'01 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가압열충격을 받는 원자로의 확률론적 구조 건전성 평가
- 반타원 유한균열을 가진 경우 -

김지호, 김종인, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

반타원 유한균열을 가진 원자로가 가압열충격 하중을 받는 경우에 대하여 확률론적 구조 건전성 평가를 수행하였다. 균열은 원자로 용기 노심대의 용접부위에 존재하는 것으로 가정하였다. 냉각재 과도조건에 따른 각 시간스텝에서의 응력해석 결과를 3차 다항식으로 근사하고, 이 근사 곡선으로부터 Raju-Newman 근사식을 사용하여 응력 확대계수를 구하였다. 확률론적 해석을 위해서는 Monte Carlo Simulation을 이용하였으며 초기균열길이, 원자로내벽에서의 중성자 조사량, 구리 및 니켈 함량, RT_{NDT}, 파괴인성치 등을 확률변수로 설정하였다. 또한 원자로 내벽에서의 중성자 조사량의 변화에 따른 균열진전 확률을 구하여 원자로 수명기간동안 원자로 구조 신뢰성의 변화를 살펴보았다.

Abstract

A probabilistic integrity assessment is performed for a reactor vessel under pressurized thermal shock(PTS). An semi-elliptical finite crack is assumed to be in the beltline weld region of the reactor vessel's inside surface. The selected random variables are initial crack depth, neutron fluence on the vessel's inside surface, the copper and nickel content of the vessel material, RT_{NDT}, and K_{IC}. The stress intensity factors are calculated by using approximate formula presented by Raju-Newman. Since the failure function cannot be explicitly expressed by selected random variables, Monte Carlo Simulation is applied to perform probabilistic analysis. The influence of the amount of neutron fluence is also examined to assess the structural reliability for vessel life time.

1. 서 론

ECCS가 가동되어 차가운 물이 원자로 노심대로 갑자기 흘러 들어오면 원자로벽에 심한 열구배를 형성하여 열응력을 유발할 뿐만 아니라 재료의 파괴인성치를 급격히 감소시키게 되므로 원자로벽에 존재하는 결함이 성장하여 원자로의 건전성 상실을 가져올 수 있다. 본 논문에서는 이러한 가압열충격 하중을 받는 원자로의 벽 내부에 유한균열이 통계적으로 분포한다고 가정하고 구조 건전성 평가를 수행하였다. 초기균열길이 뿐만 아니라 원자로내벽에

서의 중성자 조사량, 구리 및 니켈 함량, RT_{NDT}, 파괴인성치 K_{IC} 등도 확률변수로 가정하여 원자로 재료에 존재하는 불확실성을 정량적으로 평가하였으며, 균열이 진전하는 경우를 원자로의 파괴로 가정하고 파괴방정식을 구성하였다.

확률론적 구조 건전성을 평가하기 위한 방법은 MVFOSM, AFOSM 등의 해석적 방법과 확률 유한요소법, Monte Carlo Simulation 등의 수치적 방법 등 여러 가지가 있지만 해석적 방법은 파괴 방정식이 확률변수의 함수로 명확히 표현되는 경우에만 적용 가능한데 본 연구에서와 같이 파괴 방정식이 확률변수의 함수로 명확히 표현되기 어려운 경우에는 Monte Carlo 방법을 사용하는 것이 일반적이다. Monte Carlo 방법은 비교적 정확한 파괴확률을 계산할 수 있는 반면, 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 해석상 가장 많은 시간이 소요되는 열전달 및 열응력 해석을 Monte Carlo Simulation 이전에 수행하고 이를 3차 다항식으로 근사한 후, 각 계수만을 저장하여 필요할 때 사용하는 방식을 채택함으로써 Monte Carlo Simulation의 사용을 가능하게 하였다. Monte Carlo Simulation 내부에 필연적으로 포함되어야 하는 응력확대계수의 계산은 Raju-Newman이 제안한 근사방법을 사용함으로써 시간상의 제약을 해결하였다. Jackson 등[1]은 냉각재의 과도조건이 수식으로 명확히 표현되는 경우에 대하여 가압열충격을 받는 원자로의 구조 건전성을 확률론적으로 평가한 바 있으며, Kim 등[2]은 축방향 및 원주방향 무한균열을 가진 원자로가 가압열충격을 갖는 경우의 확률론적 구조 건전성 평가를 수행한 바 있다. 본 논문에서는 Kim 등의 방법에 기초하여 반타원 유한균열을 가진 원자로에 대한 건전성 평가를 수행하였다.

