

가중함수법에 의한 볼트 체결부 균열의 임계 경사각 결정에 관한 연구

허성필* · 양원호** · 정기현***

(2000년 2월 9일 접수)

A Study on the Determination of Critical Inclined Angle of Cracks in Bolted Joints by Weight Function Method

Sung-Pil Heo, Won-Ho Yang and Ki-Hyun Chung

Key Words: Weight Function Method(가중함수법), Bolted Joint(볼트 체결부), Critical Inclined Angle(임계 경사각), Contact(접촉), Clearance(간극), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

Mechanical joints such as bolted or riveted joints are widely used in mechanical components. The reliable determination of the stress intensity factors for cracks in bolted joints is needed to evaluate the safety and fatigue life of them. The weight function method is an efficient technique to calculate the stress intensity factors for various loading conditions because only the stress analysis of an uncracked model is required. In this paper the mixed-mode stress intensity factors for cracks in bolted joints are obtained by weight function method, in which the coefficients of weight function are determined by finite element analyses for reference loadings. Critical inclined angle that mode I stress intensity factor becomes maximum is determined and the effects of crack length and the magnitude of clearance on critical inclined angle are investigated.

1. 서론

항공기를 비롯한 많은 기계 구조물에 접합의 방법으로 볼트 체결 및 리벳 체결과 같은 기계적 체결이 널리 이용되고 있다. 이러한 볼트 체결부(bolted joint)는 응력집중원으로 작용할 뿐 아니라 볼트와의 접촉에 의한 접촉응력(contact stress) 등으로 인해 균열이 발생할 가능성이 높다. 기계적 체결부의 파괴역학적 안전성 및 피로수명 등을 평가하기 위해서는 이러한 볼트 체결부에 존재하

는 균열에 대한 정확한 응력확대계수(stress intensity factor; SIF)의 평가가 필요하다.

임의의 균열에 대한 응력확대계수는 주로 유한요소해석을 통해 정확하게 구할 수 있으나 여러 하중 조건에 대한 해를 얻고자 하는 경우에는 모델 구성 및 해석에 많은 시간을 요하게 된다. 가중함수법(weight function method)은 균열 및 균열체(cracked body)의 형상에 대한 가중함수와 동일 형상의 구조물에 균열이 포함되지 않은 경우에 대한 응력을 이용하여 효율적으로 응력확대계수를 구할 수 있는 방법이다. 균열을 포함하지 않은 모델에 대한 응력 해석만을 수행하게 되므로 다양한 하중 조건에 대해서도 쉽게 응력확대계수를 구할 수 있다.

여러 균열 형상에 대한 가중함수의 개발 및 그 적용에 관해서 많은 연구들이 진행되어 왔다. Glinka와 Shen은 2차원 모드 I 균열 문제에 일반

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

E-mail : spheo@orgio.net

TEL : (031)290-7496 FAX : (031)290-5849

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

*** 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

적으로 적용할 수 있는 가중함수를 제안하였고,⁽¹⁾ Wu와 Carlsson은 가중함수법을 적용하여 다양한 2차원 균열 문제에 대해 응력확대계수를 구하였다.⁽²⁾ Wang은 중앙 균열 문제에 간단히 적용할 수 있는 근사적인 가중함수를 제안하고, 다양한 하중 조건에 대한 해를 구하였다.⁽³⁾ 이러한 연구들은 주로 모드 I 문제에 대해서 수행되었고, 모드 II 문제에 관해서는 Fett 등이 혼합모드 문제에 적용할 수 있는 가중함수를 제안하고 모서리 균열 및 계면 근방의 균열에 대한 응력확대계수를 해석하였다.^(4,5)

기계적 체결부의 안전성 평가는 등방성 및 복합재료에 대해 주로 응력해석을 통한 강도 및 파손 평가가 수행되어 왔다. 볼트 체결부에 존재하는 균열에 대한 파괴역학적 평가도 수행되었으나 접촉부와 균열이 동시에 고려되어야 하는 복잡성으로 인해 상대적으로 제한적인 연구들이 수행되어 왔다. Cartwright와 Parker는 볼트부의 접촉압력을 균일 분포 및 여현(cosine) 분포로 가정하여 대칭으로 존재하는 균열에 대한 응력확대계수 해석을 수행하였다.⁽⁶⁾ Chiang과 Rowland는 수평 및 수직균열에 대한 혼합모드 응력확대계수 해석을 수행하였고,⁽⁷⁾ Narayana 등은 볼트 체결부의 간극 및 간섭에 따른 영향을 해석하였다.⁽⁸⁾ Ju는 유한요소해석을 통해 수평 및 경사 균열에 대한 혼합모드 응력확대계수를 구하고 특정한 경우에 대하여 경사각에 따른 응력확대계수의 변화를 통해 모드 I이 최대가 되는 임계 경사각이 존재함을 보였다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 볼트 체결부에 존재하는 균열에 대해 가중함수법을 적용하여 간극(clearance)의 크기에 따른 혼합모드 응력확대계수 해석을 수행하고, 균열 경사각에 따른 해석으로부터 볼트 체결부 균열의 임계 경사각을 결정하고자 한다. 또한 균열 길이 및 볼트 체결부 간극의 크기가 이러한 임계 경사각에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 가중함수법의 적용

