

Hertzian 접촉하중시 TiN/Steel의 표면균열에 대한 모드 I과 모드 II 응력확대계수

김 병 수* · 김 위 대*

(2000년 4월 22일 접수, 2001년 3월 29일 심사완료)

Mode I and Mode II Stress Intensity Factors for a Surface Cracked in TiN/Steel Under Hertzian Rolling Contact

Byeong Soo Kim and Wie Dae Kim

Key Words: Stress Intensity Factor(응력확대계수), Finite Element Analysis(유한요소해석), Tribology(트라이볼러지), Crack Propagation(균열성장), Coating/Layer(코팅/층), Stress Method(응력법), Hertzian Contact(Hertzian 접촉)

Abstract

The two dimensional problem of a layered tribological system (TiN/Steel) containing a vertical surface breaking crack and subject to rolling contact is considered in this study. Using finite elements and stress extrapolation method, a series of preliminary models are developed. Preliminary results indicate that the extrapolation technique is valid to determine Modes I and II stress intensity factors for cracks. In the case of TiN/Steel medium, KI and KII were determined for variations in crack length, layer thickness, and load location. The results show that KII reaches maximum values when the contact is adjacent to the crack where Mode I stresses are compressive. KII values decrease with decreased crack length and significantly decrease for reduced layer thickness.

1. 서론

접촉하중을 받는 다층구조물(layered system)의 접촉응력에 대한 해석은 그 구조물의 광범위한 응용범위로 인해 과거 수년동안 상당한 관심의 대상이 되어 왔다.⁽¹⁻⁸⁾ TiN과 같은 세라믹 코팅(hard coating)은 기계적인 마모와 부식저항을 향상시키며 내열성과 부하용량 등을 증가시킴으로써 기어, 베어링, 높은 속도로 운전되는 절삭공구, 터보펌프 베어링 등의 보호피막용(protective coating)으로 광범위하게 적용되어 왔다.⁽¹⁻⁷⁾

이러한 코팅 구조물들은 가혹한 트라이볼러지(tribology) 환경과 높은 접촉압력하에 노출되어 있는 기계요소의 피로수명을 연장시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 세라믹 코팅이 적용된 기계요소의 심각한 일반적인 파괴형태는 트라이볼러지적 구름접촉에 의한 피로파괴로 나타난다. Chang 등⁽²⁾과 Katsov 등⁽³⁾은 얇은 TiN 코팅을 강(steel) 구조물에 적용하여 피로수명을 연구하였으며, Erdemir^(4,5)와 Cheng 등⁽⁶⁾은 Hertzian 접촉하중하의 TiN/Steel 구조물에 대한 피로실험을 수행하였다. 이 연구에서 TiN의 상대적인 코팅두께는 피로수명에 상당한 영향을 준다고 보고하였다.⁽⁴⁻⁶⁾

세라믹 코팅의 일반적인 파괴양상은 두 가지 형태로 나타나는데, 첫째는 코팅의 표면에서 균열이 발생하여 성장 파괴되는 피팅 파괴와,⁽⁷⁾ 둘째는 코팅 표면하(subsurface)에서 균열이 형성되어 그 균열이 표면으로 성장하여 코팅이 모재로

* 책임저자, 회원, 인제대학교 기계자동차공학부

E-mail : mechkb@ijnc.inje.ac.kr

TEL : (055)320-3749 FAX : (055)324-1723

* 회원, 부산대학교 항공우주공학과

부터 박리(spalling) 되어 파괴되는 표면하 파괴(subsurface fracture) 현상이다.⁽⁶⁾ 현재까지 단층구조물의 피로파괴거동에 대한 실험 및 이론적 연구는 많이 수행되어왔다.⁽⁹⁻¹³⁾ Shieh⁽⁹⁾ 와 Rosenfield⁽¹⁰⁾는 서브서피스에서 형성된 수평균열의 성장모드를 연구하였으며, Keer 등^(12,13)은 Hertzian 접촉하중하의 단층구조물에 대한 표면균열의 파괴거동을 이론적으로 모델 하였다. 표면의 윤활과 잔류응력에 대한 영향은 Hanson 과 Keer⁽¹³⁾에 의해서 연구되었으며, 표면에 형성된 두 개의 인접한 균열의 차폐효과(shielding effect)에 대한 연구는 Kuo와 Keer⁽¹⁴⁾에 의해 수행되었다. Kaneta 등⁽¹⁵⁾과 Bower⁽¹⁶⁾는 균열의 내부에 존재하는 마찰과 유체압이 균열성장에 미치는 영향에 대해 각각 조사하였으며, Kim 등⁽¹⁷⁾과 Lee 등⁽¹⁸⁾은 단일 및 혼합모드 하중이 강 구조물에 작용하였을 때 균열발생 및 균열의 성장거동에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 다수의 연구들은 균열의 가능한 성장거동을 응력확대계수(Stress Intensity Factor)와 연계시켜 평가하였으며, 단층구조물의 해석에 제한되어 있다.

