

구름접촉 하중시 코팅 표면에 발생한 균열면의 마찰을 고려한 모드 II 전파거동에 관한 연구

김병수[#], 문병영^{*}

Crack Face Friction Effects on Mode II Stress Intensities for a Surface-Cracked Coating In Two-Dimensional Rolling Contact[Ⓒ]

Byeong Soo Kim[#] and Byung-Young Moon^{*}

ABSTRACT

This work focuses on the effects of crack free friction on Mode II stress intensity factors, K_{II} , for a vertical surface crack in a two-dimensional finite element model of TiN/steel subject to rolling contact. Results indicate that maximum K_{II} values, which occur when the load is adjacent to the crack, may be significantly reduced in the presence of crack face friction. The reduction is more significant for thick coatings than for thin. Crack extension and increased layer thickness result in increased K_{II} values. The effect of crack face friction on compressive K_I values appears negligible. Comparative results are presented for MoS₂/steel and diamond-like carbon(DLC)/Ti systems.

Key Words : Crack Propagation(균열 성장), Surface Films/Coatings(표면 필름/코팅), Stress Analysis(응력 해석), Contact Mechanics(접촉 역학)

기호설명

K_I, K_{II} = Mode I and Mode II stress intensity factors
 σ_N = stress of the crack tip, normal to the crack direction
 σ_S = shear stress in the plane normal to the crack
 $p(x)$ = Hertzian pressure
 p_i = pressure applied over surface element
 p_0 = maximum Hertzian pressure
 $q(x)$ = frictional traction
 Li = length of the i th element face
 R = effective curvature

c = vertical surface breaking crack of length
 h = coating thickness
 Γ = ratio of coating/substrate stiffness
 g = the distance from crack to load center

1. 서론

세라믹 코팅은 기계적인 마모와 부식저항을 향상시키며 내열성과 부하용량 등을 증가시킴으로써 접촉하중을 받는 기계요소 및 고속 밀링 기구의 수명을 연장시키는데 많이 사용된다. Hochman¹ 등과 Erdemir²⁻³ 가 수행한 실험적 연구에서 베어링

¹ 접수일: 2004 년 10 월 12 일; 게재승인일: 2005 년 3 월 11 일

[#] 교신저자: 인제대학교 기계자동차공학부

E-mail mecchkb@inje.ac.kr Tel. (055) 320-3749

^{*} 부산대학교 / 동남권부품소재산학협력혁신사업단

스틸의 구름접촉 하중에 의한 피로수명이 TiN 와 같은 세라믹 코팅의 사용으로 현저히 증가함을 밝혀냈다. 또한 얇은 코팅을 강 구조물에 적용하였을 경우 두꺼운 코팅에 비해 접촉하중에 대한 피로수명을 개선시키고, 두꺼운 코팅의 경우는 조기 파괴와 적층 분리의 여지가 있음이 밝혀졌다. 그러한 파손은 보통 2 가지 형태로 나타나는데, Cheng⁴ 등은 코팅과 모재 기저층의 계면에서 발생한 균열이 표면으로 성장하여 계면 분리로 발생하는 코팅의 파괴현상을 실험적으로 보였으며, Kramer⁵ 는 코팅 표면에서 발생한 균열의 피팅 파손을 일으키는 균열성장 메커니즘을 묘사하였다.

표면파괴 균열성장 메커니즘에 관한 해석적 연구가 Keer 등에 의해 수행되었으며, Keer 와 Kuo 등은 단층구조물에 대한 표면균열의 파괴거동을 이론적으로 모델화 하였으며, 표면의 윤활과 잔류응력 및 표면에 형성된 두 개의 인접한 균열의 차폐 효과에 관한 확장된 모델을 개발하였다.⁶⁻⁹ Kaneta¹⁰ 등과 Bower¹¹ 는 단층구조물에서 균열면의 마찰과 구름 접촉하의 탄성 반평면에서 표면 균열에 작용하는 윤활압력의 영향에 대해 분석하였다. 그러나 그러한 연구에서 코팅층을 포함한 시스템의 적층 구조물에 대한 해석적인 연구는 이루어지지 않았다. Kim¹² 등은 모재와 코팅층 사이의 계면 균열을 Hertzian 접촉 압력을 사용하여 이론적으로 모델화 하였으며, 그 후 Kuo¹³ 등은 다층구조물의 균열에 대한 모델의 해석적인 연구를 수행하였으나, 이러한 연구는 구름 접촉하중을 고려하지 않았을 뿐만 아니라 균열면의 마찰에 대한 영향을 포함하지 않았다. Kim¹⁴ 등은 2 차원 구름접촉과 미끄럼 접촉조건하에서, 모드 I 과 모드 II 의 응력확대계수, K_I 과 K_{II} 를 구하기 위해 유한요소와 응력외삽법을 사용하여 강판에 접촉된 TiN 코팅 층의 수직 표면 균열을 연구하였다. 그들의 결과는 표면 균열의 존재가 접촉 하중이 균열에 가해졌을 때 최대 K_{II} 값을 가질 수 있음을 제안하였고, 구름접촉 하중 하에서 K_{II} 모드가 주 성장응력으로서의 전단을 입증하였다. 하지만 균열면에서의 마찰이 균열전파거동에 미치는 영향은 수행되지 않았다.

