

프레팅 마멸 예측을 위한 알고리즘 개발[§]

조용주* · 김태완**†

* 부산대학교 기계공학부, ** 부경대학교 기계공학과

Development of Algorithm for Predicting Fretting Wear

Yong Joo Cho* and Tae Wan Kim**†

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received December 13, 2010 ; Revised May 5, 2011 ; Accepted May 6, 2011)

Key Words: Fretting Wear(프레팅 마멸), Boundary Element Method(경계요소법), Contact Analysis(접촉해석)

초록: 본 연구에서는 경계요소법을 이용한 프레팅 마멸 예측을 위한 수치적 알고리즘을 개발하였다. 반 무한체 해석을 통해 사각조각면위의 균일분포하중과 탄성변형량의 관계로부터 접촉 계면의 응력을 계산하였고 Archard wear 모델을 이용해 각 격자의 마멸 깊이를 계산하여 접촉면의 형상을 예측할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 본 연구의 정확성을 검증하기 위해 McColl 등의 연구와 비교하였고 개발된 알고리즘을 구접촉 모델에 확장하여 그 유용성을 확인하였다. 아울러 프레팅 해석의 효율적인 계산을 위해 한 step당 사이클 증가량인 step cycle이 해의 정확성에 미치는 영향을 검토하여 step cycle 설정의 중요성을 제시하였다.

Abstract: A numerical algorithm for predicting fretting wear was developed using the boundary element method (BEM). A contact analysis was performed numerically using the relation between the elastic displacement and uniformly distributed loading of a rectangular patch on a semi-infinite solid. Geometrical updating based on nodal wear depths was performed. The wear depths were computed using the Archard's equation for sliding wear. In order to investigate the efficiency of BEM for predicting fretting wear, a problem involving a two-dimensional cylinder on a flat contact was analyzed, comparing it with the simulation model proposed by McColl et al. that was based on the finite element method. The developed method was then applied to the analysis of a spherical contact and it was shown that the developed simulation technique could efficiently predict fretting wear. Moreover, the effect of a step cycle on the solution obtained by the developed method was investigated.

- 기호설명 -

d : 유효강체변위
 $e(x,y)$: 접촉전의 형상함수
 $f(x,y)$: 접촉 후의 형상함수
 H : 재료의 경도
 K : 무차원 마멸계수
 N : 부가하중
 R : 곡률반경
 S : 총누적변위

$u^P(x,y)$: 수직하중에 의한 탄성변형량
 $u^Q(x,y)$: 접선하중에 의한 탄성변형량
 V : 총 마멸량
 n_t : 총 사이클 수
 $\delta(n)$: n 번째 사이클에서의 로컬 슬립량

1. 서론

프레팅은 하중하의 접촉하는 두 표면에서 미세 상대 운동하는 접선 슬립에 의해 발생한다. 프레팅과 미끄럼 접촉 피로 마멸과의 차이는 접촉면과 슬립의 상대적인 크기에 관련되어 있다. 프레팅은 지난 수십 년간 기계요소와 구조물의 수명을 상당히 제한하는 표면 손상의 형태로 인식되

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, tw0826@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

