

피로 균열 진전에 따른 응력확대계수 측정에 관한 연구

오 동 진* · 김 명 현*[†]

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

A Study on the Measurement of Stress Intensity Factors for the Fatigue Crack Propagation

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 November 7, 2012 ; Revised December 10, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

Abstract

Fatigue cracks in structural components are the most common cause of structural failure when exposed to fatigue loading. In this respect, fatigue crack detection and structural health assessment are very important. Currently, various smart materials are used for detecting fatigue crack and measurement of SIFs(Stress Intensity Factors). So, this paper presented a measurement of SIFs using MFC(Micro Fiber Composite) sensor which is the one of the smart material. MFC sensor is more flexible, durable and reliable than other smart materials. The SIFs of Mode I(K I) as well as 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.

Key Words : Fatigue crack, SIFs(Stress Intensity Factors), Piezoelectric effect

1. 서 론

최근 선박 및 해양 구조물의 대형화로 인해 사용 재료는 점차 고강도화 되었으며, 이에 따라 발생하는 피로 균열(fatigue crack)에 의한 피로 파괴의 위험성이 대두되고 있다. 특히 근해의 자원 고갈로 인해 극지방에서 운용되는 해양구조물과 같은 경우, 피로 균열의 발생은 취성 파괴를 유발하는 요인이 되고 있다¹⁾. 또한, 선박과 해양구조물의 파괴에 의한 대형 인명피해와 환경 오염을 방지하기 위해서 피로 균열 진전에 대한 구조물의 안전성 평가 기법에 관한 연구는 필수적임을 알 수 있다. 이러한 이유로, 선박 및 해양구조물의 정적, 동적 하중을 고려한 피로 균열 감지 기법에 관한 연구가 진행되고 있으며 스마트 센서를 이용한 피로 균열 감지 및 구조물 안전성 평가 시스템 개발을 위한 기초 연구도 활발히 이뤄지고 있다. Fujimoto 등은 스마트 물질의 하나인 압전센서(PZT(Pb(Zr,Ti)O₃))를 이

용하여 구조물의 균열 발생 시점 및 응력확대계수를 측정에 관한 기초 연구를 수행하였다²⁾. 알려진 바와 같이, 선형 탄성 파괴 역학 이론에 기반한 평가 변수인 응력확대계수는 피로 균열 진전과 구조물의 수명 예측 기법 연구에서 중요한 부분을 차지한다. 응력확대계수는 피로 균열의 형상과 길이, 작용 하중을 통해 정의할 수 있다. 이때, 작용 하중의 방향에 따라 균열이 받을 수 있는 하중의 형태는 Fig. 1과 같이 세 가지 모드가 있으며, 균열이 있는 구조물은 이 세 가지 모드 중에서 하나 또는 두세 개의 모드가 결합된 하중을 받게 된다. 이에 따라, 구조물이 두 가지 이상의 조합 하중을 받게 될 때에 응력확대계수를 측정하는 기법에 관한 연구는 구조물의 파괴 특성 파악에 중요한 요소임을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 균열 선단에 조합하중을 작용시키기 위해 균열의 형상과 위치를 고려하여 CCT(Center Crack Tension) 시험편을 제작한 후, 피로 시험을 수행하였다. 또한, 피로 균열 진전 시험 결과 데이터를 바탕으로 하여 실험적 방법을 통해 응력확대

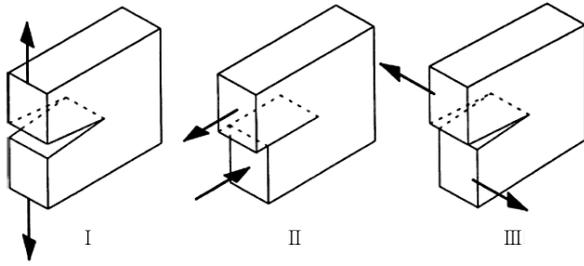


Fig. 1 Fracture mode I, II, III

계수를 측정한 후, 이를 선형 탄성 파괴 역학 이론에 근거한 응력확대계수와 비교, 고찰하였다.

