

균열의 합체를 고려한 피로균열 진전수명의 確率分布

방 홍 인* · 윤 한 용**
(1999년 8월 12일 접수)

The Probability Distribution of Fatigue Crack Propagation Life Considering Effect of Crack Coalescence

Hong-In Bang and Han-Yong Yoon

Key Words: Probability(확률), Distribution(분포), Crack Coalescence(균열합체), Fatigue Crack Growth Life(피로균열성장수명), Crack Density(균열밀도), Pressure Vessel(압력용기), Size Effect(치수효과)

Abstract

The studies of probability distribution of the fatigue crack growth life have been somewhat reported. But the study on the probability distribution of the fatigue crack growth life considering the crack coalescence for three dimensional surface fatigue crack has apparently not been reported to date. In this study, the computer program has been developed to predict the probability distribution of the fatigue crack growth life considering the crack coalescence. The effects of parameters for the distribution of the fatigue crack propagation life were evaluated by using the program.

1. 서론

구조부재의 손상 및 파괴는 가장 약한 부분에서 일어나게 되며, 구조부재가 결함을 가지고 있을 경우에는 그 결함으로부터 균열이 진전하여 파단이 일어나므로 결함의 크기나 위치 등 결함에 관한 정보로부터 부재의 안전성을 평가하여야 한다.

결함을 가지고 있는 구조부재의 피로수명에 대한 신뢰성공학적 연구는, 수명의 분포 내지는 파괴확률을 지배하는 파라미터의 통계적 성질(특히 균열진전 속도의 통계적 성질)을 논하는 연구와 파라미터의 통계적 성질을 바탕으로 하여 수명의 분포 내지는 파괴확률을 포괄적으로 구하고 수명의 분포나 파괴

확률을 지배하는 파라미터의 영향을 논하는 연구로 구분할 수 있다. 본 연구는 후자의 범주에 속하며, 이와 관련된 연구에는 다음과 같은 것들이 있다.

Okamura⁽¹⁾는 초기균열치수, 결함의 개수, 재료계수를 확률변수로 해서 수명의 확률분포를 Monte carlo simulation에 의해 구하고 각 파라미터의 영향을 나타냈다. Besuner와 Tetelman⁽²⁾은 응력폭, Paris의 균열진전속도 지배식에서 계수 C 및 초기균열면치수(균열면적)를 분포파라미터로 해서 수명의 확률분포를 Monte carlo simulation에 의해 구하는 방법을 제시했다. 北川⁽³⁾은 미소균열의 발생, 성장, 합체과정을 Monte carlo simulation을 이용하여 신뢰성평가를 하였으나 3차원 표면균열을 적용한 것이 아니라 2차원균열을 적용하였다.

위에 제시한 수명평가수법은 균열진전과정의 균열이 각각 독립적으로 진전하여 파괴에 이르는 것으로 되어 있거나 균열의 합체를 고려하긴 하였으나 균열을 2차원적으로 적용하는 등, 3차원 표면균

* 목포대학교 대학원(현,이리직업전문학교)
** 회원, 목포대학교 공과대학
E-mail : hyyoon@chungkye.mokpo.ac.kr
TEL : (0636)450-2412 FAX : (0636)452-6376

열의 합체를 고려하여 수명의 분포를 논한 것은 눈에 띄지 않는다. 기존의 평가에서는 재료의 표면 및 내부에 존재하는 다수의 균열이 각기 독립적으로 진전하여 파괴되는 것으로 취급되고 균열의 합체는 고려되지 않기 때문에 다수의 결함을 내재하고 있는 재료의 경우에는 위험한 평가가 될 가능성을 배제할 수가 없다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 동기로 하여 균열의 합체를 고려한 피로균열진전과정을 적절히 평가하고 확률론적 수법을 접목하여 피로균열 진전수명분포의 예측수법을 개발하고자 한다. 이를 통하여 예기치 못한 사고에 의해 대량의 인적·경제적 손실을 초래할 수도 있는 기계구조물의 안전성확보에 기여하고자 한다.

