

몬테카를로법을 이용한 고온 내압 요소의 크리프 균열성장 파손확률 평가

이진상 · 윤기봉^{†*}

중앙대학교 대학원 · *중앙대학교 기계공학부
(2005. 7. 26. 접수 / 2006. 2. 6. 채택)

Evaluation of Creep Crack Growth Failure Probability for High Temperature Pressurized Components Using Monte Carlo Simulation

Jin Sang Lee · Kee Bong Yoon^{†*}

Graduate School of Chung-Ang University

*Division of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received July 26, 2005 / Accepted February 6, 2006)

Abstract : A procedure of estimating failure probability is demonstrated for a pressurized pipe of CrMo steel used at 538°C. Probabilistic fracture mechanics were employed considering variations of pressure loading, material properties and geometry. Probability density functions of major material variables were determined by statistical analyses of implemented data obtained by previous experiments. Distributions of the major variables were reflected in Monte Carlo simulation and failure probability as a function of operating time was determined. The creep crack growth life assessed by conventional deterministic approach was shown to be conservative compared with those obtained by probabilistic one. Sensitivity analysis for each input variable was also conducted to understand the most influencing variables to the residual life analysis. Internal pressure, creep crack growth coefficient and creep coefficient were more sensitive to failure probability than other variables.

Key Words : creep crack growth(CCG), PFM(probabilistic fracture mechanics), Monte Carlo simulation, residual life prediction, high temperature

1. 서 론

고온에서 사용되는 플랜트 설비 요소의 기존의 잔여수명 평가는 결정론적 고온파괴역학에 기반을 두고 행하여 왔다. 이때 강도, 고온파괴인성, 크리프 균열진전 저항성 등과 같은 파괴저항을 나타내는 재료 물성값에 대해서는 하한값을, 하중, 결함 크기 등의 파괴 촉진 변수에 대해서는 상한값을 고정된 대표값으로 가정하여 적용함으로써 안전률을 고려하였다. 이와 같이 결정론적 파괴역학을 적용하여 수명평가를 수행할 경우 적용 방법은 용이하나 그 결과는 실제 파손 조건과는 거리가 먼 지나치게 보수

적인 결과를 줄 수 있다. 한 공학문제에 포함된 많은 역학적 현상들을 확정론적인 접근법으로만 해석하려면 관련된 변수값들의 정확한 예측이 필요하지만 이에 많은 어려움이 있다. 따라서 고려되는 변수값들이 대표값을 기준으로 어느 정도 변하는 경우에는 수용할 수 있는 오차 범위 안에서 일정 정도의 여유강도를 줄 수 있도록 변수값의 상한값 또는 하한값을 선택하여 적용하는 방법을 이용하여 왔다. 엄밀히 얘기하면 변수값들은 일정하다고 가정된 기대값을 중심으로 임의적으로 분산되어 있는 것으로서 어떤 값을 가질 확률분포로 존재한다. 따라서 구조물의 잔여수명을 보다 현실적이고 정량적인 방법으로 계산하기 위해서는 변수들의 분포 확률을 고려한 확률론적 고온파괴역학의 개념을 도입하여야 한다. 확률 개념을 도입한 파괴역학은 1970년대

[†]To whom correspondence should be addressed.
kbyoon@cau.ac.kr

부터 연구되기 시작하여 1980년대에는 미국의 원자력 발전소에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되었으며, 원자력 발전설비의 주요 요소에 대한 다양한 확률과피 프로그램이 개발되어 있다.^{1,2)} 그러나, 고온에서 사용되는 재료의 시간 의존적 변형 거동인 크리프에 기인한 크리프 균열성장에 의한 잔여수명 평가의 확률적인 접근은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 고온에서 사용되는 고온 플랜트 요소의 크리프 균열성장에 의한 파손 확률을 몬테카를로법을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 이를 위하여 본 연구팀의 크리프 균열성장 실험 데이터와 문헌에 보고된 데이터¹⁰⁻¹⁸⁾를 정리하여 CrMo 저합금강 재료의 고온 크리프 균열성장 물성값에 대한 통계적인 분석을 수행하여 재료물성값의 확률 분포를 결정하였다. 결정된 확률밀도함수를 이용하여 몬테카를로법을 적용하여 시간에 따른 고온 요소의 파손 확률을 평가하는 절차를 제시하였다. 본 연구에서 제시한 파손 확률 평가 절차를 이용하여 내압을 받는 배관의 내부에 축방향 균열이 존재할 때 크리프 균열성장에 의한 수명 소진으로 파손될 확률을 평가하였다. 또한 주요 변수들이 내압 배관의 잔여수명에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 각 변수에 대한 민감도 분석을 수행하여 잔여수명 소진에 보다 지배적인 영향을 주는 확률 변수를 결정하였다.