다층구조물의 균열해석에 있어서 Kim 등⁽¹⁹⁾은 계면균열(interfacial crack)을 이론적으로 모델 화시켰으며, Eberhardt 와 Peri⁽²⁰⁾는 처음으로 유한요소를 이용하여 수직균열을 가진 다층구조물을 해석하였다. 하지만 이러한 일련의 연구들은 현대 산업에서 실제 응용되는 마이크로미터 두께의 얇은 코팅 표면에 발생가능한 미세한 수직균열의 트라이볼러지적 파괴문제를 고려하지 않았으며, 국내에서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 구름접촉에 노출되어 있는 TiN 코팅표면에 형성된 미세한 수직균열의 천이거동을 평가하기 위해 균열선단에서 발생한 응력확대계수(K_I 과 K_{II})를 유한요소 해석 모델을 이용해 산출하고자 한다. 본 연구에서 사용된 유한요소 해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 다수의 예비모델이 구성되었으며, 응력확대계수를 산출하기 위해 응력범법^(21,22) 사용되었다. 더 나아가 접촉하중의 위치와 균열의 크기, 그리고 코팅두께 등이 응력확대계수에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 연구 방법

2.1 이론해석

유한요소를 이용해 응력확대계수를 계산하기 위한 방법으로서 응력범법(stress method) 과 변위범법(displacement method)이 Chan 등⁽²¹⁾과 Salehizadeh 등⁽²³⁾에 의해 각각 제시되었다. Chan 등⁽²¹⁾은 여러 가지 고전적인 파괴역학 문제를 유한요소기법을 이용하여 해석하였으며 응력확대계수값을 계산하는데 처음으로 응력범법을 도입하였다. 그 후 Salehizadeh 와 Saka⁽²³⁾는 응력확대계수값을 계산하는데 변위범법을 제시하였으며 Hertzian 접촉하중에 노출되어 있는 단층구조물의 균열을 해석하는데 사용하였다. 최근의 연구에서 Kim 등⁽²²⁾은 혼합모드 하중하의 선형 및 비선형 응력범법을 제시하여 응력확대계수를 계산하는 기법을 제시하였다.

유한요소에서의 응력범법은 균열선단(crack tip) 근방의 절점응력 들을 평가하여 이 절점응력 들로부터 겉보기(apparent) 응력확대계수값들을 계산한 뒤 외삽법(extrapolation)을 이용하여 실제 응력확대계수값을 계산하는 방법이다. 탄성재료에서 균열선단 근방의 응력장은 응력확대계수의 항으로 표시될 수 있다. 모드 I 에 대한 응력확대계수 K_I 은

$$K_I = -\frac{(2\pi r)^{1/2}}{f_{ij}(\theta)} \sigma_{ij}(r, \theta) \quad (ij \text{ no sum}) \quad (1)$$

로 표시된다. 여기서 $i, j = x, y$ 이고 $f_{ij}(\theta)$ 를 직각좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$f_{xx}(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right] \quad (2a)$$

$$f_{yy}(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right] \quad (2b)$$

$$f_{xy}(\theta) = f_{yx}(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (2c)$$

Mode II 에 대한 응력확대계수 K_{II} 는 다음과 같이 표현되며

$$K_{II} = \frac{(2\pi r)^{1/2}}{f_{ij}(\theta)} \sigma_{ij}(r, \theta) \quad (ij \text{ no sum}) \quad (3)$$

여기서 $i, j = x, y$ 이고 $f_{ij}(\theta)$ 를 직각좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$f_{xx}(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \right] \quad (4a)$$

$$f_{yy}(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \quad (4b)$$

$$f_{xy}(\theta) = f_{yx}(\theta) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2} \right] \quad (4c)$$

Fig. 1은 국부좌표계에서 균열선단과 θ 각을 묘사한다. 유한요소에서 계산된 균열선단 근방의 절점응력 $\sigma_{ij}(r, \theta = 0)$ 를 식 (1)과 식 (2)에 대입하면 $\theta = 0$ 일 때 균열선단에 접근하는 각 절점의 겉보기 응력확대계수인 K_I^* 가 계산된다. 계산된 K_I^* 값들은 균열선단에서부터 임의의 점에 이르는 거리 r 을 함수로 하여 그래프에 도시되며 (Fig. 2), 이 데이터 점들은 회귀분석(regression analysis)을 이용하여 선형 및 비선형의압법을 통해 회귀곡선이 y 축과 교차하는 부분이 균열선단에서의 K_I 값이 된다. 전단모드에 대한 모드 II 응력확대계수값도 위에서 설명한 유사한 방법으로 계산된다. $\theta = 0$ 인 면에서의 겉보기 응력확대계수 K_{II}^* 는 다음과 같이 표현된다.

$$K_{II}^* = \sqrt{2\pi r} \sigma_{xy}(r, \theta = 0) \quad (5)$$

유한요소에서 계산된 전단응력 σ_{xy} 값을 식 (5)에

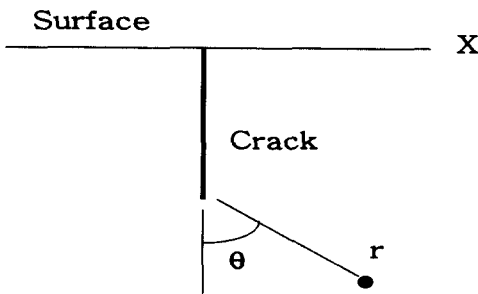


Fig. 1 The local Cartesian and Polar coordinates at the crack tip

대입하면 겉보기 응력확대계수 K_{II}^* 값이 얻어지며, K_{II}^* 에 대해 r 을 함수로 하는 회귀곡선을 이용하여 K_{II} 값을 구할 수 있다.

