

MFC 센서를 이용한 응력 확대 계수 측정에 관한 연구

오 동 진* · 김 명 현*[†]

*부산대학교 조선해양공학과

A Study of Stress Intensity Factors using Micro Fiber Composite Sensors

Dong-Jin Oh* and Myung-Hyun Kim*[†]

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

[†]Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received March 25, 2011 ; Revised April 25, 2011 ; Accepted May 17, 2011)

Abstract

Recently, the structural failures due to fatigue occur frequently with the increase of size of ships and offshore structures. In this respect, the assessment of fatigue life and the residual strength are very important. Currently, the smart materials technology has demonstrated a variety of possibilities for a diagnosis of structural strength and structural health condition for large structures. The benefits and feature of the MFC sensor are more flexible, durable and reliable than conventional smart material. In this study, Micro Fiber Composite (MFC) sensor for the measurement of stress intensity factor (SIF) of two dimensional cracks induced in a structure is developed. Two MFC sensors are placed in the vicinity of the crack tip close to each other with the crack tip in between them. The SIFs of Mode I (K_I) as well as of Mode II (K_{II}) based on the piezoelectric constitutive law and fracture mechanics are calculated. In this study, the SIF values measured by MFC sensors are compared with the theoretical results and measured value.

Key Words : MFC sensor, Stress intensity factor(SIF), Fatigue crack growth, Piezoelectric

1. 서 론

최근 선박 및 해양 구조물의 대형화로 인한 피로 파괴가 빈번히 발생하고 있다. 이로 인해 많은 사회적, 경제적 손실이 발생하고 있으며, 이를 이유로 피로 균열 발생 시 구조물의 잔여 수명 예측과 안전성 평가 시스템의 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 최근 여러 분야에 있어서 다양한 적용 가능성을 보이고 있는 Micro Fiber Composite(MFC) 센서를 이용하여 각종 구조물의 잔여 수명을 예측할 수 있는 통합적 구조물 상태진단 시스템 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 선박 및 해양 구조물은 시간에 따라 변동하는 하중에 의해 지속적으로 변형을 발생하는 복잡한 구조물로 이러한 구조

물의 동적 하중을 고려한 강도 해석 및 설계 기준에 관한 연구와 피로 강도 및 균열감지에 관련된 연구는 매우 중요하다. 특히 구조 부재에 존재하는 균열은 구조물의 파단을 유발 할 수 있기 때문에 중요한 고려 대상이 된다. 이때 선형 탄성 파괴 역학(linear elastic fracture mechanics)에 기초한 평가 변수인 응력 확대 계수(SIF)는 균열이 존재하는 구조물의 안전성 평가에 적용되어 왔다¹⁾.

본 연구에서는 알루미늄 빔의 crack opening Mode K_I 과 in-plane shear mode K_{II} 를 측정하기 위해 피로 시험을 통해 얻어진 기존의 데이터 값들을 Fujimoto (2003)의 방법을 참고하여 Mode I과 Mode II의 응력 확대 계수(SIF)를 측정 후 파괴 역학적 이론을 바탕으로 한 응력 확대 계수와 비교, 고찰하였다.