2.1 가중함수법의 개요

가중함수법은 Bueckner와 Rice 등에 의해 제안된 방법으로⁽¹⁰⁾ Fig. 1과 같이 구조물에 작용하는 외력 T에 대해 균열이 발생할 위치에서의 응력장 $\sigma(x)$ 를 구하고, 식 (1)과 같이 이 응력장과 가중

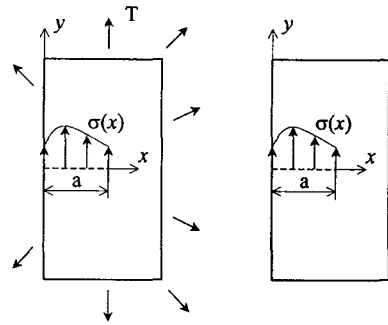


Fig. 1 Weight function method for two-dimensional crack

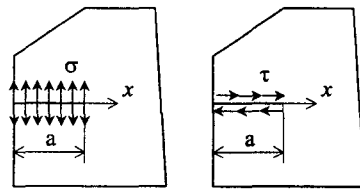


Fig. 2 Cracks in non-symmetric bodies

함수의 곱을 전체 균열길이에 대해 적분하여 응력확대계수를 구하는 방법이다.

$$K = \int_0^a h(x, a) \sigma(x) dx \quad (1)$$

여기서 가중함수 $h(x, a)$ 는 기하학적 형상에는 의존하지만 작용하중에는 독립인 특성을 가지고 있기 때문에, 특정의 균열 및 균열체 형상에 대해 신뢰성 있는 가중함수가 결정되면 임의의 하중조건에 대해서도 식 (1)의 적분을 통해 간단하게 응력확대계수를 구할 수 있다.

2.2 가중함수법에 의한 혼합모드 응력확대계수

Fig. 2와 같이 기하학적 대칭성이 존재하지 않는 일반적인 혼합모드 문제에서는 균열면상에 작용하는 수직응력 σ 에 대해서도 모드 I뿐 아니라 모드 II 응력확대계수가 모두 나타나며 이를 가중함수법에 의해 각각 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_I^{(\sigma)} = \int_0^a h_I^{(\sigma)}(x, a) \sigma(x) dx \quad (2)$$

$$K_{II}^{(\sigma)} = \int_0^a h_{II}^{(\sigma)}(x, a) \sigma(x) dx \quad (3)$$

또한 균열면상에 작용하는 전단응력 τ 에 대해서도 모드 I, 모드 II 응력확대계수가 모두 나타나며 이를 각각 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_I^{(\tau)} = \int_0^a h_I^{(\tau)}(x, a) \tau(x) dx \quad (4)$$

$$K_{II}^{(\tau)} = \int_0^a h_{II}^{(\tau)}(x, a) \tau(x) dx \quad (5)$$

균열이 존재하는 구조물에 일반적인 하중이 작용하면 균열면상에는 수직응력과 전단응력이 모두 나타나며 이 때에는 위의 두 가지 경우를 중첩하여 식 (6), (7)과 같이 응력확대계수를 구할 수 있다.^(4,5)

$$K_I = \int_0^a \{h_I^{(\sigma)}(x, a) \sigma(x) + h_I^{(\tau)}(x, a) \tau(x)\} dx \quad (6)$$

$$K_{II} = \int_0^a \{h_{II}^{(\sigma)}(x, a) \sigma(x) + h_{II}^{(\tau)}(x, a) \tau(x)\} dx \quad (7)$$

위 식에서 $\sigma(x)$ 와 $\tau(x)$ 는 균열면이 될 위치에서의 수직응력과 전단응력 분포를 나타내며 균열이 없는 모델에 대한 응력해석을 수행하여 얻게 된다. 식 (6), (7)에 포함된 4개의 가중함수는 일반적으로 각각 식 (8)~(11)과 같은 무한급수 형태로 설정한다.

$$h_I^{(\sigma)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \sum_{n=0}^{\infty} D_{I,n}^{(\sigma)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{n-1/2} \quad (8)$$

$$h_{II}^{(\sigma)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \sum_{n=0}^{\infty} D_{II,n}^{(\sigma)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{n-1/2} \quad (9)$$

$$h_I^{(\tau)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \sum_{n=0}^{\infty} D_{I,n}^{(\tau)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{n-1/2} \quad (10)$$

$$h_{II}^{(\tau)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \sum_{n=0}^{\infty} D_{II,n}^{(\tau)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{n-1/2} \quad (11)$$