2. 해석 모델

본 연구에서는 538°C의 고온에서 사용되는 외부 반경 355.6mm, 내부 반경 309mm를 갖고 6.89MPa의 내압을 받는 실린더형 튜브의 내부에 축방향으로 길이가 매우 긴 내부 표면균열이 존재하는 경우에 대하여 크리프 균열성장에 의한 수명 소진 파손확률을 예측하였다. Fig. 1에는 본 연구에서 해석한 실린더형 내압 튜브 및 내부 축방향 표면 결함의 형상을 보여주었다. Table 1에는 본 연구에서 사용한 CrMo 저합금강의 재료물성과 해석에서 사용된 튜브 및 균열 형상에 대한 입력값을 정리하였다. 해석을 위해 CrMo강을 탄성-2차 크리프 거동을 따르는 재료로 가정하였으며, 균열 선단의 크리프 균열성장 거동을 특성화하는 파괴 매개변수로는 C^* -적분의 에너지율 정의식을 천이 크리프 조건으로 확장한 C_I 매개변수를 사용하였다. 소규모 크리프 조건부터 전반적인 크리프 조건까지 전체 크리프 구간에 대한 C_I

매개변수는 재료의 크리프 상수와 균열 크기, 하중 조건을 고려한 아래 식을 사용하여 결정하였다³⁻⁵⁾. 식 (1)의 변수는 고온과피역학 문헌에 정의된 것과 동일하다⁶⁾.

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

여기서 C^* 는 J -적분과의 유사성에 의하여 EPRI 핸드북⁷⁾으로부터 유도된 식 (2)를 사용하였다.

$$C^* = A(1-a/b)^{-n} a h_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} p \frac{R_i/b + a/b}{1-a/b} \right)^{n+1} \quad (2)$$

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

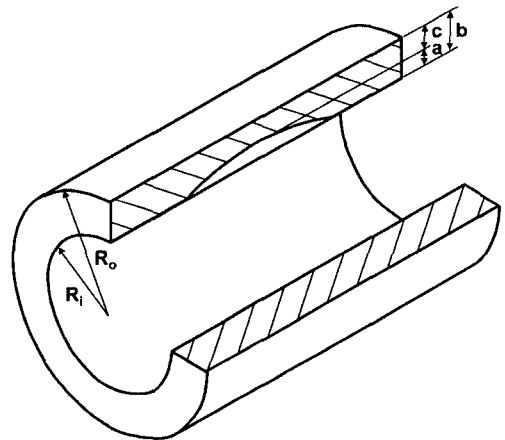


Fig. 1. Pressurized cylindrical tube with axially long internal surface crack.

Table 1. Input values used in the current study

Temp. (°C)	538
E (MPa)	140600
A (MPa ⁻ⁿ hr ⁻¹)	4.49E-20
n	8
H	1.66E-2
q	0.714
p (MPa)	6.89
R _o (mm)	355.6
R _i (mm)	309

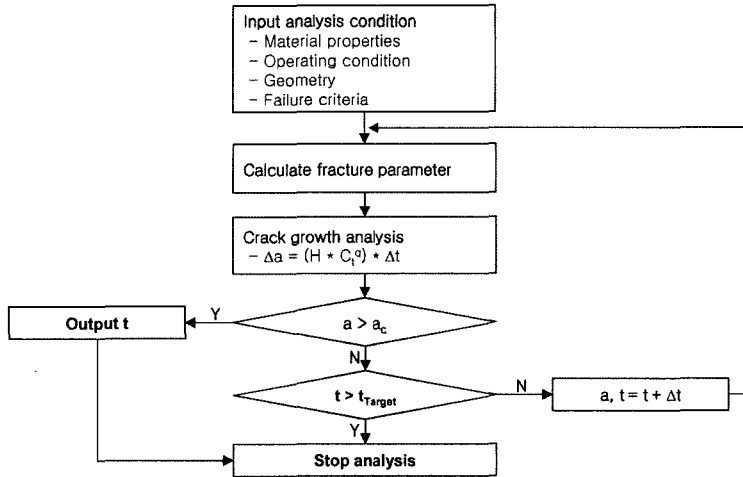


Fig. 2. Flowchart of creep crack growth life assessment.

$$\frac{da}{dt} = H \cdot C_1^q \quad (3)$$

이 때, H 와 q 는 크리프 성장과 관련된 재료 상수이다. 본 해석에서는 균열 깊이가 압력관 두께의 75%까지 성장하는 경우 파손이 발생하는 것으로 가정하였다. Fig. 2에는 이와 같은 크리프균열성장 수명평가의 절차를 흐름도 형태로 나타내었다.

