

# MFC센서를 이용한 피로수명예측에 관한 연구

이 지 훈\* · 오 동 진\* · 김 명 현\*<sup>†</sup>

\*부산대학교 조선해양공학과

## A Study on Prediction of Fatigue Life using MFC Sensors

Ji-Hoon Lee\*, Dong-Jin Oh\* and Myung-Hyun Kim\*<sup>†</sup>

\*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received August 23, 2013 ; Revised December 3, 2013 ; Accepted December 13, 2013)

### Abstract

The large-scale structures have the possibility that there are defects such as cracks due to stress concentration caused by geometric discontinuities in the structure. In this respect, the assessment of fatigue life and the development of structural health monitoring(SHM) are very important. Fatigue design of structure is typically accomplished either using a set of stress cycle (S-N) data obtained from fatigue tests or using the fracture mechanics approach. The stress intensity factor(SIF) is required for the estimation of fatigue crack propagation life from the linear elastic fracture mechanics (LEFM) perspective. In this study, Macro Fiber Composite(MFC) sensor for the measurement of SIF of two dimensional cracks is used. The SIF based on the piezoelectric constitutive law and fracture mechanics are calculated. The measured values of the SIF are later used for the prediction of the crack propagation life. In this study, the measured value of the SIF and the fatigue life are compared with the theoretical results.

Key Words : MFC sensor, Stress intensity factor(SIF), Fatigue crack propagation life

## 1. 서 론

선박이나 해양구조물을 비롯한 대형 강 구조물은 구조물 내에 있는 기하학적 불연속부에서 발생하는 응력 집중에 의하여 균열 등의 결함이 생길 가능성이 높다<sup>1-2)</sup>. 이러한 균열을 포함하는 구조물의 잔여 수명 예측과 안전성 평가 시스템의 개발은 구조물의 파괴에 의한 사고를 방지하기 위해 매우 중요하다.

구조물의 안전성 평가 관점에서 균열이 발생한 경우 균열발생이 파단으로 직결되는 구조물도 있지만, 균열 발생 이후에도 균열이 전파되는 기간동안 운항이 가능한 구조물도 있다. 이러한 구조물의 경우 전체수명의 많은 부분을 차지하는 균열진전수명을 S-N 선도를 이용한 기존의 방법으로는 명확히 정의하기 어렵기 때문에 선형탄성파괴역학(LEFM)에 기초한 평가 변수인

응력확대계수(SIF)를 사용하여 균열이 존재하는 구조물의 피로 수명을 정의할 필요가 있다<sup>3-4)</sup>.

본 연구에서는 최근 여러 분야에서 다양한 적용 가능성을 보이고 있는 Micro Fiber Composite (MFC) 센서와 Fujimoto의 방법<sup>5)</sup>을 적용하여 강재의 Crack opening mode  $K_I$  과 In-plane shear mode  $K_{II}$  를 측정 후 파괴 역학적 이론을 바탕으로 한 응력 확대계수를 비교하였다. 또한 피로시험을 통하여 측정된 균열진전수명과 Paris 법칙을 이용한 균열진전수명을 비교, 고찰하였다.

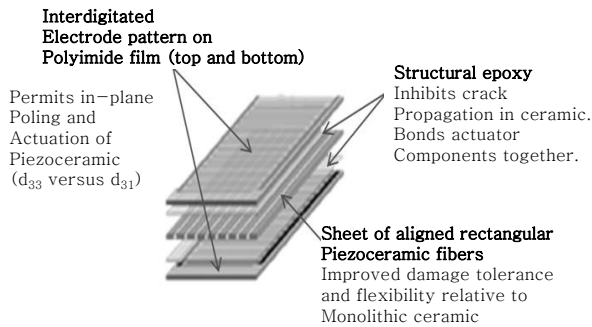
## 2. 응력확대계수(SIF) 측정

### 2.1 MFC센서

Fujimoto의 방법에서는 구조물에 발생하는 응력에 의해 요소 표면상에 전하를 발생시키는 특성을 가지고

**Table 1** MFC sensor properties

Overall Dimensions	37 mm × 17 mm
Active Area	28 mm × 14mm
IDE Spacing	0.5 mm
Capacitance	1.2 nF
PZT Type	Navy Type II
Max Voltage	-500 V ~ + 1500 V
Max Tensile Strain	4500 ppm
Thickness	0.3 mm