Fett 등의 연구^(4,5)에서와 같이 위의 무한급수는 식 (12)~(15)와 같이 간략히 하여 실제 문제에 적용할 수 있다.

$$h_I^{(\sigma)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-x/a}} + D_{I,1}^{(\sigma)} \sqrt{1-x/a} + D_{I,2}^{(\sigma)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \quad (12)$$

$$h_{II}^{(\sigma)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \left\{ D_{II,1}^{(\sigma)} \sqrt{1-x/a} + D_{II,2}^{(\sigma)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \quad (13)$$

$$h_I^{(\tau)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \left\{ D_{I,1}^{(\tau)} \sqrt{1-x/a} + D_{I,2}^{(\tau)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \quad (14)$$

$$h_{II}^{(\tau)} = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-x/a}} + D_{II,1}^{(\tau)} \sqrt{1-x/a} + D_{II,2}^{(\tau)} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right\} \quad (15)$$

식 (12)~(15)에 포함된 8개의 미정계수가 결정되면 식 (6)과 (7)로부터 각각 모드 I, 모드 II 응력확대계수를 구할 수 있게 된다. 이 미정계수는 적용하는 문제에 따라 자유 모서리 조건(free coner condition) 및 기준하중(reference loading)에 대한 응력확대계수로부터 결정할 수 있다.

3. 혼합모드 응력확대계수 해석

3.1 볼트 체결부 균열의 개요 및 유한요소해석

Fig. 3과 같이 볼트 체결부에 반지름 방향으로 균열이 존재하고 있으며, 외부에 균일 인장하중을 받고 있는 평판에 대하여 해석을 수행하였다. 구멍의 크기는 지름 12.5mm로 고정되어 있고, 볼트의 크기를 바꾸어 구멍과 볼트 사이에 간극이 존재하도록 하였다. 그림에서 a는 균열 길이, α 는 균열 경사각, r은 구멍의 반지름을 나타낸다. 사용된 재료는 알루미늄으로 물성치는 탄성계수가 68.95GPa, 푸아송의 비는 0.25이며 볼트부는 변형이 없는 강체로 가정하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

유한요소해석의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 균열이 없는 모델에 대해 Fig. 4(a)와 같은 유한요소망을 구성하여 볼트 체결부의 접촉응력 분포를 구하였고, Ju의 결과⁽⁹⁾와 비교하기 위해 수

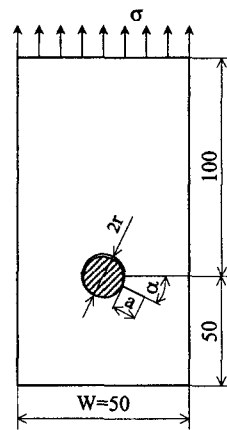
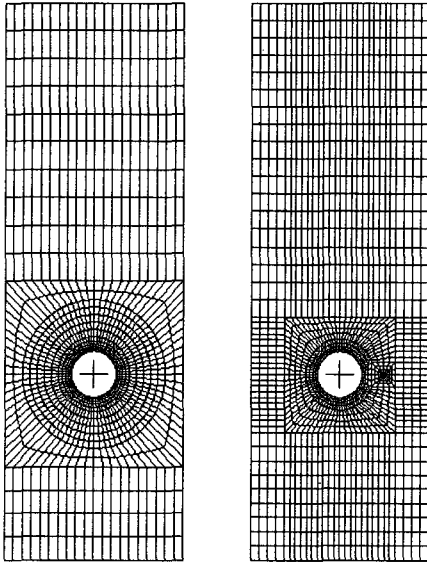


Fig. 3 Configuration of cracks in bolted joints



(a) Uncracked model (b) Horizontal crack model

Fig. 4 Finite element mesh for plates with bolted joints

평 균열이 대칭으로 존재하는 모델에 대해 응력 확대계수 해석을 수행하였다. Fig. 4(b)는 본 연구의 대상인 단일 균열이 존재하는 모델에 대한 유한요소망을 나타낸 것이다. 유한요소해석 모델에서 접촉부는 볼트와 구멍사이의 접촉 조건이 만족되도록 상세하게 요소망을 구성하였고, 볼트는 강체 요소(rigid element)를 사용하여 표현하였다. 또한 균열 선단에는 응력의 특이성을 표현할 수 있는 1/4절점 요소(quarter point element)를 사용하였다. Fig. 5는 간극이 없는 경우에 대한 접촉응력 해석 결과로 그림에서 β 는 볼트 체결부 가장 아래 부분으로부터 시계 방향으로 구멍의 경계를 따라 측정되는 각도를 의미한다. 그림에서와 같이 접촉응력 분포는 함께 나타낸 이론적인 여현(cosine) 분포와 유사하다. 두 결과에 나타나는 약간의 차이는 접촉부에서 발생하는 실제 변형 때문으로 판단되며 Hyer 등의 연구⁽¹¹⁾에서와 일치하는 경향이다.

