

보의 폭 전체에서 발생한 열린 균열을 갖는 외팔보의 손상모델에 관한 연구

A Study about the Damage Model of a Cantilever Beam with Open Crack Generated in Whole Breadth of the Beam

허영철* · 김재관* · 박성환**

Young-Cheol Huh, Jae-Kwan Kim and Seong-Hwan Park

(2007년 7월 5일 접수 ; 2007년 9월 19일 심사완료)

Key Words : Open Crack(열린 균열), Equivalent Bending Stiffness of Cracked Beam(균열 보의 등가 굽힘 강성), Galerkin's Method(Galerkin 방법)

ABSTRACT

We studied the influences of open cracks in free vibrating beam with rectangular section using a numerical model. The crack was assumed to be single and always open during the free vibration and equivalent bending stiffness of a cracked beam was calculated based on the strain energy balance. By Galerkin's method, the frequencies of cantilever beam could be obtained with respect to various crack depths and locations. Also, the experiments on the cracked beams were carried out to find natural frequencies. The cracks were initiated at five locations and the crack depths were increased by five steps at each location. The experimental results were compared with the numerical results and the comparison results were discussed.

1. 서 론

교량이나 토목 구조물과 같은 대형 구조물에서 발생한 균열은 해당 위치에서의 강성을 저하시키고 상시 하중과 같은 반복적인 하중에 의해 점진적으로 균열이 진전하게 되면 설계단계에서 산정되었던 강도를 확보하지 못하게 되므로 갑작스러운 파괴로 이어질 수 있다. 이러한 구조물의 손상을 조기에 발견하고 적절한 유지·보수를 통해 대형사고를 미연에 방지하기 위해 이미 오래 전부터 비파괴 검사를 비롯한 다양한 방법을 이용하여 손상을 감지하고 그 위치를 예측하려는 연구가 수행되어 왔다. 그 중에서

도 손상된 구조물의 진동 특성 값 즉, 고유진동수 및 모드 형상의 변화를 이용한 진동 기반의 손상 감지 연구가 활발하게 수행되어 왔는데⁽¹⁾, 비교적 간단하면서도 경제적인 방법으로 손상을 감지할 수 있다는 장점 때문인 것으로 판단된다. 그러나 실제 구조물의 적용에 있어 미세한 균열로 인한 전역적인 강성의 변화를 파악하기에는 그 효율성에 한계가 있기 때문에 최근에는 스마트 센서 등을 이용하여 국부적 손상을 직접 감지하려는 다양한 연구가 많이 시도되고 있다⁽²⁾. 전역적인 손상이나 미세한 균열과 같은 국부적인 손상을 감지하기 위해서는 손상 구조물에 대한 동특성의 변화를 정도 높게 파악하는 것이 필요하며, 이를 위해서 손상 구조물의 수치 모델을 확립하여 손상에 따른 구조물의 동특성 변화를 예측해 보는 것이 하나의 방법이 될 수 있다.

이 논문에서는 임의의 위치에서 균열을 갖는 보의 수치 모델에 대해 살펴보았다. 균열 보의 굽힘 진동

† 교신저자: 정희원, 한국기계연구원 e-엔지니어링 연구센터
E-mail : ychuh@kimm.re.kr

Tel : (042) 868-7468, Fax : (042) 868-7418

* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부

** 한국기계연구원 e-엔지니어링 연구센터

해석과 관련한 많은 연구가 수행되어 왔는데 Irwin⁽³⁾은 처음으로 균열 지점 주위의 응력 집중과 하중 사이의 관계를 정립하였다. 이후 Dimarogonas는 균열이 구조물의 동특성에 미치는 영향에 대해 많은 연구를 수행하였는데⁽⁴⁻⁶⁾, 유연도 행렬을 도입하여 부재의 균열을 스프링-힌지의 형태로 모델링하고 다양한 구조물에 대한 균열을 규명하기 위해 주파수 스펙트럴 방법을 제안하였다. Gudmundson⁽⁷⁾은 균열을 갖는 요소가 정적 유연도 행렬로 표현될 수 있음을 보이고 균열 외팔보의 고유진동수 변화를 예측하여 실험결과와 비교 검토하였다. Christides와 Barr⁽⁸⁾는 균열 부근의 응력변동을 표현하기 위해 지수함수로 감소하는 균열 동요함수(crack disturbance function)를 제안하고 대칭의 균열을 갖는 보의 고유치 방정식을 유도하였다. Shen과 Pierre⁽⁹⁾는 하나의 균열을 갖는 균일한 보에 대해 균열 주위에서 보의 적합 조건식을 만족하는 균열 함수를 제안하고 양단 단순지지 보와 외팔보의 고유치 문제의 해를 구하였다. Chondros와 Dimarogonas^(10,11)는 균열을 보의 길이 방향으로 연속 분포하는 유연도로 모델링하고 Hu-Washizu-Barr의 변분법을 이용하여 열린 균열을 갖는 보의 고유치 문제를 풀고 실험 결과와 비교 검증하였다. 국내에서도 유연도 행렬을 이용한 균열 보의 동특성 연구가 많이 수행되었는데, 균열이 있는 복합재료 보⁽¹²⁾와 회전체의 동특성 변화에 대한 연구⁽¹³⁾ 그리고 균열이 있는 유체 유동 파이프에서 이동 질량에 따른 동특성 변화에 관한 연구 등이 있다⁽¹⁴⁾.