3. 잔여수명 소진에 의한 파손확률 평가

지금까지 널리 알려진 확률론적 파괴역학 기법으로는 응력-강도 간섭법(stress-strength interference method), 모멘트법(SOSM; second-order second moment method, FOSM; first-order second moment method), 몬테카를로 시뮬레이션법 등이 있다⁸⁾. 이 중 몬테카를로 시뮬레이션법은 여러 공학 분야뿐 아니라 공학의 분야에서도 광범위하게 사용되고 있는 방법으로서 적용에 특별한 제한 조건이 없으며 복잡한 모델에 대해서도 적용할 수 있는 일반적인 해석 수단으로 널리 사용이 가능하므로 본 연구에서는 몬테카를로법을 이용하여 파손 확률을 평가하였다.

3.1. 확률변수의 결정

앞에서 언급한 바와 같이 크리프 균열성장 수명 평가에 확률론적 방법을 적용하기 위해서는 입력 변수를 고정된 값이 아닌 확률 분포를 가지는 값으로 입력하여야 한다. 본 연구에서는 크리프 균열성장률을 결정하는 변수 중 크리프 계수 A 와 크리프

균열성장 계수 H , 초기 균열깊이 a_0 를 확률 변수로 가정하였다. $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ 으로 표시되는 2차 크리프 거동에서 A 와 n 이 각각 독립변수로 보기 어려우며, $da/dt = H \cdot C_1^q$ 로 표시되는 크리프 균열성장 거동에서도 H 와 q 가 모두 독립 변수라고 보기 어렵다. 이는 log-log 좌표에서 표시되는 크리프 거동 또는 크리프 균열성장 거동에서 기울기에 해당하는 n 과 q 값은 동일재료 내에서 값의 변화가 크지 않아 고정값으로 가정할 수 있다⁹⁾. 그러나 y 절편에 해당하는 A 와 H 값은 산포도가 매우 크므로($10^2 \sim 10^3$ 정도) 확률 변수로 가정하는 것이 타당하다.

Fig. 3에는 크리프 균열성장 계수 H 에 대하여 확률밀도함수 및 관련 상수를 결정하는 절차를 나타내었다. Fig. 3(a)와 같이 실험 및 문헌¹⁰⁻¹⁸⁾으로부터 얻어진 da/dt 와 C_1 의 관계 곡선에서 기울기를 하나의 값으로 고정하여 각 점에서의 H 값을 얻었으며, 얻어진 H 값을 Fig. 3(b)와 같이 대수정규분포(log-normal) 확률지에 그려서 선형성을 보임으로써 H 값이 대수정규분포 함수를 따름을 확인하였다. 즉, H 값은 대수정규분포로 가정하는 것이 타당하다. Fig. 3(c)에는 이를 시각적으로 알기 쉽게 표현하기 위하여 대수정규분포함수의 두개의 파라미터 λ , ζ 를 계산하여 이론적인 대수정규분포함수의 확률밀도함수인 식 (4)에 의해 구해진 곡선과 문헌의 데이터로부터 구한 히스토그램을 함께 도시하였다.

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right\}, \quad 0 < x < \infty \quad (4)$$

