

확률론적 파괴역학 수법의 적용성 검토

이준성*(경기대 전자기계공학부), 곽상록(성균관대 원), 김영진(성균관대 기계공학부)

Application of Probabilistic Fracture Mechanics Methodology

Joon-Seong Lee(Kyonggi Univ.), Sang-Log Kwak, Young-Jin Kim(SungKyunKwan Univ.)

ABSTRACT

For major structural components periodic inspections and integrity assessments are needed for the safety. However, many flaws are undetectable because sampling inspection is carried out during in-service inspection. Probabilistic integrity assessment is applied to take into consideration of uncertainty and variance of input parameters arise due to material properties and undetectable cracks. This paper describes a Probabilistic Fracture Mechanics(PFM) analysis based on the Monte Carlo(MC) algorithms. Taking a number of sampling data of probabilistic variables such as fracture toughness value, crack depth and aspect ratio of an initial surface crack, a MC simulation of failure judgement of samples is performed. For the verification of this analysis, a comparison study of the PFM analysis using a commercial code, mathematical method is carried out and a good agreement was observed between those results

Key Words . PFM(확률론적 파괴역학), PDF(확률밀도 함수), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), FORM(일계이차 모멘트법), Failure Probability(파손확률), Integrity Evaluation(건전성평가), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Fracture Toughness(파괴인성치)

1. 서론

지금까지의 파괴역학에 있어서는 기기에 작용하는 응력, 균열의 길이 및 재료의 파괴인성치 등과 같은 각종 파라미터를 하나의 확정 값으로 취급하여 해석을 수행하였으나, 실제의 파괴현상을 지배하는 각종 파라미터는 존재 확률 즉 분산을 갖는다 따라서 안전여유를 정량적으로 평가하기 위해서는 구조 신뢰성공학에 이용되고 있는 파손하지 않을 확률, 즉 신뢰도와 같이 파손에 도달하는 확률을 표시하는 것이 합리적이고 현실적이다. 즉 하중과 재료강도의 특성 등 불확실성을 고려하여, 기기나 구조물의 안전여유를 파손확률(failure probability)이라고 하는 척도로서 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이러한 관점으로부터 균열을 취급하는 기존의 결정론적 파괴역학(Deterministic Fracture Mechanics, DFM) 이론에 확률론적 요소를 도입하여 파손확률을 정량적으로

예측하기 분야를 확률론적 파괴역학(Probabilistic Fracture Mechanics, PFM)이라 하며, 원자력발전소, 항공기의 안전성평가 등에 사용되고 있다. DFM에서는 파괴인성치(fracture toughness, K_{Ic})에 대한 응력확대계수(stress intensity factor, K_I)의 비를 안전여유로 정의하여, 이 값을 기준으로 안전성 평가를 하고 있다. 그러나 Fig. 1에 나타난 바와 같이 동일한 안전여유를 갖는 경우에도 파손확률(failure probability)은 분포형태에 따라 변할 수 있다.

본 연구에서는 재료물성치 또는 작용하중과 같이 분산 또는 불확실성이 포함된 평가의 입력자료와 미검출 결함에 대한 영향을 고려하여 가동기간에 따른 파손확률 예측을 위한 기법을 소개하였으며, 실구조물의 적용을 위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하였다. 또한 해석 결과의 검증에 위해 간략한 모델을 구성하여 수치적분 및 기타 상용코드⁽¹⁾의 결과와 비교하였다.

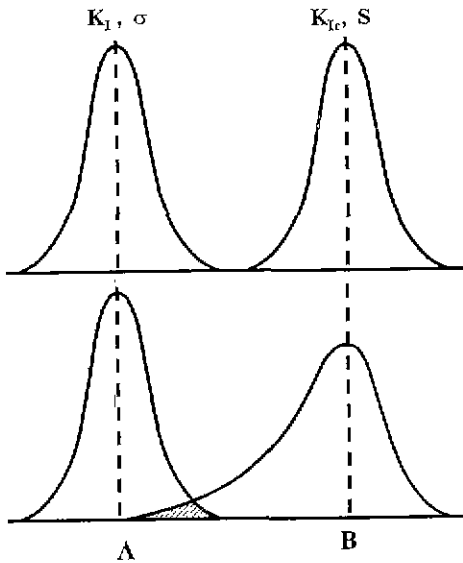


Fig. 1 Different failure probabilities at the same safety margin

2. 결정론적 건전성평가

2.1 균열성장량의 계산

원자력발전소의 주요기기에는 반복적으로 발생하는 과도상태(transient)에 의해 피로응력이 발생하여 응력집중부에서의 균열발생 및 진전을 유발한다. 이때 균열성장량의 계산은 식 (1)과 같이 주어지는 Paris 식⁽²⁾을 사용하였다.

