

유한요소법을 이용한 미끄럼 접촉시의 반무한체 내의 수평균열 전파 해석

이상윤 · 김석삼

경북대학교 기계공학과

Finite Element Analysis of Subsurface Crack Propagation in Half-space Due to Sliding Contact

Sang-Yun Lee, Seock-Sam Kim

Department of Mechanical Engineering,
Kyungpook National University

Abstract- Finite element analysis is performed about the crack propagation in half-space due to sliding contact. The analysis is based on linear elastic fracture mechanics and stress intensity factor concept. The crack location is fixed and the friction coefficient between asperity and half-space is varied to analyze the effect of surface friction on stress intensity factor for horizontal crack. The crack propagation direction is predicted based on the maximum range of shear and tensile stress intensity factor

Key words : Fracture mechanics, Finite element Method, Stress intensity factor, crack propagation

1. 서론

마멸현상에는 그에 영향을 끼치는 인자가 많으므로 그 기구는 아주 다양하고 복잡한 양상을 보이고 있다. 산업의 첨단화와 더불어 부품의 신뢰성이 더욱 요구되어 마멸에 관한 연구도 점점 활발해지고 있다. 최근의 산업기계는 고하중, 고속화 및 고온등의 가혹한 환경하에서의 작동을 요구 하고 있어 세라믹, 초경합금등의 재료가 많이 쓰이게 되었으나, 이런 취성재료들의 표면 손상 기구는 아직 명확히 밝혀지지 않고 있다. 표면

내부에 있는 균열에대한 실험은 아주 어렵기 때문에 여러 연구자의 이론적인 연구결과가 많이 발표되었다.

Suh 등의 연구에 따르면 재료의 마멸이 진행되는 중에 표면의 근처에는 전위가 발생 되고, 계속되는 미끄럼 접촉하에서의 전위의 축적에 의해 void가 생겨 서로 연결되어 마지막단계에서는 표면에 수평방향으로의 균열이 된다. 이 균열은 하중분포가 균열의 성장 방향을 바꾸지 전까지 표면과 수평한 방향으로 전파한다[1]. 표면 피로 균열의 파괴기구를 밝히기 위해 몇몇 이론적 모델이 제시되었는데 Keer 등은 반무한 탄성체에서 헤르츠압력에 의한 2차원 균열 전파 거동을 다루

었다[2]. Bryant 등은 동일 모델에서 헤르쯔 압력분포를 압자아래의 규정된 형상변위로 대치시켜 그 결과가 헤르쯔 압력에 의한 결과와 잘 일치 한다고 하였다[3]. N. Saka 등은 유한요소법을 이용한 수평균열의 전파에 관한 연구에서 균열면상의 마찰계수의 응력 확대계수에 대한 영향과 응력확대계수를 계산하여 균열전파에 대한 연구를 하였다[4].

그러나, 두 물체간의 미끄럼접촉은 주기적인 하중 변화를 일으키고 이로 인한 크랙의 성장은 일종의 피로 파괴의 관점에서 보아야 한다. 즉 응력확대계수의 변동폭 ΔK 에 의하여 균열의 전파특성을 평가하여야 한다.

본 연구에서는 반무한체 표면의 마찰계수를 변화시키고 이것의 응력확대계수에 대한 영향을 알아보고, 응력확대계수의 변동폭으로 균열 전파에 대한 해석을 하였다.

2. 문제 해석

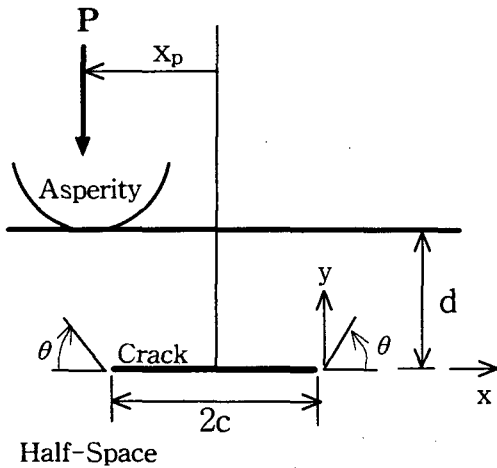


Fig.1 Coordinate and pertinent nomenclature

두 물체가 서로 접촉할 때 실제 접촉은 미소적인 관점에서 돌기간의 접촉이라고 볼 수 있다. 이 돌기간의 접촉에서 수직, 전단

응력이 일어나고 미끄럼 접촉시에는 표면에 분포된 돌기에 의해 주기적인 응력변화가 발생된다. 그러므로, 돌기의 분포가 충분히 멀고 내부 균열이 서로 영향을 끼치지 않을만큼 분포되어있다고 하면 문제는 Fig.1 과 같이 반무한체 내에서 돌기하나의 이동에 의한 균열해석이라는 2차원 평면변형율문제로 간단히 될 수 있다.