2. 시뮬레이션 프로그램의 개발

본 연구에서는 용접구조물을 그 대상으로 하여 열영향부에 존재하는 다수의 표면결함이 피로하중에 의해 균열이 깊이방향과 길이방향으로 진전하여 두께를 관통하여 누설이 시작되는 시점까지의 수명을 계산하여 그 분포를 구하고자 한다. 시뮬레이션 수법은 확률통계적 기법에 많이 이용되는 몬테카를로 방법(Monte-carlo method)를 이용했다.

2.1 표면균열에 의한 피로균열 진전수명

2차원 균열의 피로균열진전속도의 계산에는 일반적으로 다음 식과 같은 Paris-Erdogan⁽⁴⁾의 Power law가 이용된다.

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K^m \tag{1}$$

여기서, l 은 균열의 길이, N 은 사이클 수, K 는 응력확대계수, C 와 m 은 재료계수이다.

Fig. 1에 도식적으로 나타낸 반타원 표면균열을 가지는 두께 t 의 평판에 인장 및 굽힘이 가해졌을 때 균열의 깊이방향 및 길이방향으로의 진전은 식 (1)에 각각의 방향을 적용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

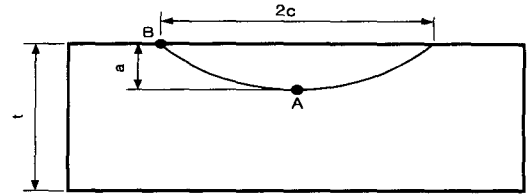


Fig. 1 Schematic diagram of semi - elliptical surface crack

$$\frac{da}{dN} = C_A \cdot (\Delta K_A)^m, \frac{dc}{dN} = C_B \cdot (\Delta K_B)^m \tag{2}$$

여기서, a 는 균열의 깊이 c 는 균열의 길이, C_A, C_B 는 표면과 내부의 진전속도의 차이를 고려하여 각각에 부여한 재료계수이다.

위 식으로부터

$$\frac{da}{dc} = \frac{C_A}{C_B} \left(\frac{\Delta K_A}{\Delta K_B} \right)^m \tag{3}$$

이기 때문에, 식 (3)을 해석하므로 해서 균열형상비 a/c 를 구할 수 있다. 응력확대계수의 해석은 Newman-Raju⁽⁵⁾ 식을 적용하였다.

초기균열이 진전하여 두께 t 를 관통하는데 까지 걸린 시간이 피로균열진전수명 (N)이며, 식 (2)를 적분하여

$$N = \int_{a_i}^t C_A^{-1} \Delta K_A^{-m} da \tag{4}$$

$$= \frac{t}{C_A (S\sqrt{\pi t})^m} \int_{x_i}^1 x^{m/2} f(x, R)^{-m} dx \tag{5}$$

과 같이 구해진다. a_i 는 초기균열깊이, S 는 응력, x_i 는 a 를 두께 로 t 나눈 값이고, R 은 균열형상비 a/c 이며, $f(x, R)$ 는 x 와 R 의 함수이다.

기준화수명 N' 은 식 (5)에 의해,

$$N' = \int_{x_i}^1 x^{m/2} f(x, R)^{-m} dx = N \frac{C_A (S\sqrt{\pi t})^m}{t} \tag{6}$$

가 된다. 여기서, 기준화 수명이라 함은 적분밖의 상수항을 제한 것으로 연구결과를 가능한

한 폭넓은 대상(두께 (t), 재질 (C), 응력 (S)가 각기 다른 구조물)에 적용할 수 있도록 하였다. 실제의 수명은 이 기준화 수명 N' 에 상수항을 곱하면 된다.

