



數值計算에 의한 龜裂開口比의 影響度 評價에 관한 研究

A Study on Parameter Sensitivity Study of Crack Opening Ratio by Using Numerical Calculation

최 병 기* · 권 택 용** · 이 상 열***

Byung-Ky Choi · Taek-Yong Kwon · Sang-Yeal Lee

(1996년 12월 20일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

ABSTRACT

The fatigue crack propagation rate has so far been measured by the effective stress intensity factor range ΔK_{eff} . But no research has been done to study how much the crack opening ratio influences the expectation of the fatigue crack propagation. Therefore, this paper evaluates of the crack opening ratio on the fatigue crack propagation life by using the method of parameter sensitivity study. Summarizing the result ; (1) When the crack opening ratio U' is high, the effect of U' gets larger than any other except for the material factor m . But when U' is low, the effect is also diminished. Therefore, the selection of the lowest value possible is desirable in the evaluation of life. (2) When the value of the material factor m is high, the effect of crack opening ratio U' is increased; at the same time the effect of the other parameters also increased wholly. The effect of material factor m itself on life is high, but in case the material factor m is high, that the effect of each parameter on life get higher is unique. In designing, better attention to the material selection should be drawn. (3) In case the stress ratio R gets smaller, the effect of crack opening ratio U' is unchangeable. But the effect of R itself remarkably decreases, and the effect of material factor m somewhat decreases.

1. 서 론

신뢰성 해석수단중 파라미터의 영향도 평가

(parameter sensitivity study)라고 하는 방법이 있어서 각 파라미터가 파괴확률 혹은 수명 등에 미치는 영향의 정도를 평가하는데에 이용되고 있다.

* 조선대학교 기계공학과

** 목포 기능대학 산업설비과

*** 목포전문대학 자동차과

Shinozuka^{1,2)}는 항공기를 대상으로 해서 파라미터의 영향도를 평가했으며 北川, 久島³⁾는 압력용기를 대상으로 해서 영향도를 평가했고 板恒⁴⁾ 등은 용접부 결함을 대상으로 해서 신뢰성 해석의 일환으로 신뢰도 평가를 했다.

본 논문은 유효응력 확대계수로서 피로균열 진전수명을 평가할 때 이용되는 균열개구비(최대응력에 대한 균열 개구응력의 비)가 피로균열 진전수명에 미치는 영향을 평가하기 위한 것으로서, 저자는^{5,6)} 실험에 의하여 균열개구점을 측정된 결과 측정위치에 따라 다른값을 나타내며 피로균열 진전수명 평가시 균열선단으로부터 떨어진 곳(크립게이지를 이용한 크랙마우스 등)에서 측정된 균열개구점 값을 이용함이 보다 정확함을 밝혔다. 본 연구에서는 균열개구비가 수명평가에 미치는 영향을 상기의 파라미터 영향도 평가방법을 이용하여 평가하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 영향도 지표

파괴확률 혹은 피로수명의 분포 P는 중요한 독립된 파라미터 X_1, X_2, \dots, X_n 의 함수로서

$$P = P(X_1, X_2, \dots, X_n) \dots\dots\dots (1)$$

로 나타낼 수 있으며 1차근사 2차모멘트법을 적용하면,

$$\bar{P} = P(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n) \dots\dots\dots (2)$$

$$V_p^2 = \sum \alpha_i^2 V_{xi}^2 \dots\dots\dots (3)$$

처럼 P의 평균 \bar{P} 와 변동계수(coefficient of variation) V_p 를 구할 수 있다.

여기서, V_{xi} 는 파라미터 X_i 의 변동계수이다. 또, α_i 는

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial P}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\bar{X}_i}{\bar{P}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

로서, 영향도 지표(sensitivity index)라고 불리워진다.

P의 변동계수 V_p 가 P의 불확실성의 크기를 나타내므로 V_p 에의 기여 그 자체는 식 (3)에 나타내는 것처럼 $\alpha_i V_{xi}$ 이지만 α_i 는 X_i 의 불확실성이 P의 불확실성에 어느정도 기여하는가를 나타내는 하나의 지표이며 V_{xi} 를 몰라도 구할 수 있는 양이기 때문에 많이 이용되고 있다. 단, α_i 가 크다고 해서 꼭 영향이 크다고 확실하게 말할 수 없는 점

은 있다. 본 연구의 목적은 데이터 자체의 불확실성을 논하기 위한 것이 아니라 설계 등의 시점에서 파라미터의 값을 약간 바꾼다던가, 혹은, 해석상 값을 약간 잘못 평가할 경우 그러한 것이 피로수명에 미치는 영향이 어느 정도인가를 밝히기 위한 것이기 때문에 각 파라미터를 확률변수가 아닌 확정치로서 취급할 수 있으며 따라서 X_i 의 변동계수 V_{xi} 는 일정하기 때문에 α_i 자체로서 영향의 크기를 확실하게 논할 수 있다.