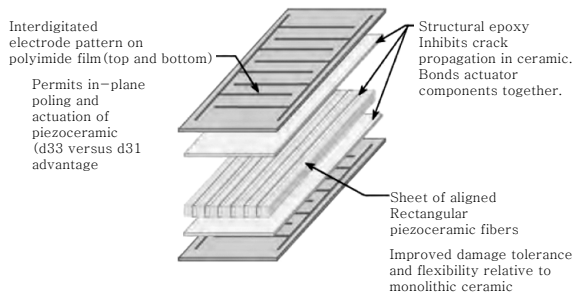


Fig. 1 Structure of MFC sensor

2. MFC 센서

2.1 MFC 센서의 특징

Fujimoto(2003)의 방법에서는 PZT[Pb(Zr, Ti)O₃]를 사용한 압전 요소를 이용하여 응력 확대 계수를 시험적 방법으로 측정하는 것이 가능하다는 것을 보여주었다¹⁾. 하지만 PZT는 취성 재료이며 약한 내구성을 가지고 있다. 이는 저온과 같은 특수한 조건에 노출되게 되면 구조물 보다 피로 파손에 더 취약하다는 것을 의미한다. 이에 비해 MFC 센서는 기존 센서들에 비해 높은 내구성과 효율성을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 구조를 가지는 MFC 센서를 사용하여 응력 확대 계수를 측정하였다. 균열 끝에서 발생하는 응력에 의해 시편 표면에 전하를 발생시키는 MFC 센서의 특성을 이용하면 구조물에서의 응력 측정을 수행할 수 있고 2차원 균열의 응력 확대 계수를 측정할 수 있다. 등방성을 지닌 MFC 센서를 구조물의 표면에 부착하면 압전 요소는 부착된 표면에서의 응력 합($\sigma_x + \sigma_y$)과 비례하여 전하를 발생시킨다²⁾. 선형 탄성 파괴 역학(LEFM)을 바탕으로 위에 언급한 MFC 센서의 특성을 조합하면 응력 확대 계수 crack opening Mode K_I과 in-plane shear mode K_{II}를 각각 구할 수 있다.

2.2 압전 원리를 이용한 응력 측정

압전 원리는 표면에 가해진 응력에 비례하여 전하를 유발하는데 이 특성은 구조물의 응력 측정에 사용된다. MFC 센서를 Fig. 2와 같이 접착제를 사용하여 시편의 표면에 부착한 후 센서에 전선을 연결 후 전하의 적분 값에 비례하여 얻어지는 출력 전압 V를 측정한다. 이때 출력 전압 V는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V = C \cdot K \int (\sigma_x + \sigma_y) ds \quad (1)$$

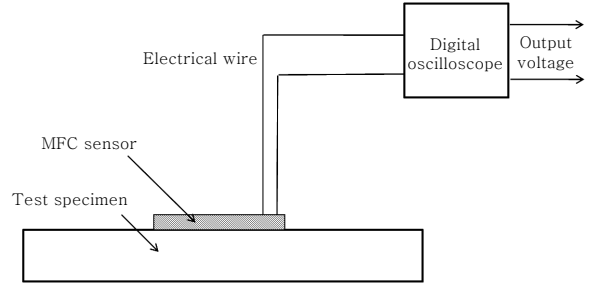


Fig. 2 Stress measurement method using MFC sensor

여기서 C는 시험을 통해 얻는 보정 상수이고 K는 응력 조건에 따라 결정되는 상수로 평면 응력 조건에서는 1이 되고 평면 변형률 조건에서는 0.74가 된다. 이는 시편 표면에서의 응력이 같다고 할지라도 평면 변형률 조건에서 얻어지는 출력 전압 값이 평면 응력 조건에서의 값보다 더 작아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 적분 구간을 의미하는 S는 MFC 센서의 실제 유효 면적을 뜻한다³⁾.

2.3 2차원 균열에서의 응력 측정 방법

선형 탄성 파괴 역학(LEFM)에서 판의 두께에 관계 없이 균열 끝에서의 응력 합($\sigma_x + \sigma_y$)은 식 (2)와 같은 간단한 형식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

식 (2)에서 r은 균열 길이, θ 는 균열의 기울기를 뜻한다. 본 연구의 방향은 위의 식 (3), (4)을 사용하여 Mode I과 Mode II에서의 응력 확대 계수를 측정하는 것이다. 측정된 출력 전압 값으로부터 각각 K_I, K_{II}를 구하기 위해서는 적어도 두 개의 센서가 균열 끝부분에 부착되어야 하며 이때 출력 전압 값들을 모두 측정한 후 식 (3), (4)³⁾의 해를 구함으로써 응력 확대 계수를 계산할 수 있다. 식 (3), (4)에 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 을

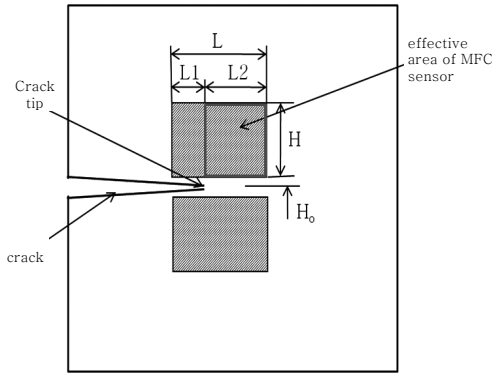


Fig. 3 Effective area of MFC sensor

대입하여 정리하여 해를 구함으로써 다음과 같이 K_I , K_{II} 을 얻게 된다.