2.2 피로균열의 합체

초기균열로부터 균열의 깊이의 미소진전량 $\Delta a \approx da$ 를 부여하면, 식 (3)으로부터 dc 가 구해지고 균열의 길이는 초기균열의 길이 c_i 에 dc 를 더하여 구할 수 있다. 확률분포로 주어진 초기균열들이 각기 독립적으로 진전하여 각각의 균열들의 간격이 합체조건을 만족하면 합체하여 두께 t 를 관통할 때까지 진전한다. 합체조건으로는 ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Sec. XI⁽⁶⁾과 BSI PD 6493⁽⁷⁾ 그리고 표면점의 연결조건⁽⁸⁾을 적용하였다. Fig. 2는 균열이 각기 진전하여 합체하고 다시 진전하는 과정을 낸 것이다.

3. Simulation 수행 및 결과

3.1 용접구조물의 피로균열 진전 시뮬레이션

시뮬레이션을 위하여 다음과 같은 조건을 설정하였다.

(1) 용접구조물을 대상으로 하여 용접부의 fusion line 상의 결함으로 존재하는 것으로 한다. 본 연구에서는 계산시간의 문제를 고려하여 용접선의 길이를 1000 mm로 하고 계산을 한 뒤, 실제구조물과 비슷한 치수를 대입하여 비교하는 방식을 택했다.

(2) 결함부위는 압력용기의 내압(內壓)변화에

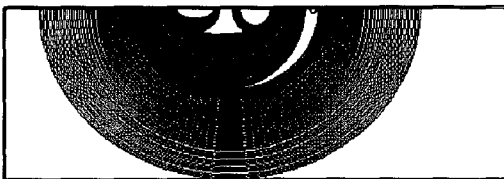


Fig. 2 Crack growth process (coalescence considered by ASME Boiler and Pressure vessel code Sec. XI)

따라 결함의 직각방향으로 인장응력만을 받는 것으로 가정하였다.

(3) 대상 구조부재는 취성재료로 가정하여, 균열선단의 응력의 세기를 파괴역학적 파라메터인 응력확대계수(stress intensity factor) K 를 적용하도록 한다.

(4) 균열은 피로하중에 의해 부재의 두께방향과 길이방향으로 진전하여 인접균열과의 간격이 합체조건을 만족한 경우 합체하며, 여러 균열 중 가장 큰 균열이 두께를 관통할 때까지의 수명을 구한다.

(5) 초기균열의 깊이분포에 대해 지수(exponential)분포,⁽⁹⁾ 대수정규분포,⁽¹⁰⁾ 감마(gamma)분포⁽¹⁰⁾ 등이 있지만, 본 연구에서는 지수분포를 따르는 것으로 가정한다. 그러나, 프로그램내에서 다른 분포로의 변경은 여러 형태에 대한 난수발생 프로그램이 삽입되어 있기 때문에 대단히 쉽다.

(6) 균열형상비(aspect ratio)의 분포에 대해서는 정규분포,⁽¹¹⁾ 대수정규분포,⁽¹²⁾ 지수분포⁽¹²⁾ 등의 연구보고가 있지만, 여기서는 대수정규분포를 따르는 것으로 한다. 깊이분포와 마찬가지로 다른 분포로 쉽게 변경할 수 있도록 되어 있다.

(7) Tang⁽¹³⁾은 용접선을 따라서 어떠한 l_0 이상의 결함이 점재(點在)한다고 하여, 균열과 균열사이의 거리 X 는 확률변수이며, 포아송(Poisson)과정으로 근사하는 경우가 많다고 하였다. 본 논문에서도 동일하게 하였다. X 의 평균치를 $1/\lambda(c_0)$ 로 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda(c_0)x) \tag{7}$$

(8) 프로그램에 적용한 입력데이터를 Table. 1에 나타내었다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.2.1 균열의 합체조건에 따른 수명의 확률 분포의 비교

Fig. 3은 균열의 합체 조건에 따른 수명의 확률

분포의 차이를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 종축은 확률로써 스케일(scale)은 정규확률스케일이고 횡축은 2.1절에서 설명한 기준화 수명(normalized life) N' 으로 스케일은 로그 스케일(log scale)이므로 본 그래프는 대수 정규 확률지(log-normal probability paper)에 해당한다.