최근 Yang과 Swamidas⁽¹⁵⁾, Owolabi와 Swamidas⁽¹⁶⁾ 등은 열린 균열이 존재하는 보에서 변형 에너지의 균형 조건식을 이용하여 균열 보의 등가 굽힘 강성을 분수함수의 형태로 유도하고 양단 단순지지 및 양단 고정지지 조건의 보에 대해 균열 크기와 위치 변화에 따른 고유진동수를 계산하는 연구를 수행하였다. 에너지 방법을 이용함으로써 단순한 정식화가 가능하고 균열된 보를 하나의 연속보로 가정함에 따라 Galerkin 방법을 이용하여 균열 보의 고유해를 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다.

이 논문에서는 하나의 균열이 폭 방향 전체에 걸쳐 존재하는 외팔보에 대해서 균열 크기와 위치 변화에 따른 고유진동수 해를 제시하고 이를 실험을 통하여 검증하였다. 이때 균열은 항상 열린 균열로

존재하며 진전하지 않는다고 가정하였다. 등가 굽힘 강성이 적용된 균열 보의 운동방정식에 대해서 외팔보의 경계 조건을 적용하여 Galerkin 방법을 이용한 고유해를 제시하였다. 한편, 실험에 사용된 시편은 정사각형 단면의 알루미늄 보로써 초기 균열의 위치를 보 길이의 0.1L~0.5L 구간의 서로 다른 5군데 위치로 정하고 균열의 깊이를 단면 높이의 1/2까지 5단계로 점진적으로 증가시키면서 고유진동수의 변화를 살펴보았다. 이를 수치 해석 결과와 비교하고 그 정도를 검증하였으며 균열의 위치 및 크기에 따른 변화를 검토하였다.

2. 균열 보의 횡방향 고유진동수

2.1 균열 보의 탄성 변형 에너지

사하중(dead-load)과 같이 외력 F 가 일정하게 작용하는 구조물에서 초기 균열이 a 만큼 성장한 후 평형 상태에 도달했다고 가정한다면 Clapeyron의 이론⁽¹⁷⁾에 따라 외력이 행한 일 W 는 내부 변형 에너지 변화량의 두 배가 된다. 즉, 외력에 의한 일 W 의 반은 내부의 변형 에너지로 축적되고 나머지 반은 균열을 성장시키는데 소모된다. Fig. 1은 균열이 a 만큼 성장했을 때 상태 1, 2의 하중-변위 응답을 보여주는데 균열 성장 전후의 에너지 크기는 각각 면적 $O\delta_1 p_1$ 및 $O\delta_2 p_2$ 이고 외력 P 에 의한 일 W 는 $\delta_1 \delta_2 p_2 p_1$ 이다. 기하학적으로도 $(O\delta_2 p_2) - (O\delta_1 p_1) = (\delta_1 \delta_2 p_2 p_1)/2$ 가 성립됨을 쉽게 알 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$W = E_c + \Delta U = 2\Delta U \quad (1)$$

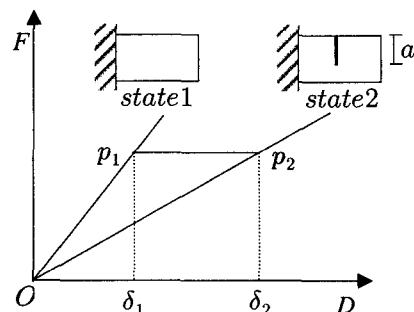


Fig. 1 Load-displacement curve according to crack growth

여기서, E_c 는 균열의 성장에 소모된 에너지이며 ΔU 는 축적되는 변형 에너지의 증가분이다. 따라서 균열된 보의 최종 변형 에너지 U_c 는

$$U_c = U + \Delta U = U + E_c \quad (2)$$

로 표현할 수 있으며, U 는 균열 성장 전 상태 1의 보의 변형 에너지를 의미한다.

2.2 균열 보의 등가 굽힘 강성

횡 진동하는 보의 전단 변형을 무시할 수 있다고 가정하면 균열에 의한 제 I의 파괴모드만이 존재하게 되고 폭이 b 이고 높이가 h 인 사각단면 보의 응력확대계수(stress intensity factor) K_I 는

$$K_I = F(a/h) \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} = \frac{6M\sqrt{\pi a}}{bh^2} F(a/h) \quad (3)$$

$$F(a/h) = 1.12 - 1.4(a/h) + 7.33(a/h)^2 - 13.8(a/h)^3 + 14(a/h)^4, \text{ for } a/h < 0.6 \quad (4)$$

여기서, a 는 균열 길이, M 은 보의 굽힘 모멘트로 정의할 수 있다.

일정한 굽힘 모멘트 M 이 작용하는 보에서 균열이 a 만큼 성장할 때 소모되는 에너지 E_c 는 파괴역학 이론에 의한 변형 에너지 분산을 G 의 적분⁽¹⁵⁾을 통해 구할 수 있다. 즉,

$$E_c = \int_0^a G dA = \int_0^a G b da \quad (5)$$

여기서,

$$G = \frac{K_I^2}{E}, \quad E = \text{재료의 영률} \quad (6)$$

식 (3)~(6)으로부터 균열의 성장에 소모되는 에너지 E_c 는

$$E_c = \frac{18\pi [F(a/h)]^2 a^2}{Eb^3} M^2 \quad (7)$$

로 정리할 수 있다.