2.2 피로균열 진전과정상의 파라미터의 영향도 지표

피로균열 진전속도는 선형탄성파괴역학을 이용하여 일반적으로 다음 식

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \dots\dots\dots (5)$$

이 사용되나 균열선단의 소성역의 크기가 무시하지 못할 정도이거나 응력비의 영향을 배제하기 위해서는 유효응력 확대계수폭 ΔK_{eff} 를 이용한 다음 식

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \dots\dots\dots (6)$$

이 사용된다. 위 두 식에서 a는 크랙길이, N은 싸이클 수, ΔK 는 응력확대계수변동폭, ΔK_{eff} 는 유효 응력확대계수폭, C, m은 재료상수이다. 초기 균열길이 a_1 으로부터 한계균열길이 a_2 까지의 수명 N은 식 (6)을 적분함으로써

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C \Delta K_{eff}^m} \dots\dots\dots (7)$$

처럼 구할 수 있다. 응력확대계수 K의 일반식은, 시험편의 유한폭, 유한길이 등에 대한 보정계수 f (a/W)를 계산의 간단성을 꾀하기 위하여 1로 놓으므로 해서

$$K = S \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (8)$$

가 되며 이를 식 (7)에 적용해서

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C (\Delta S_{eff} \sqrt{\pi a})^m} \dots\dots\dots (9)$$

이 된다. 여기서, ΔS_{eff} 는 유효응력폭이다. 최대 응력을 S_{max} , 최소응력을 S_{min} , 균열개구응력을 S_{op} 라 하면 응력폭 ΔS 와 유효응력폭 ΔS_{eff} 는

$$\Delta S = S_{max} - S_{min} \dots\dots\dots (10)$$

$$\Delta S_{eff} = S_{max} - S_{op} \dots\dots\dots (11)$$

과 같이되고, 상기 식 (11)에 균열개구비 U

(S_{op}/S_{max})와 응력비 $R(S_{min}/S_{max})$ 을 적용하여 다시 정리하면

$$\Delta S_{eff} = (1-U) \frac{\Delta S}{(1-R)} \quad (12)$$

처럼 되며, 이를 다시 식 (9)에 적용하면

$$N = \frac{2(1-R)^m}{C(1-U)^m \Delta S^m \pi^{m/2} (2-m)} \frac{1}{(a_2^{(1-m/2)} - a_1^{(1-m/2)})} \quad (13)$$

이 얻어진다. 각 파라미터의 영향도지표 α_i 는 식 (4)를 바로 이 식 (13)에 적용하므로써 얻어지며 다음에 적용 결과를 나타낸다.

$$\alpha_{a_1} = \frac{\bar{a}_1}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial a_1} \right) = \left(\frac{a_1^{(1-m/2)}}{a_2^{(1-m/2)} - a_1^{(1-m/2)}} \right) \left(\frac{2-m}{2} \right) \quad (14)$$

$$\alpha_{a_2} = \frac{\bar{a}_2}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial a_2} \right) = \left(\frac{a_1^{(1-m/2)}}{a_2^{(1-m/2)} - a_1^{(1-m/2)}} \right) \left(\frac{2-m}{2} \right) \quad (15)$$

$$\alpha_U = \frac{\bar{U}}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial U} \right) = m \frac{U}{1-U} \quad (16)$$

$$\alpha_R = \frac{\bar{R}}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial R} \right) = -m \frac{R}{1-R} \quad (17)$$

$$\alpha_{\Delta S} = \frac{\bar{\Delta S}}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial \Delta S} \right) = -m \quad (18)$$

$$\alpha_C = \frac{\bar{C}}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial C} \right) = -1 \quad (19)$$

$$\alpha_m = \frac{\bar{m}}{N} \left(\frac{\partial N}{\partial m} \right) = \left(\frac{-a_2^{(2-m)} \ln(a_2) + a_1^{(2-m)} \ln(a_1)}{a_2^{(2-m)} - a_1^{(2-m)}} \right) m + m \ln \left(\frac{1-R}{(1-U) \Delta S \pi^{1/2}} \right) + \left(\frac{m}{2-m} \right) \quad (20)$$

3. 계산결과 및 고찰

파라미터의 영향도지표는 상식식 들에 고찰한 값들을 대입하므로써 간단히 구해진다. 여기서는 참고문헌 5 및 6에서 사용한 실험 조건과 동등한

값을 적용하기로 한다.