2. 확률론적 파괴해석

2.1 파괴함수의 정의

확률론적 건전성 평가를 수행하기 위해서는 먼저 원자로의 파괴상태를 정의하여야 하는데 본 논문에서는 원자로 내벽에 존재하는 균열이 진전하는 경우를 파괴로 정의하였으며 따라서 파괴함수는 다음과 같다.

$$Z(x) = K_{IC}(x) - K_I(x) \tag{1}$$

여기서 K_{IC} 는파괴인성치, K_I 은 응력확대계수, 그리고 x 확률변수이다. 위 식에서 보는 바와 같이 K_{IC}, K_I 은 모두 확률변수의 함수이며 따라서 파괴함수 또한 확률변수의 함수가 된다. 식(1)로 부터 파괴확률은 다음과 같이 계산된다.

$$p_f = P(Z < 0) = P(K_{IC} - KI < 0) \tag{2}$$

여기서 P(x)는 x라는 사건이 발생할 확률을 의미한다. 서론에서 언급한 바와 같이 가압열충격과 같은 복잡한 냉각재 과도조건을 가진 경우는, 파괴함수 Z(x)가 확률변수 x의 함수로 명확히 표현되지 않으므로 본 논문에서는 Monte Carlo Simulation을 통하여 파괴확률을 구하였다.

2.2 확률론적 파괴해석 방법

가압열충격을 받는 원자로에 대한 확률론적 파괴해석을 수행하기 위해서는 결정론적 해석과 마찬가지로 먼저 냉각재 과도조건에 대한 원자로 벽 내부 온도분포의 시간이력과 이러

한 온도분포에 대한 응력 분포의 시간이력을 알아야 한다. 본 논문에서는 통계특성을 가진 균열길이와 무관하게 응력분포를 계산하고, Raju-Newman 근사식을 적용하여 응력확대계수를 구하였다.

가압열충격에 의한 냉각재의 과도조건에 대한 원자로 내벽에서의 온도구배는 복잡한 형상을 가지지 않으므로 이러한 온도구배에 의한 응력의 분포는 다음과 같은 3차 다항식으로 근사적으로 표현될 수 있다.

$$s(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 \tag{3}$$

여기서 s(x) 원자로 내벽에서 x 만큼 떨어진 곳에서의 응력 값이다. 따라서 식 (1)의 계수 C_i 만 알고 있으면 매 시간 스텝에서의 응력분포를 알 수 있다.

Raju-Newman은 원통형 형상의 구조물이 이처럼 3차 다항식으로 근사된 응력분포를 가진 경우, 축방향 반타원형 균열에 대한 응력확대계수를 구하는 근사식을 다음과 같이 제시하였다[3].

$$K_I = \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \sum_{j=0}^{3} G_j C_j a^j \tag{4}$$

여기서 a는 균열 깊이이고 G는 영향계수로서 참고문헌 [3]에 주어져 있다. 형상계수 Q는 다음과 같다.

$$Q = 1 + 1.464\left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \tag{5}$$

파괴인성치 K_{IC} 는 ASME code[4]에서 제시한 $(K_{IC})_{ASME}$를 사용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} K_{IC} &= ERKIC \cdot (K_{IC})_{mean} \\ (K_{IC})_{mean} &= 1.43 \times (K_{IC})_{ASME} \\ (K_{IC})_{ASME} &= 36.5 + 3.087 \exp\{0.036(T - RT_{NDT} + 56)\} MPa\sqrt{m} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $ERKIC$는 K_{IC} 의 통계분포를 고려해주는 확률계수로서 가우스 분포를 가지는 것으로 하였다. T는 균열선단에서의 냉각재 온도이며 RT_{NDT}는 기준 무연성 천이온도이다.