Table 1은 무차원 균열길이에 따른 수평 대칭 균열의 응력확대계수를 무차원화하여 나타낸 것으로 함께 나타낸 Ju의 해석 결과⁽⁹⁾와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 접촉부 및 균열을 포함하는 본 연구의 유한요소해석이 타당함을 입증할 수 있다.

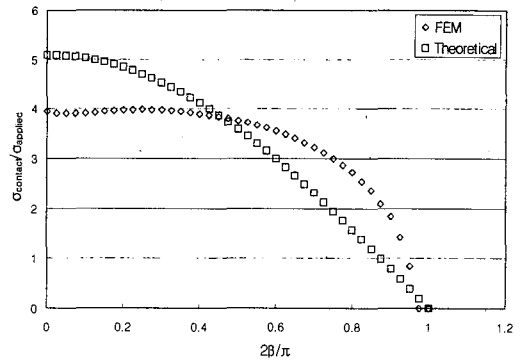


Fig. 5 Contact stress distribution along the hole boundary in the case of no clearance

Table 1 Stress intensity factors for double symmetric cracks in bolted joints

$2(a+r)/W$	$K_I / \sigma \sqrt{\pi(a+r)}$	
	FEM	Ju's results ⁽⁹⁾
0.331	1.46	1.43
0.442	1.43	1.41
0.525	1.43	1.41

3.2 볼트 체결부 균열에 대한 가중함수법의 적용

볼트 체결부에 존재하는 균열은 하중 조건 및 균열의 경사각에 따라 일반적으로 혼합모드 상태에 놓이게 되며 적합한 가중함수를 사용하여 식 (6), (7)에 의해 모드 I 및 모드 II 응력확대계수를 구할 수 있다. 4개의 가중함수 중에서 예를 들어 식 (12)에 나타난 $h_1^{(0)}$ 를 결정하기 위해서는 2개의 미정계수를 구하여야 한다. 이를 위해 기준하중으로 균열면상에 작용하는 균일 응력 $\sigma(x) = \sigma_0$ 와 일차 응력 $\sigma(x) = \sigma_0(1-x/a)$ 를 고려하여 식 (16), (17)에서와 같이 이들 하중에 대해 가중함수법을 적용한다.

$$\int_0^a h_1^{(0)}(x, a) \sigma_0 dx = \sigma_0 \sqrt{\pi a} F_{1,1}^{(0)} \quad (16)$$

$$\int_0^a h_1^{(0)}(x, a) \sigma_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right) dx = \sigma_0 \sqrt{\pi a} F_{1,2}^{(0)} \quad (17)$$

여기서 $F_{1,1}^{(0)}$ 와 $F_{1,2}^{(0)}$ 는 두 기준하중에 대한 무차원 응력확대계수로, 균열면상에 각각의 $\sigma(x)$ 를 가하여 유한요소해석을 통해 얻을 수 있다.

Table 2 Nondimensional stress intensity factors for reference loadings

$2(a+r)/W$	0.33	0.41	0.49	0.57	0.65
$F_{I,1}^{(o)}$	0.9981	0.9611	0.9562	0.9733	1.0148
$F_{I,2}^{(o)}$	0.3386	0.3151	0.3108	0.3190	0.3403
$F_{II,1}^{(o)}$	3.85E-5	7.71E-5	1.86E-4	2.79E-4	3.69E-4
$F_{II,2}^{(o)}$	5.78E-5	4.82E-5	1.35E-4	1.88E-4	2.40E-4
$F_{I,1}^{(r)}$	3.85E-5	9.64E-5	1.29E-4	1.93E-4	1.54E-4
$F_{I,2}^{(r)}$	-1.9E-5	2.89E-5	6.42E-5	4.82E-5	7.71E-5
$F_{II,1}^{(r)}$	1.0907	1.0705	1.0696	1.0875	1.1276
$F_{II,2}^{(r)}$	0.4071	0.3946	0.3932	0.4026	0.4243

Fig. 4(b)는 해석에 사용된 유한요소망을 나타낸 것으로 이와 같이 기준하중에 대한 응력확대계수를 구하기 위해서와 가중함수법 적용의 타당성을 입증하기 위한 해석에 사용된다. 이 값들을 대입하여 식 (16), (17)을 연립하여 풀면 식 (12)에서의 두 미정계수를 결정할 수 있으며, 그 결과는 식 (18), (19)와 같다.

$$D_{I,1}^{(o)} = \frac{15\pi}{8\sqrt{2}} (5F_{I,1}^{(o)} - 7F_{I,2}^{(o)}) - 10 \quad (18)$$

$$D_{I,2}^{(o)} = \frac{35\pi}{8\sqrt{2}} (5F_{I,2}^{(o)} - 3F_{I,1}^{(o)}) + \frac{35}{3} \quad (19)$$

