

확률론을 이용한 중수로 압력관의 열화 건전성 평가 Integrity Assessment of Degradation Mechanism in Heavy Water Reactor Pressure Tube Using Probabilistic method

*선종하¹, #양영수², 최성남³

*J.-H.Sun¹, #Y.-S.Yang(ysyang@chonnam.ac.kr)², S.-N.Choi³

^{1,2} 전남대학교 기계공학과, ³ 한국전력연구원 원자력발전연구소

Key words : Monte Carlo Simulation, Probabilistic method, PDF, Pressure Tube

1. 서론

국내에서 사용중인 CANDU(CANada Deuterium Uranium) 원자로는 Fig. 1 과 같이 운전 중에 연료 교체가 가능하도록 설계된 압력관(Pressure Tube)에서 핵분열을 유도하여 필요한 에너지를 얻는 가압 중수로형 원자로이며, 높은 압력과 온도에서 핵분열로 발생된 방사선을 직접 조사받는 압력관은 원자로 설비 중 가장 안전성이 요구되는 기기이므로 국내 및 원자로 개발국인 캐나다의 법규에 의해 정기적으로 가동중검사를 수행하고 있다. 압력관 결함의 건전성 확보에 관한 연구는 캐나다의 AECL(Atomic Energy Canada Limited)과 COG(CANDU Owner's Group)를 중심으로 수행되고 있으며, CSA(Canade Standard Association)에서는 압력관의 건전성평가를 위한 규제코드를 2005년에 발간하였다[1].

규제 코드에 따른 결정론적 평가 방법은 파손/건전의 이분법적인 구분이 가능하기 때문에 적용이 쉽다. 그러나 검사 대상이나 검사 부위, 검사 주기를 결정함에 있어서 정량적인 근거는 제시할 수 없기 때문에 막대한 검사비용과 장시간의 검사시간이 요구되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 1970년대 중반부터 확률론적 파괴역학 개념을 도입한 건전성 평가가 연구되었다. 호기당 380 개가 존재하는 압력관은 확률론적 파괴역학의 적용이 보다 효율적으로 생각되나, 결함의 발생 및 성장 특성이 원자력 배관이나 압력용기와 상이하여 결함 평가에 대한 확률론적 연구는 미흡한 실정이다. 그래서 본 연구에서는 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 몬테카를로 시뮬레이션(MC)을 압력관의 건전성 평가에 사용하여, 측정된 결함을 토대로 존재 가능한 최대 크기의 결함을 예측하고, 예측된 결함을 이용하여 평가를 수행하는 알고리즘을 개발하였다.

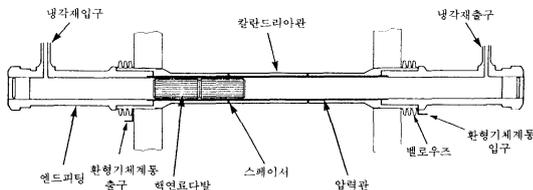


Fig. 1 Schematic diagram of CANDU fuel channel

2. 확률론적 건전성 평가

결함의 확률론적 평가는 기본적으로 결정론적 평가에 기반하며 결정론적 평가는 결함성장평가, 파괴개시평가 및 소성붕괴평가의 순서이다. 결함깊이는 식 (1)을 통해 검사 표본[2]의 97.5% 상한값(Upper Bound, UB)을 구하며, 결함 깊이는 확률론적 변수로 지정하여 난수로 가정한다. 그리고 설계 수명은 210000 시간, 평가 시작 시간은 13000 시간, Cool-down 은 772 시간당 1 회로 가정하였다.

$$(2c)_{UB} = \mu_c + z\sigma_c \quad (1)$$

여기서, σ 는 표준편차, μ 는 평균이고, $z=2.24$ (신뢰도 97.5%)이다.

2.1 확률론 변수

확률론적 건전성 평가는 결함 깊이를 확률론적 변수로 지정하여 난수로 가정한다. 난수 생성 및 표본의 분포를 고려한 확률 밀도 함수들은 다음 수식들에 의해 결정된다.