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \quad (1)$$

여기서, da 는 균열성장량, N 은 평가기간 중 발생 가능한 과도상태의 반복횟수, ΔK 는 응력확대계수 변화량, C 와 n 은 재료에 따라 결정되는 상수이다.

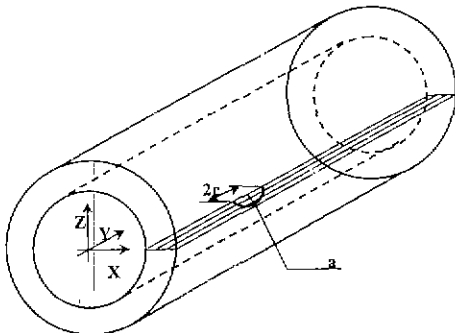


Fig. 2 Pipe geometry with axial surface flaw

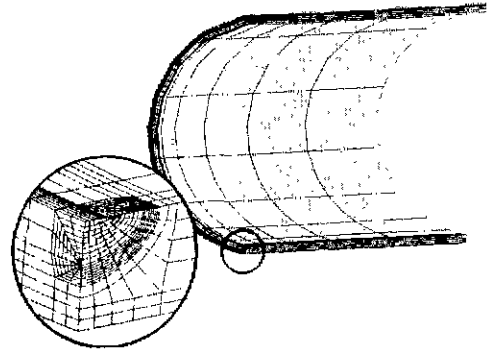


Fig 3 Model for the finite element analysis

2.2 응력확대계수의 계산

평판에 존재하는 결함의 응력확대계수계산은 수학적으로 가능하나 압력용기, 배관, CANDU 압력관 및 증기발생기 세관과 같은 실 구조물에 대한 응력확대계수계산에는 Raju-Newman의 실험식⁽³⁾, ASME Sec XI⁽⁴⁾, 유한요소해석⁽⁶⁾ 등을 수행하여 이의 결과를 활용하여야 한다. 본 연구에서는 Fig 2와 같이 내압이 작용하는 형상에 대하여 여러 가지 균열길이에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 DB화하여 이용하였다 Fig 3에 유한요소 해석시 사용된 모델의 예를 나타내었으며, 대칭조건을 이용하여 1/4만을 모델링하였다. 반면 결과의 검증을 위한 해석모델에서는 타 상용코드⁽¹⁾ 및 수식과의 비교를 위해 Hand book내용⁽⁵⁾ 및 Raju-Newman 방법을 사용하였다.

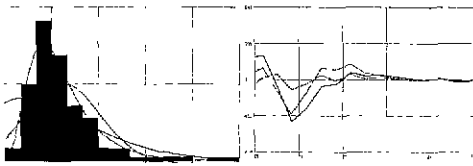
2.3 안전성평가

안전성평가에는 불안정파괴평가와 소성붕괴평가 기준이 있으며, 불안정파괴평가에는 재료의 파괴인성치와 결함의 존재로 인한 응력확대계수를 이용하였다. 소성붕괴평가 기준도 불안정파괴평가와 동일하며 평가변수로는 작용응력과 소성붕괴응력을 사용하였다

3. 파손확률 예측

3.1 분산을 고려한 자료입력

주요 입력자료의 분산을 고려하기 위해 확률변수의 경향분석으로 얻어진 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 유도하여 이를 입력자료로 활용하였으며, PDF 유도과정의 예를 Fig. 4에 나타내었다. 그림 (a)와 같이 구간에 따른 확률변수의 빈도를 히스토그램으로 표시한 후, 이를 복수개의 확률밀도함수로 곡선적합 하였다. (b)에서는 곡선적합에 대한 각각의 오차계산을 수행하고, 오차를 통한 최적의 확률밀도함수(c)를 결정한다.