Table 2는 식 (12)~(15)의 4개의 가중함수에 포함된 8개의 미정계수를 결정하기 위하여 본 연구에서 고려한 기준하중인 위의 $\sigma(x)$ 및 이와 동일한 형태의 전단응력 $\tau(x)$ 에 대한 무차원 응력확대계수 8개를 유한요소해석으로부터 구한 결과를 나타낸다. 이러한 균열면상에 작용하는 기준하중에 대한 해석에서는 균열면으로부터 충분히 멀리 떨어진 곳에 경계조건을 부여하여 응력확대계수에 영향을 미치지 않도록 하였다. 표에서 모드 I 과 모드 II의 커플링 효과를 나타내는 $F_{II,1}^{(o)}$, $F_{II,2}^{(o)}$, $F_{I,1}^{(r)}$, $F_{I,2}^{(r)}$ 는 거의 0에 가까운 값을 나타낸다. Fett 등의 연구⁽⁵⁾에서처럼 계면 근방의 균열과 같은 문제에서는 이러한 값들이 고려되어야 하겠지만 표의 결과로부터 볼트 체결부 균열에서는 이 값들을 계수에 포함하는 $h_{II}^{(o)}$, $h_I^{(r)}$ 는 응력확대계수 계산에서 고려하지 않아도 될 것이다. 따라서 볼트 체결부에 존재하는 균열에 대한 혼합모드 응력확대계수 해석에서는 식 (20), (21)과 같이 커플링의 효과를 고려하지 않는 가중함수법

Table 3 Stress intensity factors for cracks in bolted joints by weight function method and finite element method

$2(a+r)/W$	Mode I				Mode II	
	c=0		c=1%		c=1%	
	WFM	FEM	WFM	FEM	WFM	FEM
0.33	2.973	2.883	3.242	3.244	0.3348	0.3269
0.41	2.132	2.073	2.318	2.307	0.3677	0.3571
0.49	1.740	1.699	1.857	1.849	0.3366	0.3285
0.57	1.510	1.509	1.618	1.609	0.3028	0.2950
0.65	1.434	1.426	1.503	1.492	0.2727	0.2675

의 적용이 합리적이라 할 수 있겠다.

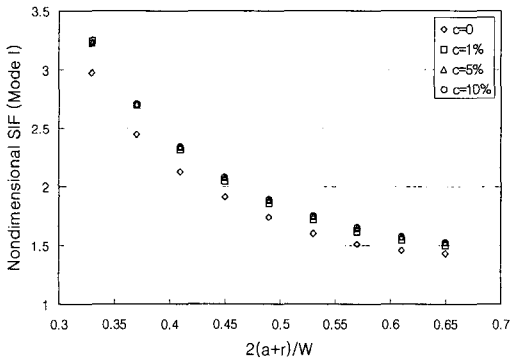
$$K_I = \int_0^a h_I^{(o)}(x, a) \sigma(x) dx \quad (20)$$

$$K_{II} = \int_0^a h_{II}^{(r)}(x, a) \tau(x) dx \quad (21)$$

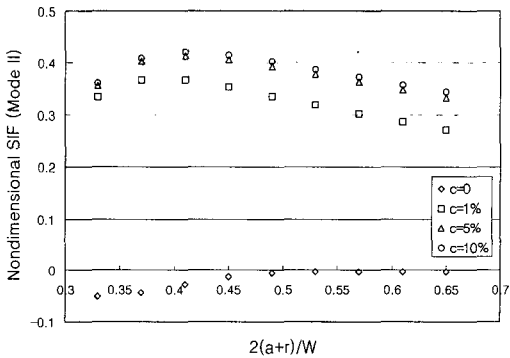
Table 3은 가중함수법과 유한요소법으로 구한 모드 I, 모드 II 응력확대계수를 $\sigma\sqrt{\pi a}$ 로 무차원화하여 균열 길이에 따라 나타낸 것으로, 간극이 없는 경우와 간극의 크기가 구멍 지름의 1%인 경우에 대한 결과를 함께 나타내었다. 모드 II에서는 간극이 없는 경우 응력확대계수가 거의 0이기 때문에 간극이 있는 경우만을 나타내었다. 표에서 WFM은 가중함수법에 의해 응력확대계수를 구한 경우로, 기준하중에 대한 유한요소해석 결과를 바탕으로 가중함수의 계수를 구하고, 균열이 없는 모델에 대한 응력해석을 통해서 얻은 균열면상의 수직응력과 전단응력을 적절한 x 의 다항식으로 곡선 적합(curve fitting)하여 식 (20), (21)로부터 응력확대계수를 구하였다. FEM은 Fig. 4(b)의 균열을 포함한 모델에 대해 유한요소해석을 수행하여 응력확대계수를 구한 경우를 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 간극 및 균열길이에 상관없이 모드 I, 모드 II 모두에서 대략 3% 이내로 두 결과가 잘 일치하였다. 따라서 균열이 없는 모델에 대한 응력해석만으로 응력확대계수를 평가할 수 있는 가중함수법의 볼트 체결부 균열에 대한 적용 타당성을 입증할 수 있다.