본 연구의 수행을 위해 상용유한요소해석 프로그램인 COSMOS/M⁽²⁴⁾을 사용하였으며 균열선단 근방의 영역에서 수렴된 응력값들을 계산하기 위해서는 판 구조물에 발생한 균열의 균열선단 근처와 균열선단에서 어느 정도 떨어진 영역에 상당히 많은 양의 유한요소가 필요하다.^(21,22) 따라서 이 소프트웨어가 산출한 데이터의 정확도와 신뢰성을 평가하기 위해 이론적인 해를 수반하는 다수의 파괴역학문제들을 예비모델로 거론하였다. 예비모델에서 저자는 혼합모드에 노출되어있는 균열선단의 겉보기 응력확대계수 K_I^* 와 K_{II}^* 회귀곡선이 선형 및 비선형으로 강하게 거동함을 관측하였으며, 겉보기 응력확대계수에 대한 회귀곡선의 특성은 균열선단 주변의 영역에서 사용한 절점들의 수에 상당히 의존함을 알 수 있었다.^(22,25)

2.2 모드 I 과 모드 II 및 혼합모드 검증을 위한 예비모델

본 연구에서 모드 I 과 모드 II 해석의 검증을 위해 예비적인 유한요소모델이 구성되었다. 첫째, 모델 1은 표면에 수직한 균열을 가진 판 구조물이 균일한 인장하중에(uniform tensile load) 노출되어 있는 유한요소모델로 KI값의 수렴성을 평가하기 위해 구성되었다. 둘째, 모델 2는 표면에 수직한 균열을 가진 판 구조물이 전단하중에 노출되어 있는 유한요소모델로 KII값의 수렴성을 평

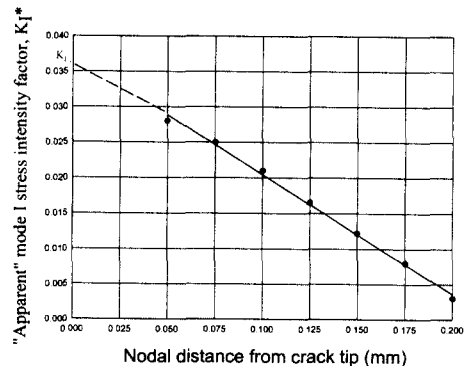


Fig. 2 The extrapolation of KI from the apparent stress intensity factors, KI*, calculated at nodes ahead of the crack tip

가하기 위해 구성되었다. 셋째, 모델 3은 균열이 없는 탄성반평면(elastic half-space)이 Hertzian 접촉하중에 노출되어 있는 유한요소모델로 평면변형률(plane strain) 조건하에서 최대전단응력(maximum shear stress)의 수렴성을 평가하기 위해 구성되었다. 넷째, 모델 4는 표면에 수직한 균열을 가진 단층구조물이 Hertzian 접촉하중에 노출되어있는 예비모델로 균열선단의 KI 과 KII 값의 수렴성을 이론해와 비교하기 위해 구성하였다. 여기서 단층구조물은 탄성반평면으로 가정하였다. 모델 1과 모델 2의 이론적인 해는 Tada⁽²⁶⁾에 의해 잘 정리가 되었으며, 모델 3의 이론적인 해는 Johnson⁽²⁷⁾에 의해 정리가 되었다. Fig. 3은 모델 3에 대한 기하학적구조 및 Hertzian 하중조건을 보여준다. 여기서 a 는 접촉반경이며 P(x)는 Hertzian 분포하중을 나타낸다. 모델 4의 이론적인 해는 Keer 등⁽¹¹⁾에 의해 제시되었다. Johnson⁽²⁷⁾의 정리에 의하면 Hertzian 분포하중을 받고있는 탄성반평면 구조물 (모델 3)의 최대전단응력은 평면변형률 조건 하에서 표면으로부터 0.79a 떨어진 위치에서 발생하며, 최대전단응력은 다음의 식 (6)에 의해 계산된다.

$$\tau_{\max} = \left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

모든 예비모델은 평면 변형률 조건하에 있는 판 구조물로 구성되었으며 표면의 가장자리에 수직한 균열을 가진다 (모델 1 과 모델 2). 판 구조물의 재료로 steel (탄성계수 E = 200 GPa, 푸아송비 $\nu = 0.3$)이 사용되었다. QM6 4 절점요소가

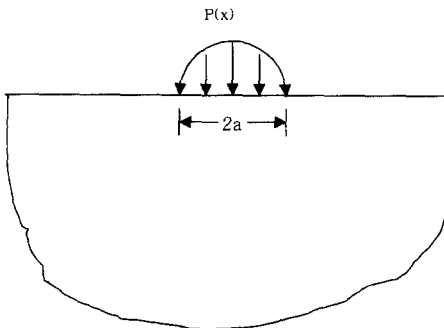


Fig. 3 Schematic geometry of an elastic half-space in Hertzian contact

주로 사용되었으며 균열선단 주위의 요소들을 조밀하게 하기 위해 3 절점요소가 필요시 추가적으로 사용되었다. QM6는 무절점 변수(nodeless variable) 기법을 도입한 요소로 요소내부에 추가적인 자유도(degree of freedom)를 부가하여 2x2 Gauss 적분을 수행한다. 이 요소는 parasitic shear 영향을 극복함으로써 기존의 4 절점요소보다 더 안정되고 정확한 시스템을 부여한다.⁽²⁴⁾ 모델 1, 모델 2, 모델 4 에 균열을 도입하기 위해 점-대-선 갭 요소(node-to-line gap element)를 사용하였으며 균열면에서의 마찰은 고려하지 않았다. 예비 모델에서 균열입구에서의 열림거리(crack mouth opening)가 응력확대계수의 오차에 미치는 영향 또한 시험되었다. 시험결과 균열입구에서의 열림 정도가 0.1 ~ 0.01 μm 일 때 일관되고 정확한 K_I 과 K_{II} 값을 산출하였으며, 균열을 도입한 예비모델 및 TiN/Steel 해석 모델에 균열열림거리 0.01 μm 가 일괄적으로 적용되었다.