일반적으로 균열이 발생하면 응력은 주로 균열선단 주위에 집중되며 균열 위치로부터 멀리 떨어질수록 공칭응력(nominal stress)의 수준에 접근하는 분

포 특성을 갖는다고 알려져 있다. 에너지 측면에서 보면 변형 에너지가 균열 주위에 집중되어 증가된다고 가정할 수 있다. 즉, 균열이 발생한 보에서 변형 에너지의 밀도함수를 도입하여 균열 깊이와 위치에 따른 E_c 의 길이 방향 분포를

$$E_c = \int_0^L \frac{Q(a,c)}{1 + [(x-c)/k(a)a]^2} dx \quad (8)$$

로 가정해 볼 수 있다. 여기서, c 는 균열이 발생한 위치를 의미하고 $Q(a,c)$ 와 $k(a)$ 는 결정해야 할 함수이다. 식 (7), (8)로부터 $Q(a,c)$ 를

$$Q(a,c) = \frac{D(a)M^2}{k(a)a[\text{atan}((L-c)/k(a)a) + \text{atan}(c/k(a)a)]} \quad (9)$$

여기서,

$$D(a) = \frac{18\pi [F(a/h)]^2 a^2}{Eb^3} \quad (10)$$

와 같이 구할 수 있다. EI_c 를 균열 보에서의 등가 굽힘 강성으로 정의하면 최종적인 변형 에너지는 식 (2)에 의해서

$$\frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI_c} dx = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx + \int_0^L \frac{Q(a,c)}{1 + [(x-c)/k(a)a]^2} dx \quad (11)$$

가 된다. 식 (9)~(11)로부터 균열 보에서의 등가 굽힘 강성 EI_c 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$EI_c = \frac{EI}{1 + EI \cdot R(a,c) / [1 + ((x-c)/k(a)a)^2]} \quad (12)$$

여기서,

$$R(a,c) = \frac{2D(a)}{k(a)a[\text{atan}((L-c)/k(a)a) + \text{atan}(c/k(a)a)]} \quad (13)$$

균열이 발생한 위치 $x=c$ 에서 단면 감소로 인한 관성모멘트 I_c 를 고려해 보면

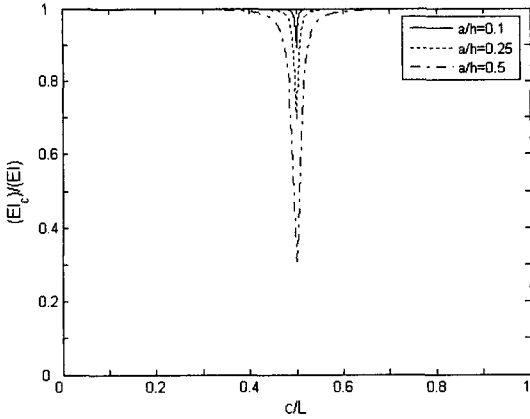


Fig. 2 Distribution of normalized bending stiffness at 0.5L of crack location

$$\frac{I}{I_c} = \frac{bh^3/12}{b(h-a)^3/12} \quad (14)$$

식 (12), (14)로부터

$$k(a) = \frac{3\pi[F(a/h)]^2(h-a)^3a}{[h^3 - (h-a)^3]h} \quad (15)$$

를 얻을 수 있다. 식 (12)를 이용하여 균열 위치 $c/L=0.5$ 에서 EI 에 대해 정규화한 균열 보의 등가 굽힘 강성의 분포곡선을 계산하면 Fig. 2와 같다.

2.3 균열 보의 고유진동수 계산

균열이 있는 Euler-Bernoulli 보에서 횡방향의 변위를 $w(x,t)$ 라고 정의하면 등가 굽힘 강성 EI_c 을 적용한 운동방정식은

$$\frac{d^2}{dx^2} [EI_c \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}] + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (16)$$

으로 표현할 수 있고 $w(x,t) = W(x)Q(t)$ 로 변수 분리하면 다음과 같은 보의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2}{dx^2} [EI_c \frac{d^2 W}{dx^2}] - \rho A \omega_c W = 0 \quad (17)$$

여기서, ω_c 는 균열 보의 고유진동수이다.

외팔보에 대한 식 (17)의 해를 구하기 위해 Galerkin 방법을 사용하였다. 균열 전후의 모드 형상의 변화가 미미하다는 가정 하에 균열이 없는 외팔보의 엄밀해⁽¹⁸⁾인 보 함수를 시도 함수(trial

function)로 선정하였다. 4차 항까지만 고려한 시도 함수 ϕ 는

$$\phi = C_1\phi_1 + C_2\phi_2 + C_3\phi_3 + C_4\phi_4 \quad (18)$$

와 같고,

$$\phi_i(\xi) = \sin \beta_i \xi - \sinh \beta_i \xi - A_i (\cos \beta_i \xi - \cosh \beta_i \xi) \quad (19)$$

여기서, $\xi = x/L$

$$A_i = \frac{\sin \beta_i + \sinh \beta_i}{\cos \beta_i + \cosh \beta_i} \quad (20)$$

$$\beta_1=1.8751, \beta_2=4.6941, \beta_3=7.8547, \beta_4=10.9955 \quad (21)$$

와 같다. 가중 함수를 ϕ_i 로 정하고 시도 함수 ϕ 와 함께 clamped-free 경계조건에 대해서 Galerkin 방법을 적용하면 적분 형태의 특성 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\int_0^L \phi_i'' EI_c \phi_i'' dx - \rho A \omega_c \int_0^L \phi_i \phi dx = 0 \quad (22)$$

여기서, $\phi_i'' = \frac{d^2 \phi}{dx^2}$, $i=1,2,3,4$

식 (22)의 적분은 MatLab을 이용한 수치 적분을 수행하였다.

