

< 논문 >

부분구조법을 이용한 2차원 프레팅 마모 해석

배준우[†] · 채영석^{*} · 이춘열^{**}

(2007년 4월 5일 접수, 2007년 6월 20일 심사완료)

Analysis of Two-Dimensional Fretting Wear Using Substructure Method

Joon Woo Bae, Young Suck Chai and Choon Yeol Lee

Key Words: Contact(접촉), Finite Element Analysis(유한요소해석), Fretting Wear(프레팅 마모), Substructure Method(부분구조법), Wear Constant(마모상수), Work Rate Model(일률 모델)

Abstract

Fretting, which is a special type of wear, is defined as small amplitude tangential oscillation along the contacting interface between two materials. In nuclear power plants, fretting wear caused by flow induced vibration (FIV) can make a serious problem in a U-tube bundle in steam generator. In this study, substructure method is developed and is verified the feasibility for the finite element model of fretting wear problems. This method is applied to the two-dimensional finite element analyses, which simulate the contact behavior of actual tube to support. For these examples, computing time can be reduced up to 1/5 in comparisons with conventional finite element analyses.

기호설명

- P : 수직 하중
- δ : 외부 변위
- K : 마모 상수
- N_e : 사이클 수
- σ_p : 접촉 압력
- u_i : 접선 변위
- w : 마모 깊이

1. 서론

일반적으로 부재를 연결하거나 지지하는 부위에서 진동에 의해 상대변위가 발생하면 이로 인하여 마모 및 피로 현상이 발생하게 된다. 특히 최근에는 원자력 발전소 내 증기발생기 내부 또는 연료봉 등에서 유체유발진동에 의한 프레팅 마모 현상이 보고되고 있다.

Eden 등에 의하여 최초로 이러한 현상에 대한 보고가 있었고, Tomlinson이 이를 프레팅이라 명명한 이후 프레팅에 의한 마모현상은 많은 학자들의 관심분야가 되었으며 Waterhouse는 프레팅을 프레팅 마모, 프레팅 피로, 프레팅 부식 등으로 구분하였다.⁽¹⁾ Ko⁽²⁾는 프레팅 마모 문제를 증기발생기 재료에 대하여 적용하여 주로 실험적으로 마모상수를 고찰하였다.

프레팅 마모에 관한 이론 해석 혹은 모델링에 관해서는 Mackin⁽³⁾ 등이 복합재료 내 티타늄/알루미늄 섬유와 유리 기지사이에서 표면조도가 마모에 미치는 영향 등에 대하여 적용한 사례와 Strömberg⁽⁴⁾가 변분법으로 마모 문제를 이론적으로 해석한 사례 등이 있다. Strömberg는 변분법의

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 대학원 기계공학부

^{*} 영남대학교 기계공학부

^{**} 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : cylee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2570 FAX : (053)810-4627

일종인 augmented Lagrangian법으로 마모 문제를 정식화하고 이를 2차원 펀치 및 평면 접촉에 적용하여 마모 깊이 및 수직 접촉 면압의 분포를 구하였다. 또한, Leen⁽⁵⁾ 등은 2차원 실린더와 평면 접촉문제에 외부하중과 변위 변화에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 본 연구진에서도 전통적인 유한요소법을 이용하여 원자력 발전소 내 증기발생기 세관 재료인 Inconel 690에 대한 프레팅 마모 현상을 해석한 바 있으나,^(6,7) 이 경우 전통적인 유한요소 해석으로는 전체 해석 시간이 너무 많이 소요되었다.

본 연구에서는 프레팅 마모 현상을 해석함에 있어서 전체 해석 시간을 줄이기 위하여 유한요소법 중 하나인 부분구조법(substructure method)을 개발하고 상대변위를 검토하는 것이 본 논문의 목적이다. 전통적인 유한요소해석을 이용한 해석(global model)과 부분구조법(substructure method)을 이용한 해석 결과를 검토하여 방법의 타당성을 입증하였다. 증기발생기 내 Inconel 690 세관(tube)과 지지대를 모사한 2차원 tube-to-support 모델을 개발하여 stick-slip과 gross slip 조건에서 사이클 증가에 따른 접촉 압력과 마모량 변화를 분석하였다.

본 연구의 결과는 가동 중인 원자력발전소의 증기발생기 튜브 및 연료봉 등의 접합부에서 발생할 수 있는 프레팅으로 인한 마모 현상을 근사적으로 예측하는데 기초 자료로 활용 가능하다.

2. 부분구조법의 정의

현재까지의 프레팅 마모 해석 결과를 보면 두 물체가 접촉되는 주위에서 마모가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 아주 세밀하게 접촉되는 영역에 격자를 생성하기 때문에 유한요소 모델의 격자의 수가 전반적으로 많아지게 된다. 이는 다시 말해서, 해석 시간에 영향을 가져오고 반복적인 사이클을 해석하는데 시간소요가 많이 된다. 그러므로 해석 시간을 줄이기 위하여 프레팅 마모 해석 시 유한요소 방법 중 하나인 부분구조법을 도입하였다.