2.3 모델 4 의 유한요소모델기법

구름 및 미끄럼 마찰접촉하중이 수직균열을 가진 탄성반평면 구조물에 적용되었으며, 표면에 요소에 적용된 Hertzian 접촉하중 분포는 다음 식에 의해 근사 시킬 수 있다.

$$p_i = \frac{p_o}{a(a^2 - x_i^2)^{1/2}} \quad (7)$$

여기서 p_o 은 최대 Hertzian 접촉압력이고, a 는 접촉폭의반경을 나타낸다. x_i 는 하중분포함수의 중심에서 i 번째 요소의 중심점까지 측정된 기하변수값을 나타낸다. 널리 알려진 Hertz 관계식을 사용하여 p_o 과 a 값은 다음과 같이 구해진다.

$$p_o = \frac{2P}{\pi a} \quad (8)$$

$$a = \sqrt{\frac{4PR(1 - \nu^2)}{\pi E}} \quad (9)$$

여기서 P 는 단위길이에 대해 적용된 하중이고 R 은 유효곡률(effective curvature)이다. E 와 ν 는 탄성계수와 푸아송비를 각각 나타낸다. 현재의 연구에서 사용된 p_o 과 a 는 각각 4810 MPa 과 1.27 mm 이며, 이 경우는 반경이 3 cm인 두 개의 실린더가 접촉시 P = 9.6 MN/m의 선하중

(line load)을 받고있는 상태를 나타낸다. 미끄럼 접촉, 즉 표면마찰력(surface frictional traction)을 포함하는 Keer 등⁽¹¹⁾의 결과와 비교하기 위하여 표면마찰력 $q(x)$ 가 Hertzian 압력과 함께 적용되었으며 $q(x)$ 는 다음과 같다.

$$q(x) = f * p(x) \tag{10}$$

여기서 f 는 마찰계수이며 $p(x)$ 는 좌표 x 위치에 있는 요소에 적용된 Hertzian 압력분포이다. 하중 $q(x)$ 를 유한요소에 적용하기 위해 식(10)을 일련의 절점력(nodal force)으로 근사 시켰으며 다음과 같이 나타낸다.

$$q_i = f * p_i * L_i \tag{11}$$

여기서 L_i 는 i 번째 요소 면의 길이를 나타낸다.

다양한 위치에서 하중을 적용하였으며 하중의 위치는 g/a 의 비율로 표시하였다 (g : 균열선단에서 하중중심까지의 거리). 여기서 적용된 하중의 위치 $g/a = -5, -1, +1, +5$ 이며, 음 과 양의 부호는 Hertzian 구름마찰접촉하중이 균열을 중심으로 균열의 왼쪽에서부터 오른쪽으로 움직이는 것을 각각 나타낸다. 표면마찰계수 f 가 0.25 일 때의 경우에 대해서 조사하였으며, 균열길이는 0.636 mm 가 선택되었다 ($c/a = 0.5$, c : 균열길이). 적용된 경계조건으로서 판의 밑면은 모든 방향으로 고정하였으며, 옆면은 x 방향으로 고정하여 y 방향의 변위를 허용하였다. 산출된 균열선단 근방의 응력들을 사용하여 정규화(normalized)된 혼합 모드 K_I 과 K_{II} 값을 외삽법을 이용해 계산하였으며, 이 결과는 Keer⁽¹¹⁾ 등에 의해 제시된 이론 해와 비교되었다.

2.4 TiN/Steel 유한요소 해석 모델

최종적으로 steel 표면 위에 TiN 코팅 막을 가진 다층시스템(layered system)에 대한 유한요소 해석 모델이 수행되었다. 여기서 TiN의 탄성계수 $E = 640$ GPa과 푸아송비 $\nu = 0.2$ 가 사용되었으며, steel은 탄성계수 $E = 200$ GPa과 푸아송비 $\nu = 0.2$ 를 사용하였다.⁽²⁸⁾ 해석 모델에서 TiN 코팅 표면에 상당히 미세한 수직균열을 도입하였으며, steel과 TiN의 계면은 완전결합상태⁽⁸⁾에 있다고 가정하였다.

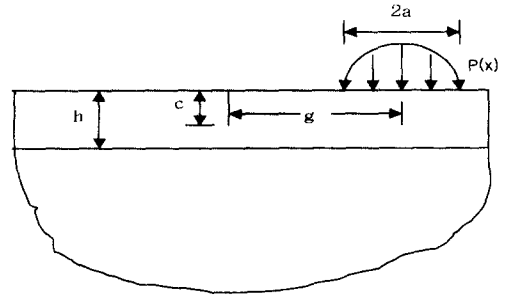


Fig. 4 The geometry of the layered contact problem with surface breaking crack subject to rolling contact