본 연구에서는 코팅 표면의 균열에 대한 균열면 마찰을 유한요소를 사용하여 모델링하고, 구름접촉에 노출되어 있는 TiN 코팅표면에 형성된 미세한 수직균열의 균열선단에서 발생한 응력확대계수를 산출하여 균열의 전파 메커니즘을 예측하

고, 균열면의 마찰에 대한 영향을 조사한다.

본 연구는 균열선단근처의 응력해석 및 응력확대계수를 산출하기 위해 응력법을 사용하며, 접촉하중의 위치, 균열의 크기, 그리고 코팅두께 등의 다양한 변수와 관계하여 균열면의 마찰이 응력확대계수에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 또한, 균열전파의 경향에서 TiN/steel 시스템에 대하여 실험되고 MoS₂/steel 과 (DLC)/Ti 에 대한 결과 또한 소개된다.

2. 연구방법

2.1 이론해석

Chan¹⁵ 등은 유한요소 모델을 사용하고 균열선단으로 전파하는 노드 응력으로부터 응력확대계수를 외삽에 의해 추정하는 방법으로 응력외삽법의 효용성과 정확성을 최초로 설명하였다. Salehizadehd¹⁶ 등은 단층 Herz 접촉 문제에서 표면하 균열을 분석하기 위해 변위 외삽법을 사용하였다. 최근의 연구에서 Kim¹⁷ 등은 혼합모드 하중하의 선형 및 비선형 응력법을 제시하여 응력확대계수를 계산하는 기법을 제시하였다.

탄성재료에서 균열선단 근방의 응력장은 응력확대계수의 항으로 표시될 수 있으며 모드 I (K_I) 과 모드 II (K_{II}) 에 대한 응력확대계수는 다음과 같다.

$$K_i = \frac{(2\pi r)^{1/2}}{f_{ij}\theta} \sigma_y \quad (i, j \text{ no sum}) \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

“ 걸보기 ” 모드 I 응력확대계수는 다음의 관계를 사용하여 결정된다.

$$K_I^* = \sqrt{2\pi r} \sigma_N (r, \theta = 0) \quad (5)$$

Fig. 1 에서처럼 $\sigma_N(r)$ 은 균열선단을 향하는 각 노드에서 균열방향에 수직한 방향의 응력이고, r, θ 는 균열선단에 원점이 있는 극좌표이다.

K_I^* 값들은 균열선단에서부터 임의의 점에 이르는 거리 r 을 함수로 하여 그래프에 도시되며, 이 데이터 점들은 회귀분석(regression analysis)을 이용하여 선형 및 비선형외삽법을 통해 회귀곡선이 y 축과 교차하는 부분이 균열선단에서의 K_I 값이 된다.¹⁷ K_{II} 값은 다음에 따르는 K_{II}^* 곡선과 비슷하게 구해진다.

$$K_{II}^* = \sqrt{2\pi r} \sigma_S (r, \theta = 0) \quad (6)$$

여기서 σ_S 는 균열에 수직한 평면에서의 전단 응력이다.

본 연구의 수행을 위해 상용유한요소해석 프로그램인 COSMOS/M¹⁸ 을 사용하였으며 균열선단 근처의 영역에서 수렴된 응력값들을 계산하기 위해서는 판 구조물에 발생한 균열의 균열선단 근처와 균열선단에서 어느 정도 떨어진 영역에 상당히 많

은 양의 유한요소 밀도가 필요하다

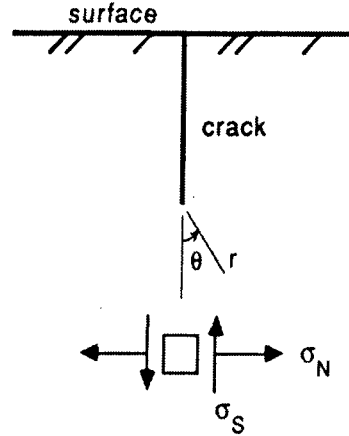


Fig.1 Crack tip coordinate and stress orientation

본 연구의 수행을 위해 상용유한요소해석 프로그램인 COSMOS/M¹⁸ 을 사용하였으며 균열선단 근처의 영역에서 수렴된 응력값들을 계산하기 위해서는 판 구조물에 발생한 균열의 균열선단 근처와 균열선단에서 어느 정도 떨어진 영역에 상당히 많은 양의 유한요소 밀도가 필요하다.