어저왔다. 프레팅 마멸은 클리어런스의 손실을 야기시켜 피로나 부식의 형태로 파손이 진행된다.⁽¹⁾ 1927년 프레팅 현상을 나타내는 본질적인 특징인 상대적 운동 혹은 슬립이 Tomlinson⁽²⁾에 의해 표현된 후, 가스 터빈 엔진과 원자력 발전 기술의 발전으로 인해 서서히 프레팅의 예에 대한 연구가 다양하게 보고되어 왔다.⁽³⁾ Ratisimba 등⁽⁴⁾과 Hiroki 등⁽⁵⁾은 일반적인 접촉 피로마멸의 경우와 같이 실험적 계수 기반의 수명예측 기법을 제시하였다. 프레팅 마멸에 대한 해석적 모델 역시 많이 보고되었는데,⁽⁶⁻⁸⁾ Korvchinsky 등⁽⁸⁾은 2차원 접촉문제에 대해 응력과 접촉 형상을 평가할 수 있는 분석모델을 제시하였다. 최근 유한요소법에 의한 수치적 해석모델은 상업 소프트웨어의 발달과 더불어 프레팅 해석에 많이 응용되어 왔다.⁽⁹⁻¹²⁾ 대표적으로 McColl 등⁽¹²⁾은 실린더 접촉 형상에 대해 사이클 수에 따른 프레팅 마멸 형상을 시뮬레이션 할 수 있는 유한요소모델을 개발하였고 해석 격자 및 해석 스텝의 최적화를 통해 해석시간을 줄일 수 있는 방법을 제시하기도 하였다. 하지만 유한 요소법 자체가 접촉부 뿐만 아니라 해석대상 전체에 대해 계산을 해야 하기 때문에 관심영역에 대한 계산만 수행할 수 있는 경계요소법에 비해 더 많은 계산시간이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 경계요소법(Boundary Element Method)를 이용한 프레팅 마멸 예측 알고리즘을 개발하고자 하였다. 반무한체 해석을 통해 접촉 계면의 응력을 계산하였고 Archard wear 모델을 이용해 각 격자의 마멸 깊이를 계산하여 접촉면의 형상을 예측할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 본 연구의 정확성을 검증하기 위해 McColl 등⁽¹²⁾의 연구와 비교하였고 구접촉 모델에 대해서도 해석을 수행하였다. 아울러 프레팅 해석의 효율적인 계산을 위해 한 step당 사이클 증가량인 step cycle이 해의 정확성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 해석 방법

2.1 접촉해석

Fig. 1은 해석에 사용된 모델을 도시한 것이다. 등방성이고 균질인 두 비접합 탄성체에 수직하중과 접선하중이 작용할 때 접촉면의 압력분포를

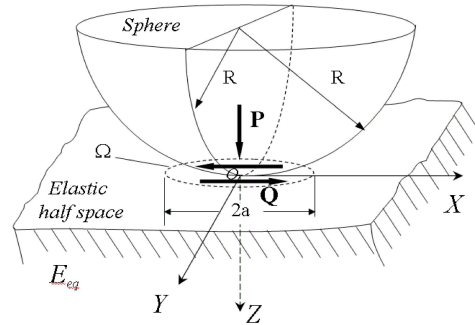


Fig. 1 The contact geometry of a sphere and a semi-infinite half space

알기 위해 사각조각표면에 작용하는 균일한 분포 하중에 의한 변위의 해를 이용하여 두 탄성체 사이의 접촉문제를 수치적으로 해석하였다. 하중이 가해지면서 두 탄성체의 간격 $f(x,y)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x,y) = e(x,y) + u^P(x,y) + u^Q(x,y) - d \quad (1)$$

여기서, $u^P(x,y)$ 와 $u^Q(x,y)$ 는 수직하중 및 접선하중에 의한 탄성변형량이고 d 는 유효강체변위이며, $e(x,y)$ 는 접촉전의 형상함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e(x,y) = R - \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)} \quad (2)$$

여기서, R 은 곡률반경이다. 접촉영역 Ω 내에서는 $f(x,y) = 0$ 의 조건이 만족해야 하므로 식 (1)은 다음의 Boussinesq 식으로 나타낼 수 있다.

$$\iint_{\Omega} (u^P(x,y) + u^Q(x,y)) dx dy = d - e(x,y) \quad (3)$$

이 식은 다음과 같이 이산화시킬 수 있다.

$$C_1 \sum_{j=1}^{\kappa} F_{ij} P_j + C_2 \mu \sum_{j=1}^{\kappa} F'_{ij} P_j = d - f_i \quad (4)$$

여기서 $C_1 = (1 - \nu_1^2)/\pi E_1 + (1 - \nu_2^2)/\pi E_2$ 이고 $C_2 = (1 - 2\nu_1)(1 + \nu_1)/2\pi E_1 + (1 - 2\nu_2)(1 + \nu_2)/2\pi E_2$ 이고 κ 는 접촉영역 내의 사각조각 수이며 F_{ij} 와 F'_{ij} 는 요소 j 에서의 수직 및 접선하중에 의한 요소 i 에서의 변위를 나타내는 영향함수이다.

