

〈論 文〉

# 표면크랙의 관통 및 파단 피로수명 예측

윤 한 용\*

(1992년 1월 20일 접수)

## Prediction of Penetration and Break Fatigue Life of Surface Crack

Han-Yong Yoon

**Key Words :** Surface Crack(표면크랙), Fatigue Life(피로수명), Penetraton and Break(관통 및 파단), Leak Before Break(파단전 누설), Effect of Parameter(파라미터의 영향)

### Abstract

A method of prediction for the fatigue life of surface crack, that is, initial cracks grow and penetrate through the thickness, was presented in the previous study of the authors. Effects of parameters such as the initial crack depth, material factors, etc., for the life were also discussed. However, in the case of adapting the concept of LBB(Leak Before Break), the break fatigue life after the penetration of the thickness must be taken into account. Hence, a method to predict the break fatigue life is presented in this paper. Effects of the parameters for the break fatigue life are discussed and compared with the penetration fatigue life.

### 1. 서 론

압력용기, 배관계통 등의 안정평가지 가장 중요한 것은 표면결함으로서 이와 관련된 연구<sup>(1~7)</sup>가 다수 있다. 그러나, 이들 연구는 대부분이 크랙이 부재의 두께를 관통할 때까지를 대상으로 한 것으로 LBB(leak before break) 개념에 입각하여 관통 후 파단까지를 고려한 것은 별로 눈에 띄지 않는다. 평가대상 구조물에 따라서는 크랙이 관통하여 내용물이 누설되면 그 단계에서 기기의 역할이 끝나는 것과 크랙이 관통하여 내용물이 누설되어도 대규모 파단이 일어나기 전까지는 안전이 확보되는 것으로 나눌 수가 있는데, 후자의 경우는 관통후 파단까지의 수명을 평가대상으로 삼아야 한다.

최근, 남동<sup>(8,9)</sup>은 표면크랙의 관통후 거동을 관찰하여 관통후의 크랙에 대해서는 Newman-Raju<sup>(2)</sup>의

응력 확대계수 평가식이 잘 맞지 않고 새롭게 제안한 평가식이 비교적 실험 결과를 잘 평가하고 있다고 보고하고 있다.

윤, H. Okamura<sup>(10,11)</sup>는 주어진 초기크랙으로부터 관통이전의 한계크랙까지의 수명을 간단히 평가하는 수법을 제안했으며 또한, 파괴역학적 제인자의 수명에 미치는 영향을 평가했다. 본 논문은 이러한 연구들의 연장으로서 상기 남동의 응력 확대계수 평가식을 이용하여 파단수명의 예측수법을 확립하고 파단수명에 미치는 파괴역학적 제인자의 영향을 밝히는데 그 목적을 두고 있다.

### 2. 표면크랙의 관통수명

본 연구에서는 관통수명과 관통후 파단수명을 분리해서 구하기로 하나 초기크랙으로부터의 총수명은 양자를 단순합산하면 된다. 또한, 본 연구에서는 우선 인장응력만을 대상으로 한다.

Fig. 1에 나타내는 두께  $t$ , 판폭  $W$ 인 평판에 인

\*정회원, 목포대학교 기계공학과

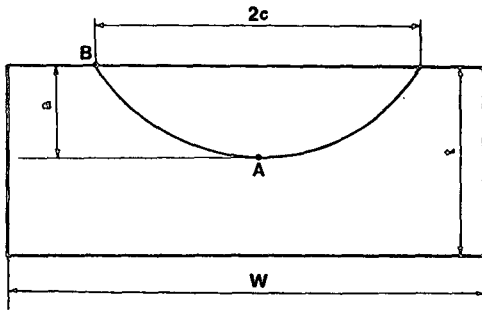


Fig. 1 Schematic diagram of surface crack

장응력이 작용할 경우 길이방향과 깊이방향의 크랙 전진속도는 Paris식을 적용하면 식(1)과 같이 된다.

$$da/dN = C_A \cdot (\Delta K_A)^m, \quad dc/dN = C_B \cdot (\Delta K_B)^m \quad (1)$$

여기서,  $a, c$ 는 깊이방향과 길이방향의 크랙의 크기이며,  $N$ 은 사이클 수,  $m$ 은 재료계수,  $\Delta K_A, \Delta K_B, C_A, C_B$ 는 각각 A점 및 B점의 응력 확대계수폭과 재료계수이다. 식(1)로부터 식(2)가 되므로 이 식으로부터 크랙형상비  $a/c$ 의 변화를 예측할 수 있다.