3. 균열 외팔보의 실험 및 수치해석 결과 비교

3.1 균열 외팔보의 자유진동 실험

균열 외팔보에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위해 $0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m}$ 단면을 갖는 5.7 m 길이의 알루미늄 보에 대한 자유진동 실험을 수행하였다. 시편은 총 5개가 제작되었고 보 길이의 0.1L, 0.2L, 0.3L, 0.4L, 0.5L에 해당하는 위치에서 초기 균열을 생성시켰다. 균열 생성방법에 대한 시나리오 및 그 구성도를 Table 1과 Fig. 3에 각각 보였다. 사용된 알루미늄 재료의 영률 $E=70\text{ GPA}$ 이고 밀도 $\rho=2,710\text{ kg/m}^3$ 이다. 각각의 초기 균열 위치에서 균열의 깊이를 5 mm 단계로 증가시키면서 $a/h=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 의 조건에서 고유진동수를 측정하였다.

Table 1 Crack scenario on the cantilever beams

	Crack location (c/L)	Crack depth(a/h)
Test specimen #1	0.1	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Test specimen #2	0.2	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Test specimen #3	0.3	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Test specimen #4	0.4	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Test specimen #5	0.5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

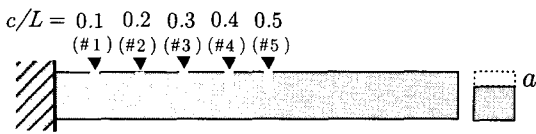


Fig. 3 Schematic configuration of damage scenario

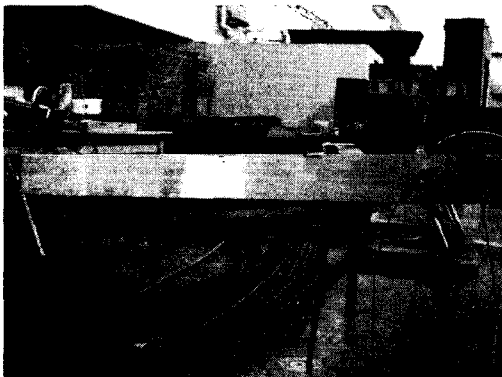


Fig. 4 Test specimen attached accelerometers

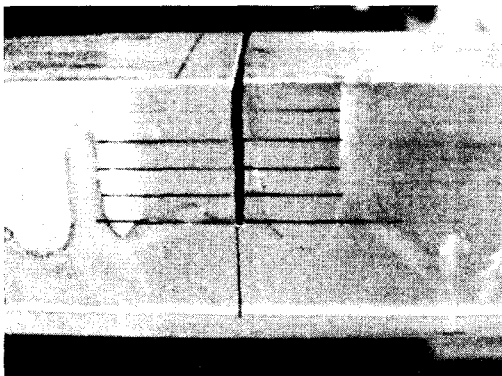


Fig. 5 Crack generation(c/L=0.5 and a/h=0.5)

열린 균열의 상태를 유지시키기 위해서 줄 톱을 사용하여 약 1mm 미만의 넓이로 균열을 생성시켰

다. 보의 상단에 4개, 측면에 1개의 B&K 가속도계를 부착하였는데 상단의 가속도계 중 하나는 약 500g 정도의 무게를 갖는 저주파용 가속도계를 사용하였고, 측면의 가속도계는 신호 분석 시 수평방향의 고유진동수와와의 구분을 위한 참고용으로 사용하였다. 가속도계의 부착 모습과 균열 생성의 한 예를 Fig. 4, Fig. 5에 각각 보였다.

5개의 시편에 대한 균열 전후 상태의 고유진동수 측정을 위해 매번 10회의 측정이 이루어졌는데 보의 끝단에서 약 10cm 정도의 강제 변위를 가했다가 해제하는 자유진동 측정과 고무 해머를 이용한 임팩트 하중의 측정이 각각 5회씩 수행되었다. 강제 변위를 주기위해 크레인을 이용하였는데 크레인에 매달은 고리형태의 공압식 잠금장치를 보 끝단의 아이볼트에 연결하고 정적 평형상태로부터 높이 10cm로 보의 끝단을 들어올린 후 고리의 잠금을 해제하였다. 가속도 신호의 데이터 취득은 NI사의 A/D 보드와 Labview를 이용하였는데, 샘플링 주파수를 100 Hz로 정하고 200초간 데이터를 취득하였다. 예비 실험의 분석 결과 데이터 취득조건에 의해 결정된 주파수 분해능은 시편의 1차 고유진동수의 변화를 파악할 수 있을 만큼 충분한 것으로 판단되었다. 매번 10회의 측정 결과를 종합한 후 4차 모드의 고유진동수까지 찾았다. 한편, 균열 전후 보에 대한 고유진동수 측정 결과는 Table 2와 같다.