돌기가 미끄럼 접촉을 할 때 발생하는 균열 주위의 소성영역은 매우 작으므로 이를 무시하여 반무한체는 탄성체라고 가정하고 선형 탄성해석을 하였다. 균열주위의 소성영역이 균열에 비해 매우 적다는 가정은 실제 고강도강이나 세라믹 재료 해석에 응용되고 있다

반무한체 표면과 돌기 사이의 마찰 계수는 0.1~0.8 으로 변화시켰고 균열면 간의 마찰계수는 0.5 고정하였다.

수평 균열의 길이는 $2c=8\mu\text{m}$ 로 하였으며, 표면으로부터의 깊이는 $4\mu\text{m}$ 로 하였다.

3. 유한 요소 모델

Fig.2 에서 보여지는 바와 같이 균열을 가지는 반무한체를 모델링하였다.

전체 요소의 크기는 가로 $200\mu\text{m}$, 세로 $160\mu\text{m}$ 으로서 8절점 평면변형율 요소를 사용하였다.

균열 주위의 요소는 Fig. 3에서 보여지는 바와 같다. 균열 주위 응력장의 특이점을 나타내기 위해 균열선단의 요소의 중간node는 1/4지점으로 이동하였다[5]. 균열면 상의 요소는 contact 요소를 사용하여 균열 면의 stick, slip 현상을 나타내게 하였고, 균열 주위 탄성을 나타내기 위해 균열 선단의 blunting방지를 위한 균열 선단 node들의 변위를 같게 하였다[6,7].

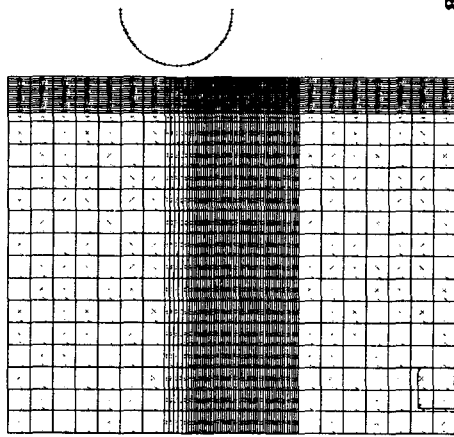


Fig.2 Finite element mesh of half-space

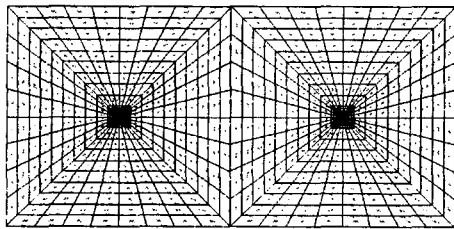


Fig.3 Mesh around the crack

유한요소 해석 프로그램으로는 **MARC[®]**를 사용하였고 IBM RS/6000 43P 기종에서 계산을 수행하였으며 각각의 조건에서 평균 10

Table 1. Mechanical property

탄성계수	600GPa
프와송비	0.23
돌기지름	25 μm
압입깊이	0.3 μm

시간 정도의 계산시간이 소요되었다.

해석은 취성재료인 세라믹 재료의 특성을 나타내기 위하여 Table 1 과 같이 하였고 미끄럼 접촉시의 압입 깊이는 0.3 μm로 하였다[8].

4. 결과 및 고찰

4.1 응력확대계수로 나타낸 균열 특성

응력확대계수 K_I 과 K_{II} 는 다음의 식으로 구하였다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy} (r, \theta=0)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy} (r, \theta=0)$$

실제 계산된 응력 확대계수는 균열 선단 주위의 여러 node들의 값으로부터 $r=0$ 지점까지 extrapolation 한 값으로 구하였다[9]. 응력확대계수 $K_I > 0$ 만이 물리적 의미를 가지기 때문에 $K_I < 0$ 인 값들은 0으로 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 돌기의 위치에 따른 K_{II} 의 변화를 나타낸 것이다. K_{II} 는 주기적 변화

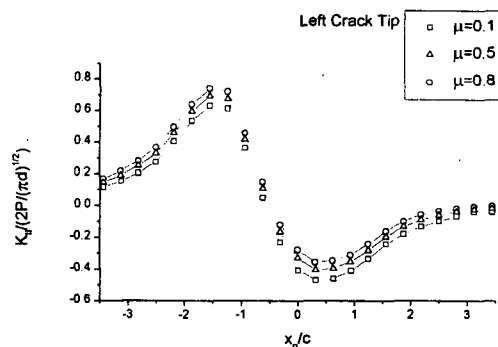


Fig. 4 Variation of dimensionless K_{II} with asperity position and contact friction.