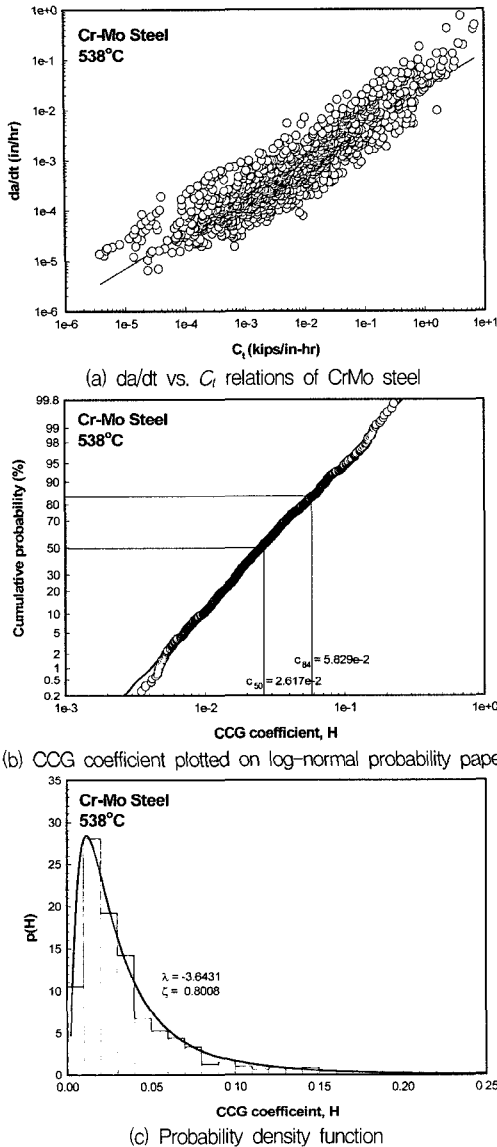


Fig. 3. Stochastic analysis of creep crack growth(CCG) coefficients for CrMo low alloy steel.

이 식에서 x 는 확률변수 H 를 나타내며 $f_x(x)$ 는 확률 밀도함수 값 $p(H)$ 를 나타낸다.

크리프 계수 A 는 기존 연구 결과로부터 충분한 수의 데이터를 얻기가 어려웠으므로 문헌¹⁾에 의하여 대수정규분포로 가정하였다. 초기 균열길이는 비 파괴검사 등의 기법으로 사용 실기에서 실제로 탐지된 균열크기 데이터로부터 결정되어야 한다. 본 논문에서는 식 (5)와 같은 확률밀도함수로 표현되는 지수분포로 가정하여 해석하였다. 식 (5)에서 μ 는 초

기 균열길이 x 의 평균을 나타낸다.

$$f_x(x) = \frac{1}{\mu} e^{-x/\mu}, \quad x \geq 0 \quad (5)$$

이상의 과정에 의해 결정된 확률변수의 분포형태와 입력값을 Table 2에 모두 정리하였다.

3.2. 파손확률 평가 절차

결정된 확률밀도함수 및 확률변수값을 바탕으로 각 변수가 결정된 확률밀도함수를 따르도록 난수(random variable)를 추출하였다. 추출된 난수와 입력값들을 이용하여 2절에서 설명한 방법으로 균열성장 속도를 계산하여 균열이 임계균열길이보다 커지면 잔여수명이 소진되어 파손되는 것으로 판단하였다. 이상의 크리프 균열성장 수명평가를 정해진 전체 시뮬레이션 횟수만큼 반복 수행하였으며, 파손이 발생할 경우 파손 발생까지의 사용수명 시점을 기억해서 특정 시간에서의 파손 횟수를 전체 시뮬레이션 횟수로 나눈 값을 그 시간대에서의 파손 확률로 정의하였다. 이러한 전체 프로그램의 순서도를 Fig. 4에 상세히 나타내었다.

Table 2. Probabilistic variables used in the current study

Probabilistic variable	Probability density function	Mean	Standard deviation
Creep coefficient, A	Log-Normal	4.49E-20	2.00E-20
CCG coefficient, H	Log-Normal	1.66E-2	1.55E-2
Initial crack size, a_i (mm)	Exponential	5	-

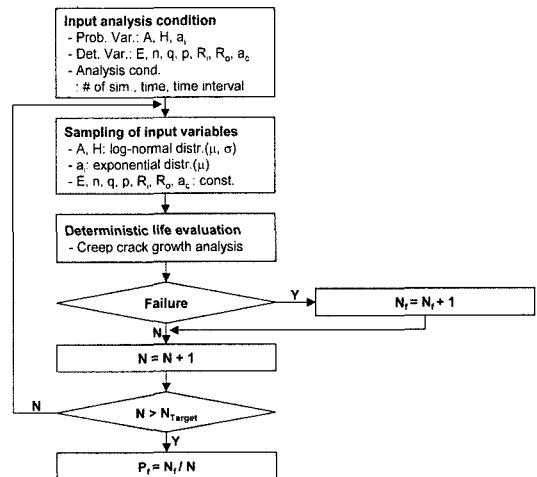


Fig. 4. Flowchart of Monte Carlo simulation.