3.2 수치해석 결과와의 비교 및 검토

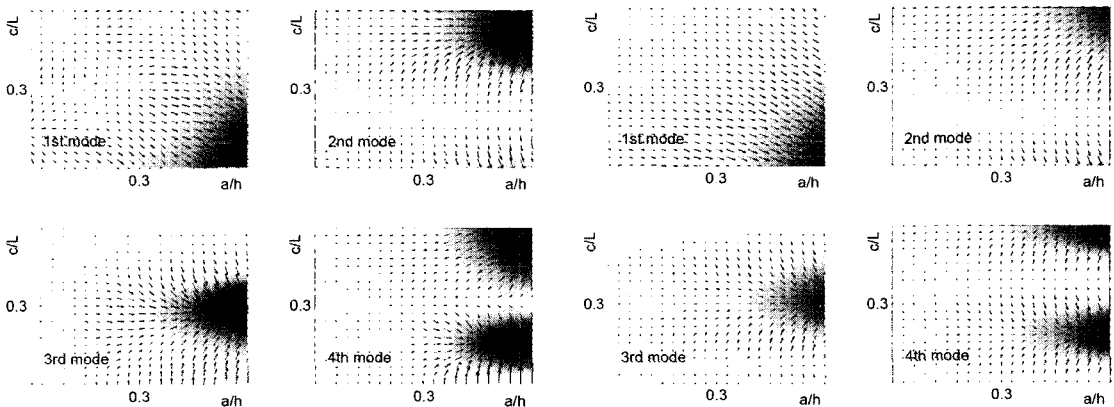
식 (22)를 이용하여 균열 외팔보의 고유진동수를 계산하고 그 결과를 Table 2에 보였다. 균열 위치 c/L과 균열 깊이 a/h를 변화시켜가면서 균열 전후의 외팔보에 대한 고유진동수 비율을 계산하였다. 한편, 계산한 각 모드별 고유진동수 비율 R_i은 식 (23)과 같이 정의하였다.

$$R_i = \frac{\omega_c(i)}{\omega_n(i)}, (i=1,2,3,4) \tag{23}$$

여기서, ω_n(i)는 균열 전 외팔보의 i번째 고유진동수 ω_c(i)는 균열 후 외팔보의 i번째 고유진동수 균열 깊이 a/h변화에 따른 고유진동수 비율은 Fig. 7에, 균열 위치 c/L변화에 따른 고유진동수 비율은 Fig. 8에 각각 보였으며, 균열 깊이와 위치변화에 대한 고유진동수 비율의 등고선을 Fig. 6에 보였다.

Table 2 Comparison results of natural frequencies for the uncracked and cracked cantilever beams

Test specimens	Crack location (c/L)	Crack depth (a/h)	1st Mode(Hz)		2nd Mode(Hz)		3rd Mode(Hz)		4th Mode(Hz)	
			Experiments	Analysis	Experiments	Analysis	Experiments	Analysis	Experiments	Analysis
#1	0.1	0.0	1.250	1.260	7.86	7.92	21.86	22.17	43.07	45.45
		0.1	1.245	1.258	7.86	7.91	21.86	22.17	43.07	43.44
		0.2	1.240	1.254	7.84	7.90	21.86	22.16	43.07	43.44
		0.3	1.230	1.247	7.83	7.89	21.86	22.15	43.07	43.42
		0.4	1.220	1.235	7.80	7.86	21.86	22.12	43.07	43.40
		0.5	1.190	1.217	7.75	7.82	21.84	22.08	43.05	43.34
#2	0.2	0.0	1.260	1.260	7.96	7.92	22.17	22.17	43.64	45.45
		0.1	1.260	1.259	7.96	7.92	22.16	22.16	43.61	45.42
		0.2	1.255	1.259	7.96	7.92	22.15	22.15	43.55	45.34
		0.3	1.250	1.251	7.96	7.92	22.08	22.12	43.49	45.20
		0.4	1.240	1.242	7.96	7.91	22.02	22.07	43.01	44.99
		0.5	1.220	1.229	7.96	7.91	21.92	21.99	42.59	44.68
#3	0.3	0.0	1.250	1.260	7.84	7.92	21.81	22.17	43.07	45.45
		0.1	1.240	1.259	7.84	7.92	21.80	22.15	43.05	45.44
		0.2	1.240	1.257	7.84	7.91	21.80	22.11	43.05	45.40
		0.3	1.240	1.254	7.83	7.91	21.70	22.04	42.99	45.34
		0.4	1.230	1.248	7.82	7.89	21.56	21.93	42.84	45.25
		0.5	1.220	1.239	7.80	7.88	21.32	21.76	42.71	45.10
#4	0.4	0.0	1.260	1.260	7.94	7.92	22.08	22.17	43.46	45.45
		0.1	1.260	1.260	7.93	7.92	22.08	22.16	43.44	45.44
		0.2	1.260	1.258	7.92	7.90	22.07	22.14	43.39	45.42
		0.3	1.255	1.256	7.89	7.88	22.06	22.10	43.26	45.37
		0.4	1.250	1.253	7.83	7.85	22.04	22.04	43.03	45.30
		0.5	1.245	1.247	7.72	7.79	21.99	21.94	42.60	45.18
#5	0.5	0.0	1.260	1.260	7.94	7.92	22.09	22.17	43.49	45.45
		0.1	1.260	1.260	7.94	7.91	22.09	22.17	43.47	45.41
		0.2	1.260	1.259	7.92	7.89	22.09	22.17	43.40	45.31
		0.3	1.255	1.258	7.89	7.86	22.09	22.16	43.24	45.15
		0.4	1.255	1.256	7.82	7.81	22.09	22.15	42.88	44.90
		0.5	1.250	1.253	7.72	7.74	22.09	22.13	42.37	45.2