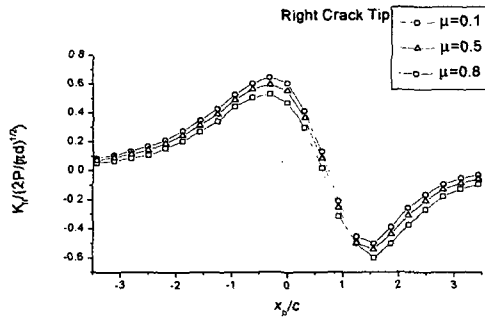


Fig. 5 Variation of dimensionless K_{II} with asperity position and contact friction.

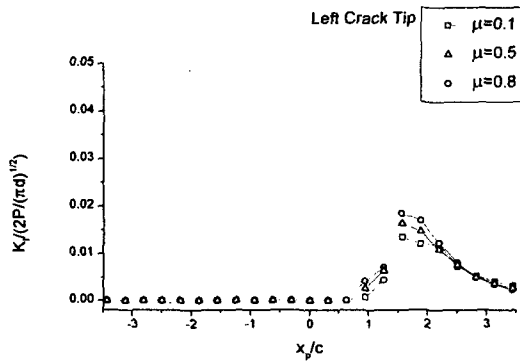


Fig. 6. Variation of dimensionless K_I with asperity position and contact friction.

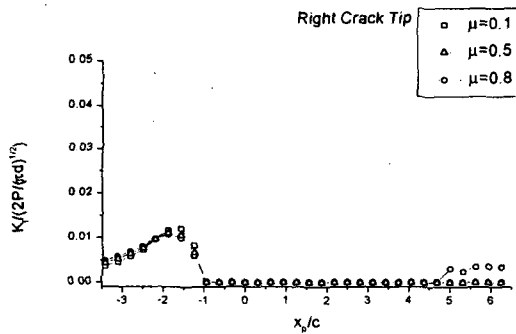


Fig. 7. Variation of dimensionless K_I with asperity position and contact friction.

를 보이고 있고 돌기가 균열 선단을 지나기 전과 후에 각각 최대값과 최소값을 나타내고 있다. 반무한체 표면의 마찰계수가 클수록 더 높은 K_{II} 가 나타났다. 이 결과로 볼때 돌기가 반무한체 표면을 접촉하여 미끄러질 때 마찰계수가 높을수록 균열 선단에 작용하는 전단력이 더 커짐을 알수있다.

Fig. 6과 Fig 7은 돌기 위치에 따른 K_I 의 변화를 나타낸 것이다. 돌기와 반무한체 사이의 미끄럼 접촉시에 반무한체 내에는 압축 응력과 전단 응력이 지배적으로 나타나지만 K_I 는 양의 값을 나타내고 있다. K_I 은 돌기와 표면사이의 마찰계수가 높을수록 더 큰 값을 나타내었으나 K_{II} 에 비하여 매우 작은 값을 나타내고 있다. 이 결과들로 볼 때 미끄럼 접촉을 받는 반무한체 내의 수평균열은 K_{II} 에 의해 전파 된다고 볼수 있다.

4.2 균열전파방향

피로 균열 성장은 응력확대계수 변동 폭으로 계산을 하였다. mixed mode의 2차원 탄성체내 균열 주위의 응력식은 아래와 같다 [10].

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + K_{II} \left(\frac{3}{2} \sin \theta - 2 \tan \frac{\theta}{2} \right) \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \right]$$

인장 응력확대계수 ΔK_σ 와 전단 응력 확대계수 ΔK_τ 를 아래와 같이 나타내었다.

$$K_{\sigma}(\theta, x_p/c) = \sigma_{\theta} \sqrt{2\pi r}$$

$$K_{\tau}(\theta, x_p/c) = \sigma_{r\theta} \sqrt{2\pi r}$$

인장, 전단 응력확대계수 변동폭은 아래와 같이 구하였다.