**Fig. 1** Component of MFC sensor

있는 PZT (piezo-ceramic transducers)를 사용한 압전 요소를 시편에 부착하여 응력확대계수(SIF)를 시험적 방법으로 측정하는 것이 가능하다는 것을 보여주었다. 하지만 PZT는 취성재료이며 약한 내구성을 가지고 있기 때문에 피로파괴 측면에서 저온과 같은 특수한 조건에 노출되게 되면 구조물보다 더 취약하다. 본 연구에서는 PZT와 동일한 특성을 가지고 있지만 PZT에 비하여 높은 내구성과 효율성을 가지고 있는 Fig. 1과 같은 구조를 가지는 MFC 센서를 이용하여 응력확대계수(SIF)를 측정하였다. 본 연구에서는 MFC 센서는 인장 또는 압축 변형률이 작용할 경우에 압전 효과를 발생하는 P1-Type (d33)을 사용하였으며, 센서의 기본적인 사양은 Table 1에 나타내었다.

**2.2 압전요소의 구성방정식**

MFC 센서를 접착제를 사용하여 시편의 표면에 부착한 후 오실로스코프를 통하여 출력 전압 V를 측정한다. Fujimoto의 방법을 사용하면, 이때 출력 전압 V는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V = C_c \cdot K \int (\sigma_x + \sigma_y) dS \tag{1}$$

여기서  $C_c$ 는 시험을 통해 얻는 보정 상수,  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$

는 MFC센서의 적분 구간을 의미하는 유효면적(S)에 발생하는 x, y방향의 응력 그리고 K는 응력조건에 따라 결정되는 상수로 평면 응력(plane stress) 조건에서는 1이 되고 평면 변형률 (plane strain) 조건에서는 0.74가 된다.

선형 탄성 파괴 역학(LEFM)에서 판의 두께에 관계 없이 균열 끝에서의 응력 합은 식 (2)과 같은 간단한 형식으로 나타낼 수 있다<sup>6)</sup>.

$$\sigma_x + \sigma_y = \frac{2K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{2K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \tag{2}$$

위의 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (1)은 다음과 같이 바뀌게 된다.

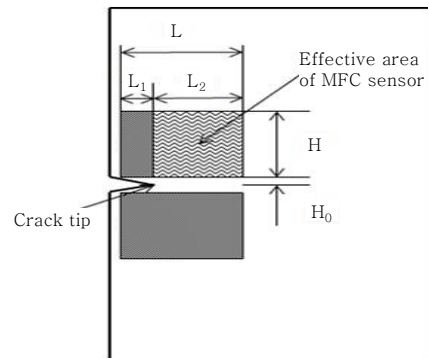
$$V_A = C \cdot K \int_{H_0}^{H+H_0} \int_{-L_1}^{L_2} \frac{2K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{2K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} dx dy \tag{3}$$

$$V_B = C \cdot K \int_{-H-H_0}^{H_0} \int_{-L_1}^{L_2} \frac{2K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} - \frac{2K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} dx dy \tag{4}$$

식 (3), (4)에서  $V_A$ 와  $V_B$ 는 균열 양 끝단에 사용된 MFC센서에서 측정된 전압값, r은 균열 길이,  $\theta$ 는 균열의 기울기, 적분 구간으로 사용된 L, H는 Fig. 2에 나타내었듯이 MFC 센서의 폭과 높이를 의미한다. 출력 전압 값들을 모두 측정한 후 식 (3), (4)의 해를 구함으로써 응력 확대 계수(SIF)를 계산할 수 있다. 식 (3), (4)에  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 을 대입하여 정리하여 해를 구함으로써 다음과 같이  $K_I$ ,  $K_{II}$ 를 얻게 된다.