$$da/dc = C_A/C_B \cdot (\Delta K_A/\Delta K_B)^m \quad (2)$$

응력 확대계수폭  $\Delta K_A, \Delta K_B$ 는 Newman-Raju<sup>(2)</sup>의 식(3)을 이용하였다.

$$K_I = S \cdot F \cdot \sqrt{\pi a} / E(k) \quad (3)$$

여기서,  $S$ 는 응력을 나타내며,  $F$ 는  $a/t, a/c, c/W$ , 그리고 표면으로부터의 각도  $\phi$ 를 파라미터로 하는 보정계수이고,  $E(k)$ 는 제2종 완전타원적분이다. 또한, 표면의 평면응력상태, 내부의 평면변형상태로부터 기인된 표면과 내부의 크랙전진속도의 차이는 식(4)와 같이 보정하면 된다고 하는 Newman-Raju의 보고를 이용해서 본 계산에서도 마찬가지로 식(4)를 적용하기로 한다.

$$C_A = C, \quad C_B = 0.9^m C \quad (4)$$

Fig. 2는 식(2)를 수치적분하므로 해서 얻어진 크랙형상비 변화 예측선도로서, 계산방법은 Newman-Raju와 마찬가지로, 방법을 택했는데 다음과 같다. 주어진 초기의 크랙깊이  $a$  및 길이  $c$ 로부터 미소의  $c$ 의 변화량  $\Delta c$ 에 따른  $\Delta a$ 를 식(2)에 적용해서 구해 이를 점진적으로 합산해 나가는 방법을 취했다. 이 선도는 각 시점에서의 크랙깊이의 변화

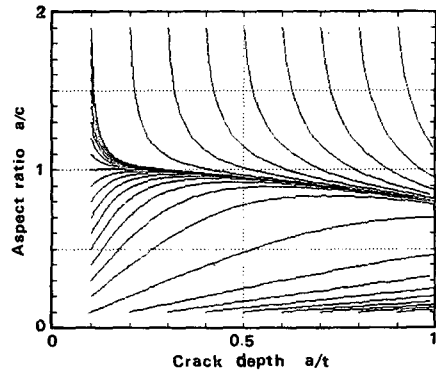


Fig. 2 Shape changes of cracks under tensile loads

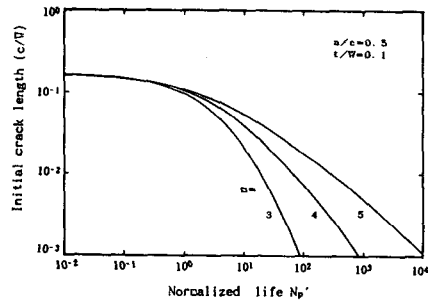


Fig. 3 Diagram for prediction of penetration life

에 따른 크랙형상비의 변화를 예측하기 위한 것으로서, 무차원화한 크랙길이  $a/t$ 가 1인 우측끝단이 관통시점으로서, 각각의 초기 크랙깊이와 초기 크랙형상비로부터 출발하여 각선의 경로를 따라서 관통에 다다른 것으로 이 선도로부터 크랙전진 각 과정에서의 크랙의 형상을 손쉽게 예측할 수 있다.

크랙이 두께를 관통할 때까지의 수명  $N$ 은 식(1)을 적분하므로 해서 식(5), 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$N_p = \int_{a_i}^t C^{-1} \cdot \Delta K_A^{-m} da \quad (5)$$

$$N_p = \frac{t}{C \cdot (\Delta S \cdot \sqrt{\pi t})^m} \int_{x_i}^1 x^{m/2} \cdot f(x, a/c)^{-m} dx \quad (6)$$

첨자  $p$ 는 파단수명과 구별하기 위하여 붙였다. 여기서,  $\Delta S$ 는 응력진폭이며,  $x$ 는  $a/t, a_i$ 는 초기 크랙깊이이고,  $f(x, a/c)$ 은  $x$ 와  $a/c$ 의 함수로서 Newman-Raju의 식에 의한 것이다.

Fig. 3은 기준화된 관통수명  $N_p'$ 과 무차원화한 초기 크랙길이(이하, 본 논문에서는 이를 간단히 초기 크랙길이라 부르기로 한다)  $c/W$ 와의 관계를

재료계수  $m$ 을 변화시켜 나타낸 것으로 기준수명 이란 수명  $N_p$ 를 식(6)의 적분표시 밖의 상수부분 으로 나누어 준 것으로 식(7)과 같다.

$$N_p' = N_p \cdot t^{-1} \cdot C \cdot (\Delta S \cdot \sqrt{\pi t})^m \quad (7)$$

이며, 이  $N_p'$ 은 응력조건, 재료조건으로부터 일반 화하기 위한 것으로 본래의 수명  $N_p$ 는 식(7)을 역 산해서 간단히 구해진다.  $a/c$ 는 초기 크랙형상비 이고  $t/W$ 는 부재형상비로 두께에 대한 판폭비를 의미한다.

