〈논 문〉

구름 및 미끄럼 접촉하의 중공원판의 표면하층균열에 대한 J-적분

이 강 용* · 김 준 엽*

(1996년 12월 13일 접수)

J-integral for Subsurface Crack in Circular Plate with Inner Hole under Rolling and Sliding Contact

Kang Yong Lee and June Yeop Kim

Key Words: J-integral(J-적분), Stress(응력), Rolling Contact(구름접촉), Crack(균열)

Abstract

J-integral for a subsurface horizontal crack in a circular plate with an inner hole under rolling line contact is evaluated according to loading positions with various load conditions, crack length and crack location. Two-dimensional crack is modeled, and the relation between Tresca stress for uncracked model and J-integral is discussed. The loading location which gives the maximum J-integral depends on load condition and crack location, and the presence of frictrion force increases Tresca stress and J-integral near the surface. Regardless of friction force, crack location that gives maximum J-integral is the same as that of maximum Tresca stress in an uncracked model, and the value of J-integral is propotional to crack length. It is also showed that the variation of an inner radius of a disk does not effect J-integral value.

1. 서 론

구름접촉을 하는 물체에 발생하는 균열은 표면균열과 표면하층균열이 있으며, 각각 핏팅(pitting) 현상과 스폴링(spalling)현상을 일으키며, 표면박리와 마모의 관점에서 중요시 되어 왔다. 구름접촉은 수직하중과 수평하중을 야기시켜 발생된 균열에 대해 응력특이성을 일으키기 때문에 이를 잘 설명하는 응력세기계수(stress intensity factor) 또는 J-적분을 평가함으로써 표면박리와 마모를 보다 잘 이해하게 된다. 이러한 중요성으로 말미암아 Suh[1~3] 등에 의해 탄소성 무한체에서 미세균열의 발생과 성장 메카니즘이 발표된 이후로, 선형탄성 파괴역학적 접근으로 Fleming과 Suh[3]가 무한체내에 길이가 긴 표면하층균열에 대하여 수직 및 수평력에 의한 응력세기계수 K_I과 K_{II}를 계산하여 K_I이 K_{II}보다 훨씬 작음을 보였다. 이들의 연구는 Hills와 Asehlby[4,5]에 의하여 계속되어, 미끄러짐접촉하에서 응력세기계수를 계산하는 방법이 고안되었다. 또, Rosenfield[6]는 균열면에서의 마찰을 고려하였을 경우 응력세기계수가 작아짐을 보였다. 최근에는 Keer 등[7]이 구름 및 미끄럼 접촉하의 2차원 균열을 표현하기 위해 전위배분(distribution of dislocation)방법을 고안하였고, 이 방법을 통하여 Keer와 Bryant[8]가 표면균열에 침투한 윤활제의 압력에 의한 영향을, Keer 등[9]이 표면 및 표면하층균열을 동시에 삽입하여 균열성장을 살펴 보았

*회원, 연세대학교 기계공학과

다. Salehizadeh와 Saka[10]는 유한요소법을 이용하여 표면하층의 균열에 대하여 균열면의 마찰에 의한 영향과 가지균열(branched crack)에 대하여 살펴보았다. 지금까지의 많은 연구 모델은 탄소성 무한체를 기본으로 하였고, 각각의 경향을 살펴보는데는 충실하였지만, 통합적으로 모든 변수에 따른 영향은 구체적으로 언급하지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 철도차량용 휠 등, 구름접촉을 하는 중공원판에 발생하는 표면하층 수평균열을 대상으로 하였고, 유한요소법 상용 패키지인 ABAQUS를 사용하여 마찰력의 존재 여부, 균열의 크기, 균열발생위치, 내경의 변화 등에 따른 J-적분 변화를 살펴봄으로써 포괄적인 개요를 얻을 수 있도록 하였고, J-적분을 무균열시의 Tresca 응력과의 연관성으로부터 파악함으로써, 일반적인 모델에서도 J-적분을 예측할 수 있도록 하였다.