$$\Delta K_{\sigma} = \Delta K_{\sigma}(\theta) = \Delta K_{\sigma, \max} \Big|_{\theta = \theta^*}$$

$$- \Delta K_{\sigma, \min} \Big|_{\theta = \theta^*}$$

$$\Delta K_{\tau} = \Delta K_{\tau}(\tau) = \Delta K_{\tau, \max} \Big|_{\theta = \theta^*}$$

$$- \Delta K_{\tau, \min} \Big|_{\theta = \theta^*}$$

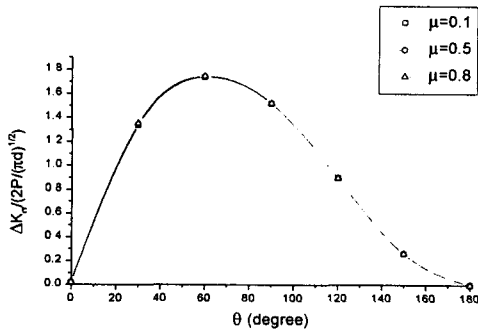


Fig. 8 Variation of dimensionless ΔK_{σ} with direction and contact friction

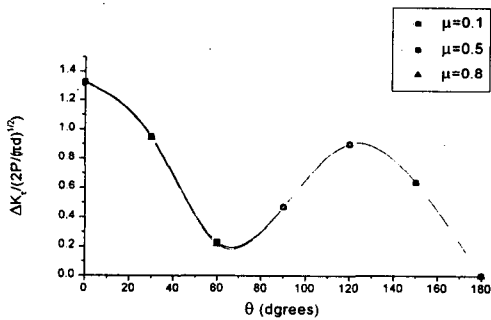


Fig. 9 Variation of dimensionless ΔK_{τ} with direction and contact friction

Fig. 8 과 Fig 9는 ΔK_{σ} 의 ΔK_{τ} 의 각도에 따른 변화를 돌기와 반무한체 표면의 마찰계수를 변화시키면서 나타내었다. ΔK_{σ} 와 ΔK_{τ} 경우 모두 마찰계수에 따라 값은 점점 커지지만 그 차이는 미소하였고 최대값은 변하지 않고 ΔK_{σ} 는 약 70° 부근에서 최대값을 나타내고 ΔK_{τ} 는 0° 에서 최대값을 나타내고 있다. 피로 하중을 받는 반무한체의 수평 균열의 경우 인장기구가 지배적일 때 균열은 약 70° 방향으로 전파되고 전단기구가 지배적일 경우는 0° 방향으로 전파된다고 볼 수 있다. 이 결과는 K. Komvopoulos[10]와 Melin[11] 이 예측한 70° 방향의 균열 전파의 결과와 잘 일치하고 있다.

이 결과들로 볼 때 균열의 균열면 상 밖으로 즉, 수평방향으로의 전파에서 그 각도를 바꾸는 것은 인장기구에 의해서 일어난다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 미끄럼 접촉시의 수평균열에서는 mode I 응력확대계수 K_I 보다 mode II 응력확대계수인 K_{II} 가 더 큰 영향을 미쳤다.
2. 미끄럼 접촉 표면의 마찰계수가 높을수록 응력확대계수 값은 커지는 경향을 나타낸다.
3. 전단모드 응력확대계수 ΔK_{τ} 는 0° , 인장모드 응력확대계수 ΔK_{σ} 는 약 70° 에서 최대 값을 나타낸다.
4. 균열면상을 따라 수평으로의 균열 전파는 전단기구에 의한 것이고 균열면상 밖으로의 전파는 인장기구에 의한 것이다.

참 고 문 헌

- [1] N.P. Suh, "The delamination theory of wear" , *Wear*, Vol.25 (1973) pp.111-124.
- [2] Keer, L.M. and Byrant, M.D., "A pitting model for rolling contact fatigue" , *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol.105, (1983) pp.198-205.
- [3] Bryant, M.D., Miller, G.R. and Keer, L.M. " Line contact between a rigid indenter and a damage elastic body" , *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol.37 (1984) pp.467-478.
- [4] N.Salehizadeh, N.Saka, "Crack propagation in rolling line contacts" , *ASME Journal of Tribology*, Vol.114 (1992), pp.690-697.
- [5] R.S. Barsoum, "On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics" , *Int. J. Numer.Mecha.*, Vol.2 (1976), pp.25-37
- [6] MARC user manual, MARC analysis Research Corporation
- [7] T.L. Anderson, "Fracture mechanics; Fundamentals and Applocation", CRC Press, Second edition(1995), pp.586-591
- [8] William A. Glaeser, "Materials for tribology" , Elsevier,(1992), pp.132-149
- [9] S.K. Chan, I.S. Tuba and W.K. Willson, "On the finite element method in linear fracture mechanics, *Eng. Fract. Mech.*, Vol.10 (1970), pp.1-17
- [10] K.Komvooulos, S.-S. Cho, "Finite element analysis of subsurface crack propagation in a half-space due to a moving asperity contact" , *Wear*, Vol.209 (1997), pp.57-68
- [11] S. Melin, "When does a crack under modeII condition?" , *Int. J. Frac.*, Vol.30 (1986), pp.103-114.