2.2 단층 매개체 수직 표면균열 모델링

이 모델은 수직 표면 균열을 가지고 있고 Hertzian 접촉압력, $p(x)$ 에 의한 하중을 받는 탄성 반평면으로 구성되었다. 4 절점, 평면 변형률, QM6 요소가 주로 사용되고 삼각형 요소는 메쉬를 완성하는데 필요한곳에만 사용되었다. QM6 는 무절점 변수(nodeless variable) 기법을 도입한 요소로 요소 내부에 추가적인 자유도(degree of freedom)를 부가하여 2 x 2 Gauss 적분을 수행한다. 이 요소는 parasitic shear 영향을 극복함으로써 기존의 4 절점 요소보다 더 안정되고 정확한 시스템을 부여한다.¹⁸ 마주보는 균열면 위의 요소사이의 마찰 접촉은 점-대-선 갭 요소(node-to-line gap element)를 사용하여 모델링 되었다. 경계조건은 판의 밀면은 모든 방향으로 고정하였으며, 옆면은 x 방향으로 고정하여 y 방향의 변위를 허용하였다. Hertzian 압력은 표면 요소에 가해진 균일 압력, p_i 의 분포에 의해 근사되었다.

여기서,

$$p_i = \frac{p_0}{a(a^2 - x_i^2)^{1/2}} \quad (7)$$

이고, p_0 는 최대 Hertzian 압력, a 는 접촉 반경, x_i 는 하중 분포함수의 중심에서 i 번째 요소의 중심점까지 측정된 것이다. p_0 와 a 는 잘 알려진 Hertzian 관계를 사용하여 다음과 같이 구해진다.

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a} \quad (8)$$

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

여기서 P 는 단위 길이에 적용된 하중, R 은 유효곡률 (effective curvature), E 는 탄성계수, ν 는 푸아송비이다. 본 연구에서 사용된 p_0 와 a 는 각각 4810 MPa 과 1.27 mm이다. 이 값들은 반경 3 cm 인 두 강철 실린더 ($E=200\text{GPa}$, $\nu=0.3$)가 접촉 시 $P=9.6 \text{ MN/m}$ 의 선하중(line load)을 받고 있을 때 생기는 것이다. 미끄럼 접촉을 포함하는 Keer⁶ 등의 결과와 비교하기 위하여 마찰결인력 $q(x) = fp(x)$ 가 적용되었다. $q(x)$ 는 요소에서의 절점력(nodal force), $q_i = fp_i \times L_i$ 로 근사되었고, 여기서 L_i 는 i 번째 요소의 전면에서 표면 노드에 작용하는 i 번째 요소의 면의 길이 이다. 하중위치의 변화 ($g/a = -5, -1, 1, 5$: 여기서 g 는 균열에서 하중중심까지의 거리, 음의 부호는 균열로 접근하는 마찰하중을 나타낸다.)와 표면 마찰 계수 ($\mu=0.25$) 가 $c/a=0.5$ (c 는 균열길이; $c = 0.636 \text{ mm}$ 이다)의 경우에 대해 조사되었다. 산출된 균열선단 근처의 응력들을 사용하여 정규화(normalized)된 혼합모드 K_I 과 K_{II} 값을 외삽법을 이용해 계산하였으며, 이 결과는 Keer⁶ 등에 의해 제시된 이론 해와 비교되었다.