2. 유한요소 모델링

Fig. 1에 보는 바와 같이 2차원 평면변형률상태로 가정하여, 접촉 표면하층에 발생하는 균열을 모델링하였다. 먼저 응력해석을 위해서 무균열 유한요소 모델링을 한 후, 균열을 삽입하여 균열해석을 하였다. 모델링에 사용한 요소는 8개의 절점을 갖는 CPE8 요소이며, 무균열 모델에 사용된 총 요소수는 985개이며, 균열해석을 위한 모델에는 총 1261개의 요소를 사용하였다. Fig. 1에서 접촉길

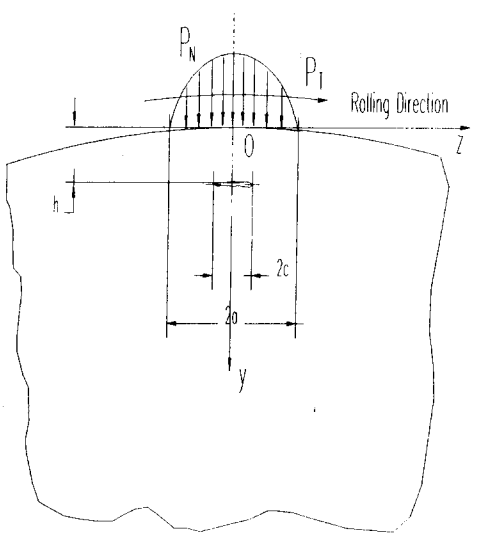
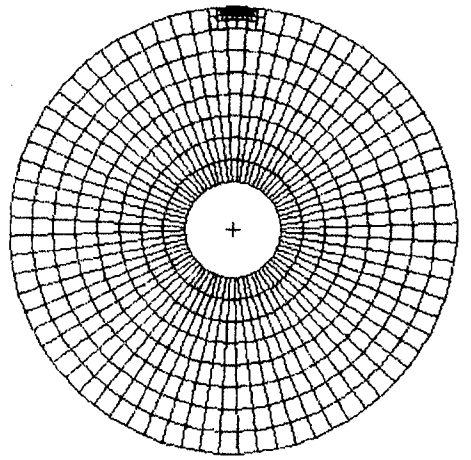
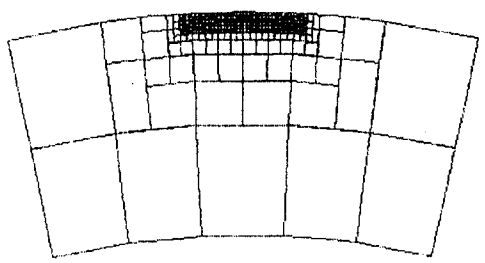


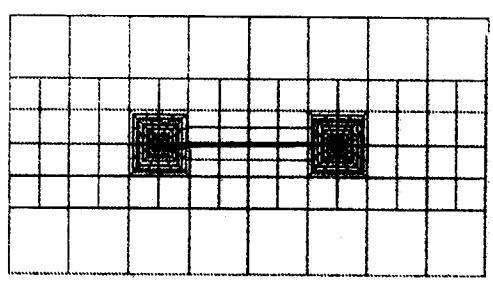
Fig. 1 Schematic geometry subsurface cracked body



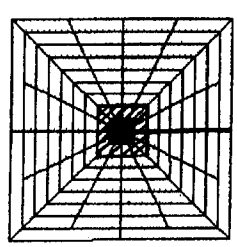
(a) Finite element mesh



(b) Detailed mesh of contact zone



(c) Elements near crack



(d) Crack tip modeling

■ : Quater point element
■ : Transient element

Fig. 2 Finite element mesh for disk model subjected to Hertzian loading

이(2a)는 13.6 mm, Hertz 접촉압력(P_N)은 1.25 GPa, 마찰력(P_T)은 마찰계수를 0.3으로 하여 일정한 값(fP_N)을 사용하였다. Fig. 2(a), (b)에 유한요소 모델링을 나타내었다. 외경대 내경의 비가 4.65인 원판을 중심각 5°로 분할하였고, 균열 존재부위의 조밀한 모델링을 위해 MPC(Multi-Point Constraint)를 사용하였다. 균열면을 모델링하기 위하여 경계면요소로 22개의 ISL22 요소를 사용하였다. 심각한 파괴현상인 스폴링이 접촉길이인 a보다 짧은 균열길이 c로부터 발생하기 때문에,[10] c/a를 0.075로 하여 짧은 길이의 균열에 대한 경향을 살펴볼 수 있도록 하였다. 균열이 존재하는 깊이는 응력해석결과 가장 큰 응력이 발생하는 깊이로 하였다. 이 균열을 기초로 하여 균열크기와 발생깊이가 다른 균열을 모델링하여 그 경향을 살펴볼 수 있도록 하였다. Fig. 2(c)에 균열선단 주위의 메쉬(mesh)를 상세히 나타내었다. 균열은 두꺼운 선으로 표시하였다. 균열 상층면은 3-절점의 경계면요소(ISL22)를 사용하였고, 하층면은 미끄럼선(slide line)을 사용하여 모델링하였다. Fig. 2(d)와 같이 균열선단에는 Barsoum[11]이 제시한 QPE(Quater Point Element)를 사용하였고, 그 외곽에 1개층의 천이요소(transition element)[12]를 사용하였으며, 나머지는 정규요소를 사용하여 모델링하였다. 탄성재료 물성치로 영률와 푸아송비를 205.8 GPa과 0.3으로 사용하였고, 경계조건으로 중심부인 축과 억지끼워맞춤하는 부위의 절점들에 대하여 수평, 수직 및 회전 변위을 구속하였다. 접촉하중을 접촉길이의 3배되는 지점까지 좌우로 이동시켜, 하중작용위치에 따른 응력 및 J-적분값을 관찰하였다.