(a) Histogram generation (b) Error estimation curve fitting



(c) Determination of PDF

Fig 4 PDF derivation from raw data

3.2 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 파손확률 예측

몬테카를로 시뮬레이션은 확률변수의 반복적인 추출기법을 이용하여 주어진 조건을 만족하는 비율을 구하는 기법으로 수학, 통계, 공학 등 다른 분야에 널리 사용되고 있다. 다양한 기법중 본 연구에서는 일반 몬테카를로(crude Monte Carlo, MC)법과 층별 몬테카를로(Stratified Sampling Monte Carlo, SSMC)⁽⁷⁾법을 사용하였다. 파손확률의 계산에는 FPES (Failure Probability Estimation System)로 명명된 내부 개발코드를 이용하였다.

4. 사례연구

개발된 평가모델의 검증에 위해 원전배관에 대한 사례연구를 수행하였다. 결과의 검증에는 PRAISE 코드⁽¹⁾와의 해석 결과와 비교하였다. 또한 해의 수학적 도출이 가능한 간략화된 모델에 대한 해석을 수행하여 검증하였으며, 이를 바탕으로 실제 구조물에 대한 해석을 수행하였다

4.1 평가모델의 검증을 위한 해석

Fig 2와 같이 축방향 표면결함이 존재하는 배관에 내압이 작용할 경우의 소성붕괴확률을 MC 시뮬레이션 및 수치적분법을 이용하여 계산하였으며, 주요 입력조건은 다음과 같다.

- 결함의 깊이비(a/t) : Log-Normal 분포, 평균 0.049, 표준편차 0.244
- 결함의 형상비(a/c) : 0.2

- 관의 두께(t) : 4.1 mm
- 관의 내부반지름(R_i) : 53 mm
- 작용 압력(P_i) : 11.9 MPa
- 유동응력(σ_{flow}) : 626.4 MPa

파손기준은 원주방향 작용응력(σ_h)이 소성붕괴응력(σ_h^c)을 초과하는 경우로 가정하였으며, 수학적 검증을 위해 균열진전은 고려하지 않았다. 소성붕괴 응력계산에는 식(2), (3)을, 수치적분에는 식(4)를 사용하였다.

$$\sigma_h = \sigma_f \left(\frac{1 - a_f/t}{1 - a_f/t M} \right) \quad (2)$$

여기서, M 은 보정계수로 다음과 같이 계산된다

$$M = \sqrt{1 + 1.255 \left(\frac{c^2}{r_m t} - 0.0135 \frac{c^4}{(r_m t)^2} \right)} \quad (3)$$

$$g(a/t) = \sigma_h'(a/t) - \sigma_h \quad (4)$$

식(4)에 식(2), (3)을 대입하여 식(4)를 만족하는 a/t 값을 계산하면 0.88이 되며, 주어진 a/t 의 분포에서 a/t 가 0.88이상인 영역을 직분하면 파손확률은 6.2×10^{-3} 으로 계산된다. 반면 MC 시뮬레이션을 수행하여 평균값을 계산하면 10,000개의 수행중 62개의 파손이 발생하여 위에서 계산된 값과 동일한 파손확률이 얻어진다.

4.2 상용해석 코드와 비교를 위한 해석

원주방향 결함이 존재하는 배관의 가동기간에 따른 소성붕괴 확률을 계산하였으며, 상용해석 코드인 PRAISE코드와 입력조건을 일치시키기 위해 관용단 위계를 사용하였다 주요 입력조건은 다음과 같다

- 결함의 깊이비(a/t) : 지수함수분포, 평균 0.2
- 결함형상비 역수(c/a) : 지수함수분포, 평균 5.0
- 관의 두께(t) : 1 inch
- 관의 내부반지름(R_i) : 5 inch
- 작용 압력(P) : 1.5 ksi
- 피로균열진전 상수(C) : 9.0×10^{-9}
- 피로균열진전 지수(n) : 4.0
- 유동응력(σ_{flow}) : 40 ksi
- 과도상태 발생 : 년간 5회

파손기준으로는 소성붕괴 및 균열관통을 적용하였으며, 소성붕괴조건을 식(5)~(7)에 나타내었다.

$$A_c \geq \left(1 - \frac{\sigma_h}{\sigma_{flow}} \right) \times A_p \quad (5)$$

여기서, σ_h 는 원주방향응력, A_c 와 A_p 는 각각 균열과 배관의 면적으로 다음과 같이 계산하였다.