Fig. 3에서 BSI Code, ASME Code, 표면점

Table 1 Input data for simulation

| Parameter | Dimension |
|---|--------------------|
| Initial crack depth (Exponential distribution ; λ) | 0.5, 0.7, 0.9 |
| Initial aspect ratio (Log-normal distribution ; μ_l) | -0.5 |
| Initial aspect ratio (Log-normal distribution ; σ_l) | 0.15 |
| crack density (poison process ; $\lambda(c_0)$) | 0.01, 0.005, 0.001 |
| Thickness(mm) | 20, 30, 40 |
| Width(mm) | 1000, 31400 |
| Material factor ; m | 2, 3, 4 |

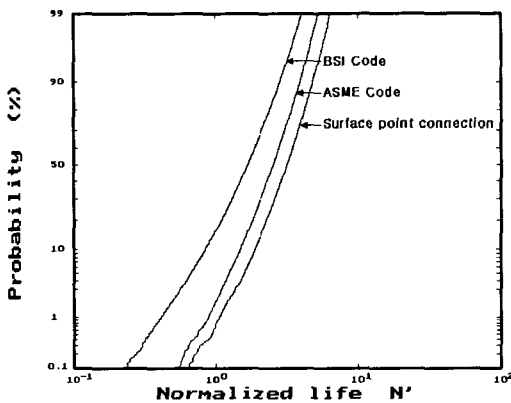


Fig. 3 Difference in life distribution by coalescence condition (number of crack = 50)

연결조건의 3가지 중 BSI Code가 가장 수명이 짧아지는 진보적인(critical)한 조건이며 표면점 연결 조건이 가장 보수적인 평가임을 알 수가 있다. 본 연구에서는 이하 중간 조건인 ASME Code 조건에 의해 시뮬레이션을 수행하였다.

3.3.2 균열의 합체고려와 비합체 경우의 비교

균열의 합체를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 차이를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 합체 및 비합체에 대해 균열밀도(균열의 갯수 ÷ 용접선 길이)를 0.01, 0.05, 0.1로 하여 수명의 확률분포를 구해 나타내 본 결과, 균열 밀도가 작은 경우는 합체와 비합체에 따른 차이는 별로 없으나, 밀도가 커질수록 그 차이는 커짐을 알 수가 있다. 또한, 균열밀도가 커지면서 수명의 평균치는 작아지는 대신 분포는 작아지는 현상을 나타냈다.

3.3.3 재료상수 m의 변화에 따른 비교

Fig. 5는 균열의 수를 50개로 하고, 재료상수 m을 2, 3, 4로 변화시켜 변화에 따른 관통수명의 변화를 나타내었다. m값이 클수록 관통수명이 증가함과 동시에 분포가 더 커지는 것도 볼 수가 있다. 이는 m이 클수록 균열진전 저항이 큼을 의미하며, 균열진전저항이 클수록 수명의 분포는 커지는 현상도 알 수가 있다.