3. 해석 및 결과

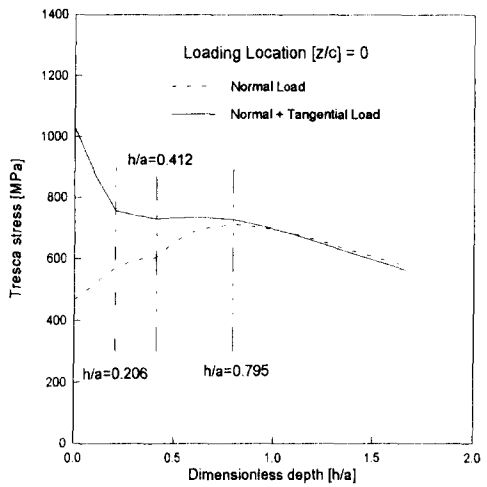
3.1 응력해석 결과

2차원 탄성응력해석에 의해 하중작용위치를 변화시켜가면서, Fig. 1의 좌표계 중심(O)으로부터 y축 방향으로 깊이에 따른 Tresca 응력을 Fig. 3의 (a)~(f)에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 수직하중(P_N)만이 O의 위치에 작용할 때, 최대 Tresca 응력의 발생깊이는 h/a가 0.795이고, 그 값은 710 MPa로 기존 수치해석결과[13]와 일치함을 알 수 있다. 또, 마찰력(P_T)이 부과되었을 경우 표면 근처의 응력이 현저히 증가함을 볼 수 있다. Fig. 3(d)에서 수직하중만이 작용할 때, 하중작용위치가 중심에서부터 z/a=−1인 지점까지는 응력의 최대값이 나타나는 깊이는 h/a가 0.795인 곳에서 0.412인 곳으로 이동함을 볼 수 있고, 그 이후에는 전체적인 응력이 감소되며, 표면에서의 응력이 떨어지고 깊이가 깊어질수록 상대적으로 큰 응력이 나타난다. Fig. 3(e)에서 마찰력이 부과되었을 경우, 응력은 표면에서 최대값을 보이다가 z/a가 -1인 위치에서 h/a가 0.206인 곳에서 최대 응력값을 보인다. 그 이후에는 마찰력이 존재하지않을 경우와 같은 경향을 보이는데, 이것은 중심 O의 위치가 마찰력의 작용면으로부터 벗어났기 때문이다. Fig. 3(f)에서 z/a가 1인 경우 마찰력이 작용하면 표면하층에서는 오히려 응력이 수직하중만인 경우보다도 더 적은 값을 보여주는데, 이런 현상은 균열발생깊이에 따른 J-적분값의 변화를 이해하는데 도움이 될 것이다. 한편, z/a=−1에 수직 및 마찰력이 동시에 작용하는 경우에 대한 Fig. 3(b)의 응력분포와 차이가 있음을 보여준다.