$$K_I = \frac{V_A + V_B}{2CKG_1} \tag{5}$$

$$K_{II} = \frac{V_B - V_A}{2CKG_2} \tag{6}$$



**Fig. 2** Effective surface of MFC sensor

$$G_1 = \int_{H_0}^{H+H_0} \int_{-L_2}^{L_1} \sqrt{\frac{x^2 + y^2 + x}{\pi(x^2 + y^2)}} dx dy \quad (7)$$

$$G_2 = \int_{H_0}^{H+H_0} \int_{-L_2}^{L_1} \sqrt{\frac{x^2 + y^2 - x}{\pi(x^2 + y^2)}} dx dy \quad (8)$$

상수  $G_1$ 과  $G_2$ 를 계산하기 위해 먼저 적분 구간을 설정하게 된다. 실제 피로 균열이 성장함에 따라 MFC 센서의 유효면적이 Fig. 2와 같이 균열 끝부분부터  $L_1$ 까지가 되고 적분 구간 중  $L_1$ 은 0이 된다<sup>7)</sup>.

### 3. 균열진전수명 예측

구조물의 피로 수명은 초기균열영역과 균열진전영역으로 구성되고, 균열진전영역이 피로 수명의 대부분을 차지한다. 피로수명은 응력확대계수(SIF)와  $da/dN$ 의 관계를 이용하여 Fig. 3과 같이 나타낸다. 이 곡선은 3 영역으로 구분되는데, 낮은 응력의 I 영역에서는 균열 거동은 초기값  $\Delta K_{th}$ 의 영향을 받는다. 중간 부분은 많은 구조물 등에 적용되는 II 영역으로 곡선은 선형성을 나타낸다. 마지막으로 높은  $\Delta K$ 에서, 매우 높은 균열성장속도와 작은 피로수명을 나타내는 III 영역이 있다. Paris는 선형 영역(region II)을 다음과 같이 나타내었다<sup>8)</sup>.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (9)$$

여기서  $C$ ,  $m$ 은 재료 상수이고,  $\Delta K$ 는 응력확대계수 범위이다.  $\Delta K$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = F \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

여기서  $\Delta \sigma$ 는 응력범위,  $a$ 는 균열길이,  $F$ 는 기하학적 형상과 하중조건에 의해 결정되는 형상계수이다. Tada (1985)는 Fig. 4에 표현된 SEN (single edge notch)을 이용하여

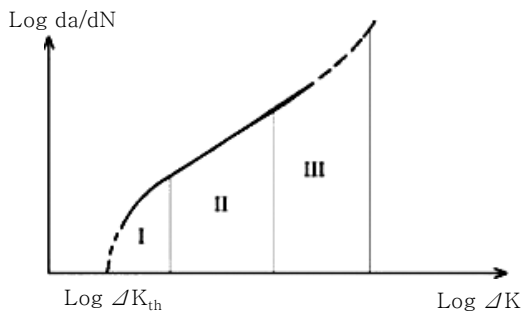


Fig. 3  $da/dN-\Delta K$  curve

시험편이 1축 인장하중을 받을 때 다음의 형상 계수 계산식을 제안하였다<sup>8)</sup>.

$$F = 0.266 \cdot \left(1 - \frac{a}{w}\right)^4 + \frac{0.867 + 0.266\left(\frac{a}{w}\right)}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \quad (11)$$

여기서  $w$ 는 시편의 폭을 의미한다. 식(9)의 변수를 분리하고 적분형태로 표현한 후 식(10)에 대입하면 균열진전수명을 계산할 수 있는 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta \sigma)^m (\pi a)^{m/2} F^m} = \frac{1}{C(\Delta \sigma)^m (\pi)^{m/2}} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{a^{m/2} F^m} \quad (12)$$

여기서  $a_i$ 는 초기 균열길이,  $a_f$ 는 최종 균열길이를 나타낸다.