Fig. 4는 TiN/steel 시스템에 부가된 구름접촉하중과 균열 및 코팅 막에 대한 기하학적 매개변수를 보여준다. 여기서 h 는 코팅두께, c 는 균열크기, a 는 접촉하중의 접촉반경, $P(x)$ 는 Hertzian 접촉하중, g 는 균열선단에서 접촉하중 중심까지의 거리를 나타낸다. 현재의 연구에서 다양한 위치의 구름접촉하중에 대해 상대적으로 두껍고 얇은 코팅두께와 다양한 균열크기가 적용되었으며, 각 경우에 대해 최대 Hertzian 압력 $p_0 = 4$ GPa과 접촉반경 $a = 5\mu m$ 가 각각 사용되었다.⁽⁴⁻⁶⁾ 이 수치들은 Erdimir^(4,5)와 Cheng 등⁽⁶⁾이 실험한 값들에서 선택되었으며, TiN/Steel 구조물이 구름접촉하중에 의해 피로 파괴되는데 있어서 관심의 대상이 되는 하중범위이다. 해석 모델은 2차원 평면 변형률 조건을 사용하였으며 Hertzian 구름접촉하중 하의 탄성반평면으로 가정하였다.^(8,20,23,25)

예비모델에서 이미 거론된바와 같이 응력범은 균열선단주위의 영역에 많은 수의 요소를 배치해야 정확한 해를 구할 수 있다. 특히 본 해석모델은 코팅두께가 매우 얇고 코팅에 형성된 균열선단이 계면에 상당히 근접하기 때문에 균열선단주위에 많은 요소가 필요한데, 개발된 해석 모델은 최소한 4000 개 이상의 요소를 포함하며 8000 개 이상의 자유도가 사용되었다. 앞에서 언급한 바와 같이 균열입구에서의 열림정도는 $0.01 \mu m$ 가 사용되었으며, 점-대-선 갭 요소를 사용하여 균열을 모델 하였다. 사용된 경계조건은 예비모델 4에서와 같이 판의 밑면은 모든 방향으로 고정하였으며 옆면은 x 방향으로 고정하였다. Fig. 5는 유한요소모델의 경계조건과 균열선단 주위에서 강화된 요소밀도를 보여준다.

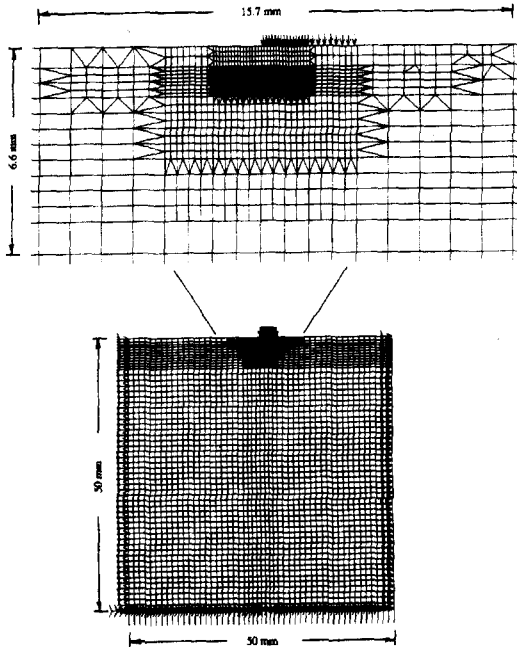


Fig. 5 The finite element mesh used to model the surface breaking crack in the TiN/Steel medium subject to Hertzian loading, showing boundary conditions and high mesh density around crack tip

본 연구에서 다양한 위치에서의 접촉하중에 의한 상대적인 코팅두께의 파괴 메커니즘을 조사하기 위해 다음의 경우가 검토되었다.

<연구 1>: $h = 5 \mu\text{m}$, $c = 2 \mu\text{m}$
 $(a/h = 1, c/h = 0.4)$

<연구 2>: $h = 5 \mu\text{m}$, $c = 1 \mu\text{m}$
 $(a/h = 1, c/h = 0.2)$

<연구 3>: $h = 0.5 \mu\text{m}$, $c = 0.2 \mu\text{m}$
 $(a/h = 10, c/h = 0.4)$

<연구 2>는 <연구 1>의 a/h 의 비가 같은 경우에 대해 균열길이가 감소하였을 때 그 영향을 검토하기 위해 선택되었으며, <연구 3>은 c/h 의 비가 <연구 1>과 같은 경우에 대해 코팅두께가 감소하였을 때 그 영향을 검토하기 위해 선택하였다. 다양한 위치에서 구름접촉하중이 적용되었으며, 접촉하중의 위치는 g/a 의 비율로 표시하여 $g/a = -1, -3, +1, +3$ 의 경우에 대해 적용하였다. 구름접촉하중에 대한 Hertzian 하중분포는 예비모델 4에서 언급한 (7~9)식을 사용하였으며, g/a 의 음과 양

Table 1 Comparison of normalized stress intensity factors for a surface crack between Model 4 and the results obtained from Keer et al.(11) (Surface friction coefficient, $f = 0.25$ was used)

g/a	Finite Element	Keer et al. (1982)
1	$K_I = 0$	$K_I = 0$
1	$K_{II} = 0.09$	$K_{II} = 0.1$
5	$K_I = 0.24$	$K_I = 0.25$
5	$K_{II} = 0.0012$	$K_{II} = 0.001$

의 부호는 구름접촉하중이 균열을 중심으로 균열의 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 것을 나타낸다. 균열내부에서의 마찰력과 코팅표면의 윤활에 의한 균열내부에서의 유체압에 대한 영향은 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 예비모델의 결과

유한요소모델의 타당성을 검증하기 위해 개발된 모델 1과 모델 2에 대한 K_I 과 K_{II} 의 결과는 Tada⁽²⁶⁾에 의해 제시된 이론해와 비교되었으며, 3% 내의 오차로 잘 일치하였다.^(22,25) 이 결과는 응력법의 사용과 반 대칭 하중 (antisymmetric load) 하에서 균열 면의 모델링에 대한 깎 요소의 적용 능력, 그리고 유한요소 해석 모델의 균열선단 주위의 요소 밀도에 대한 신뢰성 등을 제공한다. Hertzian 하중하의 타당성 검토모델 (모델 3)에서 유한요소에 의해 산출된 von Mises 응력분포결과를 이론 해와 비교하였을 때 6% 내의 오차를 산출하였다.