Table 1 Parameter sensitivities (difference by crack opening ratio, U)

Parameter	Case 1		Case 2	
	Value	α_i	Value	α_i
a_1	16.0	1.15	16.0	1.15
a_2	33.0	1.65	33.0	1.65
R	0.4	2.0	0.4	2.0
U	0.5	3.0	0.25	1.0
ΔS	0.57	3.0	0.57	3.0
m	3.0	8.76	3.0	9.98
C		1.0		1.0

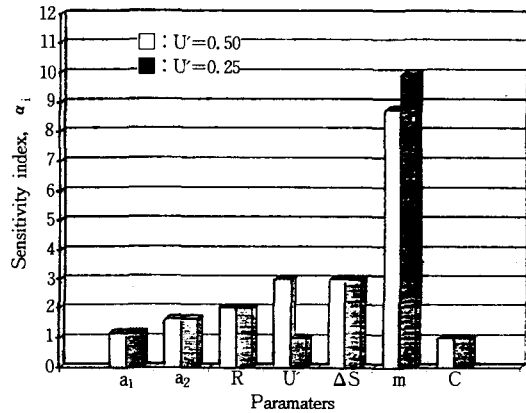


Fig. 1 Changes of parameter sensitivity by crack opening ratio, U

Table 1에서 Value는 계산에 적용된 데이터 값이며 오른쪽의 α_i 가 계산결과 얻어진 영향도의 값으로서 값이 클수록 피로수명에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다. Case 1과 Case 2의 차이는 균열개구비 U를 0.5와 0.25를 적용한 것이다. Fig. 1은 Table 1의 결과를 알기쉽게 그래프로 표시한 것으로 영향의 크기가 한눈에 파악된다. 표와 그림으로부터 알 수 있듯이 U의 값이 0.5일 경우 U의 영향도는 m 다음으로 2번째인데 비해 U의 값이 0.25의 경우는 가장 작은 값을 나타낸다. 다시 말해서 U의 값이 작을수록 그 영향은 작아지므로 피로수명 평가에 있어서 가능한 한 작은 값을 택하는 것이 바람직 하다고 하겠다.

저자는 균열 개구점의 값을 측정할 때 측정위치에 따라 그 값이 다르고, 균열 마우스나 시험편의 배면에서 측정한 값이 균열 선단에서보다 작으며

바로 이 작은 값을 택하는 것이 보다 정확한 평가가 가능하다는 것을 밝혔다. 본 연구에서의 계산 결과는 이를 더욱 입증해 준다고 생각된다.

Table 2 Parameter sensitivities (difference by material factor, m)

Parameter	Case 1		Case 2	
	Value	α_i	Value	α_i
a_1	16.0	1.15	16.0	0.87
a_2	33.0	1.65	33.0	2.06
R	0.4	2.0	0.4	2.92
U'	0.5	3.0	0.5	4.38
ΔS	0.57	3.0	0.57	4.38
m	3.0	8.76	4.38	12.55
C		1.0		1.0

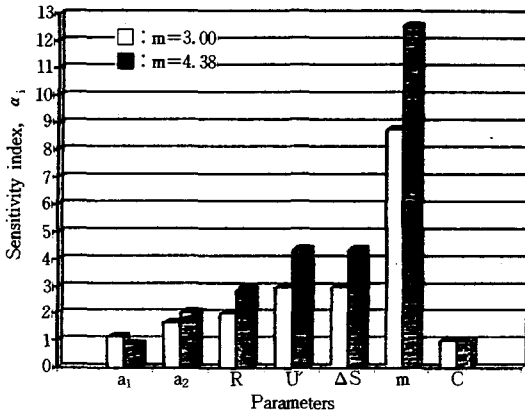


Fig. 2 Changes of parameter sensitivity by material factor, m

Table 2와 Fig. 2는 재료가 다른 경우를 고려한 것으로서 재료상수 m의 값을 바꾸어 보았다. 4.38이라고 하는 값은 SS41재의 값으로서 별도의 데이터⁷⁾를 인용했다. 그럼으로부터 알 수 있듯이 m의 값이 클 경우 U'의 영향이 커짐과 동시에 전반적으로 다른 파라미터의 영향도 커진다.