3.3.4 초기균열의 깊이 변화에 따른 비교

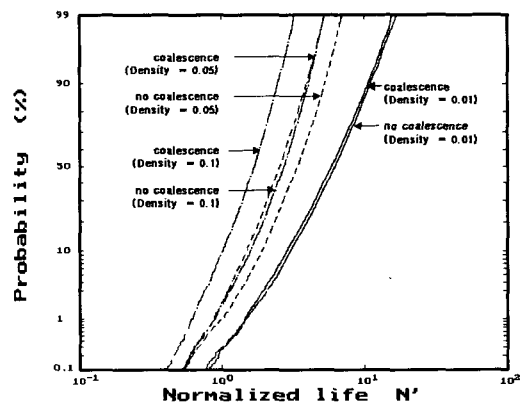


Fig. 4 Comparison of crack coalescence effect with no coalescence of crack

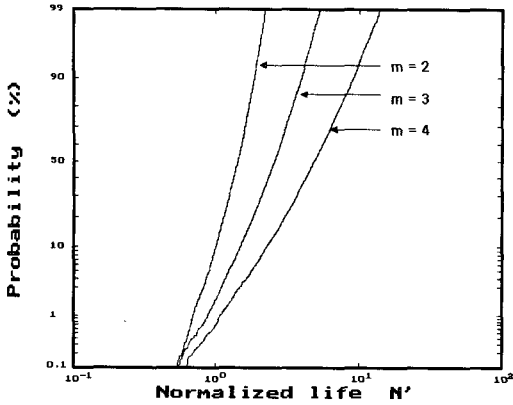


Fig. 5 Effect of m for distribution of normalized life (number of crack = 50)

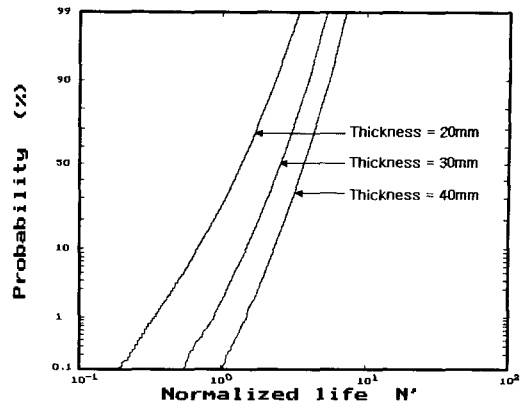


Fig. 7 Effect of thickness of component for the life distribution

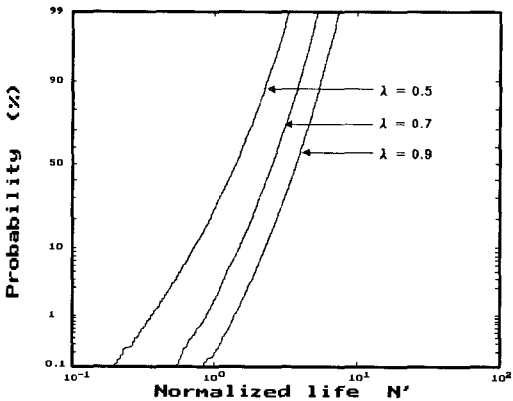


Fig. 6 Difference in life distribution due to exponential distribution parameter λ of initial crack depth

Fig. 6은 용접선 길이를 1000 mm로 하고 초기균열이 50개 존재하며, 지수분포를 따르는 초기균열깊이의 λ 값을 0.5, 0.7, 0.9로 변화시켜, 변화에 따른 관통수명 확률분포의 변화를 보여주고 있다. λ 값이 증가하면 평균 초기균열깊이가 작아지기 때문에 관통수명이 증가함을 알 수가 있다.

3.3.5 부재의 두께에 따른 비교

Fig. 7은 용접선길이를 1000 mm로 하여 균열의 수를 50개로 하고 용접모재의 두께를 20, 30, 40 mm로 변화시켜 관통수명의 확률분포의 변화를 비교하였다. 두께가 두꺼워지면 두꺼워질수록 수

명이 길어지는 것은 당연한 현상이다. 두께가 두꺼워질수록, 수명의 확률분포가 작아짐을 알 수 있다. 이는 균열이 보다 오랫동안 진전하면서 균열의 상호작용에 의해 균열들의 크기가 평균화되어 가는 것으로 이해할 수가 있다.