### 3. 파단수명

크랙이 두께를 관통한 후 전면과 배면의 진전속 도는 식(7)과 같은 형태로

$$dc_s/dN = C \cdot (\Delta K_s)^m, \quad dc_a/dN = C \cdot (\Delta K_a)^m \quad (8)$$

이며, 여기서,  $c_s, c_a$ 는 각각 전면과 배면의 반크 락길이이며,  $K_s, K_a$ 는 관통후의 각각 전면과 배면 의 응력 확대계수로서 남등의 식을 적용해서

$$K_s = \delta(c_e)/\delta(c_s) \cdot S \cdot \sqrt{\pi \cdot c_s} \cdot F(\eta_s) \quad (9)$$

$$K_a = \delta(c_e)/\delta(c_a) \cdot S \cdot \sqrt{\pi \cdot c_a} \cdot F(\eta_a) \quad (10)$$

처럼 구할 수 있다. 여기서,  $c_e$ 는 두께중양의 반크 락길이로서

$$c_e = \sqrt{(3c_s + c_a)}/2 \quad (11)$$

이며,  $\eta, F, \delta$ 는 각각 다음과 같다.

$$\eta_s = c_s/W, \quad \eta_a = c_a/W \quad (12)$$

$$F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.37\eta^2 - 0.044\eta^3) / \sqrt{1 - \eta} \quad (13)$$

$$\delta(c) = 4S \cdot c \cdot (1 - \nu^2) / (E \cdot V(\eta)) \quad (14)$$

식(14) 중의  $\nu$ 와  $E$ 는 각각 포와송비, 탄성계수이 며,  $V(\eta)$ 는

$$V(\eta) = -0.071 - 0.535\eta + 0.169\eta^2 + 0.02\eta^3 - 1.071(1/\eta) \cdot \log(1-\eta) \quad (15)$$

이다.

관통후 파단수명은 관통한 시점으로부터 불안정 파괴를 일으키는 시점까지의 사이클 수가 되나, 현 단계에서 이와같은 경우의 불안정 파괴, 즉, 피로 파괴 인성치에 관한 연구결과는 없다. 단, 2차원크 락의 경우는 여러 실험결과가 있을 것으로 사료되 나 그대로 3차원의 관통크랙에 적용이 가능한지는

미지수이기 때문에 본 계산에서는 간단히 전면의 크랙길이가 판폭의 0.8배에 달한 시점으로 했다. 어찌됐든 이 문제는 정확한 데이터가 얻어지는대로 간단히 수정을 가하면 해결된다. 파단수명은 식(8)의 첫번째 식을 적분하므로 해서 식(16), 식(17)과 같이 구할 수 있다.

$$N_b = \int_{c_{sp}}^{0.8W} C^{-1} \cdot \Delta K_s^{-m} dc_s \quad (16)$$

$$N_b = \frac{W}{C \cdot (\Delta S \cdot \sqrt{\pi W})^m} \int_{\eta_{sp}}^{0.8} \left[ \frac{\eta_e}{V(\eta_e)} \frac{V(\eta_s)}{\eta_e} \sqrt{\eta_s} \cdot F(\eta_s) \right]^{-m} d\eta_s \quad (17)$$

첨자  $b$ 는 관통수명과 구별하기 위하여 붙였으 며,  $c_{sp}, \eta_{sp}$ 는 각각, 관통시점의 전면의 크랙길이 와 이를 판폭으로 나누어 무차원화한 것이다.

#### 3.1 파단수명에 대한 재료계수 $m$ 의 영향

Fig. 4는 기준화된 파단수명  $N_b'$ 을 초기 크랙길 이  $c/W$ 와 재료계수  $m$ 의 변수로 해서 나타낸 것 으로, 기준화된 파단수명  $N_b'$ 은 식(7)과 마찬가지로 식(18)로 된다.

$$N_b' = N_b \cdot W^{-1} \cdot C \cdot (\Delta S \cdot \sqrt{\pi W})^m \quad (18)$$