2. MFC 센서

2.1 MFC 센서의 구조와 특징

앞서 언급한 바와 같이 스마트 센서를 이용한 구조물의 균열 발생 시점 및 응력확대계수 측정에 관한 연구는 활발히 이뤄지고 있다. Fujimoto는 스마트 센서인 압전센서(PZT(Pb(Zr,Ti)O3))를 이용하여 실험적 방법을 통한 응력확대계수 측정이 가능하다는 것을 보여주었다³⁾. 그러나 기존의 압전 센서는 저온 환경에서는 취성 파괴에 취약하며, 유연성이 없어 해양구조물에 흔히 쓰이는 강관 구조물에 부착 할 수 없다는 단점이 있다. 이에, 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 구조를 가지는 MFC (Micro Composite Sensor)센서를 사용하여 응력확대계수를 측정하였다.

MFC 센서는 piezoceramic fiber로만 구성된 기존의 PZT와 달리 센서의 윗면과 아랫면에 강도와 유연성이 매우 우수하고 열적, 화학적 안정성이 뛰어난 고분자 재료인 Polyimide로 만들어진 film이 부착되어 더 높은 내구성을 지니고 있다. 또한, 본 연구에 사용된 MFC 센서의 사양은 Table 1과 같다.

2.2 압전 효과를 이용한 응력확대계수 측정

압전 효과란 표면에 가해진 응력에 비례하여 전하를

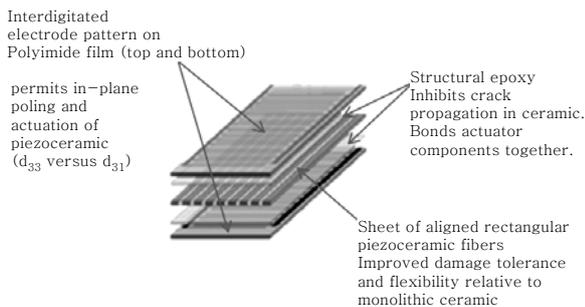


Fig. 2 Structure of MFC sensor

Table 1 Specification of MFC sensor

Model	M-2814-P1
Active length	28mm
Active width	14mm
Overall length	38mm
Overall width	20mm
Capacitance	0.61nF
Free strain	1550ppm
Blocking force	195N

발생시키는 효과를 말하며, 이 특성을 이용하여 구조물에 발생하는 응력을 측정 할 수 있다. 등방성을 지닌 MFC 센서를 구조물의 표면에 부착하면 압전 요소는 부착 된 표면에서의 응력 합($\sigma_x + \sigma_y$)에 비례하여 전하를 발생시키게 된다. 이때, 전하의 적분 값에 비례하여 얻어지는 출력 전압 V 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

위의 식에서 C 는 정하중 시험을 통해 얻어지는 보정 상수이며 K 는 응력 조건에 따라 결정되는 상수로 평면 응력 조건에서는 1, 평면 변형률 조건에서는 0.74가 된다. 그리고 적분 구간을 의미하는 S 는 MFC 센서의 실제 유효 면적을 뜻한다.

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.

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

위의 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

이때, 위의 적분 구간은 상수 G_1 과 G_2 로 식 (5), (6)에 나타내었다. 피로 균열이 진전함에 따라 MFC 센서의 유효 범위가 달라지므로, Fig. 3에 나타난 바와 같이 적분 유효 구간이 바뀌어야 함을 알 수 있다. 이에

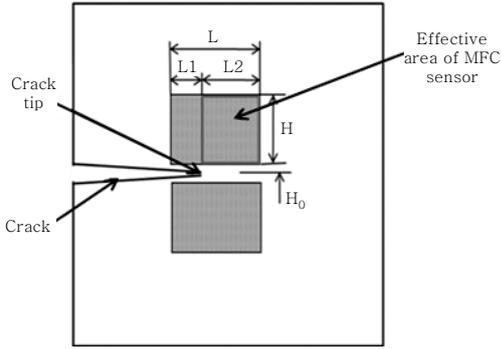


Fig. 3 Effective area of MFC sensor

따라, 실제 계산에 적용되어야 할 적분 범위는 균열 끝단에서부터 L_2 가 되고, 적분 구간 중 L_1 은 0이 된다. 유효 적분 구간의 산정이 끝난 후, 식 (3)과 (4)를 연립하여 정리하면 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 를 얻을 수 있으며, 그 식은 식(7), (8)에 정리하여 나타내었다.