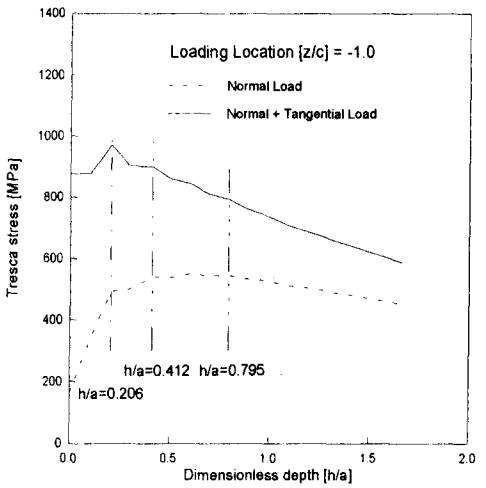
3.2 J-적분 계산결과

3.2.1 수직압력에 의한 J-적분

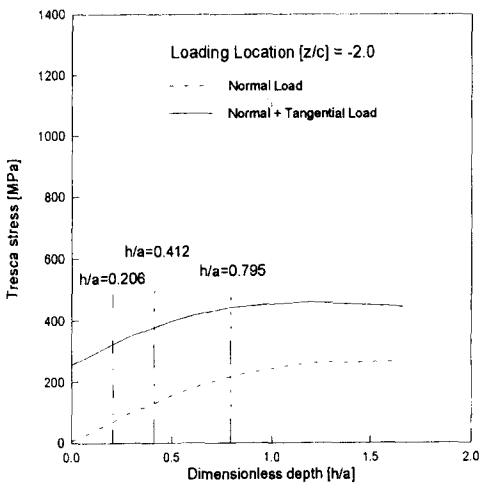
가감속이 없는 일반적인 주행상황에서는 마찰력이 존재하지 않는 자유구름(free rolling)상태로 볼 수 있고, 이 경우 수직분포압력(P_N)의 이동에 따른 J-적분값을 Fig. 4에 나타내었다. 균열발생깊이는 응력해석결과 최대 응력발생깊이인 h/a=0.795로 하였다. 수직분포압력이 균열선단에는 압축력으로 작용하게 되므로, 모드 I에 인한 J-적분값은 존재하지 않으며, 수직압력으로 인하여 균열면에 발생하는 전단력에 의한 미끄럼형 모드(모드 II)에 대한 J-적분값만이 존재하게 된다.[8~10] 하중작용위치가 균열에 가까워질수록 J-적분값은 점점 커지다가, z/a가 −1이 되는 지점에서 최대값을 보이고, 그 이후 균열중앙선의 위치에 도달하게 될 때까지 J-적분값은 점점 줄어들다가 0이 되는 것을 보여주고 있다. 이것은 하중이 균열중앙선에 다다르면, 균열선단은 좌우로 똑같은 크기의 압축력을 받게되어 미끄러짐이 일어나지 않기 때문이다. 하중작용위치가 균열중앙선을 통과한 이후, 같은 균열선단에서는 실제로 전단력의 방향이 반대이지만, J-적분은 전단력의 제곱에 비례하므로, J-적분은 균열중앙선 좌우에서 대칭을 보인다. 또한, 좌측 균열선단과 우측 균열선단에서의 J-적분값은 완전히 대