$$K_I = \frac{V_A + V_B}{2 C K G_1} \tag{5}$$

$$K_{II} = \frac{V_B - V_A}{2 C K G_2} \tag{6}$$

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

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

상수 G_1 과 G_2 를 계산하기 위해 먼저 적분 구간을 설정하게 된다. 실제 피로 균열이 성장함에 따라 MFC 센서에 작용하는 응력 범위가 바뀌기 때문에 Fig. 3과 같이 적분되는 유효 면적도 바뀌어야 함을 알 수 있다. 이에 따라 유효 면적은 균열 끝부분부터 L_2 까지가 되고, 적분 구간 중 L_1 은 0이 된다.

3. 균열 진전과 파단 수명 예측

구조물의 피로 수명은 균열 초기 영역과 균열 전파 영역으로 구성되고, 균열전파영역이 피로 수명의 대부분을 차지한다. 피로균열 진전 거동은 Fig. 4와 같이

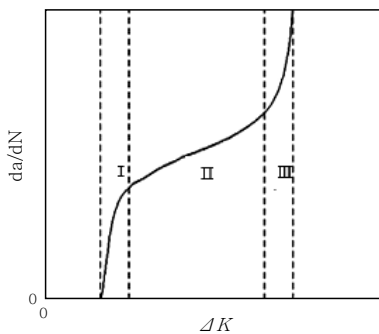


Fig. 4 $da/dN-\Delta K$ curve

$da/dN-\Delta K$ 선도로 나타나며, Paris는 선형 영역(region II)을 다음과 같이 나타내었다.⁵⁾

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

여기서 C , m 은 재료 상수이고, ΔK 는 응력 확대 계수 범위이다. 위의 식 (9)를 통해 파단 수명을 계산 할 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \tag{10}$$

변수를 분리하고 적분한 후 정리하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 식 (11)의 a_i 는 초기 균열 길이, a_f 는 최종 균열 길이를 뜻하며 a_f 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{2}{(n-2)C(\Delta K)^m} \left(\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right) \tag{11}$$

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{f(g)\sigma_{max}} \right)^2 \tag{12}$$

식 (12)에서 K_c 는 재료의 고유 물성치인 파괴 인성, $f(g)$ 는 형상을 고려한 보정계수이다.

4. 시험 방법

4.1 시편 제작 및 시험 방법

본 논문에서는 과거 피로 시험을 통해서 얻었던 데이터를 바탕으로 응력 확대 계수를 측정해 보았다. 이때 사용된 시편은 알루미늄 빔(Al6061)이고 시편의 치수는 Fig. 5에 나타내었다. 균열을 유도하기 위해 중앙부에 1mm의 노치를 만들어 제작하였다. 피로 하중의 파형은 정현파를 사용하였고 응력비 $R=0.1$, 주파수 10Hz의 조건에서 시험을 수행하였다. 또한, 센서는 d33 effect를 가지는 유효 면적 $28\text{mm} \times 14\text{mm}$, 두께가 0.3mm인 'MFC sensor P1 type M2814-P1'를 사용하였다. 본 논문에서는 피로하중의 파형은 정현파를 사용하였고

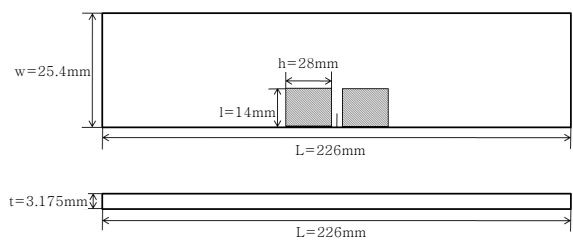


Fig. 5 Dimension of test specimen

응력비 R=0.1, 10Hz 의 조건에서 시험을 수행하였다. 시험 과정 중 균열은 점차적으로 진전하게 되는데 진전 길이는 디지털 확대경을 통하여 관찰, 측정하였고 출력 전압은 디지털 오실로스코프를 사용하여 측정하였다.