$ERKIC$는 새로운 균열이 발생할 때마다 재생성된다. 계수 1.43은 ASME에서 제시된 K_{IC} 값이 시험데이터의 하한 곡선으로 구한 매우 보수적인 값이며, 확률론적 건전성 평가에서는 평균치를 택하는 것이 타당하므로 이를 보상하기 위한 계수이다[5]. 기준 무연성 천이온도 RT_{NDT} 는 Regulatory Guide 1.99, Revision 2[6]의 계산과정을 적용하였으나 통계특성을 고려하기 위해 다음과 같이 변형하였다.

$$RT_{NDT} = RT_{NDT0} + \Delta RT_{NDT} + ERRTN\sqrt{\sigma(RT_{NDT0}) + \sigma(RT_{NDT})} \tag{7}$$

여기서 RT_{NDT0} : RT_{NDT}의 초기치

ΔRT_{NDT} : 중성자 조사에 의한 RT_{NDT} 의 증가량

$\sigma(\Delta RT_{NDT0})$: RT_{NDT0} 의 불확실성을 고려한 1 σ 값으로서

용접부 균열인 경우 = -8.3°C

모재에 균열인 경우 = -5.3°C

$\sigma(\Delta RT_{NDT})$: RT_{NDT} 의 불확실성을 고려한 1 σ 값으로서

용접부 균열인 경우 = -2.2°C

모재 균열인 경우 = -8.3°C

$ERRTN$ 은 RT_{NDT} 의 통계특성을 고려하는 확률변수로서 가우스분포를 가지는 것으로 하였다. $ERRTN$ 값은 하나의 원자로에 대해, 즉 한번의 Monte Carlo Simulation에 대해 한번만 생산된다. 본 논문에서는 원자로 내벽에서의 중성자 조사량, copper 함유량, nickel 함유량 등의 변수들의 통계특성도 고려함으로써 원자로 재료에 내재된 불확실성을 가급적 정확히 정량적으로 평가하고자 하였다.

이상과 같이 반타원 유한 균열을 가진 원자로가 가압열충격을 받는 경우의 확률론적 구조 건전성평가 절차를 정리하면 그림 1 과 같다.

3. 적용 예

실제 적용 예로서 다음과 같은 원자로의 건전성 평가를 수행하였다.

- 원자로 내경 : 4,394 mm
- 모재 벽두께(모재 재질 : SA 508 Class 3) = 219 mm
- 클래드 두께(클래드 재질 : STS 309L) = 4.8 mm

하중조건은 SBLOCA 사고를 가정하였으며 SBLOCA에 대한 냉각재 온도 및 원자로 내부 압력의 과도조건은 그림 2및 3에 주어져 있다. 이러한 냉각재 과도 조건에 따른 원자로벽에서의 열전달 해석 및 응력분포를 구하기 위한 열응력해석은 ANSYS Code[7]를 사용하여 수행하였다. Plane55 축대칭 요소 및 등가의 구조요소를 사용하였으며 두께방향으로 14개의 요소로 분할하였다. 클래딩도 유한요소모델에 포함 하였으며 두 개의 요소로 분할하였다. 냉각재 온도 과도조건은 1001 개의 time step으로 분할하였다.

중성자 조사량이 다음과 같이 변하는 경우에 대한 해석도 수행하여 원자로 수명기간동안의 건전성의 변화를 살펴보았다.

fluence level : 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 x 10^{19} n/cm^2

선택된 확률변수들에 대한 통계특성은 표 1 에 주어져 있다.