2.3 균열면 마찰을 갖는 TiN/steel 해석 모델

본 작업모델은 길이 c 의 수직 표면 균열 길이를 포함하는 두께 h 를 갖는 TiN 코팅층 ($E=640\text{GPa}$, $\nu=0.2$)을 포함하도록 이전 모델의 물성치를 변경하여 얻었다. 코팅/모재 강성비를 Γ 로 하였을 경우, TiN/steel 시스템에서 $\Gamma = 3.2$ 이

다. 상응하는 기하학적 변수는 다층시스템 (layered system) 을 묘사하는데, 그것과 하중의 위치는 Fig. 2 에 나타나 있다. 다음의 각 경우에서, 최대 Hertz 압력 p_0 와 접촉 반경 a 는 Cheng⁴ 등과 Erdemir³ 의 실험값과 비슷한 4 GPa 과 $5 \mu\text{m}$ 로 선택되었으며, TiN/steel 구조물이 구름접촉하중에 의해 피로 파괴 되는데 있어서 관심의 대상이 되는 하중범위이다. 해석 모델은 다층, 수직 표면균열을 가진 Hertzian 구름접촉하중 하의 탄성반평면으로 가정하여 2차원 평면 변형률 조건을 사용하였다.

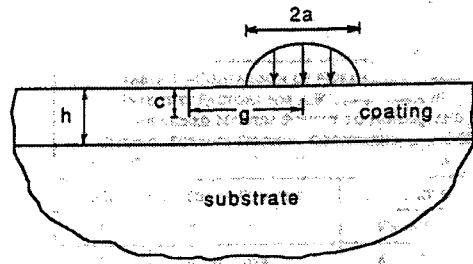


Fig. 2 Geometrical parameters of the cracked coating subject to rolling contact.

응력 외삽법은 균열선단 영역에서 미세한 메쉬를 필요로 한다. 균열선단의 근접한 내부에 코팅과 모재 경계가 있는 지금의 모델은 그 부분에 메쉬를 더욱더 미세하게 할 필요가 있다. 각 모델은 대략 4000 개 이상의 요소를 포함하고 8000 여개 이상의 자유도를 가진다. 이 모델에서 $0.01 \mu\text{m}$ 의 균열 입구 열림 값이 일관되게 사용되었다.

마찰 계수 $f=0$ 과 $f=0.5$ 의 균열면 마찰을 포함하는 점-대-선 갭 요소 (node-to-line gap element) 가 사용되었으며 이 값은 Bhushan 과 Gupta¹⁹ ($f_{static} = 0.65$, $f_{kinetic} = 0.45$) 에 의해 측정된 TiN/steel 자체 미끄럼에 대한 값의 범위에 있다. 경계조건은 판의 밑면은 모든 방향으로 고정되었고 옆면은 측면으로 고정되었으며 표면은 고정으로부터 자유롭다.

Fig. 3 에 균열선단에서의 집중적인 메쉬 밀도의 예를 보여준다.

모델은 다음의 4 가지 경우를 분석하기 위해 사용되었다:

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

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

이 경우는 감소된 균열길이의 영향을 조사하기 위해 선택되었다.

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

이 경우는 감소된 코팅 두께의 영향을 조사하기 위해 선택되었다.

<연구 4>: $h = 0.5 \mu\text{m}$, $c = 0.1 \mu\text{m}$
 $(a/h = 10, c/h = 0.2)$

이 경우는 얇은 코팅에서 감소된 균열길이의 영향을 조사하기 위해 선택되었다.

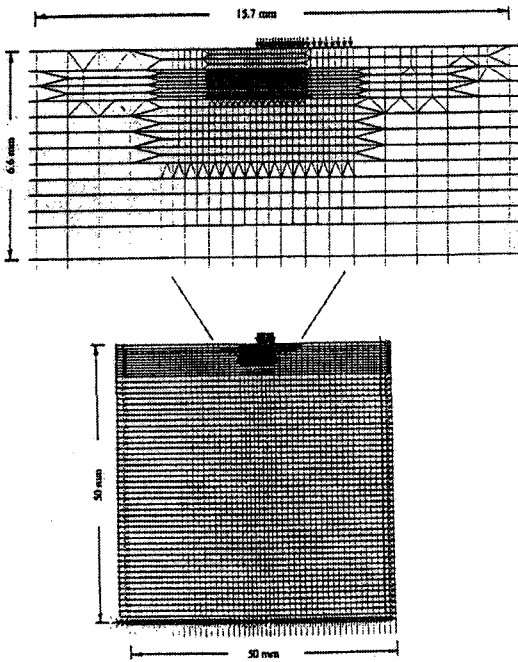


Fig. 3 The finite element mesh used to model the surface breaking crack in the layered medium subject to Hertzian loading.

