

TDFM 및 MCM을 사용한 고온설비의 위험도 평가

이진상 · 류우석* · 윤기봉

중앙대학교 기계공학부 · *한국원자력연구소

1. 서 론

결정론적 파괴역학에 기반을 두고 행해져 왔던 기존의 수명평가법은 강도, 파괴인성 등과 같은 재료 물성값에 대해서는 하한값을, 하중, 결합형상, 균열진전속도 등에 대해서는 상한값을 적용하여 안전여유를 고려한 하나의 대표값으로 고정되어 있다는 가정 하에서 이루어져 왔다. 그러나 이러한 값들은 실제로는 어떤 값을 가질 확률분포로 존재하며, 기존 결정론적 파괴역학을 적용하여 수명평가를 수행할 경우 적용 방법은 용이하나 그 결과는 실제 파손과는 거리가 먼 지나치게 보수적인 결과를 예측할 수 있다. 따라서 구조물의 파손을 보다 현실적이고 정량적인 방법으로 예측하기 위해서는 변수들의 분포 확률을 고려한 확률론적 파괴역학(probabilistic fracture mechanics)의 개념을 도입하여야 한다.

이러한 확률 개념을 도입한 파괴역학은 1970년대부터 연구되기 시작하여 1980년대에는 미국의 원자력 발전소에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되었으며, 현재는 원자력 발전설비에 대한 다양한 확률파괴 프로그램이 개발되어 있다.^{1),2)} 그러나, 고온에서 사용되는 재료의 시간 의존적 변형 거동인 크리프(creep, Time Dependent Fracture Mechanics, TDFM)에 대한 확률적인 접근은 아직 활성화되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고온에서 사용되는 후속 압력관의 크리프 균열성장 파손확률을 몬테카를로법(Monte Carlo method, MCM)을 이용하여 평가하였으며, 주요 변수들이 파손확률에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다.

2. 확률론적 수명평가 방법

2.1 해석 대상

본 연구에서는 650℃의 고온에서 사용되는 외경 355.6mm, 내경 309mm를 갖고 6.89MPa의 내압을 받는 압력관의 내부에 길이방향으로 균열이 존재하는 경우에 대하여 크리프 균열성장에 의한 파손확률을 예측하였다. Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 압력관 및 그 결합의 형상을, Table 1에는 압력관 재료인 316 스테인리스강의 주요 기계물성을 나타내었다.

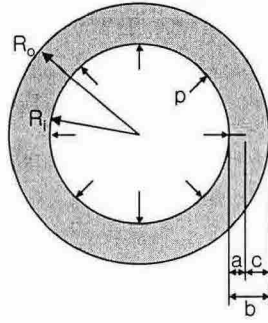


Fig. 1 해석에 사용된 압력관 및 결함 형상

Table 1 316 스테인리스강의 650°C에서의 주요 기계물성

Youngs modulus, E (MPa)	155,000
Creep coefficient, A ($\text{MPa}^{-n}\text{hr}^{-1}$)	1.55E-28
Creep exponent, n	11.5
CCG coefficient, H	1.11E-7
CCG exponent, q	0.772

2.2 크리프 균열성장 수명평가

균열 선단에서의 크리프 거동을 특성화하는 파괴 매개변수로는 C_t 가 사용되며 식 (1)과 같이 표시된다.³⁾

$$C_t = \frac{4\alpha\beta\tilde{r}_c(\theta, n)(1-\nu^2)K^4}{E(n-1)} \frac{F'}{W} \frac{F'}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} t^{-\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (1)$$

이 때 C^* 는 정상상태에서의 크리프 거동을 특성화하는 매개변수로서 J-적분과의 유사성에 의하여 EPRI 핸드북⁴⁾으로부터 식 (2)와 같이 유도된다.

$$C^* = A(1 - \frac{a}{b})ah_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} p \frac{R_i/b + a/b}{1 - a/b} \right)^{n+1} \quad (2)$$

이때 h_1 은 a/b , n , R_i/b 의 함수로서 EPRI 핸드북으로부터 구할 수 있다. 위의 식에 의해서 매개변수가 결정되면 식 (3)과 같은 크리프 균열성장식으로부터 균열성장률을 결정할 수 있다.

$$da/dt = H C_t^q \quad (3)$$

본 연구에서는 균열 깊이가 압력관 두께의 75%까지 성장하는 경우 파손이 발생하는 것으로 판단하였다.