4. 해석결과 및 고찰

그림 4는 원자로 벽 내부에서의 온도의 시간이력을 나타낸 것이다. 0t 는 클래드와 모재의 경계부분을 의미하는데 이곳에서는 냉각재의 온도와 유사하게 변하지만, 안쪽으로 들어갈수록 비교적 완만한 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 일정한 시간에서 원자로 벽 두께 방향으로의 응력분포를 보이고 있다. 내벽에서 일정한 거리까지는 매우 큰 인장응력이 걸리고 내벽에서 멀어지면 압축응력을 받는다는 것을 알 수 있다. 균열은 내벽에 존재하므로 가압열충격에 의한 온도구배는 큰 응력확대계수의 원인이 될 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 1/4t 균열에 대하여 시간에 따른 응력확대계수 K_I 과 파괴인성치 K_{IC} 의 변화를

나타낸 것이다. 그림에서는 모든 시간영역에서 K_I 이 K_{IC} 보다 작지만 이는 결정론적인 판단에 의한 것이며 확률론적으로 보면 K_{IC}를 구하기 위한 여러 가지 계수들에 많은 불확실성이 내포되어 있으므로 이를 고려하는 경우에는 K_{IC} 값도 통계특성을 가지게 되므로 모든 시간영역에 대해 K_{IC} 가 반드시 K_I보다 작다고 할 수 없다. 실제로 그림 6과 동일한 상황(1/4t 균열, 중성자 조사량 0.3 x 10^{19} n/cm^2) 에 대해 확률론적인 분석을 수행해본 결과, 20,000번의 수행에서 K_I 값이 K_{IC}보다 큰 경우가 8회 생산되었다(파괴확률 0.04%). 이와같이 결정론적인 방법에 의해서는 안전하다 하더라도 구조물에 내재된 여러 가지 불확실성에 의해 파괴가능성이 상존하므로 이러한 파괴가능성에 대한 정량적 평가가 필요하다.

그림 7은 중성자조사량의 변화에 따른 원자로의 파괴확률을 나타낸 것이다. 중성자 조사량이 클수록 파괴확률도 증가하며 수명말기에는 약 12.5% 파괴확률을 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 같은 조건하에서 축방향 무한균열에 대한 파괴확률[2]과 비교한 것이다. 유한균열인 경우, 무한균열에 비해 약 1/3 정도 작은 파괴확률을 가짐을 알 수 있다.

5. 결론

반타원 유한균열을 가진 원자로가 가압열충격 하중을 받는 경우에 대하여 확률론적 구조건전성 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 균열이 진전할 확률은 수명초기에는 약 0.7%, 말기에는 약 12.5 % 정도 된다.

- 반타원 유한균열의 경우는 2차원 무한균열과 비교하여 약 1/3 정도 작은 파괴확률을 보이고 있다.

- 결정론적인 방법에 의해서는 안전하다 하더라도 구조물에 내재된 여러 가지 불확실성에 의해 파괴가능성이 상존하므로 이러한 파괴가능성에 대한 정량적 평가가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. P.S. Jackson, D.S. Moeling, "Stochastic Simulation of PWR Vessel Integrity for Pressurized Thermal Shock Condition", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.106, (1984)

2. J.H.Kim et al. "Probabilistic Structural Integrity Assessment of a Reactor Vessel under Pressurized Thermal Shock", Journal of the Korean Nuclear Society, Volume 32, Number 2, pp99-107, (2000).

3. I.S.Raju and J.C.Newman, Jr, Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels, Journal of Pressure Vessel Technology, 1982

4. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Appendix G, 1992 Edition.