3.3.6 실제의 압력용기에의 적용

대상용기로는 용량이 500 m³짜리 구형 압력용기로 하였다. Fig. 8에 실제 압력용기의 모양을 나타내었다. 이 구형 압력용기의 부재두께는 $t=30mm$ 이고, 그 재질은 고장력강으로 하였다. 정중앙의 용접선의 둘레길이는 $l=\pi D=31400mm$ 이다. 이 용접선 상의 균열을 대상으로 하여 simulation을 하였다. 대상물의 치수, 균열의 갯수만 다를 뿐 기타 조건은 앞의 경우와 동일하다.

Fig. 9는 균열밀도의 차이(0.01, 0.005, 0.001)의 영향을 나타낸 것이다. 즉, 용접선 길이 31400 mm에 균열의 갯수를 32, 157, 314개로 변화시켜 보았다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 균열밀도가 클수록 수명의 절대값이 작아지고, 그 차이는 확률이 높은 부분으로 갈수록 커짐을 알 수가 있다.

3.3.7 결함밀도(Crack density)가 동일한 경우의 수명변화 비교

Fig. 10에서는 결함밀도(crack density)가 동일하게 하여 그 변화되는 양상을 나타내어 보았다. 용접선 길이 31400 mm에 균열이 1000개와 용접선 길이

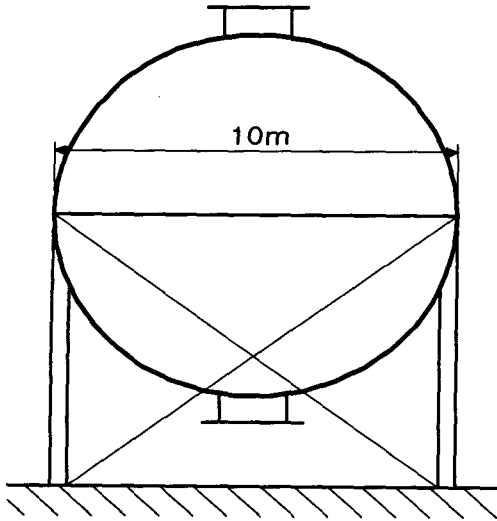


Fig. 8 Schematic diagram of spherical type pressure vessel

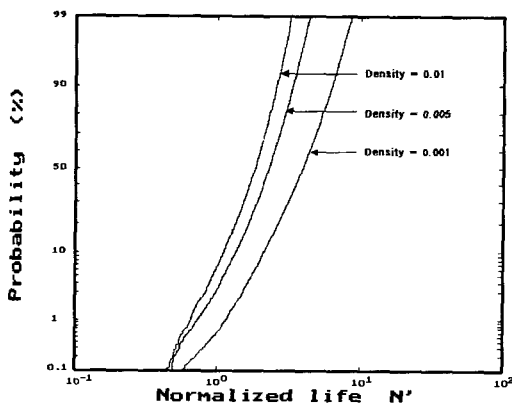


Fig. 9 Difference in life of actual structure according to crack density

1000 mm에 균열이 31.8≒32개로 하여 그 변화 양상을 관찰하여 보았다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 동일한 결함밀도에서도 수명의 변화가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 용접선 길이가 길면 길수록 초기균열의 깊이가 큰 균열이 나타날 수 있는 확률이 높기 때문으로 예상된다. 모든 조건이 같더라도 구조부재의 피로균열 진전수명의 확률분포에도 치수효과(Size effect)가 존재하므로 주의를 요한다.

4. 결 론

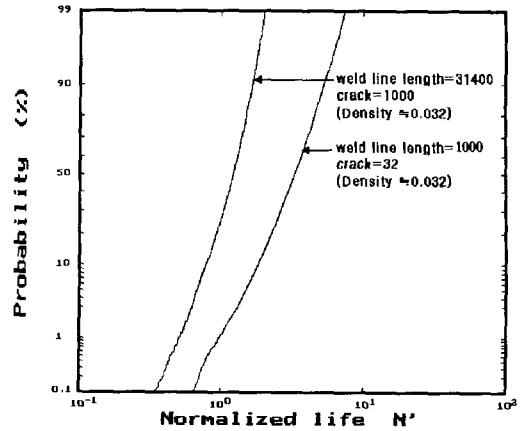


Fig. 10 Size effect of probability distribution of fatigue crack growth life

본 연구에서는 균열의 합체를 고려한 피로균열진전 수명분포에 관한 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) BSI Code, ASME Code, 표면점 연결 조건의 3 가지 중 BSI Code 조건이 가장 수명이 짧아지는 진보적인 조건이며, 표면점 연결 조건이 가장 보수적인 결과를 나타내었다.