난수 생성은 Box-Muler Method 를 이용하여, 0 부터 1 사이의 표준균일분포를 갖는 난수 U_1, U_2 를 생성한다. 생성된 난수는 식 (2)~(4)를 사용하여 압력관 결함 평가에 가장 많이 쓰이는 정규분포, 대수정규분포, 지수분포 세 가지의 분포를 표현한 확률밀도함수(PDF)의 형태로 변환한다.[3]

- 표준정규분포

$$N_1 = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos(2\pi U_2)$$

$$N_2 = \sqrt{-2 \ln U_1} \sin(2\pi U_2)$$

$$\rightarrow N = \frac{N_1 + N_2}{2}$$

- 정규분포 : $x = \mu + \sigma N$ (2)

- 대수정규분포 : $y = e^x$ (3)

- 지수분포 : $z = -\mu \ln(N)$ (4)

여기서, σ 는 표준편차, μ 는 평균이다.

난수를 발생시켜 각 분포에 적합한 10^5 개의 결함 깊이를 생성하였고, 이 결함 깊이를 Fig.2 와 같이 분포화시켰다. 평균의 식 (2)~(4)가 올바른 난수의 변환식이라는 것이 증명되었다.

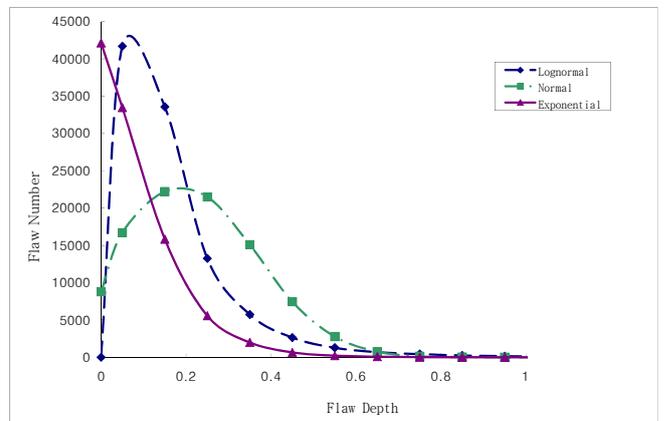


Fig. 2 Distribution curve by random numbers

2.2 확률론적 건전성 평가

검사 표본값이 갖는 분포는 확률도와 Anderson-Darling(A-D)검정을 통해 결정하였다. Fig.3 은 각 분포에 대한 확률도

를 도시한 것으로서, 그래프 내의 점들이 직선에 따라 분포될수록 A-D 검정값이 높게 나오며, 대수정규분포의 A-D 검정값이 세가지 분포 중 가장 높은 0.915 를(정규분포 : 0.733, 지수분포 : 0.854) 가지므로 가장 적합함을 확인할 수 있다. Fig.4 는 가장 적합하다고 판정된 대수정규분포에 대한 확률밀도함수와 확률도, 그리고 생존함수와 위험 함수를 확인할 수 있다. Fig.4 에서 확률밀도함수에 따라 대수정규분포를 이분다는 것과, 확률도를 통해 적합도를 확인할 수 있다

대수정규분포에 대해 회귀분석을 실행한 Table 1 의 입력을 이용하여 결함 깊이는 검사 표본의 97.5% 상한값을, 결함 깊이는 난수로 생성된 확률론적 변수를 구한 다음 식 (5)에 따라 평가를 수행한다.

$$Tube_{all-ig} \leq \frac{H_{all-ig}}{N_{tube}} \quad (5)$$

Tube_{all-ig} = 계산된 파손확률
 H_{all-ig} = Single Source 에 대한 허용 파손확률(0.00167)
 N_{tube} = 380 개

식 (5)를 만족하는 결함(Case 1)과 불만족 결함(Case 2)의 입력값을 Table 2 에 명시하였다.