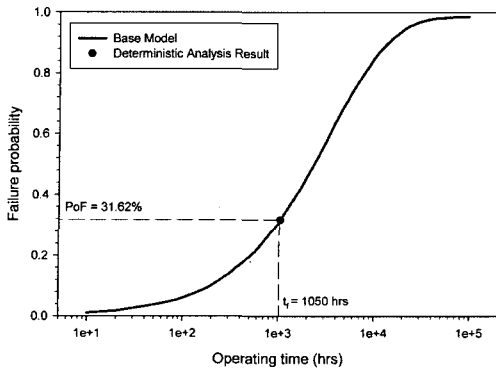


Fig. 5. Failure probability of pressurized cylinder with axially long crack.

3.3. 해석 결과

이상 설명한 해석조건으로 수행된 몬테카를로 방법을 이용한 파손확률 평가 결과를 가동 시간에 따른 내압 튜브의 파손확률로 나타내어 Fig. 5에 도시하였다. 결정론적 방법과의 결과를 비교하기 위하여 변수의 확률분포가 아닌 대표값을 적용한 결정론적 방법에 따른 잔여수명평가 결과를 함께 표시하였으며, 결정론적 수명평가에 의하면 파손 수명은 1050 시간이었으며 이는 확률론적 평가시 파손확률이 약 31.62%로 평가되게 된다. 따라서 결정론적 방법에 의한 수명평가는 상당히 보수적임을 알 수 있다.

3.4. 민감도 분석

해석에 사용된 주요 변수들이 파손 확률에 미치는 영향을 정량적으로 평가함으로써 잔여수명 평가에 보다 지배적인 영향을 주는 변수를 파악하기 위하여 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다. Table 3에 보인 바와 같이 주요 변수의 값을 일정 범위로 변화시켜 가면서 고온 요소의 사용시간에 따른 파손 확률을 평가, 비교하였다. 민감도 분석 과정을 통하여 파악된 잔여수명을 주로 지배하는 변수에 대하여는 해석을 집중적으로 수행함으로써 효율적인 건전성 평가를 수행할 수 있다.

Table 3. Variation range of parameters used in sensitivity analysis

Parameters		Variation range
Probabilistic Variables	H_{mean}	$\pm 20\%$
	H_{STD}	$\pm 20\%$
	A_{mean}	$\pm 20\%$
	A_{STD}	$\pm 20\%$
Deterministic Variables	q	$\pm 20\%$
	p	$\pm 20\%$
	E	$\pm 20\%$

Fig. 6~Fig. 9에는 본 연구에서 수행된 민감도 해석 결과를 나타내었다. Fig. 6에는 크리프 균열성장 계수 H 값의 평균과 표준편차 변화에 대한 민감도 분석 결과를 나타내었다. 시간에 따른 크리프 균열성장률과 비례하는 H 값의 평균값이 증가함에 따라 파손확률도 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 H 값의 표준편차값이 커질수록, 즉 평균값 주위로 넓게 분포되어 있을수록 파손확률이 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 대수정규분포로 분포하는 H 값의 특성상 표준편차가 증가할수록 회귀분석 결과인 대표값보다 큰 값이 난수로서 추출될 확률이 작기 때문이다. Fig. 7에는 각각 크리프 계수 A 값의 평균과 표준편차 변화에 대한 민감도 분석 결과를 나타내었다. H 값에 대한 민감도 분석의 결과와 마찬가지로 시간에 따른 2차 크리프 변형률과 비례하는 A 값의 평균값이 증가함에 따라 파손확률이 증가하고 A 값의 표준편차값이 커질수록 파손확률이 감소하는 경향을 나타낸다. 반면 파손확률이 변화하는 폭은 H 값의 변화에 따라 변화하는 파손확률의 폭보다 적은 값을 나타낸다. Fig. 8에는 결정론적 변수인 탄성 계수 E , 내압 p , 크리프 균열성장 지수 q 값에 대한 민감도 분석의 결과를 나타내었다. 탄성계수의 변화는 전체 해석 시간에 대하여 파손 확률에 큰 영향을 주지 않는 반면 내압의 변화는 파손확률에 큰 영향을 주었다. 하중 초기 국부적인 크리프에 의하여 C 값이 1보다 클 때에는 크리프 균열성장 지수가 커질수록 파손확률이 커지는 반면 크리프가 재료 전체로 진전되어 C 값이 1보다 작아지면 크리프 균열성장 지수가 커질수록 파손확률이 작아지는 역전 현상이 발생되었다. 또한 크리프 균열성장 지수의 영향은 가동 초기보다는 후기에서의 파손확률에 더 많은 영향을 주는 것으로 해석되었다.