Eberhardt²⁰ 등은 $g/a = \pm 1$, 즉 하중이 균열에 인접해 작용하였을 경우 최대 K_{II} 값을 찾았으며 하중이 균열로부터 멀어질 때, 즉 $g/a = \pm 5$ 에서 K_{II} 는 0 으로 감소함을 알았다. 본 연구에서 하중의 위치는 $g/a = \pm 1, \pm 3$ 에 대해 조사되었으며, 균열면의 마찰조건은 $f=0.0$ 과 $f=0.5$ 에 대한 각각의 다른 경우 대해 실험을 하였다. 모든 경우에서 접촉 반경 $a = 5 \mu\text{m}$ 가 적용되었다.

2.4 추가 해석 모델 : MoS₂/steel 과 DLC/Ti 해석 모델

이 작업 모델은 MoS₂/steel 과 diamond-like carbon (DLC)/Ti 시스템의 두개의 추가모델을 실험하였다. 본 해석 모델들은 TiN/steel 시스템의 가장 극한 경우와 비교하기 위해 선택하였으며, 다음의 경우, 즉 두꺼운 코팅: $a/h=1$, 균열길이가 긴 경우: $c/h=0.4$, 균열에 가해지는 하중조건 $g/a=1$ 에 대해 실험하였다. MoS₂ 의 물성치는 각각 $E = 33.8 \text{MPa}$, $\nu = 0.13$ 이며 DLC 에 대한 물성치는 $E = 800 \text{GPa}$, $\nu = 0.2$ 이며 Ti 에 대한 물성치는 $E = 110 \text{GPa}$, $\nu = 0.33$ 이다. 이 값들은 DLC/Ti 와 MoS₂/steel 시스템에 대해 각각 $\Gamma = 7.27$, $\Gamma = 0.17$ 의 코팅/모재 에 대한 강성 비를 산출한다. 균열면 마찰에 대한 영향은 $f = 0.0$ 과 $f = 0.15$ 에 대해서 실험되었으며, 이 값들은 Hutchins²¹ 와 Bowden²² 의 MoS₂ 의 자체 미끄러짐에 대한 마찰계수 및 DLC 의 자체 미끄러짐에 대해 측정된 값들로 본 모델의 해석을 위해 적용되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단층 매개체 수직 표면균열의 해석 결과

표면에 수직균열을 가진 단층 구조물이 구름 마찰접촉 하중하에 있는 해석모델의 경우, 유한요소 에 의해 산출된 K_I 과 K_{II} 의 결과를 Keer⁶ 등이 제시한 그래프와 비교하였으며, Table 1 은 유한요소해와 이론 해를 비교한 결과를 보여준다. Table 1 에서 나타난 해석 결과는 두 방법론 (본 연구에서 개발된 유한요소 해석 모델과 Keer⁶ 등에 의한 이론적 해석방법) 사이에 상당한 일치를 보여주며, 유한요소모델링 방법이 타당함을 입증한다.

Table 1 Comparison of normalized stress intensity factors for a surface crack between finite element model and the results obtained from Keer et al.⁶ (surface friction coefficient, $\mu = 0.25$ 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	$K_{II} = 0.0012$	$K_{II} = 0.001$

3.2 균열면 마찰을 갖는 TiN/steel 모델의 해석 결과

Fig. 4 는 TiN/steel 시스템에 대하여 하중의 위치를 함수로 해서 정규화 시킨 응력확대계수 $K_I / p_o \sqrt{a}$ 와 $K_{II} / p_o \sqrt{a}$ 를 그래프로 도시하였다 (Case 1: $a/h=1, c/h=0.4, f=0, 0.5$).

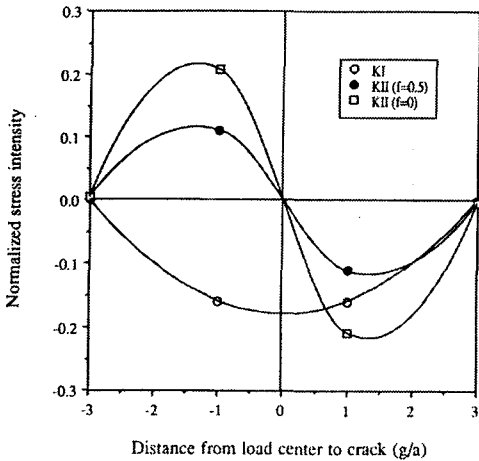


Fig. 4 Normalized stress intensity factors for a vertical crack in TiN/steel, Case 1: $a/h=1, c/h=0.4$ with and without crack face friction, $f = 0, 0.5$.