$$G_1 = \int_{H_0}^{H+H_0} \int_{-L_1}^{L_2} \sqrt{\frac{x^2+y^2+x}{\pi(x^2+y^2)}} dx dy \quad (5)$$

$$G_2 = \int_{H_0}^{H+H_0} \int_{-L_1}^{L_2} \sqrt{\frac{x^2+y^2-x}{\pi(x^2+y^2)}} dx dy \quad (6)$$

그리고상 위의 식에 나타난 바와 같으며, H는 센서의 유효 면적 세로 길이이고 H_0 는 균열 끝단에서부터 센서까지의 거리이다. 또한, L_1 은 실제 적분 구간에 포함되지 않는 센서 가로 길이, L_2 는 센서의 유효 면적 가로 길이이다⁴⁾.

$$K_I = \frac{V_A+V_B}{2CKG_1} \quad (7)$$

$$K_{II} = \frac{V_B-V_A}{2CKG_2} \quad (8)$$

3. 시험 준비

3.1 피로 시험

본 논문에서는 Fig. 4, 5와 같이 CCT 시험편을 제작 하여 피로 시험을 수행하였다. 균열을 유도하기 위해 시험편 중앙부에 40mm의 노치를 삽입한 후, 노치의 기울기를 0, 30, 45, 60도로 하여 시험편을 제작하였다. 피로 시험에 사용된 장비는 Fig. 6와 같은 ± 20 ton의 최대 용량을 가지는 축 인장/압축 유압 피로 시험기를 사용 하였고, 피로 하중의 파형은 정현파, 응력비 $R=0.1$ 그리고 주파수 3Hz의 조건에서 시험을 수행하였다. 또한, MFC 센서는 인장 시 전하를 발생시켜 피

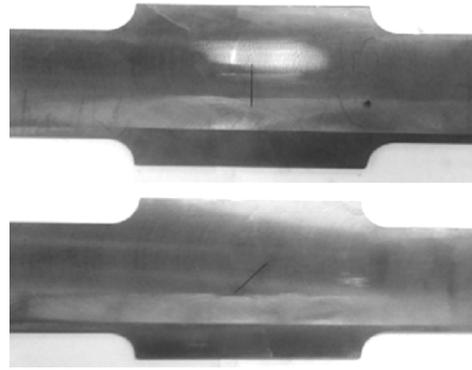


Fig. 4 Shape of test specimen

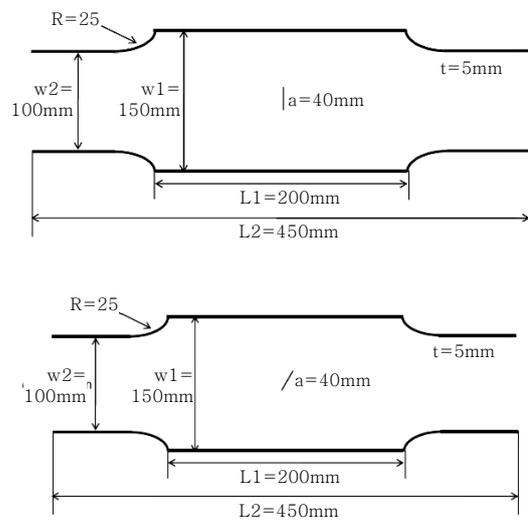


Fig. 5 Dimension of test specimen

로 시험 시 하중 범위에 따라 출력 전압을 측정 할 수 있는 유효 면적 28mm×14mm, 두께는 0.3mm인 'MFC sensor P1 type M2814-P1'을 사용하였으며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 시험편에 부착 하였다. 시험 과정 중 균열은 점차적으로 진전하게 되는데 균열 진전 길이는 디지털 확대경을 통하여 관찰 및 측정 하였고, 출력 전압은 디지털 오실로스코프를 사용하여 측정하였다.