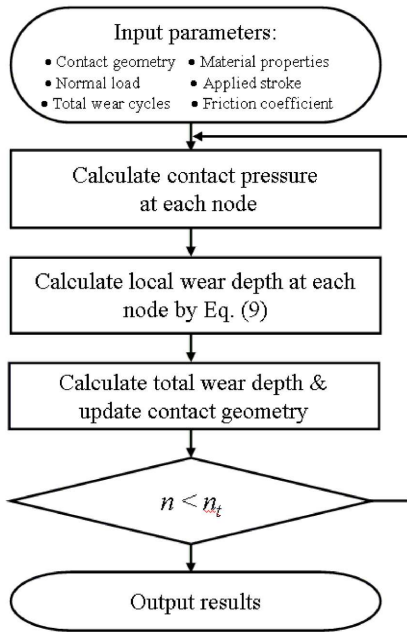


Fig. 2 Flow chart of numerical procedure for the prediction of fretting wear

2.2 프레팅 마멸 해석

Fig. 2는 프레팅 마멸량을 계산하기 위한 알고리즘을 도시한 것이다. 해석절차는 다음과 같다.

- 1) 구와 평판에서의 프레팅 마멸 상황을 가정하여, 접촉 조건, 마멸계수 등의 필요 데이터를 입력 받는다.
- 2) 접촉 해석을 통해 각 노드의 접촉 응력을 계산한다.
- 3) 재료의 마멸계수, 각 노드의 압력, 이동거리를 곱하여 각 노드의 마멸량을 계산한다.
- 4) 구와 평판의 형상좌표에 계산된 마멸량을 반영시켜 새로운 형상을 계산한다.

1)~4)까지의 계산단계를 목표 cycle에 도달할 때까지 반복 수행하여 특정 cycle 후 구와 평판의 형상변화를 계산하게 된다. 각 노드에서의 프레팅 마멸 깊이를 구하기 위해서 다음과 같은 Archard's equation⁽¹³⁾을 이용한다.

$$\frac{V}{S} = K \frac{N}{H} \tag{5}$$

여기서, V 는 총 마멸량, N 은 부가하중, S 는 총 누적변위, K 는 무차원 마멸계수, H 는 재료의 경도이다. 정량적인 예측을 위해 수직압력이 작용

Table 1 Analysis condition for cylinder on flat contact⁽¹²⁾

Poisson's ratio	0.3
Elastic modulus	210 GPa
Wear coefficient of cylinder	$2 \times 10^{-14} \text{ Pa}^{-1}$
Wear coefficient of plate	$3 \times 10^{-14} \text{ Pa}^{-1}$
Applied normal load	185 N
Stroke	50 μm
Radius of a cylinder	6 mm
Total number of cycle	18000 cycle

하는 이산화된 표면의 마멸 프로파일을 나타내기 위해서는 위의 식을 다음과 같이 수정할 필요가 있다.

$$\frac{dV}{dS} = K \frac{dN}{H} \tag{6}$$

양변을 dA 로 나누면 다음과 같이 된다.

$$\frac{dV}{dAdS} = K \frac{dN}{HdA} \tag{7}$$

dV/dA 항은 마멸 높이 dh_w 가 되며 dN/dA 항은 접촉 압력 $p(x,y)$ 항으로 대체할 수 있다. K/H 항은 일정한 값이므로 마멸계수 k 로 대체한다면 다음과 같은 식이 된다.

$$dh_w = kp(x,y)dS \tag{8}$$

이를 각 사이클 당 일반적인 식으로 바꾸면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$h_w = k \int_0^{n_t} p(x,y)\delta(n)dn \tag{9}$$

여기서, n_t 는 총 사이클 수이며 $\delta(n)$ 은 n 번째 사이클에서의 로컬 슬립량이다.