### 4. 시험 방법

본 연구에서 사용된 시편은 ASTM-E647에 따라서 제작된 연강재 시험편( $\sigma_Y = 235MPa$ )이고 시편의 치수는 Fig. 4에 나타내었다. 균열진전이 폭방향으로 진전될 수 있도록 SEN (single edge notch)를 EDM (electrical discharge machining) 방법을 사용하여 시편의 중심부에 높이 3mm, 폭 3mm의 크기로 삽입하였다. 피로 하중의 파형은 정현파이며, 응력비  $R=0.1$ , 주파수 8Hz, 하중 범위를 99kN으로 시험을 수행하였다. 피로 시험 과정 중에는 확대경을 이용하여 피로균열 발생 시기 및 위치를 확인하였다. MFC 센서는 Fig. 4에 나타내었듯이 시험편의 노치를 중심으로 2mm 간격을 두고 부착하여 균열이 진전함에 따라 디지털 오실로스코프를 이용하여 전압값을 일정 시간 주기로 저장하였다. 이때, 접착 조건에 따라 값이 달라지기 때문에 센서 부착 후 출력 전압과 응력 범위를 이용하여 보정(calibration)을 하여야 한다. 두께가 15mm인 시편이

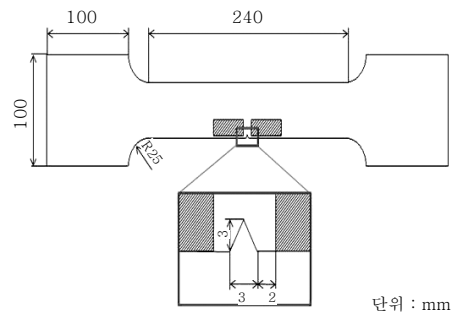


Fig. 4 Single edge notch tension specimen

고 1축의 주기적인 응력을 받기 때문에 평면 변형을 조건이다. 이에 따라서  $K=0.74$ 가 되고 위의 조건들을 식 (1)에 대입하면 보정 상수를 구하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{V}{K \times \Delta\sigma \times S} \quad (13)$$

식(12)에서  $\Delta\sigma$ 는 응력범위,  $V$ 는 출력 전압,  $S$ 는 MFC 센서의 면적을 나타낸다. 위의 조건들과 식 (13)를 이용하여 계산 한 결과 보정 상수  $C=0.002$ 가 됨을 알 수 있다.

### 5. 시험 결과

보정을 마친 후, 피로 시험을 통해 얻어진 출력 전압  $V$ 와 식 (5), (6)을 사용하여 응력확대 계수를 측정하였다. 균열의 길이와 Cycle의 관계는 Fig. 5에 나타내었다. 초기 균열은 균열이 육안으로 확인이 가능한 1mm로 정의하였다. Cycle이 늘어날수록 균열의 길이가 급격하게 늘어나는 것을 알 수 있고, 특히 균열길이가 7mm에 도달한 후 균열진전속도가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 오실로스코프에서 측정 되던 출력 전압과의 관계는 Fig. 6에 나타내었다. 출력 전압과 균열길이의 관계를 보면 균열길이가 7mm에 도달한 후 측정된 출력 전압값이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이때 출력전압이 급격히 떨어지는 것은 균열길이가 7mm에 도달한 이후에 진전속도가 급격하게 증가하는 것과 균열의 길이가 성장하여 센서의 유효표면 범위의 한계치에 도달하기 때문으로 생각된다. 피로시험을 통해 측정된 응력확대계수와 식(9)를 사용하여 계산한 값을 Fig. 7에 나타내었다. 그래프를 보면 균열이 천천히 성장하는 구간에서는 응력확대계수가 대체로 일치하나 균열의 성장이 빠르게 진행되는 구간을 지난 후에는 점차 오차가 커짐을 확인할 수 있다. 이는 균열진전 속도가 급격하게 증가하면서 출력 전압에 영향을 주었기

때문이라고 판단된다.