피로 시험을 하기 전 균열 전파 경로와 MFC 센서의 거리를 3mm로 하여 부착하였다. 이때, 접촉 조건에 따라 값이 달라지기 때문에 센서 부착 후 출력 전압과 응력 범위를 이용하여 보정(calibration)을 하여야 한다. 두께가 얇은 박판이고 1축의 주기적인 응력을 받기 때문에 평면 응력 조건임을 알 수 있고, 이에 따라 $\sigma_x = \sigma$, $\sigma_y = 0$ 이 되고 K=1이 됨을 알 수 있다. 위의 조건들을 식 (1)에 대입하면 보정 상수를 구하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{v}{\sigma \times s} \tag{13}$$

식 (13)에서 σ 는 응력 범위, v 는 출력 전압, s 는 센서의 면적을 뜻한다. 위의 조건들과 식 (13)을 이용하여 계산한 결과 보정 상수 C=0.002가 됨을 알 수 있다.

4.2 MFC 센서를 이용한 SIF 측정

보정을 마친 후, 피로 시험을 통해 얻어진 출력 전압 V와 식 (5), (6)을 사용하여 응력 확대 계수를 측정하였다. 균열의 길이와 cycle의 관계는 Fig. 6에 나타내었다. cycle이 늘어날수록 균열의 길이가 급격하게 늘어난 것을 알 수 있고, 특히 균열의 길이가 5mm 정도 되었을 때 급격히 성장하는 것을 알 수 있다. 오실로스코프에서 측정 되던 출력 전압은 Fig. 7를 보면 균열의 길이가 5mm 정도 되었을 때 증가하는 것을 관찰 할 수 있고, 12mm 정도 되었을 때 떨어지는 것을 확인

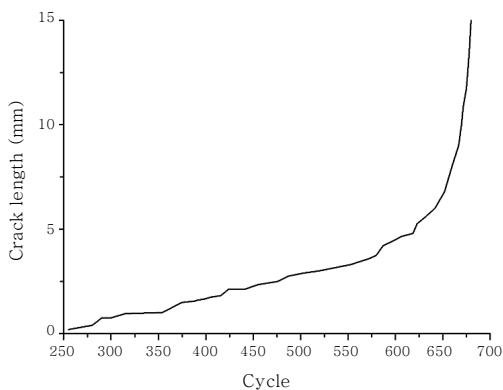


Fig. 6 Crack length vs. cycle

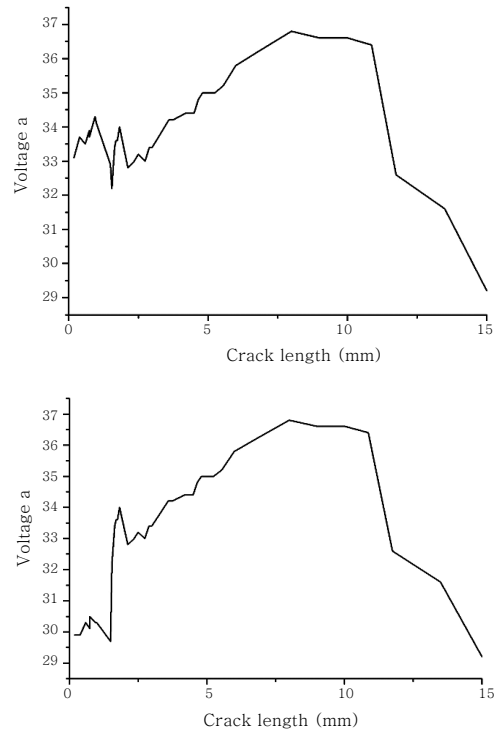


Fig. 7 Output voltage vs. crack length

할 수 있다. 이때 출력전압이 12mm에서 급격히 떨어지는 이유는 균열의 길이가 성장하여 센서에 영향을 주었기 때문으로 생각된다.