마지막으로 모델 4 (표면에 수직균열을 가진 단층 구조물이 구름마찰접촉하중하에 있는 해석모델)의 경우, 유한요소에 의해 산출된 K_I 과 K_{II} 의 결과를 Keer⁽¹¹⁾ 등이 제시한 그래프와 비교하였으며, Table 1은 유한요소해와 이론 해를 비교한 결과를 보여준다. Table 1에서 나타난 결과는 두 방법론 (본 연구에서 개발된 유한요소 해석 모델과 Keer⁽¹¹⁾ 등에 의한 이론적 해석방법) 사이에 상당한 일치를 보여주며, 다시 한번 유한요소모델링 기법에 대한 타당성을 부여한다.

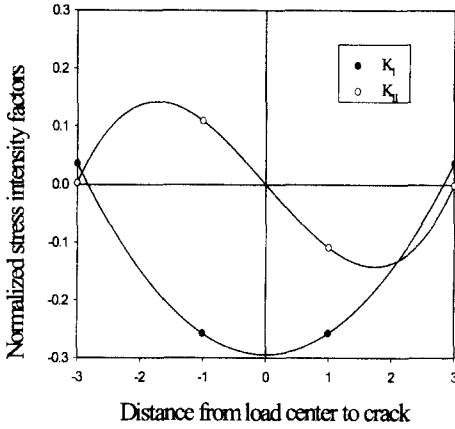


Fig. 6 Normalized stress intensity factors for a vertical surface crack in TiN/Steel : Case 1 ($h = 5 \mu\text{m}$, $c = 2 \mu\text{m}$)

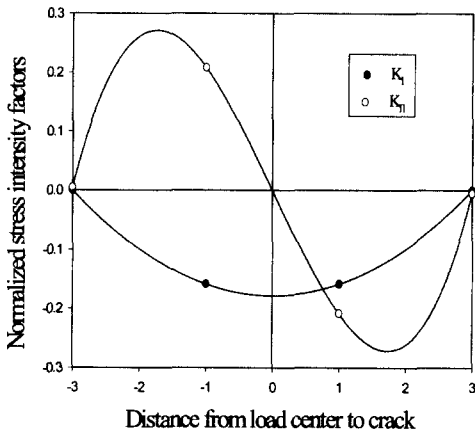


Fig. 7 Normalized stress intensity factors for a vertical surface breaking crack with reduced length in TiN/Steel : Case 2 ($h = 5 \mu\text{m}$, $c = 1 \mu\text{m}$)

3.2 TiN/Steel의 표면균열에 대한 해석결과

Fig. 6 ~ 8 은 <연구 1>, <연구 2>, <연구 3>에 대한 유한요소 해석의 결과를 보여주며, 하중의 위치를 함수로 하여 $p_0\sqrt{a}$ 에 의해 정규화(normalized)시킨 모드 I 과 모드 II 응력확대계수를 그래프로 도시하였다. 본 연구에서의 특별한 관심은 상대적인 코팅 두께에 따른 균열의 크기에 대해 다양한 위치에서의 접촉하중이 균열선단에서 발생한 혼합모드 K_I 과 K_{II} 의 응력확대계수에

미치는 영향을 고찰하는데 있다. 결과에서 나타난바와 같이 K_I 곡선은 $g/a = 0$ 을 중심으로 대칭 형태를 보여주며, K_{II} 곡선은 반대칭 형태를 보여준다. 모든 경우에 대해 K_{II} 값의 최대치는 구름접촉하중이 균열에 인접하여 부가되었을 때 발생하였으며, 이 결과는 이전의 연구보고와 일치한다.^(15,16,20,25) 외삽되어진 K_I 값의 최대치는 $g/a = 0$ 일 때 발생하였으며, 이 위치를 중심으로 음의 값을 나타냈다. 최대 K_{II} 값은 압축모드 K_I 하에서 관측되었다. 즉 균열선단은 압축 모드 I 응력에 의해 닫힘 상태에 있음을 나타내며, 이 결과는 이전의 단층구조물의 연구에서 보고된 바와 같이^(11,12) 균열선단에서 발생한 법선 방향의 압축응력은 균열면을 interdigitation 시키면서 모드 II에 의한 균열의 성장을 방해하려는 경향을 가진다. 하중의 위치가 균열에서 멀어질수록 K_I 은 0의 값에 접근하는 경향을 나타냈는데, 현재의 연구는 균열면 내부에서 발생할 수 있는 마찰에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에 $K_I < 0$ 때 동시에 발생하는 K_{II} 특성의 거동에 대해 반드시 고찰되어야만 한다.