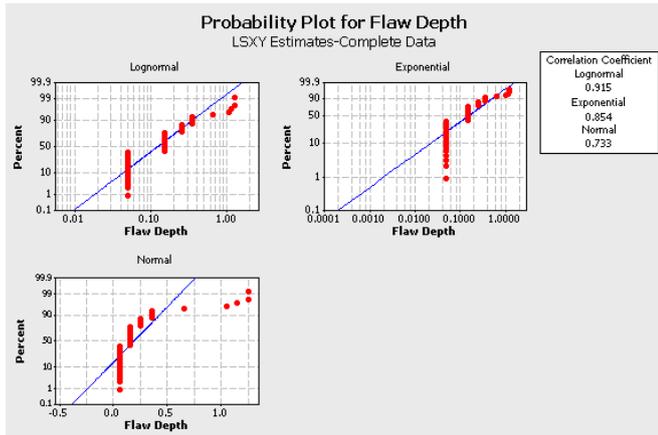


Fig. 3 Optimizing distribution by Probability Plot

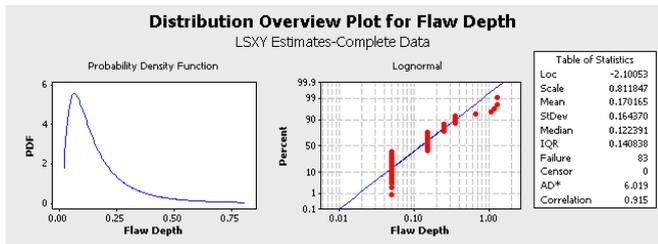


Fig. 4 Distribution Overview Plot for Flaw Depth

Table 1. Details of probabilistic input data

Probabilistic Method	Case 1		Case 2	
	Mean	STD	Mean	STD
Axial length(c)	0.9	0.05	1.69	1.36
Lognormal-Depth(a)	-1.851	0.332	-0.664	0.147

3. 평가 결과

확률론적 건전성 평가에서 설계 수명에 대해서 평가가

불만족이면 식(5)를 만족하는 가장 큰 결함 깊이를 식(6)에 따라 내림차순으로 5011 번째의 결함 깊이에 대해 파손되지 않는 최대 수명과 최대 Cool-down 횟수를 산출한다. 식 (6) 은 열화(Degradation)에 의한 허용 파손 확률을 파손되는 결함의 개수로 변환하는 식이다.

$$H_{all-ig} (0.00167) \times RandomNum(10^5) \times ReactorYear(30) + 1 = 5011 \quad (6)$$

Table 2 은 두 종류의 입력에 따른 건전성 평가 결과이다. Case 1 은 평가 만족이고, Case 2 는 평가 불만족이기 때문에 이분법을 적용하여 압력관의 남은 수명과 남은 Cool-down 횟수를 산출하였다. Cool-down 은 772 시간당 1 회 실행되기 때문에 Case 1 은 총 255 회가 남았고, Case 2 는 총 24 회가 남았음을 확인할 수 있다.

Table 2. Details of probabilistic output data

Probabilistic Method	Case 1	Case 2
Axial length(UB)	1.012 mm	4.736 mm
Remained Life	197000 hours	18528 hours
Remained Cool-down	255 times	24 times

4. 결론

본 연구는 중수로 압력관에 존재하는 결함의 건전성 평가에 확률론을 적용하기 위한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MC 법을 적용시켜 압력관의 건전성을 평가하는 알고리즘을 구현하였다.
- (2) 검사 표본의 정확한 분석을 위해 가정한 분포를 A-D 검정으로 적합도를 검정하였다.
- (3) 확률론적 건전성 평가를 실행하여 압력관의 남은 수명과 사용 가능한 Cool-down 횟수를 산출하였다.

후기

본 연구는 한국 전력연구원과 한수원(주)의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. CSA, "Technical requirements for in-service evaluation of zirconium alloy pressure tubes in CANDU reactors", CAN/CSA-N285.8-05", 2005
2. AECL, "Assessment Document-Summary of Engineering Assessments in Support of Channel Shifting", 59REF-31100-ASD-007, 2006
3. J.D. Son, and D.J.Oh, "Failure Probability Evaluation of Pressure Tube using the Probabilistic Fracture Mechanics", Journal of the KOSOS, Vol. 22, No. 4,2007