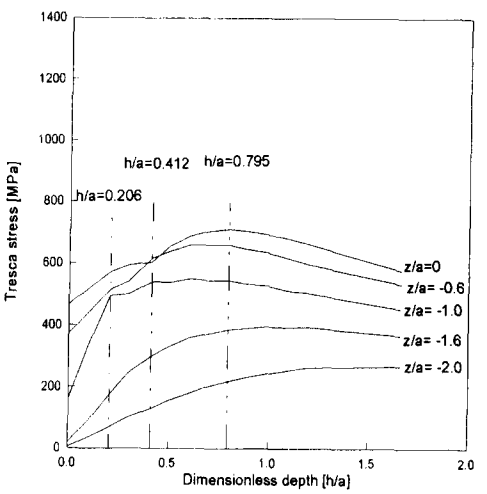
(a) $z/a=0$



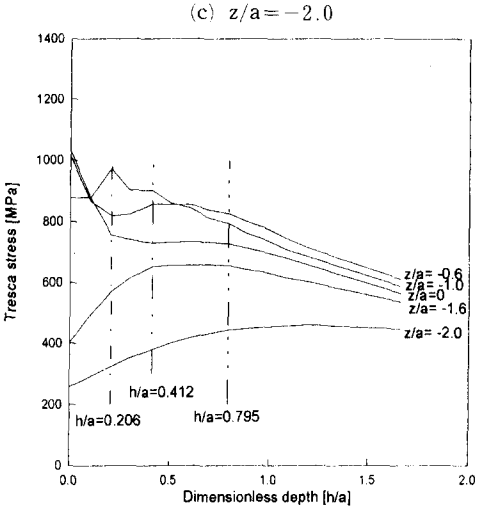
(b) $z/a=-1.0$



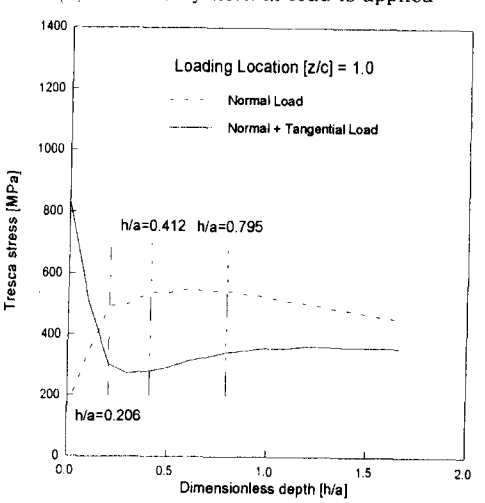
(c) $z/a=-2.0$



(d) When only normal load is applied



(e) When friction force is added



(f) $z/a=1.0$

Fig. 3 Tresca stresses along depth from coordinate center for various loading postions

칭임을 알 수 있다. 균열의 크기에 따른 J-적분값의 변화는 균열성장의 경향을 파악하는데 도움이 될 것이다. Fig. 5는 c/a가 0.075인 균열의 크기를 각각 2배, 3배인 0.15, 0.225로 하였을 경우, 균열 크기가 커질수록 더 큰 J-적분값을 가짐을 알 수 있다. 그리고, J-적분의 최대값이 발생하는 하중작용위치는 균열길이에 무관함을 알 수 있다. Fig. 6은 균열발생깊이에 따른 J-적분값의 변화를 보여주고 있다. Fig. 4에서 J-적분값이 최대가 되는 하중작용위치는 z/a=−1이며, 이 위치에 마찰력이 존재할 때와 그렇지 않을 때의 최대 Tresca 응력은 Fig. 3(b)에서 h/a가 각각 0.206과 0.412인 깊이에서 발생하므로, 이 깊이에 발생한 균열에 대한 J-적분값을 살펴보았다. z/a가 −1인 지점에서 최대값은 h/a가 0.412인 깊이에 균열이 존재할 때로 나타나, J-적분값은 응력상태에 비례함을 알 수 있다. 하중작용위치가 균열중심에서 먼 곳(z/a<−1)에서는 균열발생깊이가 깊어질수록 J-적분값이 커지는데, 이것은 Fig. 3(c)에서의 응력상태를 보면 그 결과를 이해할 수 있다.

3.2.2 마찰력이 부과된 경우의 J-적분

가감속시에는 접촉 수직압력에 더하여 진행 방향

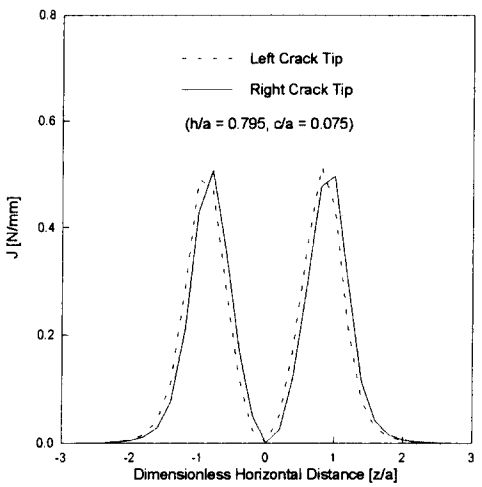


Fig. 4 J-integrals for a subsurface crack for various load positions

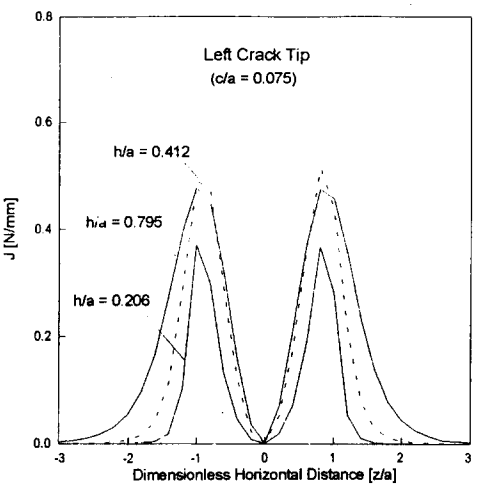


Fig. 6 J-integral for a subsurface crack under normal load with change of crack location