3.3 간극의 크기에 따른 응력확대계수

가중함수법에 의해 볼트 체결부에 존재하는 수평 균열에 대하여 균열길이에 따른 모드 I 및 모



(a) Mode I



(b) Mode II

Fig. 6 Stress intensity factors due to the magnitude of clearance

드 II 응력확대계수 해석을 수행하고 그 결과를 각각 Fig. 6(a)와 6(b)에 나타내었다. 간극의 영향을 조사하기 위하여 간극이 없는 경우와 간극의 크기가 구멍 지름의 1%, 5%, 10%인 경우에 대해 응력확대계수를 구하였다. 간극이 없는 경우에 비해 간극이 1% 존재하는 경우는 모드 I 응력확대계수가 상대적으로 크게 증가하나, 간극이 존재하는 경우들끼리 비교해 보면 간극의 크기는 응력확대계수에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 이는 실제로 간극이 있는 볼트 체결부에 존재하는 균열에 대해 간극이 없는 모델로 이상화하여 파괴역학적 평가를 수행한다면 응력확대계수를 과소 평가하는 오류를 범하게 됨을 의미한다. 모드 II 응력확대계수는 간극이 없는 경우에는 거의 0에 가까운 값이므로 순수한 모드 I 상태로 볼 수 있겠으나, 간극이 있는 경우에는 수평 균열, 즉 작용하중에 수직인 균열일 지라도 혼합모드 상태에 놓이게 됨을 알 수 있다.

Table 4 Reference stress intensity factors for horizontal and inclined crack

	Horizontal	Inclined
$F_{I,1}^{(\theta)}$	0.9562	0.9679
$F_{I,2}^{(\theta)}$	0.3108	0.3180
$F_{II,1}^{(\tau)}$	1.0696	1.0611
$F_{II,2}^{(\tau)}$	0.3932	0.3884

Table 5 Nondimensional stress intensity factors for inclined crack by weight function method and finite element method

	WFM	FEM
Mode I	1.6536	1.6968
Mode II	-0.4493	-0.4374

4. 임계 경사각 결정

4.1 경사진 균열에 대한 가중함수법의 적용

경사진 균열에 대해 가중함수법을 적용하기 위해서는 서로 다른 경사각을 가지는 균열에 대해 각각 기준하중에 대한 해를 구해야 하나, 이것은 모델 구성 및 해석에 많은 시간을 요하게 된다. Table 4는 수평균열과 경사각 27°인 경사진 균열에 대해 가중함수의 계수에 포함되는 기준하중에 대한 무차원 응력확대계수를 비교한 것으로, 각각에 대한 유한요소해석을 통해 얻어진 값들이다. 외부하중에 대한 해석이라면 경사각에 따라 응력확대계수에 차이가 날 것이나, 본 연구에서 고려하고 있는 기준하중은 균열면상에 작용하는 균일 응력과 일차 응력이므로, 표의 결과에서와 같이 수평한 균열에서 구한 값과 경사진 균열에서 구한 값이 적은 오차 범위내에서 잘 일치하는 값을 알 수 있다. 따라서 경사진 균열에 대한 가중함수법의 적용에서는 균열이 없는 모델에서 얻은 응력 데이터를 응력요소의 회전을 통해 경사진 균열면상의 수직응력과 전단응력으로 변환시키고, 가중함수는 경사진 균열에서의 기준하중에 대한 추가적인 해석 없이 수평균열에서 계수를 그대로 사용할 수 있을 것이다.

Table 5는 간극이 구멍 지름의 1%인 볼트 체결부에 존재하는 경사진 균열에 대하여 위의 절차에 따른 가중함수법과 유한요소법에 의해 구한

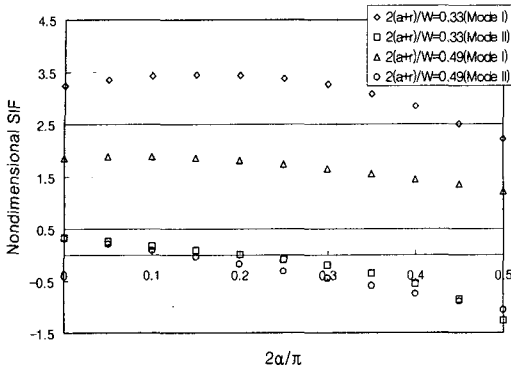
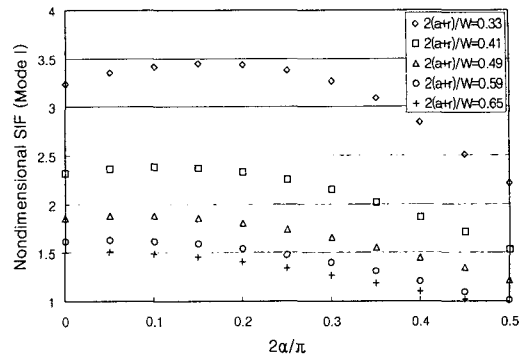