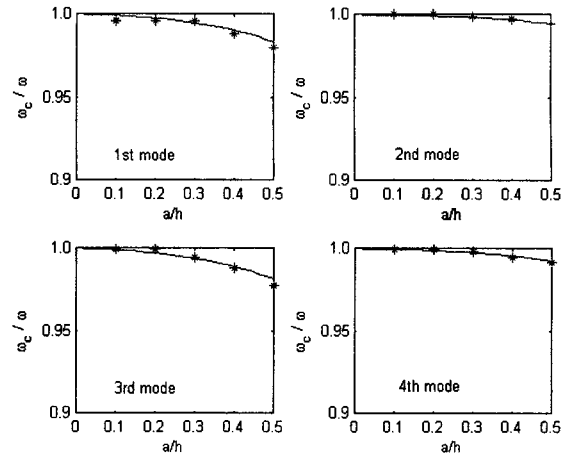
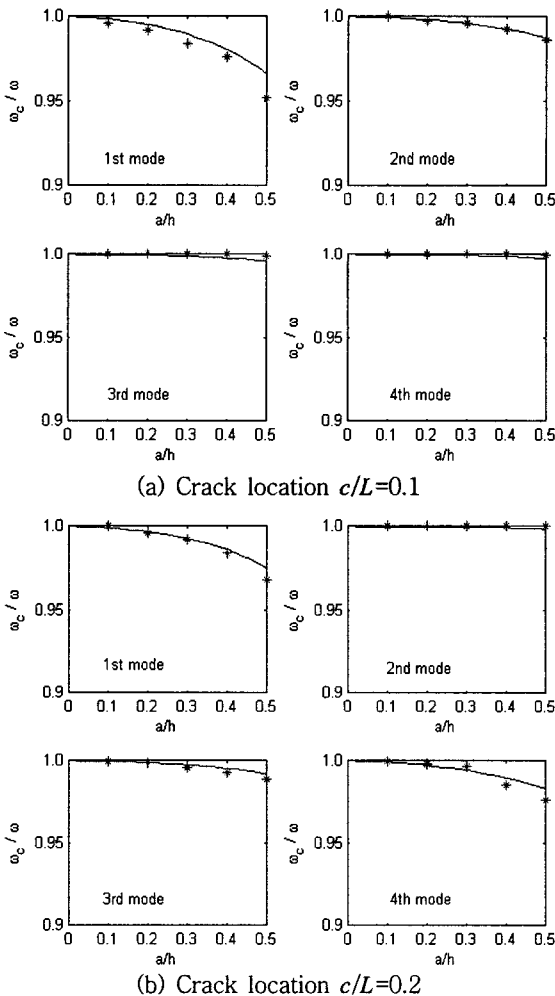
(a) Experiment results

(b) Numerical analysis results

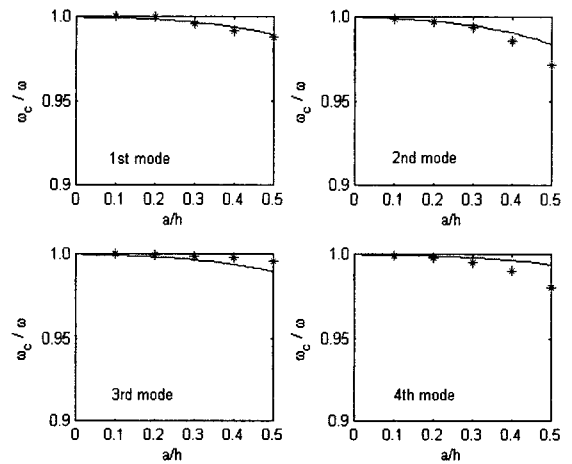
Fig. 6 2D-contour plots of frequency changes for the cracked cantilever beams according to the crack variables, c/L and a/h

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 분석된 모든 모드에서 실험 및 수치해석의 정성적인 결과는 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었는데 첫 번째 모드의 경우 균열 위치 $c/L=0.0$, 두 번째 모드의 경우 $c/L=0.5$, 세 번째 모드의 경우 $c/L=0.3$ 그리고 네 번째 모드의 경우 $c/L=0.15, 0.5$ 부근의 위치에서 고유진동수 비율이 최소값을 갖는다. 식 (23)으로부터 고유진동수 비율 $R_i (\leq 1.0)$ 값이 작다는 것은 균열 주변의 굽힘 강성이 저하되어 균열 전에 비해 고유진동수가 낮아졌다는 것을 의미한다.

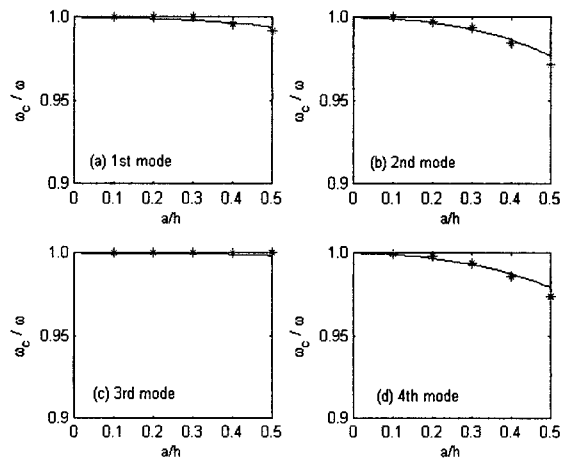
Fig. 7을 살펴볼 때 균열 깊이 $a/h=0.5$ 의 경우 실험 및 해석결과의 고유진동수 비율이 다른 조건에 비해 상대적으로 큰 차이를 보였다. 즉, 첫 번째 모드에서 $c/L=0.1$ 인 경우 실험결과가 0.9520, 해석결과가 0.9659로써 0.0139(1.39%)의 오차를 보였고