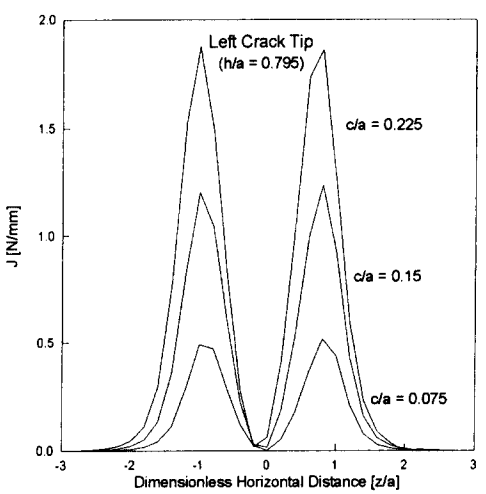


Fig. 5 J-integrals for a subsurface crack under normal load with change of crack length

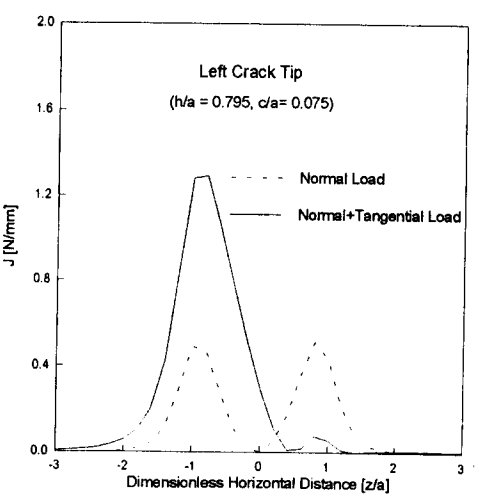


Fig. 7 J-integral for a subsurface crack when friction force is added

의 마찰력이 작용하게 되고, 이 경우 J-적분값을 h/a=0.795, c/a=0.075일 때 Fig. 7에 나타내었다. J-적분의 최대값이 수직압력만 작용할 때보다 2.5배정도 커지고, 균열중앙면에 대한 대칭성이 사라지게 된다. 그러나 J-적분의 최대값이 발생하는 하중작용위치는 수직압력만이 작용할 때와 같음을 알 수 있다. 하중작용점이 우측에 있을 경우 J-적분값이 크게 줄어드는 것은, 수직하중과 마찰력에 의한 좌측 균열선단의 미끄러짐의 방향이 서로 반대가 되어 상쇄되기 때문이며, Fig. 3(f)의 응력결과에서도 수직하중만 작용할 때보다 응력이 감소됨을 보았다. Fig. 8에는 마찰력이 작용할 경우, 균열의 크기에 따른 J-적분값을 보여주고 있다. 수직압력만이 작용할 때의 균열의 크기에 따른 결과와 같이, 균열크기가 클수록 J-적분값도 증가함을 나타내고 있다. Fig. 9에는 마찰력이 작용할 경우, 균열발생깊이에 따른 J-적분의 변화를 나타내고 있다. 표면에 가까운 균열일수록 J-적분의 최대값이 커지는데, 이는 Fig. 3(b)의 응력변화에서 볼 수 있듯이, 마찰력의 영향이 표면에 가까울수록 크기 때문이다. 또, 균열중앙부에 하중이 작용할 때, 수직압력에 의한 J-적분값은 0이었지만, 마찰력이 부과됨으로써 상당히 큰 J-적분값을 보이는 것을 볼 수 있고, 최대 J-적분값을 주는 하중작용위치도 균열중심쪽으로 이동되어 있음을 알 수 있다.

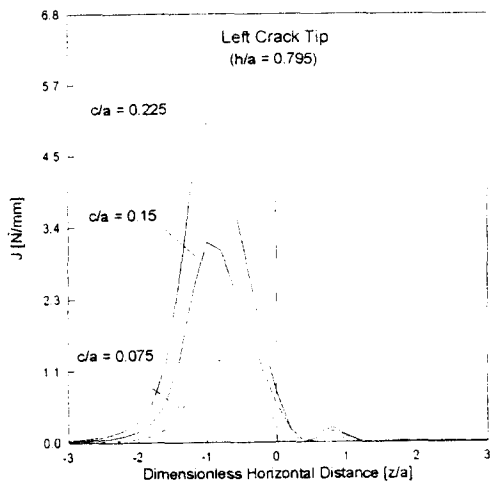


Fig. 8 J-integral for a subsurface crack with change of crack length when friction force is applied