Fig. 4 에서 알 수 있듯이 K_{II} 는 비대칭이고 하중이 균열에 인접해 작용할 때, 즉 $g/a = \pm 1$ 에서 최

대값을 갖는다. K_I 은 대칭이고 이 위치에서 음인데, 이것은 균열이 닫힌 상태에 있고 압축 모드 I 하에 있음을 의미한다. 여기서 압축모드 I 응력은 균열면의 맞물림을 통하여 모드 II 균열성장을 억제하려는 경향이 있다. 균열면에 $f=0.5$ 인 경우 균열면 근처 $g/a = \pm 1$ 에서 K_{II} 값은 거의 50%가 감소했다. 이것은 균열면 마찰이 건조 구름 접촉 (dry rolling contact) 하중에 대한 모드 II 균열 전파 억제를 돕는 것으로 볼 수 있다. 본 모델은 Kaneta¹⁰ 등에 의해 지적된 바와 같이, 균열 열림과 모드 II 균열 성장을 촉진하고, 내부적으로 균열에 압력을 가할 수도 있는 윤활을 고려하지 않았음을 주목해야 한다. K_I 곡선은 Fig. 4 에 도시된 바와 같이 균열면에 마찰이 있어도 마찰이 없는 경우에 대해 그 값은 거의 변하지 않았다.

Fig. 5 는 감소된 균열 길이 ($a/h=1, c/h=0.2$)에 대한 결과로서 $f=0.0$ 과 $f=0.5$ 의 경우에 대한 하중의 위치함수로서 $K_I / p_o \sqrt{a}$ 과 $K_{II} / p_o \sqrt{a}$ 에 대한 <연구 1>과 유사한 그래프를 나타낸다.

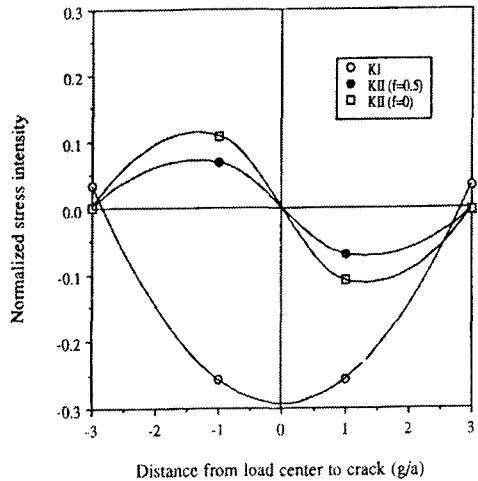


Fig. 5 Normalized stress intensity factors for a vertical crack with reduced length in TiN/steel, Case 2 : $a/h=1, c/h=0.2$, with and without crack face friction, $f = 0, 0.5$.

<연구 1> 에서와 같이 K_{II} 는 비대칭이고 K_I 은 대칭이다. 그림에서 K_{II} 값은 <연구 1>과 비교하여

50% 정도가 감소되었음을 보여준다. 균열면 마찰 $f=0.5$ 에서 K_{II} 의 감소는 거의 30% 정도로 나타났다. 이러한 결과들은 균열길이 증가함에 따라 K_{II} 가 증가함을 제시한다. 다층 구름 접촉에서 모드 II 균열 성장은 불안정한 과정이 될 수 있으나 균열면 마찰 효과는 균열이 성장함에 따라 더욱 중요해지고, 마찰계수에 의존하여 증가된 균열 길이의 증가 및 전파거동을 억제 할 수도 있다. Fig. 5 는 K_I 의 값이 균열이 작은 경우, 즉 짧은 균열에 있어서 더 크고 균열면 마찰의 유무에 영향을 받지 않음을 보여준다.

긴 균열($c/h=0.4$)과 짧은 균열($c/h=0.2$)을 갖는 얇은 층의 <연구 3>과 <연구 4>에서, $K_I / p_o \sqrt{a}$ 와 $K_{II} / p_o \sqrt{a}$ 값들에 대한 g/a 의 그래프가 Fig. 6 에 그려져 있다.

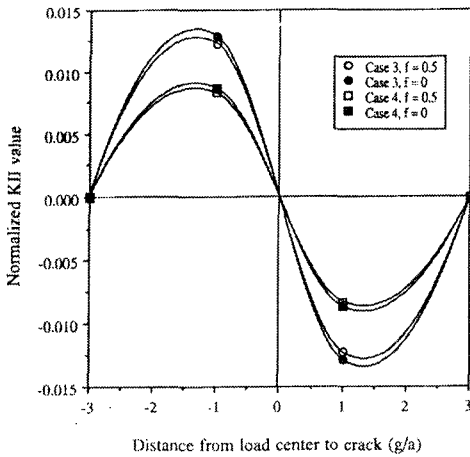


Fig. 6 Normalized stress intensity factors for a vertical crack in TiN/steel, for a thin coating ($a/h=10$) with a long crack (Case 3: $c/h=0.4$) and a short crack (Case 4: $c/h=0.2$), with and without crack face friction, $f=0, 0.5$.