(2) 균열의 합체를 고려한 경우와 합체를 고려하지 않은 경우를 비교한 결과, 균열 밀도가 작은 경우는 합체와 비합체에 따른 차이가 별로 없으나 밀도가 커질수록 그 차이도 커짐을 알 수가 있다. 또한, 균열 밀도가 커지면서 수명의 평균치는 작아지는 대신 분포는 작아지는 현상을 나타냈다.

(3) m 값이 클 수록 수명이 증가함과 동시에 분포도 커지는 것을 볼 수가 있다. 이는 m 이 클수록 균열 진전 저항이 큼을 나타내며, 균열 진전 저항이 큰 재료일수록 수명의 분포도 커지는 현상을 나타냈다.

(4) 부재의 두께가 커지면 커질수록 수명이 길어지는 대신 수명의 확률 분포는 작아짐을 알 수가 있었다.

(5) 실제의 압력용기에 적용하여 본 결과 밀도가 클수록 수명의 절대값이 작아지고 그 차이도 확률이 높은 부분으로 갈수록 커진다. 또한, 균열의 밀도를 포함하여 모든 조건이 같더라도 구조 부재의 피로 균열 진전 수명의 확률 분포에도 치수 효과가 존재함에 주의를 기울여야 한다.

참고문헌

- (1) Okamura, H., Watanabe, K. and Naito, Y., 1975, "Reliability Approach in Structural Engineering," *Maruzen*, pp. 244~257.
- (2) Besuner, P. M. and Tetelman, A. S., 1977, "Probabilistic Fracture Mechanics," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 43, pp. 99~107.
- (3) 北川英夫, 中曾根祐司, 1984, "微小分布き裂の發生・成長・合體を伴う腐食疲勞破壊過程のモンテカルロ解析モデル," *材料*, 第33卷, 第364號, pp. 14~20.
- (4) Paris, P. C. and Erdogan, F. J., 1963, "A Critical Analysis of Various Yield Strengths," *Basic Eng., Trans. ASME* 85, p. 828.
- (5) Jr. Newman, J. C. and Raju, I. S., 1979, "Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension and Bending Loads," *NASA Technical Paper 1578*.
- (6) ASME, 1980, "Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, Appendix A."
- (7) *British Standard Institute*, 1980, "PD 6493 Guidance on Some Methods for the Deviation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints."
- (8) 高温構造安全技術研究組合, "ISES 8218 BER 1次 冷却系配管の健全性評価に關する研究."
- (9) Jouris, G. M. and Shaffer, D. H., 1980, "Methodology for Inferring Initial Flaw Distribution," *Nucl. Eng. Des.*, 60. p. 437.
- (10) Nilsson, F. A., "Model for Fracture Mechanical Estimation of the Failure Probability of Reactor Pressure Vessels," *Pressure Vessel Technology*, Part II, Third National Conference, Tokyo, pp. 593~601.
- (11) Brückner, A. and Munz, D., 1983, "The Effect of Curve Fitting on the Prediction of Failure Probability from the Scatter in Crack Geometry and Fracture Toughness," *Reliability Engineering* 5, pp. 139~146.
- (12) Harris, D. O., Lim, E. Y. and Dedhia, D. D., 1981, "Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant," *NURER/CR-2189*, Vol. 5.
- (13) Tang, W. H., 1973, "Probabilistic Updating of Flaw Information," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 1, No. 8, pp.459~467.