피로시험을 진행하면서 초기균열이 발생한 후 7,200 cycle마다 균열길이를 측정하였다. 측정된 데이터와 응

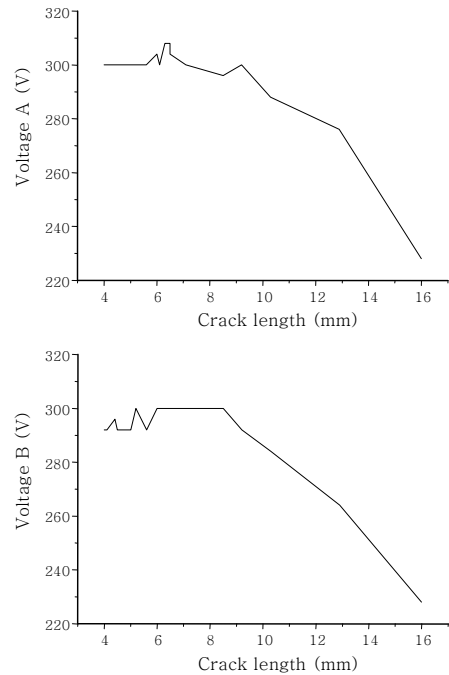


Fig. 6 Voltage A,B vs. crack length

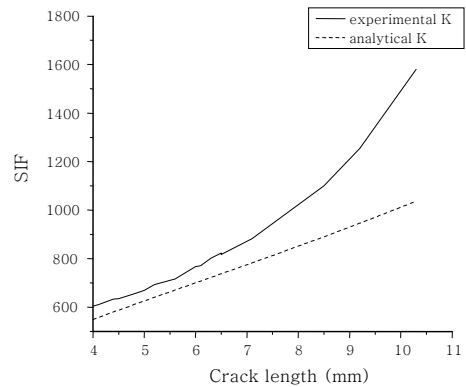


Fig. 7 Stress Intensity Factor(SIF) vs. crack length

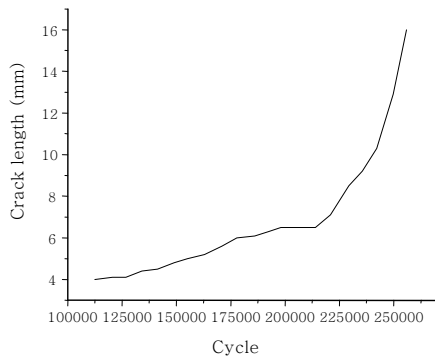


Fig. 5 Crack length vs. cycle

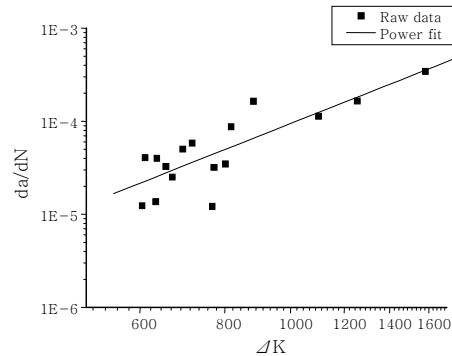


Fig. 8 da/dN vs. ΔK curve

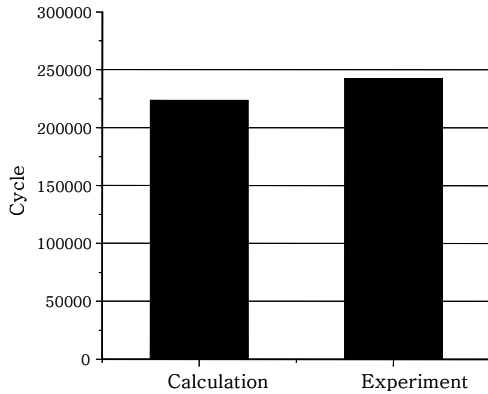


Fig. 9 Comparison of theoretical and experimental fatigue life

력확대계수를 사용하여 Fig. 8에 나타내었고, 선형보간법을 사용하면 Paris가 제시한 식 (9)에서의 재료상수  $m$ ,  $C$ 는 2.88,  $5.011e-12$ 이다. 식 (12)을 통해 계산한 피로수명과 피로시험을 통하여 측정한 피로수명을 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 피로시험을 통하여 측정한 피로수명은 242,230 cycle이고 식 (12)를 통해 계산한 피로수명은 223,321 cycle로 약 8% 정도의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 MFC 센서를 이용하여 응력확대계수(SIF)를 측정하고 피로수명을 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

1) Fujimoto가 제안한 방법을 이용하여 MFC센서를 이용한 피로시험을 통하여 직접적으로 응력확대계수(SIF)를 측정할 수 있다.

2) 선형탄성파괴역학(LEFM)을 기반으로 한 응력확대계수(SIF)와 피로시험을 통해 얻어진 값을 비교한 결과, 균열이 급격하게 진전하기 이전에는 유사한 증가양상을 보이지만 균열이 급격하게 진전한 이후에는 오차가 점차적으로 커지는 것을 확인할 수 이었다. 이는 균열이 진전하면서 센서에 영향을 끼쳐 오차가 발생하였다고 판단된다.

3) Paris 법칙을 이용하여 피로수명을 예측한 결과 실제 측정값과 이론값의 오차가 약 8%정도 발생하였고 위에서 정의한 측정된 응력확대계수(SIF)의 오차가 피로수명의 이론값에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4) MFC센서를 이용한 피로시험을 통하여 균열의 성장에 따른 응력확대계수(SIF)의 측정과 균열진전수명이 예측 가능함을 알 수 있었고, 급격한 균열 진전 등으로 인한 센서에서 발생하는 오차를 줄인다면 구조물의 안전성 평가 시스템(Structural health monitoring)으로 적절할 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