Fig. 6 Fatigue test machine

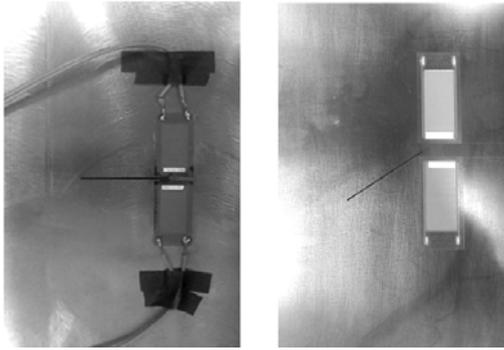


Fig. 7 Set up of test specimen

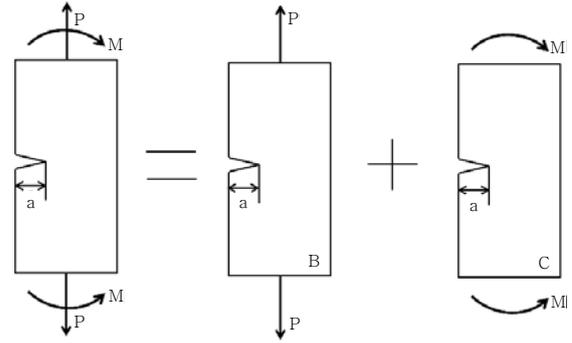


Fig. 8 Principle of superposition

3.2 Calibration을 통한 보정 상수 계산

센서 부착 후, 정하중 시험을 통해 얻은 출력 전압과 응력 범위를 이용하여 보정 상수 C를 얻게 된다. 피로 시험을 수행하기 전에 노치의 형상을 고려하여 균열 전파 경로를 예측하여 균열과 MFC 센서간의 거리가 최대한 가깝게 센서를 부착한다. 그 후 정하중 시험을 통해 얻은 출력 전압과 응력 범위를 아래의 식(9)에 대입하여 보정 상수 C를 계산한다.

$$C = \frac{V}{\Delta\sigma \cdot S} \tag{9}$$

위의 식에서 $\Delta\sigma$ 는 응력 범위 S는 출력 전압 V는 유효 면적을 뜻하며, 시험편의 두께가 얇은 박판이고 피로 시험 시 1축의 주기적인 응력을 받기 때문에 평면 응력 조건임을 알 수 있다. 본 연구에서는 측정된 보정 상수 C의 평균값을 취하여 사용하였으며, 그 값들은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

4. 중첩법을 적용한 응력확대계수 계산

선형 탄성 파괴 역학에서는 탄성재료에서 각각의 응력, 변형률, 변위 성분들은 서로 중첩이 가능함을 보이고 있다. 또한, 하중 모드가 동일한 경우 Fig. 7에 나타난 바와 같이 응력확대계수는 중첩법(Principle of superposition)을 적용할 수 있으며, 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다⁵⁾.

Table 2 Calibration factor of static test

	C(V/N)
CCT 0	0.0042872
CCT 30	0.0026239
CCT 45	0.002449
CCT 60	0.006808

$$K_{total} = K_B + K_C \tag{10}$$

노치의 기울기를 30, 45, 60도로 하여 제작한 CCT 시험편의 피로 시험 시, 피로 균열은 하중 작용 방향과 수직하게 진전하게 된다. 이에 따라, Fig. 8에 나타난 바와 같이 균열은 진전하게 되며, 응력확대계수를 계산하기 위해서는 중첩법을 적용하여 같은 방향 성분인 K_I 를 더하여 계산하여야 한다.

중첩법을 적용하여 응력확대계수를 계산하기 위해 기울어진 노치의 응력확대계수 K_A 를 계산 할 수 있는 식 (11)과 균열이 진전함에 따라 측정되는 응력확대계수 K_B 를 계산 할 수 있는 식 (13)를 이용하여 전체 K_{Total} 을 계산하게 된다. K_A 를 계산 할 수 있는 식은 (11)에 나타내었고 σ 는 공칭 응력을 a는 균열 길이를 의미한다⁶⁾.

$$K_A = (F_A \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}) \cdot \cos^2\theta \tag{11}$$

$$K_B = (F_B \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}) \tag{12}$$

또한, 형상 계수 계산식은 식 (13), (14)에 나타내었다. 아래 식에서 W는 시험편의 폭을 뜻하며, e는 시험편의 중심축에서 균열 선단까지의 거리를 뜻한다.