Fig. 3의 관통수명의 경우 초기 크랙길이가 작아 질 수록 수명이 길어지고 계수  $m$ 의 영향( $m$ 에 따 른 수명의 차이) 또한 초기 크랙길이가 작아질 수 록 커지는 반면, 파단수명의 경우 초기 크랙길이가 대략 0.1 이하가 되면 동일  $m$ 에 대해서 수명이 거 의 동일한 값을 나타내고  $m$ 의 영향 또한 변화가 없음을 알 수가 있다. 파단수명의 경우 수명은 관 통시점의 크랙길이가 좌우하게 되나 초기 크랙길이 가 대략 0.1 이하가 되면 관통시점의 크랙길이는

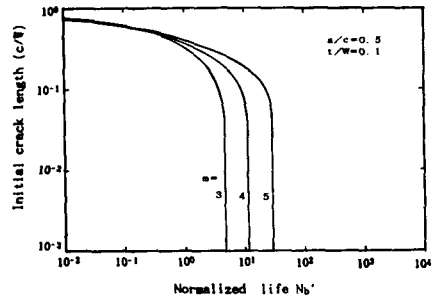


Fig. 4 Diagram for prediction of break life (effect of material factor  $m$ )

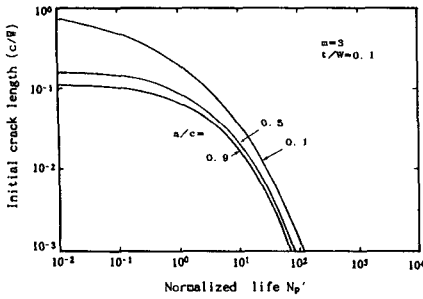


Fig. 5 Diagram for prediction of penetration life (effect of initial crack aspect ratio)

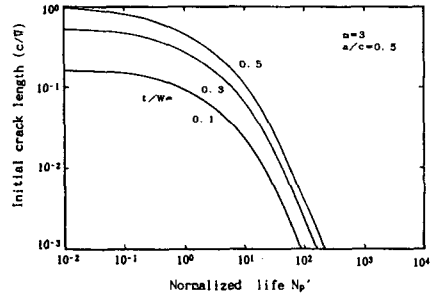


Fig. 7 Diagram for prediction of penetration life (effect of element aspect ratio)

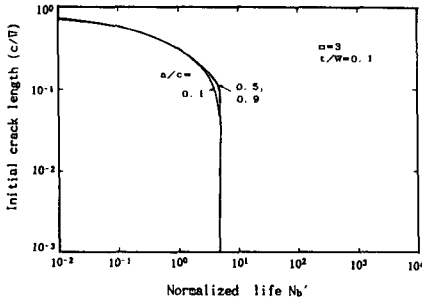


Fig. 6 Diagram for prediction of break life (effect of initial crack aspect ratio)

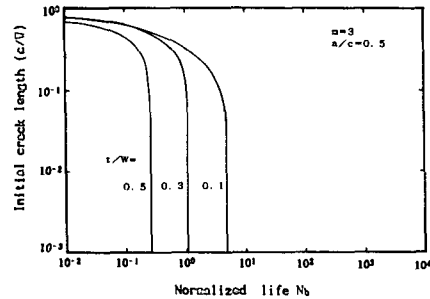


Fig. 8 Diagram for prediction of break life (effect of element aspect ratio)

거의 같은 값을 가지게 됨을 의미하며 이러한 경향은 Fig. 2에서도 어느정도 예측이 가능하다.

### 3.2 파단수명에 대한 초기 크랙형상비(a/c)의 영향

Fig. 5는 Fig. 3의 관통수명을 재료계수  $m$  대신에 초기 크랙형상비  $a/c$ 를 변화시켜 나타낸 것으로 초기 크랙길이가 작을 경우에는 그 영향이 약간 있다가 초기 크랙길이가 커질수록 그 영향도 커짐을 나타낸다. 반면, Fig. 6은 Fig. 4의 파단수명을 Fig. 5와 마찬가지로 초기 크랙형상비를 변화시켜 나타낸 것으로, 초기 크랙형상비의 영향이 초기 크랙길이가 작을 경우 거의 나타나지 않으며, 초기 크랙길이가 0.1에 가까워지면서 나타났다가 다시 없어지는 것으로 나타나 있다. 그러나, 실질적으로 차이가 없어지는 것이 아니라, 적용된 데이터에 의한 계산상, 초기 크랙길이가 대략 0.2 이상에서는 이미 무차원화한 크랙길이  $a/t$ 가 1을 넘어 계산초기부터 관통되어진 것으로 되기 때문에 차이가 없어진다. 즉, 차이가 없는 것이 아니라 없는 것처럼