(c) Crack location $c/L=0.3$



(d) Crack location $c/L=0.4$

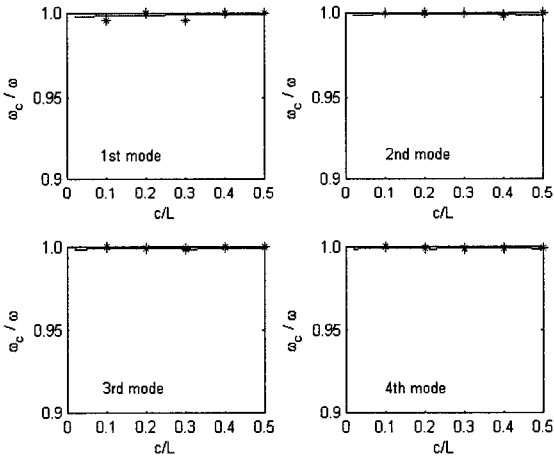


(e) Crack location $c/L=0.5$

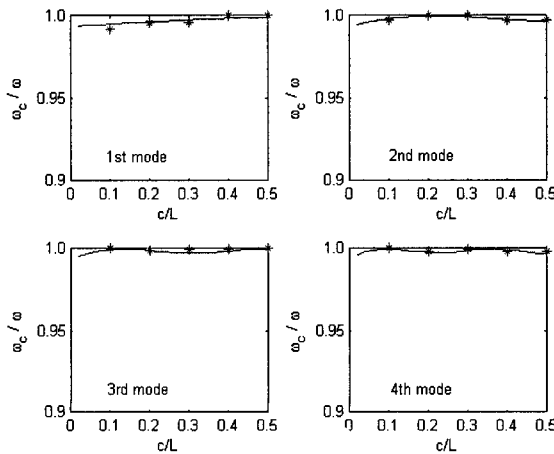
Fig. 7 Frequency changes of the cracked cantilever beams according to various crack depths : * experiment, — numerical analysis

두 번째 모드에서 $c/L=0.4$ 인 경우 실험결과가 0.9723, 해석결과가 0.9836으로써 0.0113(1.13%)의 오차를 보였다. 세 번째 모드에서 $c/L=0.4$ 인 경우 실험결과가 0.9959, 해석결과가 0.9896으로써 -0.0063(-0.63%)의 오차를 보였고 네 번째 모드에서 $c/L=0.4$ 인 경우 실험결과가 0.9802, 해석결과가 0.9941으로써 0.0139(1.39%)의 오차를 보였다. 이는 식 (4)의 균열 형상함수 $F(a/h)$ 의 상한조건인 $a/h < 0.6$ 에 근접함으로 인해 발생한 오차인 것으로 추정되나 그 오차는 최대 약 1.4% 이내로써 신뢰할만한 수준으로 판단된다.

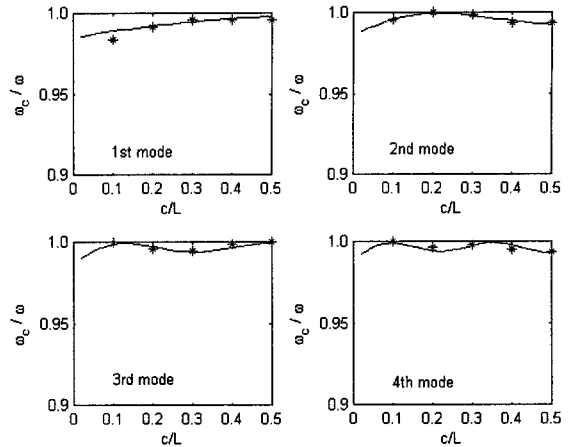
Fig. 8에서 보면 $a/h=0.2$ 의 조건에서부터 균열로 인한 고유진동수의 변화를 관찰할 수 있었는데, $a/h=0.1$ 의 경우 그 변화량이 미미하여 이 논문에서는 수치적으로 큰 의미가 없을 것으로 사료된다.



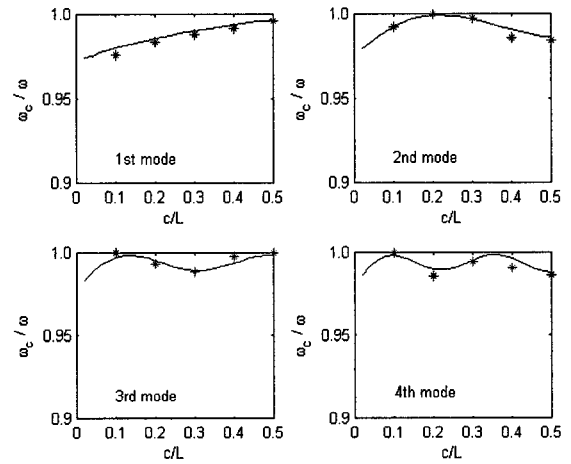
(a) Crack depth $a/h=0.1$



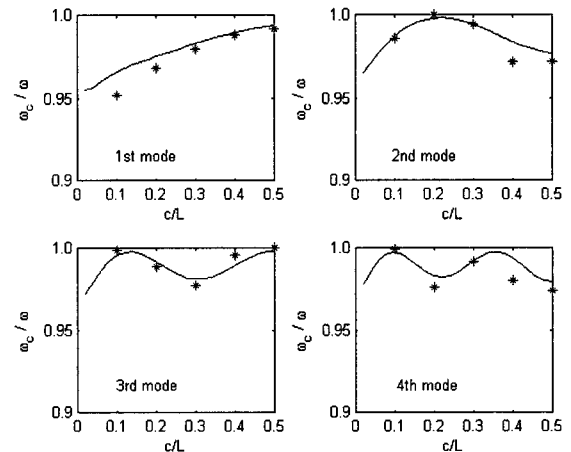
(b) Crack depth $a/h=0.2$



(c) Crack depth $a/h=0.3$



(d) Crack depth $a/h=0.4$



(e) Crack depth $a/h=0.5$

Fig. 8 Frequency changes of the cracked cantilever beams according to various crack locations: * experiment, — numerical analysis

