욱, 이규만, 박근배, "냉각조건을 고려한 원자로 용기의 압력-온도 한계곡선평가," 원자력학회 추계학술대회 논문집, 2001.
 [3] OECD/NEA PWG3-IAGE Metal Group, "Probabilistic Structural Integrity of a PWR Reactor Pressure Vessel," 2004.