보이는 것에 지나지 않는다. 아 물론, 파단수명의 경우 관통수명의 경우와 달리 초기 크랙형상비의 영향은 초기 크랙길이가 작을 경우에는 거의 없고 크랙길이가 커지면 약간의 차이가 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 파단수명에 대한 부재형상비(t/W)의 영향

Fig. 7은 Fig. 3의 관통수명을 재료계수  $m$  대신에 부재형상비  $t/W$ 를 변화시켜 나타낸 것이고, Fig. 8은 Fig. 4의 파단수명을 Fig. 7과 마찬가지로 부재형상비를 변화시켜 나타낸 것으로, 두 그림의 경향이 완연히 다름을 알 수가 있다. 즉, 관통수명의 경우는 초기 크랙길이가 커질수록 부재형상비의 영향이 커지나, 그와는 반대로, 파단수명의 경우는 그 영향이 초기 크랙길이가 커질수록 작아진다.

## 4. 결 론

본 연구는 표면크랙의 피로수명예측 수법에 관한 것으로서, 특히 관통후 파단수명의 계산수법과 파

피역학적 인자들의 영향을 논했다. 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) LBB개념에 입각하여 관통이후 파단수명을 예측하는 수법을 제시했다.

(2) 재료계수  $m$ 이 수명에 미치는 영향을 파악한 결과, 관통수명의 경우 초기 크랙길이가 작아질수록 수명이 길어지고 계수  $m$ 의 영향( $m$ 에 따른 수명의 차이) 또한 초기 크랙길이가 작아질수록 커지는 반면, 파단수명의 경우 초기 크랙길이가 대략 0.1 이하가 되면 동일  $m$ 에 대해서 수명이 거의 동일한 값을 나타내고  $m$ 의 영향 또한 변화가 없음을 알 수가 있었다.

(3) 초기 크랙형상비  $a/c$ 의 수명에 미치는 영향을 파악한 결과, 파단수명의 경우 관통수명의 경우와 달리 초기 크랙형상비의 영향은 초기 크랙길이가 작을 경우에는 거의 없고 크랙길이가 커지면 약간의 차이가 나타난다.

(4) 부재형상비  $t/W$ 의 수명에 미치는 영향을 파악한 결과, 관통수명의 경우는 초기 크랙길이가 커질수록 부재형상비의 영향이 커지나, 그와는 반대로, 파단수명의 경우는 그 영향이 초기 크랙길이가 커질수록 작아진다.

### 참고문헌

- (1) 三原正言, 1977, “壓力容器における疲労き裂の傳播成長解析に關する二三の考察,” 壓力技術, 第15卷, 第6號, pp. 300~308.
- (2) Murakami, Y., 1987, “Stress Intensity Factors Handbook,” Pergamon Press, p. 714.
- (3) 栗原正好, 三原正言, 1981, “表面き裂傳播に關する構造物の安全性評價についての一考察,” 日本機械學會講演論文集, No. 810-7, pp. 201~206.
- (4) Jolles, M. and Tortoriello, V., 1983, “Geometry Variation During Fatigue Growth of Surface Flaws,” ASTM STP 791, pp. 297~307.
- (5) Jolles, M. 1983, “Constraint Effects on the Prediction of Fatigue Life of Surface Flaws,” Trans. ASME, Vol. 105, pp. 215~218.
- (6) Corneliu Manu, and Anthony R. Ingraffea, 1984, “Numerical Evaluation of the Growth Rate Material Parameters in Fatigue Propagation of Surface Flaws,” Nuclear Engineering and Design 77, pp. 131~138.
- (7) Wu Shang-Xian, 1985, “Shape Change of Surface Crack During Fatigue Growth,” Eng. Frac. Mech., Vol. 22, No. 5, pp. 897~913.
- (8) 南起祐, 安藤柱, 藤林信評, 小倉信和, 1987, “高張力鋼の疲労壽命とき裂貫通舉動,” 第4回破壊力學シンポジウム講演論文集, 日本材料學會, pp. 240~244.
- (9) 남기우, 1991, “평활시험편에 있어서 균열형상비 변화에 따른 피로수명과 균열관통거동,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 68~71.
- (10) 尹漢鏞, 岡村弘之, 1988. “半だ圓表面き裂の疲労き裂進展における確率論的壽命豫測,” 日本機械學會論文集, 第55卷, 第513號, pp. 1095~1100.
- (11) Han-Yong Yoon and Hiroyuki Okamura, 1990, “The probabilistic Prediction of the Fatigue Crack propagation Life of a Semi-Elliptical Surface Crack,” Proceedings of the KSME/JSME Joint Conference on FRACTURE AND STRENGTH '90, pp. 678~683.