5. R.D.Cheverton and D.G.Ball, "OCA-P, A deterministic and probabilistic fracture mechanics code for application to pressure vessel", ORNL, (1984)

6. U.S. NRC Regulatory Guide 1.99, Rev.02, "Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials", (1988)

7. ANSYS, Ver. 5.1, Swanson Analysis System Inc.

표 1 확률변수의 통계모델

Probabilistic Parameter	Distribution Model	Mean	Standard Deviation	Range
Initial Flaw Depth	Marshall	-	-	0 ~ 50.8mm
Inside Surface Fluence $x10^{19}(n/cm^2)$	Gaussian	0.3 ~ 3.5	Mean*0.3	0.0 ~ 10.0
copper content	Gaussian	0.30%	0.03%	0.0 ~ 0.40
Nickel content	Gaussian	0.75%	0.10%	0.0 ~ 1.20
ERRTN	Gaussian	0	1	-3 ~ +3
ERKIC	Gaussian	1	0.15	0.55 ~ 1.45

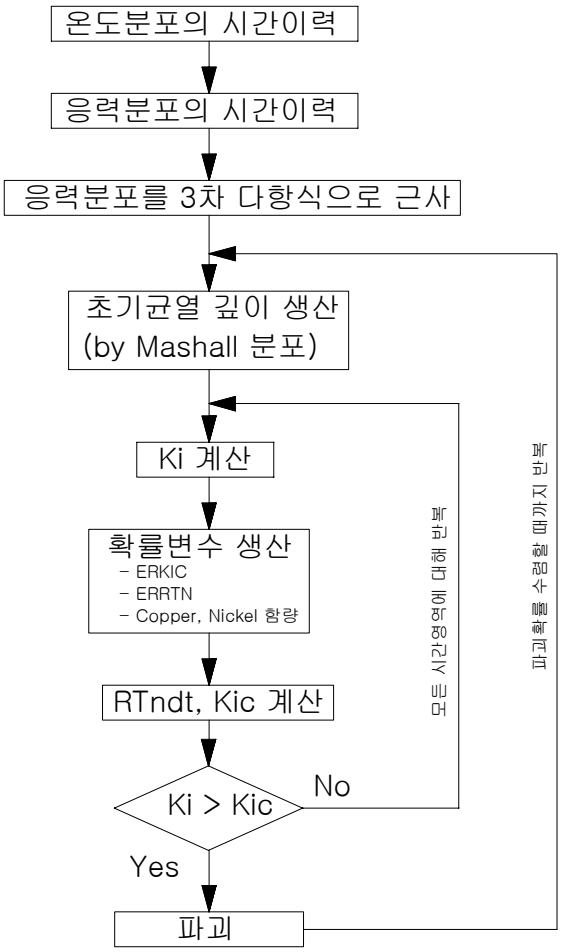

그림 1 확률론적 건전성 평가 절차

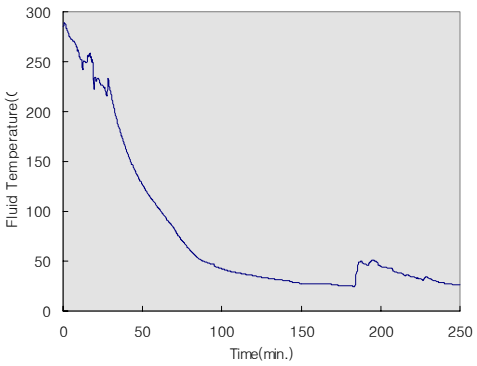

그림 2 냉각재 온도의 시간이력

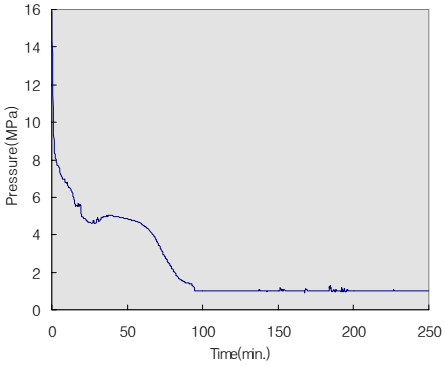

그림 3 원자로 내부압력의 시간이력

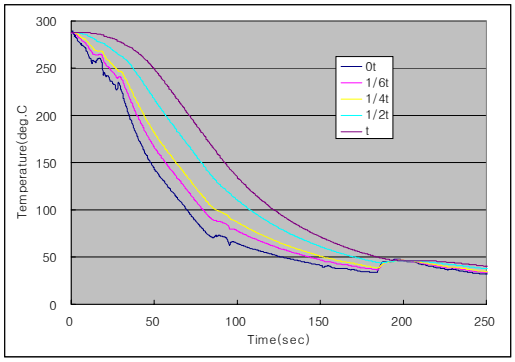

그림 4 원자로 벽 내부 온도의 시간이력

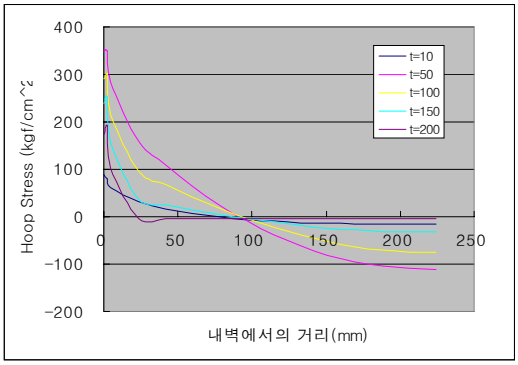

그림 5 원자로 벽 내부의 응력분포

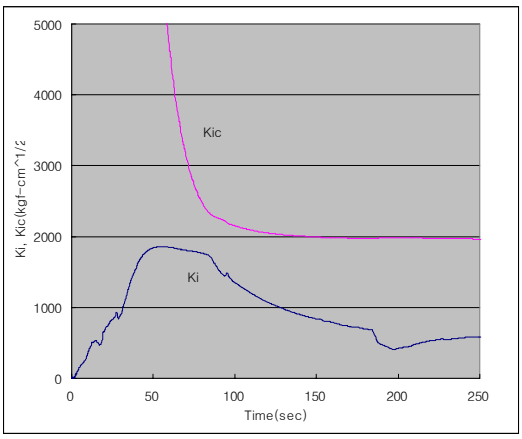

그림 6 응력확대계수 및 파괴인성치의 시간이력

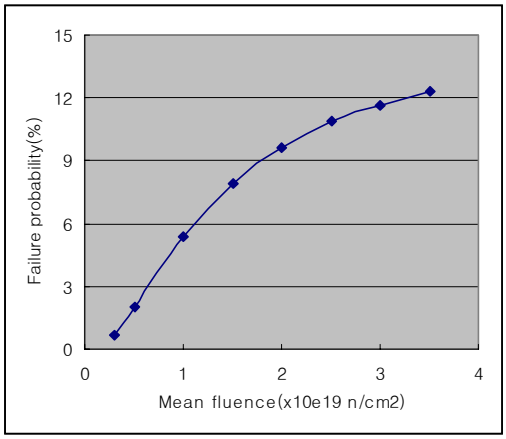

그림 7 중성자조사량에 따른 파괴확률

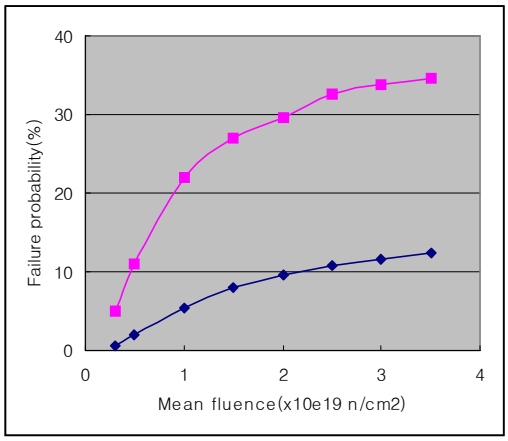

그림 8 무한균열과의 바교