2.3 확률론적 크리프 균열성장 수명평가

본 연구에서는 기존의 문헌에 발표되어 있는 316 스테인리스강의 크리프 물성에 대한 통계적 처리를 통하여⁵⁾ 확률분포함수를 결정하였으며 크리프 계수 및 크리프 균열성장 계수는 대수정규분포로, 초기균열길이는 문헌에 의하여¹⁾ 지수분포로 결정하였다. 해석에 사용된 확률분포함수의 평균과 표준편차는 Table 2와 같다. Fig. 2에 보인 MCM 절차와 같이 특정 확률밀도함수를 갖는 확률변수를 추출한 후 결정론적 파괴역학의 파손 발생유무를 판단하는 절차를 반복 수행하여 최종적으로 시간에 따른 파손확률을 평가하였다.

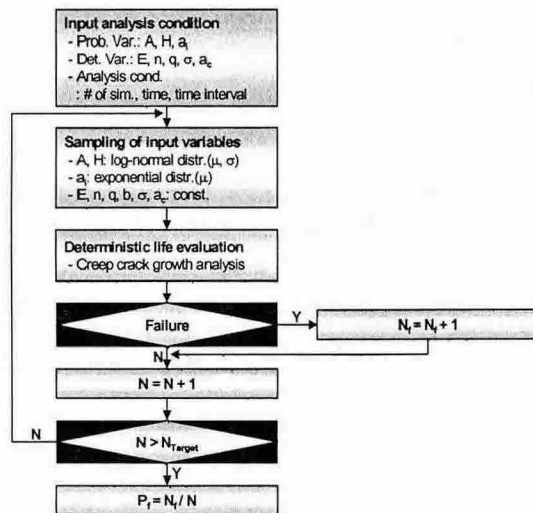


Fig. 2 몬테카를로 시뮬레이션 방법 적용 절차

3. 해석 결과

3.1 파손 확률

Fig. 3에는 위의 해석조건에서 수행된 몬테카를로 방법의 결과로서 가동 시간에 따른 재료의 파손확률을 결정론적 방법에 따른 결과를 함께 표시하였다. 결정론적 방법에 의한 파손수명인 16300시간 가동 후의 파손확률은 약 29.3%인 것으로 평가되었으며, 결정론적 방법에 의한 수명평가는 상당히 보수적임을 알 수 있다.

Table 2 해석에 사용된 확률변수

Prob. Variable	PDF type	Mean	STD
Creep coefficient, A	Log-Normal	1.55E-28	1.00E-28
CCG coefficient, H	Log-Normal	1.11E-7	1.28E-7
Initial crack size, a_i (mm)	Exponential	5	-

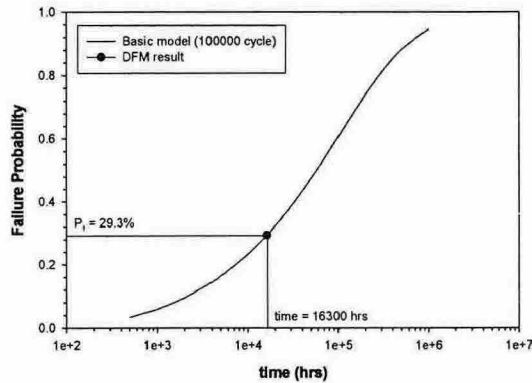


Fig. 3 몬테카를로법을 이용한 압력관의 파손확률

3.2 민감도 분석 (Sensitivity analysis)

효율적인 파손확률 평가를 하기 위해서는 많은 입력 자료를 필요로 하지만 충분한 자료를 획득하는 것에는 많은 어려움이 있다. 각각의 입력 변수가 파손확률에 미치는 영향, 즉 변수의 민감도(sensitivity)를 결정할 수 있다면 보다 효율적인 파손확률 평가가 가능하다. 즉, 결정된 민감도를 통해 파손 확률에 지배적인 변수를 파악할 수 있고, 해당 변수의 신뢰성을 높이기 위한 연구를 집중할 수 있을 것이다.