피로 시험을 통해 측정한 응력 확대 계수와 파괴 역학 이론 중 Ashby(1999)의 식을 사용하여 계산한 값을 Fig. 7에서 비교하였다. Ashby(1999)의 식은 식 (14)⁴⁾, (15)에 나타내었고 σ 는 공칭 응력을 a는 균열 길이를 의미하며 식 (14)의 w는 시편의 폭을 뜻한다.

$$K_I = F \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \tag{14}$$

식 (14)의 형상 계수 계산식은 식 (15)에 나타내었다.

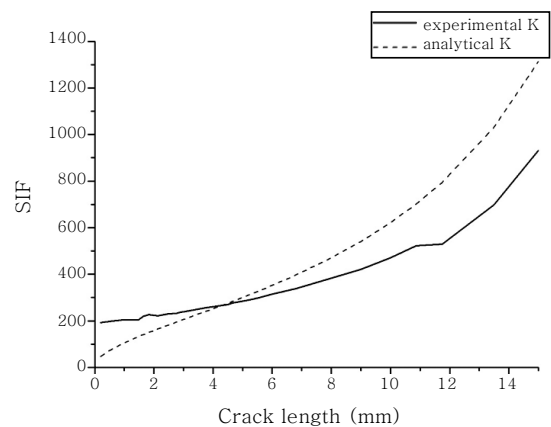


Fig. 8 SIF vs. crack length

$$F = \frac{1.1 \left(1 - 0.2 \left(\frac{a}{w} \right) \right)}{\left(1 - \frac{a}{w} \right)^{3/2}} \quad (15)$$

그래프를 보면 균열이 천천히 성장하는 구간에서는 응력 확대 계수가 대체로 일치하나 균열의 성장이 빠르게 진행되는 구간을 지난 후에는 점차 오차가 커짐을 확인 할 수 있다. 이는 균열이 빠르게 성장했을 때 균열 진전 방향이 출력 전압에 영향을 주었기 때문이라고 판단된다.

5. 유한 요소 해석

상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 모델링 후 해석을 통하여 응력 확대 계수를 계산해 보았다. 균열 길이는 2.5, 6, 10, 13.5mm로 요소의 크기는 균열 선단에서의 특이성을 고려하여 1mm로 하였고 Fig. 9와 같이 모델링 하였다.

균열이 성장 할 때의 균열 형상은 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 균열의 길이가 길수록 균열 열림의 정도가 더 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 피로 시험을 수행하여 측정된 응력 확대 계수와 유한 요소 해석

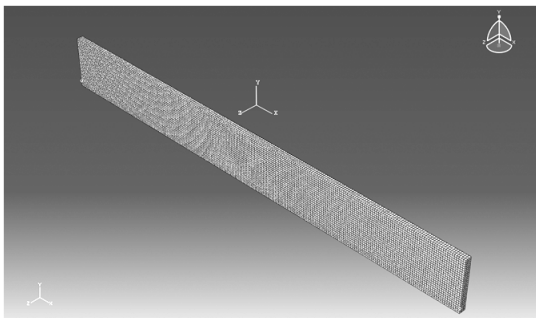


Fig. 9 Modeling of specimen

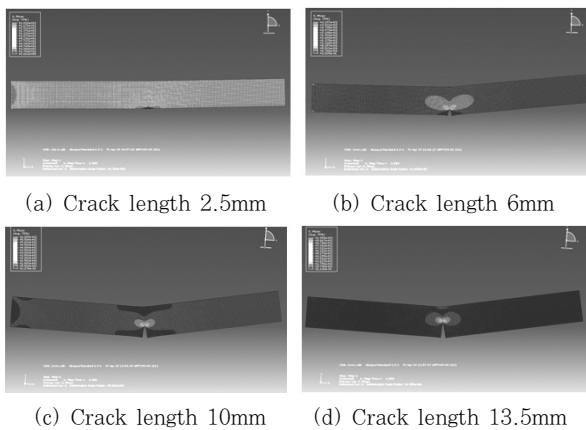


Fig. 10 Result of finite element method(FEM)