<연구 1 : Fig. 6> 과 <연구 2 : Fig. 7>에서 균열의 크기가 감소했을 때 최대 K_{II} 값은 약 50% 정도 감소한 반면 압축모드 K_I 값은 약 50% 정도 증가하였으며, 최대 K_{II} 값은 코팅의 두께가 감소하였을 때 현저한 감소를 보였다(Fig. 8). 모든 경우 (<연구 1>, <연구 2>, 연구 3)에 대해 하중의 위치가 균열에서 멀어질수록 K_{II} 는 0의 값에 접근하는 경향을 나타냈으며, 구름접촉하중이 균열에 인접하여 부가되었을 때 발생한 최대 K_{II} 값은 하중이 균열 근처에서 부가될 경우 모드 II에 의한 균열전파가 일어날것으로 예상된다.

접촉반경 대 코팅두께의 비, 즉 a/h 의 증가는 K_{II} 값에 현저한 영향을 주는 것으로 나타났으며, 코팅두께의 감소는 모드 II 응력확대계수를 동시에 감소시키는 것으로 관측되었는데, 이 경우 코팅 두께 및 균열 크기는 K_{II} 값과 함수관계에 있는 것으로 관측된다. 결과적으로 구름접촉하중이 균열의 좌측에서 우측으로 이동하면서 하중이 균열에 인접하여 부가되었을 때 두꺼운 코팅막은 얇은 코팅막에 비해 상당히 불안정한 모드 II 균열전파가 일어날것으로 예상되며, 이 연구결과는 이전의 실험연구를 통해 보고된^(2,4~6) 내용과 일치한다. Erdemir⁽⁵⁾와 Cheng 등⁽⁶⁾의 연구에서 TiN 코팅

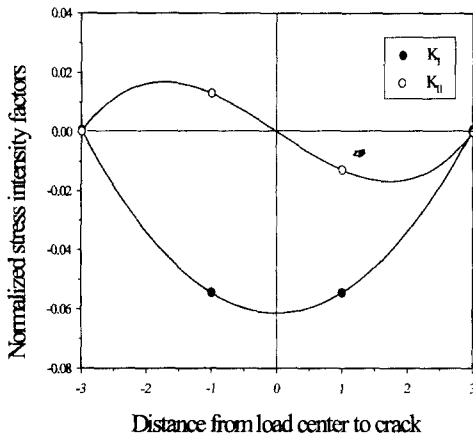


Fig. 8 Normalized stress intensity factors for a vertical surface breaking crack in TiN/Steel for a thin coating : Case 3 ($h = 0.5 \mu\text{m}$, $c = 0.2 \mu\text{m}$)

두께가 $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ 일 때 상대적으로 두꺼운 코팅 두께 ($> 2 \mu\text{m}$)보다 피로파괴에 더 잘 견디며 $2 \mu\text{m}$ 이상의 두꺼운 코팅막은 구름접촉하중 하에서 코팅막이 심하게 모재로부터 분리되는 현상을 보고하였다. Keer 등⁽¹¹⁾은 단층구조물의 경우에 있어서 구름마찰접촉하중하의 균열은 표면에서는 균열이 닫힘 상태에 있게되며 표면에서 어느 정도 떨어진 표면하부에서는 균열이 열림 상태가 되어 결과적으로 균열은 부분적으로 닫힘 상태에 있다고 보고하였다. 현재의 연구에서 $c/h = 0.2$ 또는 $c/h = 0.4$ 의 균열에 대한 경우 접촉하중이 균열에 인접하여 부가되었을 때 압축모드 K_I 에 의해 표면하부에서는 균열이 닫힘 상태에 있게 될 것으로 예상된다. 즉 구름접촉하중이 균열에 인접하여 부가되었을 때 모드 II 응력은 균열면을 따라 균열성장을 촉진시키며, 하중이 균열에서 멀어질수록 모드 II 응력의 영향은 사라지면서 균열은 횡 방향으로 천이 거동할 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Hertzian 접촉하중하의 TiN/Steel 구조물에 표면균열이 형성되었을 경우 균열선단에서 발생한 혼합모드 응력확대계수값들이 제시되었다. K_I 과 K_{II} 값들은 균열길이, 코팅두께, 접

촉하중의 위치 등을 함수로 하여 평가되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일련의 유한요소 예비모델을 사용해 평가된 응력확대계수값들은 유한요소 모델링 기법 및 응력법 사용에 대한 타당성을 부여하였다.

(2) TiN/Steel에서 평가된 모드 II 응력확대계수는 모든 경우에 있어서 접촉하중이 균열에 인접하여 부가되었을 때 최대 값을 나타냈으며, 이때 발생한 압축 모드 I 응력은 균열의 성장을 방해하려는 경향을 나타냈다.

(3) 접촉 반경 대 코팅두께 비 (a/h)의 변화는 K_I 과 K_{II} 값에 영향을 주었으며, a/h 의 증가는 K_{II} 를 감소시키는 것으로 나타났다.

(4) 코팅의 두께와 균열의 길이가 커질수록 K_{II} 는 증가하는 경향을 보였는데, 이는 일단 상대적으로 두꺼운 코팅막에 균열이 발생하였을 경우 얇은 코팅막에 비해 불안정한 모드 II 균열전파가 예상된다.