Fig. 4부터 Fig. 6에는 본 연구에서 수행된 민감도 해석 결과를 나타내었다. Fig. 4에는 기본모델에서 확률변수로 주어진 초기균열길이, 크리프 계수, 크리프 균열성장 계수를 각각 평균값으로 고정하여 해석한 결과를 나타내었다. 해석 결과 그림에서처럼 초기균열길이 파손확률에 상당히 큰 영향을 주는 것으로 평가되었으며, 초기결함 여부 및 가동중 검사에서 결함 검출의 정확성이 파손확률 평가에 매우 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 반면 크리프 계수와 크리프 균열성장 계수는 균열 성장이 크지 않은 가동 초기에는 파손확률에 큰 영향을 주지 않지만, 가동 후 일정 시간이 증가한 후 균열성장률이 증가하는 영역에서는 파손확률에 중요한 영향을 주는 것으로 판단되었다. Fig. 5와 Fig. 6에는 크리프 계수와 크리프 균열성장 계수의 평균값과 표준편차 값을 각각 2배와 반으로 변화시켜 가며 해석한 결과를 각각 나타내었다. 크리프 계수와 크리프 균열성장 계수의 절대적인 값인 평균값의 변화뿐만 아니라 표준편차의 변화도 파손

확률에 영향을 주는 것으로 평가되었으며, 크리프 균열성장 계수가 파손확률에 미치는 영향이 크리프 계수보다 더 큰 것으로 평가되었다.

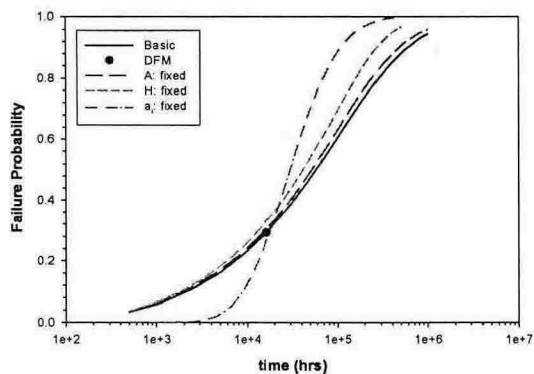


Fig. 4 특정 확률변수를 고정한 경우의 파손확률

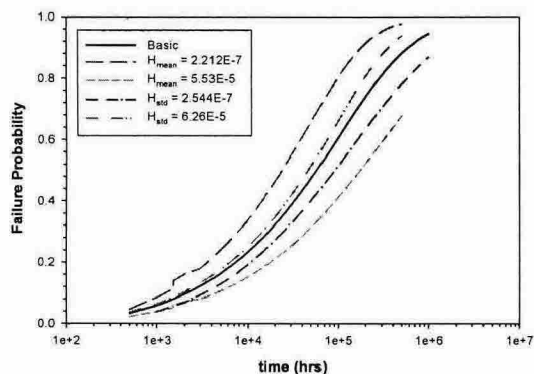


Fig. 5 크리프 균열성장 계수의 평균과 표준편차 변화에 따른 파손확률

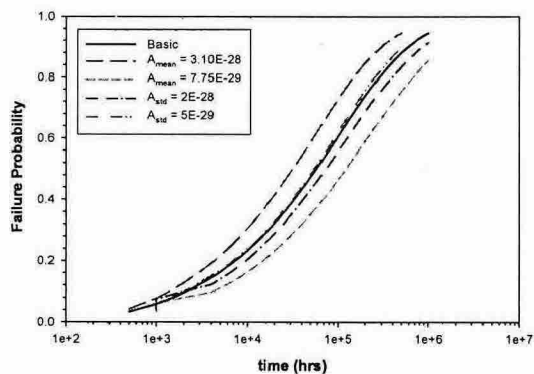


Fig. 6 크리프 계수의 평균과 표준편차 변화에 따른 파손확률

4. 결 론

본 연구에서는 압력관에 대하여 MCM을 이용한 수명평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MCM을 이용하여 고온에서 사용되는 후육 압력관의 크리프 균열성장에 의한 파손확률을 평가하였다.
- (2) 확률변수의 민감도를 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였으며, 크리프 균열성장 계수가 크리프 계수보다 파손확률에 미치는 영향이 큰 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 기술개발 중장기 계획사업의 위탁 연구인 "원자력 재료 고온물성 DB구축을 위한 고온 균열성장 거동 평가용 모델 개발" 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] C. Sundararajan, "Probabilistic Structural Mechanics Handbook", Champman & Hall, 1995
- [2] D. O. Harris, "A Probabilistic Fracture Mechanics Computer Code for Piping Reliability Analysis", LLNL report, NUREG/CR-5864, 1992
- [3] J. L. Bassani, D. E. Hawk and A. Saxena, "Evaluation of the C_t Parameter for Characterizing Creep Crack Growth Rate in The Transient Regime", ASTM STP 995, pp.7-26, 1986
- [4] V. Kumar, M. D. German and C. F. Shih, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI NP 1931, 1981
- [5] A. H.S. Ang and W. H. Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", John Willey & Sons, 1984
- [6] R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM International, 1989