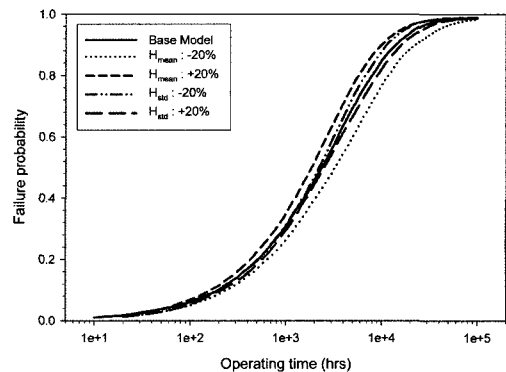


Fig. 6. Failure probability for various PDF of CCG coefficient, H.

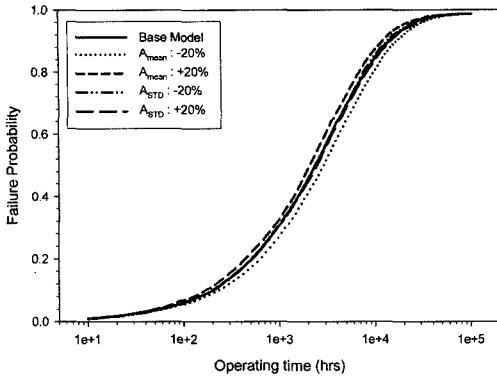


Fig. 7. Failure probability for various PDF of creep coefficient, A.

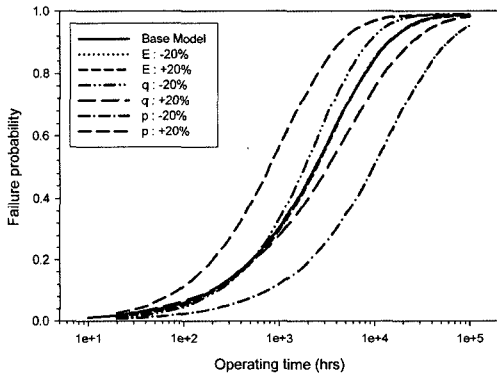


Fig. 8. Failure probability for various E, q and p values.

Fig. 9에는 민감도 분석의 결과를 정량적으로 알 수 있도록 결정론적 수명해석으로 계산된 잔여수명인 1050시간에서의 파손확률값 31.62%를 기준으로 각 변수의 변화 범위에 대한 파손 확률값의 변량을 토네이도 선도(tornado diagram)로 표시하였다. 운전 조건인 내압 p 가 파손 확률에 가장 큰 영향을 주는 것으로 평가되었으며, 크리프 균열성장 계수 H , 크리프계수 A 의 평균값도 파손 확률에 중요한 영향을 주는 변수로 판단되었다. 반면에 H 와 A 의 표준편차가 파손확률에 주는 영향은 비교적 작았으며, 탄성계수는 영향을 거의 미치지 않았다. 크리프 균열성장 지수 q 값은 가동 초기보다는 후기에서의 파손확률에 더 많은 영향을 주는 것으로 해석되었다.

선형 좌표계에 표현되는 내압, 탄성계수 등과 역함수 형태로 대수 좌표계에 표시되는 크리프 계수나 크리프 균열성장 계수 등의 민감도 분석을 같은 선형 변화 범위로 놓고 민감도 분석을 수행하였으므로 실제 크리프 계수나 크리프 균열성장 계수의 민감도는 Fig. 9에서 보는 것보다는 훨씬 클 것으로 판단된다. 따라서 향후 확률론적 방법을 사용한 정확

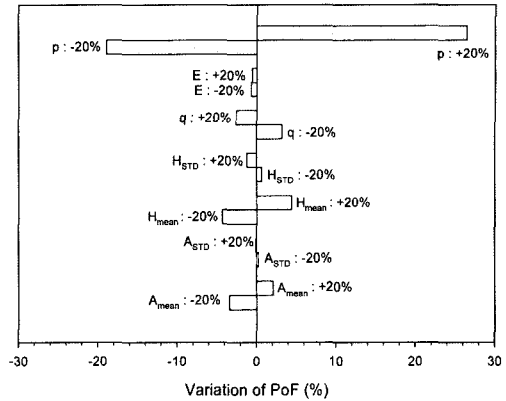


Fig. 9. Comparison of PoF variation.