위 계산 과정을 통하여 각 노드에서의 프레팅 마멸깊이는 그 노드의 접촉응력값, 마멸계수, 슬라이딩 거리의 곱으로 구할 수 있다. 이러한 계산에서 프레팅 마멸량 계산의 가장 핵심이 되는 값은 접촉 해석을 통해 계산된 구와 평판 각 노드의 접촉 응력 값이다.

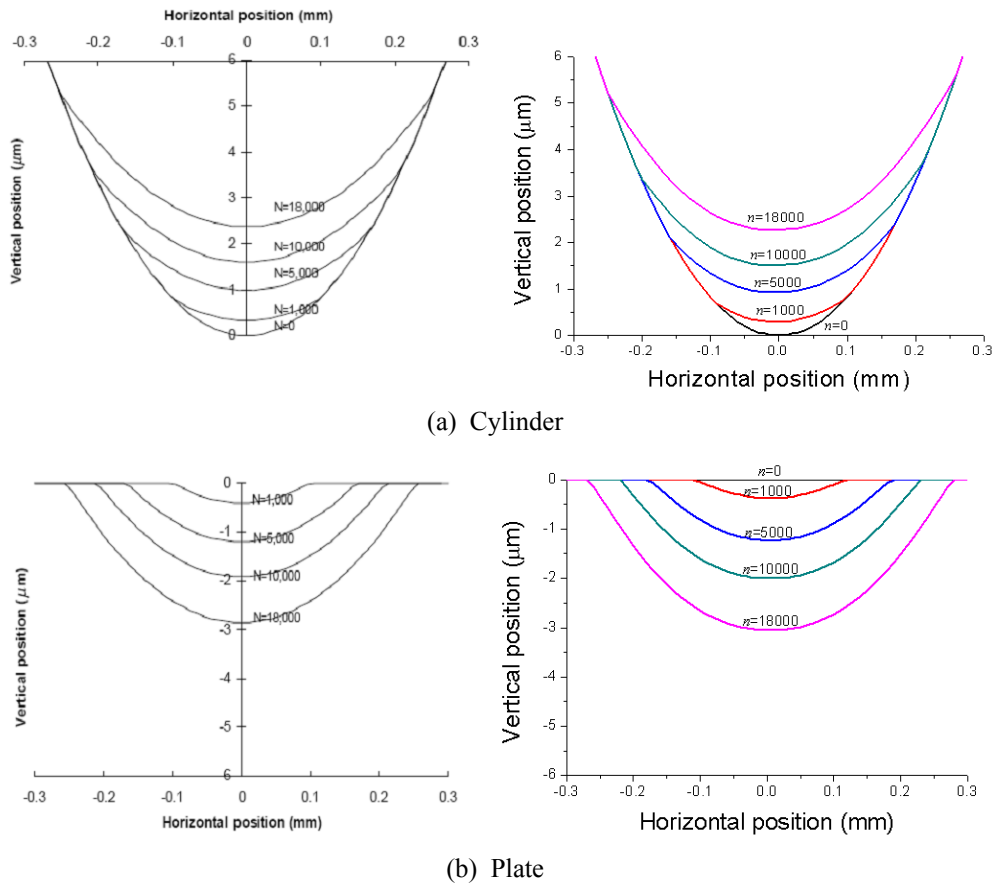


Fig. 3 Comparison of predicted wear profiles between McColl et. al⁽¹²⁾'s (left) and this study (right)

기존의 다른 연구자들은 이 접촉부의 응력을 계산하는데 상용 FEM 해석프로그램을 사용하였기 때문에 독립적인 프레팅 마멸 예측 프로그램을 제작하는데 어려웠고, 계산시간 또한 엄청나게 소요되었다. 그러나 프레팅 마멸의 발생은 주로 접촉면에서의 접촉 응력 값이 주요 변수이기 때문에 굳이 구조물 전체의 응력을 계산하기 보다는 접촉면에서 발생하는 접촉 응력 값만 계산하면 된다.