잘 알려진 바와 같이 균열 구조물의 고유진동수는 균열 위치 및 깊이 변화와 밀접한 관계를 갖고 있음을 실험과 수치해석 결과로부터 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이 논문에서는 변형률 에너지 방법을 이용하여 균열 위치 및 깊이의 비를 변수로 갖는 등가의 굽힘강성 함수를 도입하고 외팔보에 대한 고유진동수 해를 제시하였다. 아울러 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 5개의 알루미늄 보를 제작하고 길이방향으로 0.1L, 0.2L, 0.3L, 0.4L, 0.5L의 위치에 초기 균열을 생성시킨 후 균열 깊이를 변화시켜가면서 균열 전후의 외팔보에 대한 고유진동수 비율을 살펴보고 해석결과와 비교 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이 논문의 실험은 측정 조건들을 잘 제어할 수 있는 연구실 환경에서 수행되었으며 비교적 심한 손상에도 불구하고 균열 보의 고유진동수 감소율은 최대 5% 이내로 분석되었다. 측정 조건의 제어가 힘든 실제 현장에서는 이보다 작은 크기의 손상, 측정 오차 및 온도 변화 등의 불확실성을 고려해 볼 때 고유진동수의 변화만으로 손상을 감지하는 방법은 매우 조심스럽게 접근할 필요가 있으며 후속 연구의 방향으로써 좀 더 효율적으로 손상을 감지할 수 있는 방안을 모색해야 할 것으로 판단된다.

(2) 이 논문에서 제시한 균열 보의 손상모델은 고유진동수 비율에 대한 실험결과와 비교해 볼 때 정량적으로는 최대 오차 1.4% 미만으로 신뢰할만한 수준이었으며, 균열 위치 및 깊이에 따른 고유진동수 변화패턴을 잘 추종하는 것으로 판단한다.

(3) 실험결과와 분석을 통해 균열 구조물의 고유진동수는 잘 알려진 바와 같이 균열 위치 및 깊이에 변화에 밀접한 관계를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 제시된 균열 보의 손상모델은 현재 추진 중인 구조물의 손상감지 알고리즘 개발 연구에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

이 연구는 과학기술부에서 지원하는 기관고유사업의 일환으로 수행되었으며 관련 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Doebbling, S. W., Farrar, C. R., and Prime, M. B., 1998, "A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods", Shock and Vibration Digest, Vol. 30, pp. 91~105.
- (2) Meyendorf, N. and Berthold, A., 2006, "New Trends in NDE and Health Monitoring", Proceedings of SPIE : Smart Structures and Materials/NDE for Health Monitoring and Diagnostics, Vol. 6179, pp. 617901-1~617901-10.
- (3) Irwin, G. R., 1957, "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate", ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, pp. 361~364.
- (4) Chondros, T. G. and Dimarogonas, A. D., 1980, "Identification of Cracks in Welded Joints of Complex Structures", Journal of Sound and Vibration, Vol. 69, pp. 531~538.
- (5) Dimarogonas, A. D. and Massouros, G., 1981, "Torsional Vibration of a Shaft with Circumferential Crack", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 439~444.
- (6) Dimarogonas, A. D. and Papadopoulos, C. A., 1983, "Vibration of Cracked Shafts in Bending", Journal of Sound and Vibration, Vol. 91, pp. 583~593.
- (7) Gudmundson, P., 1983, "The Dynamic Behaviour of Slender Structures with Cross-sectional Cracks", J. Mech. Physics Solids, Vol. 31, pp. 329~345.
- (8) Christides, S. and Barr, A. D. S., 1984, "One-dimensional Theory of Cracked Bernoulli-Euler Beams", International Journal Mechanics Science, Vol. 26, pp. 639~648.
- (9) Shen, M. H. and Pierre, C., 1994, "Free Vibrations of Beams with a Single-edge Crack", Journal of Sound and Vibration, Vol. 170, pp. 237~259.
- (10) Chondros, T. G. and Dimarogonas, A. D., 1998, "Vibration of a Cracked Cantilever Beam",

Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 120, pp. 742~746.

(11) Chondros, T. G. and Dimarogonas, A. D., 1998, "A Continuous Cracked Beam Vibration Theory", Journal of Sound and Vibration, Vol. 215, pp. 17~34.

(12) Ha, T. W. and Song, O. S., 1999, "A Study on the Dynamic Characteristics of a Composite Beam with a Transverse Open Crack", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 5, pp. 1019~1028.

(13) Hong, S. W., Choi, S. H. and Lee, C. W., 2003, "Dynamic Modeling and Analysis of General Rotor Systems with Open Cracks", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 290~300.

(14) Yoon, H. I. and Son, I. S., 2004, "A Study on Dynamic Behavior of Cantilever Pipe Coveying Fluid

with Crack and Moving Mass(1) - Focused on the Amplitude Characteristics-", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1304~1313.

(15) Yang, X. F., Swamidas, A. S. J. and Seshadri, R., 2001, "Crack Identification in Vibrating Beams Using the Energy Method", Journal of Sound and Vibration, Vol. 244, pp. 339~357.

(16) Owolabi, G. M., Swamidas, A. S. J. and Seshadri, R., 2003, "Crack Detection in Beams Using Changes in Frequencies and Amplitudes of Frequency Response Functions", Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, pp. 1~22.

(17) Gdoutos, E. E., 1993, Fracture Mechanics, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.

(18) Gorman, D. J., 1975, Free Vibration Analysis of Beams and Shafts, John Wiley and Sons, Inc.