한 크리프 균열성장 수명평가가 이루어지기 위해서 크리프 균열성장 계수와 크리프 계수의 신뢰성을 높이기 위한 집중적인 연구가 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 CrMo계 저합금강 소재로 된 내압을 받는 실린더형 튜브의 내부에 축방향으로 매우 긴 균열이 존재하는 경우에 크리프 균열성장에 의한 확률론적 잔여수명 수명평가를 몬테카를로법을 이용하여 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 몬테카를로법을 이용하여 고온에서 사용되는 요소의 크리프 균열성장에 의한 파손확률을 평가하는 방법을 제시하였으며, 해석 결과 기존의 결정론적 평가법에 의한 잔여수명 계산 결과는 상당히 보수적인 결과를 주는 것이 확인되었다.
- 2) 잔여수명 평가에 관련된 변수 및 상수가 평가 결과에 미치는 영향도를 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였으며, 내압과 크리프 균열성장 계수, 크리프 계수의 순서로 계산된 파손확률에 민감한 영향을 주는 것으로 나타났다.

감사의 글 : 본 연구는 전력산업기반기금 전력산업연구개발사업 “화력발전소 위험도 기반 진단 절차 개발” 과제(R-2004-1-134)의 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”, Research 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) K. B. Yoon, K. Y. Kim, “High temperature fracture parameter for a weld interface crack”, Theoretical and applied fracture mechanics, Vol. 32, pp. 27~35, 1999.
 - 5) K. B. Yoon, J. S. Lee, “Evaluation of C_r -parameter for Weld Interface Crack Considering Material Plastic Behavior”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 24 No. 3, pp. 676~684, 2000.
 - 6) A. Saxena, “Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers”, CRC Press, 1998.
 - 7) V. Kumar, M. D. German and C. F. Shih, “An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis”, EPRI NP 1931, 1981.
 - 8) A. H. S. Ang and W. H. Tang, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Willey & Sons, 1984.
 - 9) R. Viswanathan, “Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components”, ASM International, 1989.
 - 10) Kee Bong Yoon, Tae Gyu Park, Ashok Saxena, “Creep crack growth analysis of elliptic surface cracks in pressure vessels”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 465~479, 2003.
 - 11) A. Saxena, J. Han, K. Banerji, “Creep crack growth behavior in power plant boiler and steam pipe steels”, Journal of pressure Vessel Technology Transaction ASME, Vol. 110, pp. 137~146, 1998.
 - 12) K. B. Yoon, A. Saxena and P. K. Liaw, “Characterization of creep fatigue crack growth behavior under trapezoidal waveshape using C_r -parameter”, International Journal of Fracture, Vol. 59, pp. 95~114, 1993.
 - 13) R. H. Norris, A. Saxena, “Creep crack growth behavior in chromium molybdenum steel weldments”, Mater Ageing Component Life extension, 1 : 713~723, 1995.
 - 14) M. Tabuchi, K. Kubo, K. Yagi, “Effect of specimen size on creep crack growth rate using ultra-large CT specimens for 1Cr-Mo-V steel”, Engineering fracture mechanics, Vol. 40, No. 2, pp. 311~321, 1991.
 - 15) A. Saxena, K. Yagi, M. Tabuchi, “Crack growth under small scale and transition creep conditions in creep-ductile materials”, ASTM STP 1207, pp. 381~497, 1994.
 - 16) P. S. Grover, A. Saxena, “Characterization of creep fatigue crack growth behavior in 2.25Cr-1Mo steel using $(C_t)_{avg}$ ”, International Journal of fracture, Vol. 73, pp. 273~286, 1995.
 - 17) A. Saxena, “Creep fatigue crack growth in power plant materials and components”, Adv Fracture Res, ICF9, Vol. 1, pp. 51~62, 1997.
 - 18) P. S. Grover, A. Saxena, “Modeling the effects of creep fatigue interaction on crack growth”, Fatigue and fracture of engineering materials and structures, Vol. 22, pp. 111~122, 1999.