Table 3과 Fig. 3은 다른 응력비 R의 경우를 고려한 것으로 R이 작아질 경우 U'의 영향도에는 변화가 없으나 R자체의 영향은 현저하게 작아지고 m의 영향도 약간 작아지는 현상이 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 간단한 수치계산에 의하여 균열

Table 3 Parameter sensitivities (difference by stress ratio, R)

Parameter	Case 1		Case 2	
	Value	α_i	Value	α_i
a_1	16.0	1.15	16.0	1.15
a_2	33.0	1.65	33.0	1.65
R	0.4	2.0	0.1	0.33
U'	0.5	3.0	0.5	3.0
ΔS	0.57	3.0	0.57	3.0
m	3.0	8.76	3.0	7.55
C		1.0		1.0

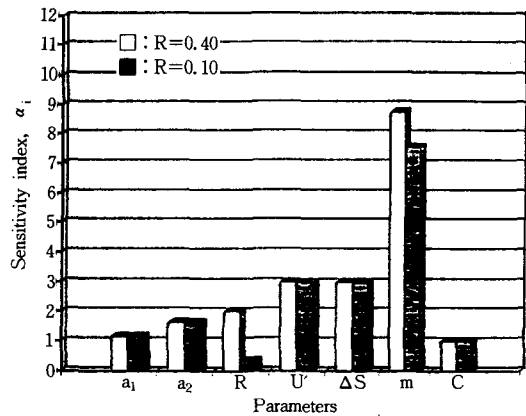


Fig. 3 Changes of parameter sensitivity by stress ratio, R

개구비를 포함한 여러 파라미터의 피로균열 진전 수명에 미치는 영향의 크기를 평가했다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 균열개구비 U'의 값이 클 경우 영향의 크기는 재료상수 m 다음으로 크지만 U'의 값이 작아지면 그 영향도 함께 작아지므로 피로수명 평가에 있어서는 가능한 한 작은값을 택하는 것이 바람직하다고 생각된다.
- 2) 재료상수 m 값이 클 경우 균열개구비 U'의 영향이 커짐과 동시에 전반적으로 다른 파라미터의 영향도 커진다. 재료상수 m 자체가 피로수명에 미치는 영향도 크지만 m이 큰 재료의 경우는 각 파라미터가 수명에 미치는 영향도 커지는 것은 특이한 점이라 할 수 있으며, 설계시 재료선정에 주의를 요해야 함을 알 수 있었다.
- 3) 응력비 R이 작아질 경우 균열개구비 U'의 영향도에는 변화가 없으나 R자체의 영향은 현저하

게 작아지고 재료상수 m 의 영향도 다소 작아지는 현상이 나타났다.

이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Shinozuka, M, "Development of Reliability-Based Aircraft Safety Criteria", AFFDL-76-31, 1976.
- 2) 岡村弘之, 板恒浩, "強度の統計的取扱い", 培風館, pp. 234~241, 1979.
- 3) 北川英夫, 久田俊明, "表面龜裂の成長と非破壊検査を考慮한 信賴性解析", pp. 526~1042, 1979.
- 4) 板恒浩, 豊田政男, 深川容三, 朝田洋雄, "缺陷を有する銲接部の信賴性解析", pp. 526~531, 1981.
- 5) 崔秉起, "고강도 알루미늄 합금재에 있어서 크랙열림점 평가에 관한 연구", 한국자동차공학회지, pp. 100~106, 1993.
- 6) 최병기, 윤한용, 박창근, 정태권, "피로크랙진전과정에 있어서의 크랙 열림점 평가에 관한 연구", 대한기계학회 호남지부 학술강연회 초록집, pp. 9~15, 1990.
- 7) 진경옥, 박상국, 권재도, 진영준, 장재영, "疲勞크랙進展壽命의 統計學的 分布特性에 관한 研究", 大韓機械學會 秋季學術大會 抄錄集, pp. 63~66, 1989.