본 연구는 균열면 내부의 마찰과 코팅표면의 윤활이 균열선단의 응력상태에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문에 이러한 부가적인 조건들이 코팅파괴에 미치는 영향에 대해 계속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2000년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것이며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Hochman, R. F., Erdemir, A., Dolan, F.J. and Thom, R. L., 1985, "Rolling-Contact Fatigue of Cu and TiN Coatings on Bearing Steel Substrates," *Journal of Vacuum Science*, Vol. 3, pp. 2348-2353.
- (2) Chang, T. P., Cheng, H. S., Chiou, W. A. and Sproul, W. D., 1991, "A Comparison of Fatigue Failure Morphology Between TiN Coated and Uncoated Lubricated Rollers," *Tribology Transactions*, Vol. 34, pp. 408-416.
- (3) Katsov, K. B., Zhitomirskii, V. N., and Khrunik, R. A., 1986, "Contact Fatigue of High-Speed Steel with Wear-Resistant Nitride

- Coatings in a Corrosive Medium," *Soviet Materials Science* (English Translation of Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov) Vol. 22 No. 5 Sep-Oct, pp. 534~535.
- (4) Erdemir, A., 1986, "A Study of Surface Metallurgical Characteristics of TiN Coated Bearing Steels," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- (5) Erdemir, A., 1992, "Rolling-Contact Fatigue and Wear Resistance of Hard Coatings on Bearing-Steel Substrates," *Surface and Coating Technology*, Vol. 54, pp. 482~489.
- (6) Cheng, H. S., Chang, T. p. and Sproul, W. D., 1990, "A Morphological Study of Contact Fatigue of TiN Coated Rollers," in *Mechanics of Coatings*, Dowson, D., Taylor, C. M., and Goldet, M., eds., pp. 81~88.
- (7) Kramer, B. M., 1988, "Predicting the Wear Resistance of Hard Coatings," in *Engineered Materials for Advanced Friction and Waer Applications*, Schmidt, F. A. and Blau, P. J., eds., pp. 101~108.
- (8) Komvopoulos, K., 1988, "Finite Element Analysis of a Layered Elastic Solid in Normal Contact With a Rgid Surface," *Journal of Tribology*, Vol. 110, pp. 477~485.
- (9) Shieh, W. T., 1977, "Compressive Maximum Shear Crack Initiation and Propagation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp. 37~54.
- (10) Rosenfield, A. R., 1980, "A Fracture Mechanics Approach to Wear," *Wear*, Vol. 61, pp. 125~132.
- (11) Keer, L. M., Bryant, M. D., and Haritos, G. K., 1982, "Subsurface and Surface Cracking Due to Hertzian Contact," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 104, pp. 347~351.
- (12) Keer, L. M. and Bryant, M. D., 1983, "A Pitting Model for Rolling Contact Fatigue," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 198~205.
- (13) Hanson, M. T. and Keer, L. M., 1992, "An Analytical Life Prediction Model for the Crack Propagation Occurring in Contact Fatigue Failure," *Tribology Transactions*, Vol. 35, pp. 451~461.
- (14) Kuo, C. H. and Keer, L. M., 1995, "Three-Dimensional Analysis of Cracking in a Multilayered Composite," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 62, pp. 273~281.
- (15) Kaneta, M., Yatsuzuka, H. and Murakami, Y., 1985, "Mechanism of Crack Growth on Lubricated Rolling/Sliding Contact," *ASLE Transactions*, Vol. 28, pp. 407~414.
- (16) Bower, A. F., 1988, "The Influence of Crack Face Friction and Tappered Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 110, pp. 704~711.
- (17) 김정규, 이종선, 김철수, 1999, "단일 및 혼합 모드 하중하에서의 레일강의 파괴조건 및 피로 균열진전거동," 대한기계학회논문집, 제23권, 제 6호, pp. 1039~1047.
- (18) 이억섭, 김동준, 류황희, 1999, "혼합모드하중 하에서의 피로균열전파방향과 피로수명 예측," 대한기계학회논문집, 제23권, 제9호, pp. 1550~1558.
- (19) Kim, S. H., Keer, L. M. and Cheng, H. S., 1990, "Loss of Adhesion of a Layer Bonded to an Elastic Half space Caused by a Concentrated Contact," *Tribology Transactions*, Vol 33, pp. 53~59.
- (20) Eberhardt, A. W. and Peri, S., 1995, "Surface Cracks in Layered Hertzian Contact with Friction," *Tribology Transactions*, Vol. 38, pp. 299~304.
- (21) Chan, S. K., Tuba, I. S. and Wilson, W. K., 1970, "On the Finite Element Method in Linear Fracture Mechanics," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 1~17.
- (22) Kim, B. S. and Eberhardt, A. W., 1997, "Linear and Nonlinear Extrapolation of Stress Intensities for Edge Cracks in Mixed-Node Loading," *Engineering Fracture Mechanics*, V. 57, No. 4, pp. 715~720.
- (23) Salehizadeh, H. and Saka, N., 1992, "Crack Propagation in Rolling Line Contacts," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 114, pp. 690~697.
- (24) COSMOS/M Finite Element Analysis System, 1995, Version 1.75, User Guide, 1, Structural Research and Analysis Corporation, Pittsburgh, PA.

- (25) 김병수, 김위대, 부명환, 2000, "유한요소를 이용한 TiN/Steel 코팅재 표면균열의 파괴거동에 대한 해석," 대한기계학회, 2000 부산지부 춘계 학술대회 논문집, pp. 1~8.
- (26) Tada, H., 1973, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Del Research Corp., St. Louis.
- (27) Johnson, K. L., 1989 "Contact Mechanics," Cambridge: University Press.
- (28) Bhushan, B. and Gupta B. K., 1991, *Handbook of Tribology*, McGraw-Hill, Inc.