3. 해석결과

이상의 개발된 프레팅 마멸량 계산 알고리즘을 이용하여 두 가지 접촉형상에 대해 해석을 수행하였다. 첫 번째는 2차원 모델로 실린더와 평판의 접촉문제로서 McColl 등⁽¹²⁾의 결과와 비교하였고 두 번째는 구 접촉에 대한 문제이다. Table 1은 McColl 등⁽¹²⁾의 연구에서 제시한 해석조건을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 본 연구에서 수행한 결과와 McColl 등⁽¹²⁾ 결과를 비교한 것으로 동일한 해석조건에서 마모 시편의 형상변화 예측 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 상부시편의 경우 접촉 부위에서 마멸이 진행되면서 곡률이 점차 커지며, 하부시편의 경우 마멸 깊이가 깊어지며 폭 또한 넓어짐을 확인할 수 있다.

Table 2는 두 연구의 해석 프로그램의 절차를 비교한 것으로 기존의 FEM을 이용하여 접촉응력을 계산한 비교논문에 대비해 본 연구에서 개발된 프로그램은 거의 유사한 결과를 얻으면서도 계산시간은 매우 짧음을 확인할 수 있다. 다만 McColl 등⁽¹²⁾의 연구가 이루어진 시점에 비해 본 연구가 이루어진 시점이 차이가 있어 동일한 기준으로 계산시간을 비교하는 것은 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 수행한 경계요소법은 전 요소가 아니라 프레팅이 발생하는 표면에 대해서만 계산을 하므로 분명히 계산시간의 감소효과가 반영된 결과라 사료된다.

이상의 구축된 알고리즘을 통해 구 접촉인 경우 프레팅 마멸해석을 수행하였다. 구의 직경은 33mm로 가정하였고 구와 평판의 물성치 및 마멸계수는 Table 1과 동일한 값을 적용하였다. 초기 접촉압력은 430MPa, stroke는 20 μ m로 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 접촉 중심축(Y=0)에서의 사이클 증가에 따른 프레팅 마멸형상을 도시한 것이다. Fig. 4(a)에서 사이클이 증가함에 따라 구의 곡률반경은 증가하고 있고 약 1000사이클 후의 최대 마멸량은 약 0.3 μ m로 나타남을 알 수 있다. Fig. 5는 사이클 증가에 따른 접촉폭 및 최대접촉압력의 변화를 도시한 것이다. 초기 접촉폭은 약 400 μ m 정도였으나 1000사이클 후에 약 540 μ m로 35%정도 증가하였으나 접촉압력은 430MPa에서 250MPa로 약 42%정도로 감소하였음을 알 수 있다. 접촉폭의 감소와 접촉압력의 증가가 서로 비례하지 않는 이유는 접촉 사이클이 증가하면서 소성변형에 의한 압력손실이 비선형적으로 이루어지기 때문이다.

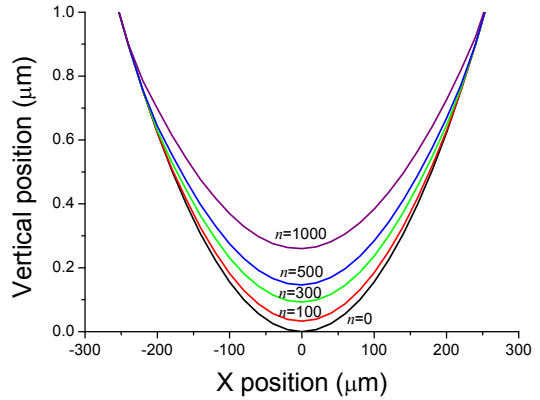
지금까지의 해석 결과는 1 사이클씩 증가시켰을 때의 해석결과들이고 3차원 해석의 경우 총 1000사이클의 해석 시 약 10시간정도의 계산시간이 소요되는 것을 확인하였다. 따라서 3차원 프레팅 해석 시 효율적인 프레팅 마멸 계산을 위해서는 적절한 step cycle 즉, 한 step당 사이클 증가량의 설정이 중요하다.