$$F_A = (1 - 0.025\alpha^2 + 0.06\alpha^4) \cdot \sqrt{\sec \frac{\alpha\pi}{2}} \tag{13}$$

$$\left(\alpha = \frac{2a}{W}\right)$$

$$F_B = \left(\sec \frac{\pi a}{2} \cdot \frac{\sin 2\alpha\beta}{2\alpha\beta}\right)^{0.5} \tag{14}$$

$$\left(\alpha = \frac{2a}{W - 2e}, \quad \beta = \frac{2e}{W}\right)$$

피로 균열은 기계 노치에서 생성되어 하중 방향과 수직한 방향으로 진전하게 된다. 이때, 출력 전압과 cycle 과의 관계를 Fig. 10에 정리하여 나타내었다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 균열이 진전함에 따라 오실로스코

프를 통해 측정되는 출력 전압값은 떨어짐을 확인 할 수 있다. 이는, 균열이 진전함에 따라 MFC 센서에 영향을 끼치는 유효 면적이 줄어들어 출력 전압이 낮게 측정 되는 것임을 알 수 있다. 이러한 특성을 적용한다면 실제 구조물에 센서를 부착 시, 출력 전압값이 낮게 출력 되는 현상을 관찰 하여 균열 진전의 정도를 판단 할 수 있다.

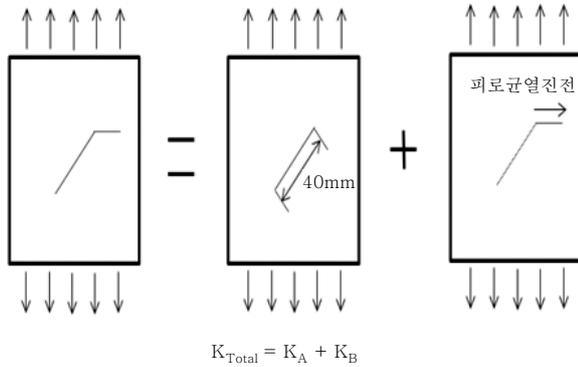


Fig. 9 Total stress intensity factor of crack

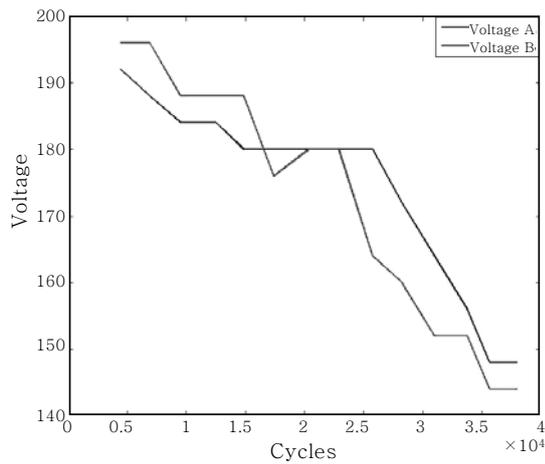


Fig. 10 Relationship between voltage and cycle

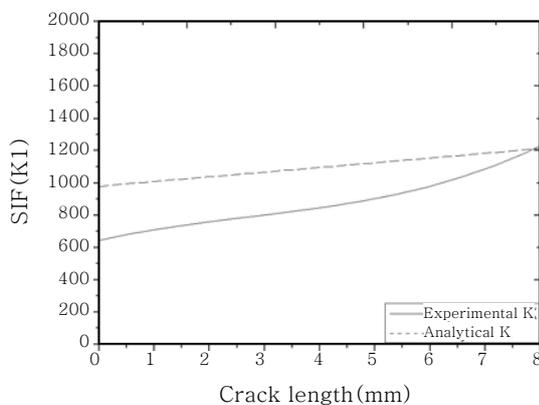


Fig. 11 Relationship between SIF and CCT with crack slant angle 0°

중첩법을 적용하여 계산된 응력확대계수와 선형 탄성 파괴 역학 이론값을 비교하여 Fig. 11~Fig. 14에 나타내었다. Fig. 11~Fig. 14에 나타난 바와 같이 피로 균열이 진전함에 따라 응력확대계수에 대한 이론값 및 측정값 모두 증가하는 경향을 보였으나, 두 결과 값에는 다소 큰 오차가 발생하였다. 이는 센서의 부착 정도