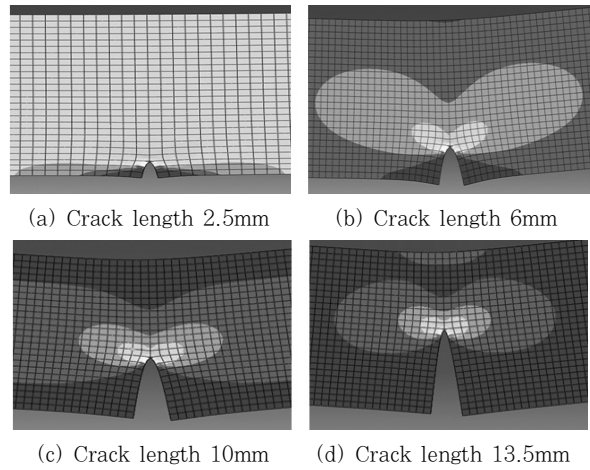


Fig. 11 Local shape of crack

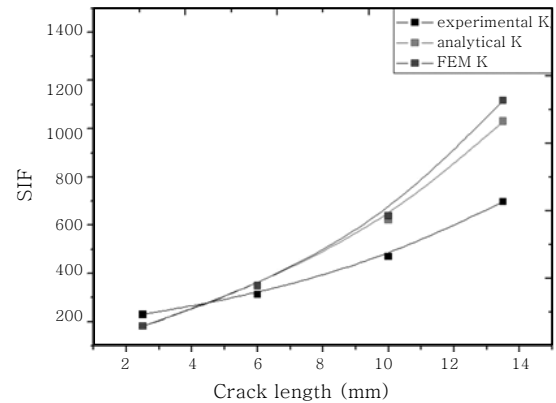


Fig. 12 Comparison of SIF from experiment with FEM

을 통해 얻은 값, 이론값을 Fig. 12에서 비교하였다. 해석값과 이론값과의 오차는 적었으나, 시험값과의 비교에서는 어느 정도의 오차가 발생함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 MFC 센서의 구조 및 응력 측정 방법 및 부착 방법에 대해서 연구하였으며 MFC 센서가 가지는 특성들을 파악 하였다. 또한, 센서를 알루미늄 빔에 부착하여 얻어진 데이터를 사용하여 응력 확대 계수를 측정해 보았다.

1) 기존 센서에 비해 높은 내구성과 효율성을 가지는 MFC 센서를 이용함으로써 시험적인 방법을 통하여 직접적으로 응력 확대 계수를 측정 할 수 있었다.

2) 선형 탄성 파괴 역학(LEFM)을 기반으로 한 응력 확대 계수와 시험적 방법으로 구한 값을 비교 결과, 비슷한 증가 양상을 보였지만 균열이 빠르게 진전하게

되면 오차가 최대 28% 정도 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 센서 접착 시 접착제의 두께가 균일하지 못하고, 균열이 진전하면서 센서에 영향을 끼쳐 오차가 발생 하였다고 판단된다.

3) FEM을 통해 계산된 응력 확대 계수와 이론값을 비교 결과 대체로 일치하는 것을 알 수 있었고, 시험값과의 비교에서는 이론값과의 비교 결과와 같이 균열이 빠르게 성장한 구간에서는 상당한 오차를 보였다.

4) 측정된 응력 확대 계수를 파괴 역학 이론에 적용하면 균열의 성장에 따라 구조물의 잔여 수명이 예측 가능함을 알 수 있었고, 센서의 접착 방법, 균열의 영향 등을 고려하여 오차를 줄인다면 구조물의 안전성 평가 시스템으로 적절할 것으로 판단된다.

후 기

이 과제는 부산대학교 교수 국외장기파견 지원비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. Fujimoto, Y: Piezoelectric sensor for stress intensity factor measurement of two dimensional cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, **70** (2003), 1203-1218
2. Fujimoto, Y: Stress Intensity Factor Measurement of Cracks Using a Piezoelectric Element, *Society for Experimental Mechanics*, **44** (2004), 320-325
3. 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
4. M.F. Ashby: *Materials selection in mechanical design*, Butterworth-Heinemann
5. M.H Kim, S.W Kang, 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)
6. M.H Kim, J.Y Geom: A structural health monitoring system with application to welded structures, *The Korea Society of Ocean Engineers*, **19-4** (2005), 384-394