Fig. 6은 step cycle이 해석결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 1000 사이클 후의 upper 시편(구) 형상의 계산 결과를 다양한 step cycle에 대해서 계산한 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 500 또는 250 사이클을 1 step으로 하여 계산한 경우 극단적으로 다른 형태의 마멸형상 결과가 도출되는 것을 확인할 수 있었다.

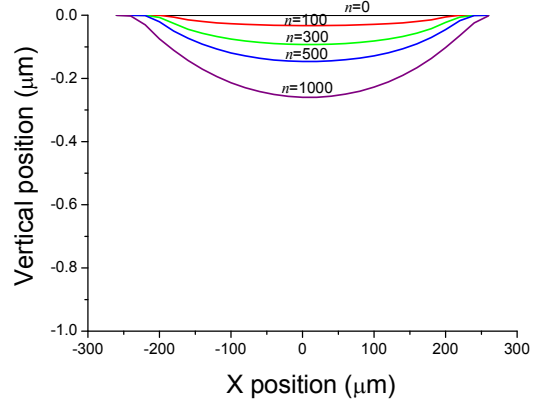
Table 2 Comparison of calculation time

Analysis method	FE method ⁽¹²⁾	BE method
Mesh size	10 μ m	10 μ m
Step cycle	30	1
Total number of cycle	18,000	18,000
Number of iteration	600 times	18,000*3 times
Calculation time	1 day	30min

이는 stick-slip 현상에 의해 발생한 profile로 판단되는데, step 크기를 1사이클씩 증가시킬 때는 마찰계수 및 shear traction 효과가 덜 작용하지만, 500 또는 250 사이클을 1 step으로 사용할 경우



(a) Sphere



(b) Plate

Fig. 4 Predicted wear profiles on X-axis (Y=0) with an increase of wear cycles for three-dimensional spherical contact

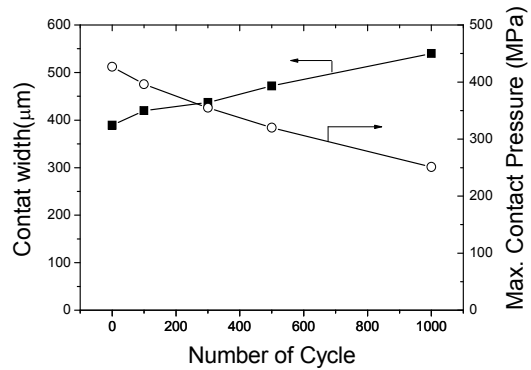


Fig. 5 Contact width and Max. contact pressure with an increase of wear cycles for three-dimensional spherical contact