매우 명백하게 K_{II} 값은 두꺼운 코팅 경우와 비교했을 때 현저히 감소됨을 알 수 있다. 이것은 구름 접촉 피로에서 얇은 코팅이 두꺼운 코팅보다 나은 보호를 한다는 Cheng⁴ 등과 Erdemir³ 의 결과와 일치한다. 또, 증가된 균열길이는 불안정한 균열 성

장을 암시하는 K_{II} 값을 증가하게 한다. 얇은 코팅의 경우에 균열면 마찰은 K_{II} 에 최소한의 영향을 미치고 따라서 균열성장을 억제 하는데 크게 도움을 주지 못한다는 것을 Fig. 6 에서 알 수 있다.

3.3 MoS₂/steel 과 DLC/Ti 모델의 해석 결과

TiN/steel 시스템의 가장 극한 경우 (두꺼운 코팅, $a/h=1$; 긴 균열, $c/h=0.4$; 균열에 작용하는 하중, $g/a=1$) 와 비교된 MoS₂/steel 과 DLC/Ti 시스템의 결과가 Fig. 7 에 요약되어 있다. Fig. 7 에서 최고 K_{II} 값은 DLC/Ti 시스템, 즉 $\Gamma=7.27$ 일 때 발생했고 이 시스템에서 균열면 마찰은 K_{II} 값을 현저히 감소시켰다. 이 경우에서 TiN 코팅에 대해 자체미끄럼 마찰 계수 값 $f=0.5$ 와 비교하여 DLC 코팅의 자체미끄럼 마찰 계수 값 $f=0.15$ 임이 중요하다. Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 MoS₂/steel 시스템, 즉 $\Gamma=0.17$ 일 때 K_{II} 값은 최소이고, 균열면에서의 마찰은 균열 성장 억제에 무시할만한 영향을 갖는다. 결국, 이러한 결과들은 K_{II} 값은 증가된 코팅/모재 강성률에 대해 증가하고, 그런 시스템에 대해 균열면 마찰은 현저히 K_{II} 를 감소시킨다.

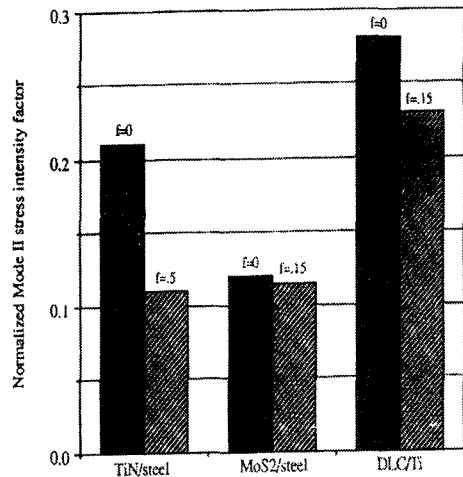


Fig. 7 Normalized Mode II stress intensity factors for a vertical crack in TiN/Steel, MoS₂/steel and DLC/Ti, for Case 1: $a/h=1, c/h=0.4, g/a=-1$, with and without crack face friction, $f=0, 0.5$.

4. 결론

구름 접촉을 하는 TiN/steel 다층 구조물의 유한 요소 모델에서 표면 파괴 균열 시, 균열 면 마찰, 균열 길이, 코팅 두께, 그리고 응력확대계수, K_I 과 K_{II} 에서 하중 위치의 영향에 대해 해석하였다. 작업 모델에 앞서 예비 모델은 유한요소의 메쉬 밀도, 균열 입구 열립, 응력 외삽법의 검증을 위해 사용되었으며, 비선형 하중문제의 고려에서 K_I 과 K_{II} 에 대한 모델링의 타당성을 검증하였다. TiN/steel 에서 수직 표면 균열 및 균열면 마찰에 대한 결과는 다음의 결론을 뒷받침 한다.

1. K_{II} 는 코팅층 두께가 증가되거나 혹은 균열길이가 커질 경우에 증가하였다.
2. 균열면 마찰은 더 긴 균열을 가진 두꺼운 층일 경우와 더 강한 코팅/모재 강성률의 경우에 상당히 K_{II} 값을 감소시킨다.
3. 균열면 마찰은 K_I 에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
4. TiN/steel 과 비교된 것처럼, 최대 K_{II} 값은 DLC/Ti 시스템에 대하여 증가하였고, MoS₂/steel 시스템에 대하여는 감소하였다.