Fig. 7 Stress intensity factors along inclined angle of crack

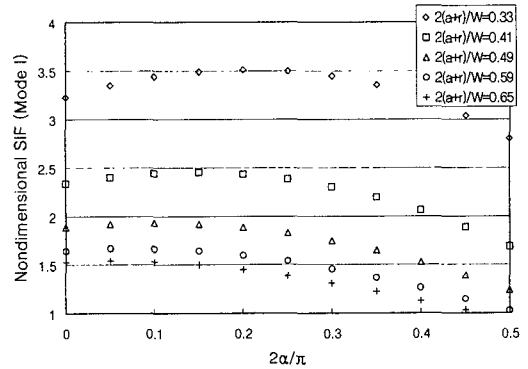
모드 I, 모드 II 응력확대계수를 비교한 것으로, 최종 결과인 응력확대계수에서도 위 절차의 타당성을 확인할 수 있다. 가중함수법의 가장 큰 장점은 주어진 기하학적 형상에 대하여 여러 하중 조건에 대한 응력확대계수를 균열이 없는 모델에 대한 응력해석만으로 간편하게 구할 수 있다는 점이지만, 이와 같이 경사진 균열 문제에서 여러 경사각에 대한 응력확대계수를 평가할 때에도 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있겠다.

4.2 볼트 체결부 균열의 임계 경사각

Fig. 7은 볼트 체결부의 간극이 구멍 지름의 1%인 경우에 대하여 가중함수법에 의해 구한 모드 I, 모드 II 응력확대계수를 무차원 균열 경사각에 따라 나타낸 것이다. 먼저 앞 절에서 언급했듯이 경사각 α 가 0°인 경우, 즉 수평 균열인 경우에도 모드 I뿐 아니라 모드 II 응력확대계수도 함께 존재함을 알 수 있다. 경사각이 증가함에 따라 모드 I 응력확대계수는 증가하다가 감소하는 경향을 나타내며 모드 II 응력확대계수는 0으로 감소하다가 부호가 바뀌어 증가해 가는 경향을 가진다. 이는 특정의 경사각에서 모드 II 응력확대계수는 0이 되면서 모드 I 응력확대계수가 최대가 되는 상태에 놓이게 됨을 의미하며 결국 가장 위험한 상황인 순수 모드 I 상태가 되는 임계 경사각이 존재함을 나타낸다. 물론 유한요소 해석 및 가중함수법의 적용에서 수반되는 오차의 영향으로 모드 II가 0이 되고, 모드 I이 최대가 되는 임계 경사각이 정확하게 일치하지는 않지만 적은 범위내에서 이러한 임계 경사각을 찾을 수 있다.



(a) Clearance=1%

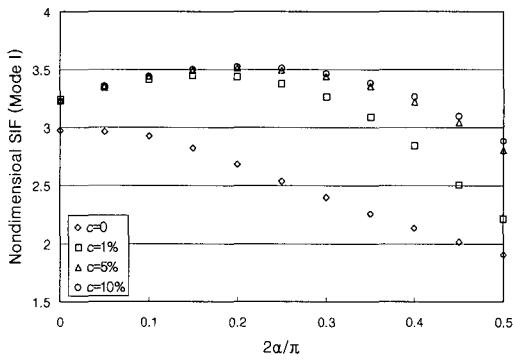


(b) Clearance=5%

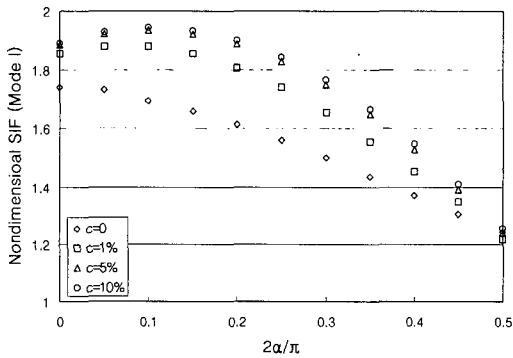
Fig. 8 Effect of crack length on mode I stress intensity factors along inclined angle of crack

Fig. 8(a), (b)는 각각 간극이 구멍 지름의 1%, 5%인 경우에 대하여 균열 경사각에 따른 모드 I 응력확대계수를 균열길이를 변화시켜가며 나타낸 것이다. 앞의 설명에서와 같이 모든 균열 길이에서 경사각이 증가함에 따라 응력확대계수가 증가 후 감소하는 경향을 가진다. 그리고 두 경우 모두에서 균열길이가 커짐에 따라 모드 I이 최대가 되는 임계 경사각이 감소하며 점차 0°에 접근해감을 알 수 있다.