$$A_c = a \times c \times (2 + \frac{a}{R_i}) \quad (6)$$

$$A_p = \pi \times t \times (2R_i + t) \quad (7)$$

여기서, c 는 균열 반길이(half crack length)이다. 내부 계발 코드에서는 일반 MC기법과 SSMC기법을 동시에 사용하였으며, 두 결과는 Fig 5에 나타난 바와 같이 일치하였다

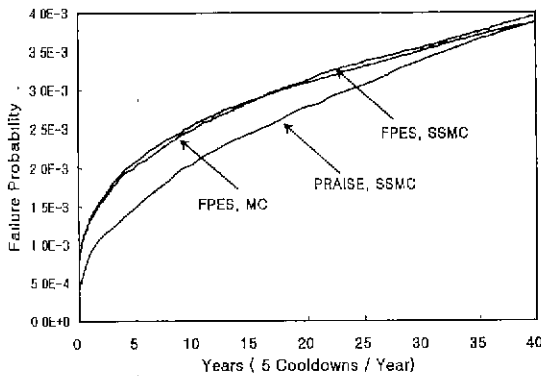


Fig 5 Comparison of failure probability

4.3 원전 배관의 파손확률 예측

균열진전을 고려하여 파손확률의 변화를 구하기 위한 해석을 수행하였다.

해석의 주요 입력조건은 다음과 같다.

- 결함의 깊이비(a/t) : 지수함수분포, 평균 0.1
- 결함의 형상비(a/c) : 지수함수분포, 평균 0.15
- 파괴인성치(K_{Ic}) : Log-Normal 함수분포, 평균 50.0, 표준편차 10.0
- 관의 두께(t) : 5.0 mm
- 관의 내부반지름(R_i) : 50.0 mm
- 작용 압력(P) : 15.0 MPa
- 피로균열진전 상수(C) : 4.0×10^{-10} m/cycle
- 피로균열진전 지수(n) : 3.3
- 과도상태 발생 : 연간 5회

MC기법 및 SSMC기법을 이용한 결과를 Fig. 6에 반복계산 횟수와 함께 표기하였다. 연간 5회의 과도상태를 가정하여 해석하면 40년 수명 후 파손확률은 9.5×10^{-4} 로 원전배관에서 요구하는 허용파손확률인 10^{-3} 의 조건을 만족하였다.

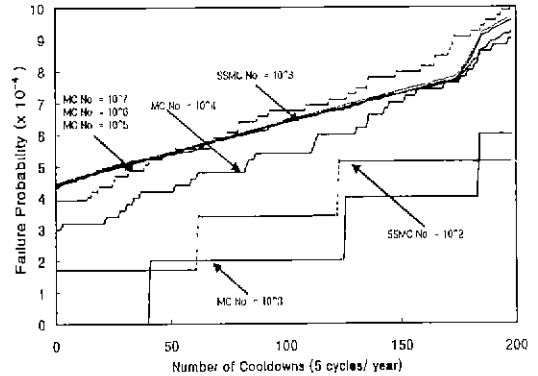


Fig. 6 Failure probability as a function of time

결론

본 연구에서는 확률론적 파괴역학의 적용을 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) MC 시뮬레이션 모듈을 구성하였으며, 다양한 해석모델에 대한 사례연구를 수행하였다.
- (2) 모듈의 검증을 위해, 간략화된 모델에 대한 해석 결과를 상용코드와 비교하여 서로 일치함을 알 수 있었다.
- (3) 실제 배관에 대한 사례연구결과 40년 설계수명 동안 안전성을 확보하였다.

참고문헌

- 1 Lawrence Livermore National Laboratory, "pc-PRAISE A Probabilistic Fracture Mechanics Computer Code for Piping Reliability Analysis," NUREG/ CR-5864, 1992
- 2 Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Trans ASME J Basic Eng Ind, Vol D85, 1963
- 3 Newman J. C. and Raju, I. S., "Stress Intensity Factors for Internal surface cracks in Cylindrical Pressurized Vessels," Transaction of the ASME Vol 102, 1980
- 4 ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section XI, Appendix A-1000, 1992
- 5 Zahoor, A., "Ductile Fracture Hand -book. Vol I, II, III" EPRI Report NP-6301-D, Electric Power Research Institute, 1989
- 6 이진석, 김영진, 석창성, 박윤원, "CANDU 압력관의 건전성평가를 위한 결함해석," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제3호, pp 731-740, 1995.
- 7 Lawrence Livermore National Laboratory, "Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant," NUREG/ CR-2189, 1981