후기

본 논문은 2002 년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hochman, R. F., Erdemir, A., Dolan, F. J. and Thom, R. L., "Rolling-Contact Fatigue of Cu and TiN Coatings on Bearing Steel Substrates," Journal of Vacuum Science, Vol. 3, pp. 2348-2353, 1985.
2. Erdemir, A., "A Study of Surface Metallurgical Characteristics of TiN Coated Bearing Steels," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1986.
3. Erdemir, A., "Rolling-Contact Fatigue and Wear Resistance of Hard Coatings on Bearing-Steel Substrates," Surf. and Coat. Tech., Vol. 54, pp. 482-489, 1992.
4. Cheng, H. S., Chang, T. P. and Sproul, W. D., "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, 1990.
5. Kramer, B. M., "Predicting the Wear Resistance of Hard Coatings," in Engineered Materials for Advanced Friction and Wear Applications, Schmidt, F. A. and Blau, P. J., eds., pp. 101-108, 1988.
6. Keer, L. M., Bryant, M. D. and Haritos, G. K., "Subsurface and Surface Cracking Due to Hertzian Contact," Jour. of Lubr. Tech., Vol. 104, pp 347-351, 1982.
7. Keer, L. M. and Bryant, M. D., "A Pitting Model for Rolling Contact Fatigue," Jour. of Lubr. Tech., Vol. 105, pp. 198-205, 1983.
8. Hanson, M. T. and Keer, L. M., "An Analytical Life Prediction Model for the Crack Propagation Occurring in Contact Fatigue Failure," Trib. Trans., Vol. 35, pp. 451-461, 1992.
9. Keer, L. M. and Kuo, C. H., "Cracking in a Loaded, Brittle Elastic Half-Space," Int'l. Jour. of Solids and Structures, Vol. 29, pp 1819-1826, 1992.
10. Kaneta, M., Yatsuzuka, H. and Murakami, Y., "Mechanism of Crack Growth on Lubricated Rolling/Sliding Contact," ASLE Trans., Vol. 28, pp. 407-414, 1985.
11. Bower, A. F., "The Influence of Crack Face Friction and Tapered Fluid on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue Cracks," ASME Jour. of Trib., Vol. 110, pp. 704-711, 1980.
12. Kim, S. H., Keer, L. M. and Cheng, H. S., "Loss of Adhesion of a Layer Bonded to an Elastic Half space Caused by a Concentrated Contact," Trib. Trans., Vol. 33, pp. 53-59, 1990.
13. Kuo, C. H. and Keer, L. M., "Three-Dimensional Analysis of Cracking in a Multilayered Composite," ASME Jour. of Appl. Mech., Vol. 62, pp. 273-281, 1995 .
14. Kim, B. S. and Kim, W. D., "Mode I and Mode II Stress Intensity Factors for a Surface Cracked in TiN/Steel Under Hertzian Rolling Contact," Trans. KSME, Vol. 25(8), pp. 1163-1172, 2001.
15. Chan, S. K., Tuba, I. S. and Wilson, W. K., "On the Finite Element Method in Linear Fracture

- Mechanics," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 1-17, 1970.
16. Salehizadeh, H. and Saka, N., "Crack Propagation in Rolling Line Contacts," *ASME Jour. of Trib.*, Vol. 114, pp. 690-697, 1992.
 17. Kim, B. S. and Eberhardt, A. W., "Linear and Nonlinear Extrapolation of Stress Intensities for Edge Cracks in Mixed-Mode Loading," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 57, No.4, pp 715-720, 1997.
 18. "COSMOS/M Finite Element Analysis System," Version 1.75, User Guide, 1, Structural Research and Analysis Corporation, Pittsburgh, PA, 1995.
 19. Bhushan, B. and Gupta, B. K., *Handbook of Tribology*, McGraw-Hill, New York, 1991.
 20. Eberhardt, A. W. and Peri, S., "Surface Cracks in Layered Hertzian Contact with Friction," *Tribol. Trans.*, Vol. 38, pp. 299-304, 1995.
 21. Hutchings, I. M., "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials," CRC Press, Boca Raton, FL, 1992.
 22. Bowden, F. P. and Tabor, D., "The Friction and Lubrication of Solids," Oxford Press, Oxford, UK, 1986.