Fig. 9(a), (b)는 각각 무차원 균열길이가 0.33, 0.49인 경우에 대하여 균열 경사각에 따른 모드 I 응력확대계수를 간극의 크기를 변화시켜가며 나타낸 것이다. 앞 장에서 언급했던 것처럼 경사각이 0°인 수평 균열의 경우, 간극의 유무는 모드 I 응력확대계수에 큰 영향을 미치지 않지만 간극의 크기는 거의 영향이 없음을 확인할 수 있다. 경사진 균열에서는 간극의 크기가 커짐에 따라 모드 I



(a) $2(a+r)/W=0.33$



(b) $2(a+r)/W=0.49$

Fig. 9 Effect of the magnitude of clearance on mode I stress intensity factors along inclined angle of crack

응력확대계수가 증가하는데, 그 차이는 균열 길이 및 경사각에 따라 다르다. 간극의 크기에 따른 임계 경사각은 먼저 간극이 0인 경우에는 언제나 경사각이 0°인 경우가 임계 경사각임을 알 수 있다. 즉 작용하중에 수직인 균열이 모드 I이 최대가 되는 가장 위험한 상황에 해당된다. 전체적으로 간극의 크기가 증가함에 따라 임계 경사각은 0°로부터 증가하다가 일정해 가는 경향을 확인할 수 있다.

5. 결론

가중함수법을 적용하여 볼트 체결부에 존재하는 균열에 대한 파괴역학적 평가를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가중함수법을 적용하여 볼트 체결부에 존재

하는 수평 균열 및 경사 균열에 대한 혼합모드 응력확대계수 해석을 수행하였고 그 타당성을 입증하였다.

- (2) 볼트 체결부에 존재하는 균열은 일반적으로 혼합모드 상태에 놓이며, 간극이 있는 경우에는 작용하중에 수직인 균열일 지라도 혼합모드 상태가 된다.

- (3) 수평 균열의 경우, 간극의 존재는 모드 I 응력확대계수를 증가시키지만, 간극의 크기는 거의 영향을 미치지 않는다.

- (4) 균열의 경사각에 따라 모드 I 및 모드 II 응력확대계수가 달라지며 가장 위험한 상황인 순수 모드 I 상태가 되는 임계 경사각이 존재한다.

- (5) 임계 경사각은 균열길이가 커짐에 따라 감소하며 점차 0°에 접근해 간다.

- (6) 임계 경사각은 볼트 체결부 간극의 크기가 증가함에 따라 증가하다가 일정해 가는 경향을 가진다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Glinka, G. and Shen, G., 1991, "Universal Features of Weight Functions for Cracks in Mode I," *Engng. Fracture Mechanics*, Vol. 40, No. 6, pp. 1135~1146.
- (2) Wu, X. R. and Carlsson, A. J., 1991, "*Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions*," Pergamon Press, New York.
- (3) Wang, Q. Z., 1998, "Some Simple Mode-I SIF Expressions of Finite-Width Strip with a Center Crack Derived by Using an Approximate Weight Function," *Engng. Fracture Mechanics*, Vol. 60, No. 1, pp. 37~45.
- (4) Fett, T. and Munz, D., 1997, "*Stress Intensity Factors and Weight Functions*," Computational Mechanics Publications, Southampton.
- (5) Fett, T., Munz, D. and Tilscher, M., 1997,

- "Weight Functions for Sub-Interface Cracks," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 34, No. 3, pp. 393~400.
- (6) Cartwright, D. J. and Parker, A. P., 1982, "Opening Mode Stress Intensity Factor for Cracks in Pin-loads Joints," *Int. J. of Fracture*, Vol. 18, No. 1, pp. 65~78.
- (7) Chiang, Y. J. and Rowlands, R. E., 1991, "Finite Element Analysis of Mixed-Mode Fracture of Bolted Composite Joints," *J. of Composites Technology and Research*, Vol. 13, No. 4, pp. 227~235.
- (8) Narayana, K. B., Dayananda, T. S., Dattaguru, B., Ramamurthy, T. S. and Vijayakumar, K., 1994, "Cracks Emanating from Pin-Loaded Lugs," *Engng. Fracture Mechanics*, Vol. 47, No. 1, pp. 29~38.
- (9) Ju, S. H., 1997, "Stress Intensity Factors for Cracks in Bolted Joints," *Int. J. of Fracture*, Vol. 84, pp. 129~141.
- (10) Rice, J., 1972, "Some Remarks on Elastic Crack-Tip Stress Field," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 8, pp. 751~758.
- (11) Hyer, M. W. and Liu, D., 1985, "Stresses in Pin-Loaded Orthotropic Plates : Photoelastic Results," *J. of Composite Materials*, Vol. 19, pp. 138~153.