### Reference

1. D.S. Um, et al. : A Study on the fatigue strength analysis of the welded joints in ship hull construction, Journal of KWS, **10-4** (1992), 259-267 (in Korean)
2. M.H. Kim, S.W. Kang, and H.R. Kim :A Study on the Fatigue Life Assessment for Load-carrying Fillet Welded Joints using Stress Intensity Factor, Journal of KWJS, **26-6** (2008), 97-102 (in Korean)
3. Norman E.Dowling : Mechanical Behavior of Material (3rd Edition), 2007, Pearson Education, Inc., 535-597
4. K.S. Kim, et al. : A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure(I), Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **45** (2008), 669-678 (in Korean)
5. Fujimoto, Y : Piezoelectric sensor for stress intensity factor measurement of two dimensional cracks, Engineering Fracture Mecahnics, **70** (2003), 1203-1218
6. T.L. Anderson : Fracture mechanics(3rd Edition), 2005, CRC Press
7. M.H. Kim, B. Butrym, and D.J.Inman : Fatigue life Estimation of structural components using MFC sensors. An International Journal for Experimental Mechanics. 2010
8. H. Tada, P.C. Paris, and G.R. Irwin : The stress analysis of Cracks Handbook(2nd Edition), 1985, Paris Productions Inc.
9. M.H. Kim, J.Y. Geam : A structural health monitoring system with application to welded structures, The Korea Society of Ocean Engineers, **19-4** (2005), 384-394 (in Korean)
10. W.K. Wilkie, et al. : Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications, Proceedings of 7<sup>th</sup> SPIE, **3991** (2000), 323-334