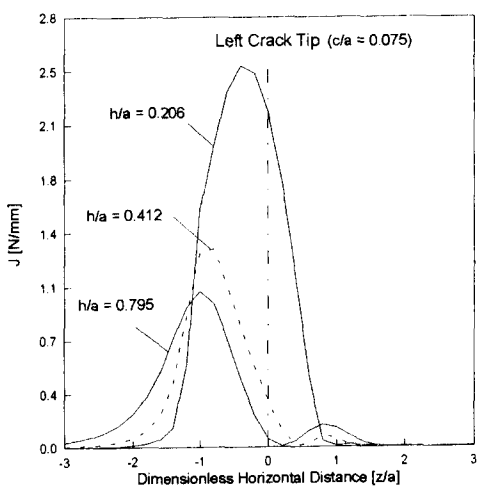


Fig. 9 J-integral for a subsurface crack with change of crack location when friction force is applied

3.2.3 내경의 변화에 따른 J-적분의 영향

내경변화의 영향을 살펴보기 위하여, 내경대 외경의 비를 1.02까지 줄여보았지만, J-적분에 대한 영향은 없었다.

4. 결 론

구름접촉 하에 있는 중공원판의 표면하층에 존재하는 균열의 거동을 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) Hertz의 수직접촉압력에 의한 내경을 가진 원판의 표면하층 수평균열에 대한 J-적분값은, 하중이 균열에서 접촉길이의 반이 되는 거리에 작용할 때 가장 큰 값을 가진다.

(2) 마찰력이 작용하면, 접촉면 부근의 응력이 증가되고, 이로 인해 표면에 가까운 균열일수록 더 큰 J-적분값을 가지게 된다.

(3) 마찰력의 존재 여부와 관계없이, 최대 J-적분값을 주는 균열깊이는 최대 J-적분값을 주는 하중작용위치에서의 최대 Tresca 응력이 발생되는 깊이와 일치하며, 균열의 크기가 클수록 더 큰 J-적분값을 갖게 된다.

(4) 내경의 변화는 J-적분에 영향을 끼치지 못한다.

참고문헌

(1) Suh, N. P., 1977, "An Overview of the Delamination Theory of Wear," *Wear*, Vol. 44, pp. 1~16.

(2) Jahanmir, S. and Suh, N. P., 1977, "Mechanics of Subsurface Void Nucleation in Delamination Wear, " *Wear*, Vol. 44, pp. 17~38.

(3) Fleming, J. R. and Suh. N. P., 1977, "Mechanics of Crack Propagation in Delamination Wear, " *Wear*, Vol. 44, pp. 39~56.

(4) Hills, D. A. and Ashelby, D. W., 1980, "On the Determination of Stress Intensification Factors for a Wearing Half-space, " *Engng. Fracture Mech.*, Vol. 13, pp. 69~78.

(5) Hills, D. A. and Ashelby, D. W., 1980, "On the Application of Fracture Mechanics to Wear, " *Wear*, Vol. 54, pp. 321~330.

(6) Rosenfield, A. R., 1980, "A Fracture Mechanics Approach to Wear, " *Wear*, Vol. 61, pp. 125~132.

(7) Keer, L. M., Bryant, M. D. and Haritos, G. K., 1980, " Subsurface Cracking and Delamination, " *Solid Contact and Lubrication, ASME/AMD*, Vol. 39, pp. 79~95.

(8) Keer, L. M., Bryant, M. D. and Haritos, G. K., 1982, " Subsurface and Surface Cracking Due to Hertzian Contact," *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 104, pp. 347~351.

(9) Keer, L. M. and Bryant, M. D., 1983, "A Pitting Model for Rolling Contact Fatigue," *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 198~205.

(10) Salehizadeh, M. and Saka, N., 1992, "Crack Propagation in Rolling Line Contact," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 114, pp. 690~696.

(11) Roshdy S. Barsoum, 1976, "On the Use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 110, pp. 25~37.

(12) Lim, I. L., Johnston, I. W. and Choi, S. K., 1993, "Application of Singular Quadratic Distorted Isoparametric Elements in Linear Fracture Mechanics," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 36, pp. 2473~2499.

(13) Johnson, K. L., 1987, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, pp. 84~106.