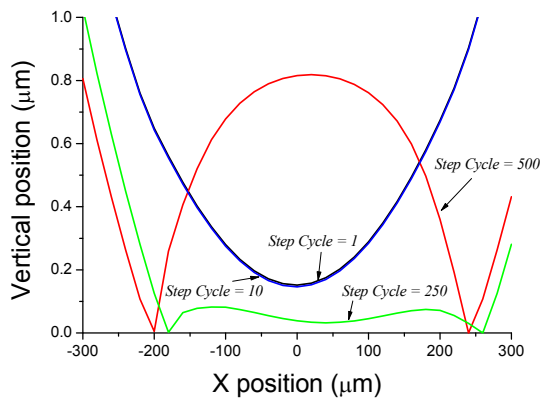


Fig. 6 Effect of step cycle on the wear profile of sphere after 1000 cycles

stick zone에서 발생하는 reversed slip에 의해 cyclic tangential force의 감소가 발생하고 이로 인해 접촉면의 가장자리에서 상대적인 slip 현상을 막아주기 때문에 반대 방향의 profile이 생성되는 것으로 판단된다. 본 해석의 경우 약 10 사이클 이하를 1 step으로 할 경우 1 사이클씩 증가한 경우의 결과와 거의 유사함을 확인하였고 프레팅 해석 시 step cycle의 신중한 설정이 요구될 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 등방성 균질 탄성체의 접촉에 대해 프레팅 마멸 후의 형상을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 효율적인 계산을 위해 경계요소법을 적용하여 2차원 실린더 접촉 및 구 접촉 시의 결과를 제시하였다. 기존의 유한요소법을 적용한 결과와 비교하여 그 정확성을 검증하였으며 비교논문에 비해 본 연구에서 개발된 프로그램의 계산시간은 매우 짧음을 확인할 수 있다. 구축된 프로그램을 3차원 접촉 문제에 적용시켜 해석을 수행하여 사이클 증가에 따른 마멸 형상 변화 및 접촉 폭과 최대접촉압력의 변화를 고찰하였다. 또한 3차원 해석의 효율적인 계산을 위해서는 한 step당 사이클 증가량인 step cycle의 설정이 중요하며, 적절한 계산 Step을 고려하지 않는다면 실제 마모상황과 다른 계산결과가 도출될 가능성이 있음을 보였다. 향후 본 연구의 해석 신뢰도를 높이기 위한 실험결과와의 비교연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2010-065)

참고문헌

- (1) Waterhouse, R. B., 1972, Fretting Corrosion, Pergamon, Oxford, pp. 4.
- (2) Tomlinson, G. A., 1927, "The Rusting of Steel Surfaces in Contact," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 115, pp. 472~483.
- (3) Waterhouse, R. B., 1982, "Occurrence of Fretting in Practice and Its Simulation in the Laboratory, Materials Evaluation Under Fretting Conditions," ASTM STP Vol. 780, pp. 3~4.
- (4) Ratsimba, C. H. H., McColl, I. R., Williams, I. J., Leen, S. B. and Soh, H. P., 2004, "Measurement, Analysis and Prediction of Fretting Wear Damage in a Representative Aeroengine Spline Coupling," *Wear*, Vol. 257, pp. 1193~1206.
- (5) Endo, H. and Marui, E., 2002, "Studies on Fretting Wear: Influence of Rubbing Surface Materials and Some Considerations," *Wear*, Vol. 253, pp. 795~802.
- (6) Galin, L. A., Korovchinsky, I. G., 1977, "Axisymmetric Contact Problem of the Theory of Elasticity in the Presence of Wear," *J. Appl. Math. Mech.*, Vol. 41, pp. 826~831.
- (7) Galin, L. A., 1976, "Contact Problems of the Theory of Elasticity in the Presence of Wear," *J. Appl. Math. Mech.*, Vol. 40, pp. 981~986.
- (8) Korovchinsky, I. G., Rajeev, P. T. and Farris, T. N., 2001, "Wear in Partial Slip Contact," *J. Tribol.* Vol. 123, pp. 848~856.
- (9) Podra, P. and Andersson, S., 1999, "Simulating Sliding Wear with Finite Element Method," *Tribol. Int.*, Vol. 32, pp. 71~81.
- (10) Oqvist, M., 2001, "Numerical Simulation of Mild Wear Using Updated Geometry with Different Step Size Approaches," *Wear*, Vol. 249, pp. 6~11.

- (11) Johansson, L., 1994, "Numerical Simulation of Contact Pressure Evolution in Fretting," *J. Tribol.* Vol. 116, pp. 247~254.
- (12) McColl, I. R., Ding, J. and Leen, S. B., 2004, "Finite Element Simulation and Experimental Validation of Fretting Wear," *Wear*, Vol. 256, pp. 1114~1127.
- (13) Archard, J. F., 1953, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *J. Appl. Phys.*, Vol. 24, pp. 981~988.