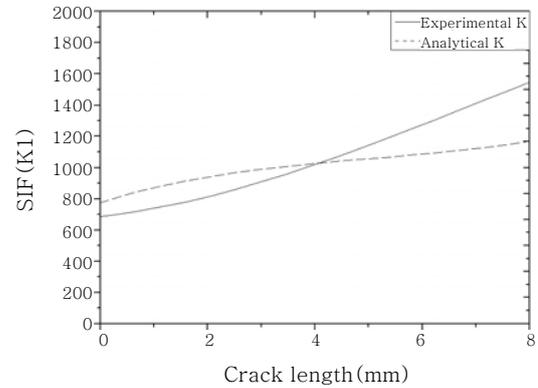


Fig. 12 Relationship between SIF and CCT with crack slant angle 30°

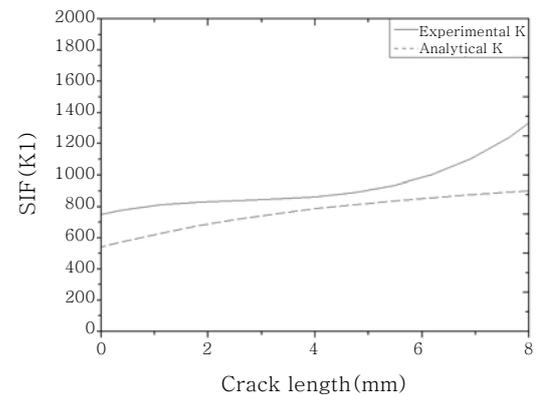


Fig. 13 Relationship between SIF and CCT with crack slant angle 45°

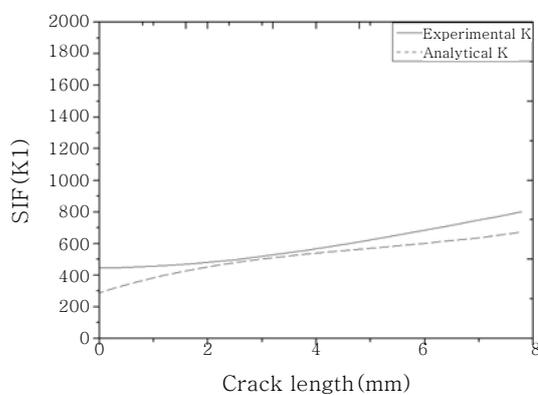


Fig. 14 Relationship between SIF and CCT with crack slant angle 60°

와 균열이 진전함에 따라 센서에 영향 미쳤기 때문으로 판단 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 MFC 센서의 구조 및 응력 측정 방법 및 부착 방법에 대해서 연구하였으며 MFC 센서가 가지는 특성들을 파악 하였다. 또한, 중첩법(Principle of superposition)을 적용하여 30°, 45°, 60° 기울어진 균열의 형상에 따른 응력확대계수 측정 기법에 대하여 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 연구 성과를 아래와 같이 정리하여 나타내었다.

1) 기존 센서에 비해 높은 내구성과 효율성을 가지는 MFC 센서를 이용하여 실시간으로 응력확대계수를 측정할 수 있었다.

2) 선형 탄성 파괴 역학(LEFM)을 기반으로 한 응력 확대 계수와 시험적 방법으로 구한 값을 비교 결과, 비슷한 증가 양상을 보였지만 균열의 형상 및 센서의 접착 정도에 따라 어느 정도의 오차가 발생하였다.

3) 균열의 위치와 형상을 고려한 적절한 보정 기법 및 센서 부착 기법을 적용한다면, 균열 진전 감지 및 응력확대계수 측정 기법으로 적절할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. 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
2. Fujimoto, Y: Piezoelectric sensor for stress intensity factor measurement of two dimensional cracks, Engineering Fracture Mechanics, **70**(2003), 1203-1218
3. Fujimoto, Y: Stress Intensity Factor Measurement of Cracks Using a Piezoelectric Element, Society for Experimental Mechanics, **44**(2004), 320-325
4. D.J. Oh, M.H Kim: A study of Stress Intensity Factors using Micro Fiber Composite Sensors, Journal of KWJS **29-3** (2011), 56-61 (in Korean)
5. T.L Anderson: Fracture mechanics, CRC press
6. Y.Murakami: Stress intensity factors handbook, The Japan Society of Materials Science, Pergamon press