부분구조법은 유한요소 해석 시 관심이 되는 부분만 고려하여 유한요소 모델을 생성하고 나머지 부분은 하나 이상의 superelement로 대체하여 해석을 수행하는 것으로, 이때 superelement는 원

래 형상을 가지는 유한요소 모델을 개별적으로 만들어 해석하여두고 부분구조 모델에서 강성 행렬 등을 읽어서 해석을 수행 하는 방법이다. 다시 말해서, 프레팅 마모 해석 시 관심이 되는 접촉면만 세밀하게 유한요소 모델을 생성하기 때문에 격자의 수가 현저히 감소하므로 매 사이클마다 해석 시간을 감소시킬 수 있다. 또한 마모가 발생하여 부분구조 모델의 접촉면에 변화가 생겨도 superelement와 연계시켜주는 절점이 변화하지 않는다면 부분구조 모델만으로 해석을 계속 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 프레팅 마모 해석

3.1 일률모델

일률모델(work rate model)은 프레팅 마모 시 소산된 에너지율 즉, 수직하중성분에 대한 총 이동거리의 시간에 대한 비율과 마모율로 나타나며 이로부터 마모 깊이(wear depth)는 다음과 같이 정의된다.

$$w \equiv K \cdot \sigma_p \cdot u_t \quad (1)$$

여기서 K 는 마모상수, σ_p 은 접촉 압력, u_t 는 접선 변위로 정의한다.

프레팅 마모 해석에는 ABAQUS 6.5⁽⁸⁾을 마모 계산과 마모 깊이 변화에 대한 유한요소 모델 수정은 FORTRAN을 사용하였다.

3.2 Cylinder-to-plate 프레팅 마모 해석

3.2.1 해석 내용

프레팅 마모 문제에 부분구조법의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 1과 같은 cylinder-to-plate 접촉 문제에 Table 1에 제시한 하중과 변위를 적용하여 비교 하였다. 여기서, case 1은 전형적인 stick-slip 영역에서, case 2는 gross slip 영역에서 프레팅 마모 해석을 수행한 것이다.

Fig. 2(a)는 전체적인 유한요소 모델을 나타낸 것으로 평면변형률(plane strain) 상태로 가정을 하여 실린더의 직경을 12mm, 평판의 높이를 10mm으로 설정하였고 접촉 영역에서 정확한 계산을 위해 각 절점 간격을 10 μ m로 조밀한 격자를 생성하였다. Fig. 2(b)는 부분구조법을 이용한 모

델로써 마모가 발생하는 주요 부분에만 유한요소 모델을 생성하고 나머지 두 부분은 *superelement*로 대체한 모델을 나타 낸 것이다. 해석 시 이용한 물성치는 Super CMV(*high strength alloy steel*)^(5,7)으로 탄성계수를 $E=200\text{GPa}$, 푸아송 비 $\nu=0.3$, 마모상수 $K=1.0\times 10^{-11}\text{Pa}^{-1}$, 마찰계수 $\mu=0.6$ 로 Lagrange 접촉조건을 사용하였고 마모량 계산에서는 일률 모델을 적용하였다.

Table 1 Parameters for cylinder-to-plate problem

	Normal load (N/mm)	Displacement (μm)
Case 1	120	2.5
Case 2	120	10

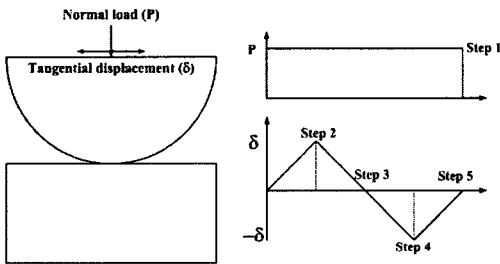
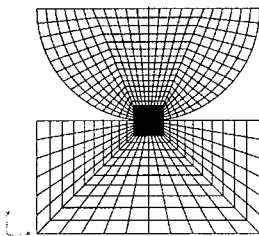
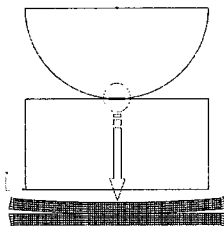


Fig. 1 Cylinder-to-plate contact model



(a) global model



(b) substructure model

Fig. 2 Comparisons of finite element model

3.2.2 상대 변위 평가

Fig. 1에서와 같이 수직 하중 조건은 한 개의 step으로 일정한 값이 계속 적용되며 변위 진폭은 네 개의 step에 걸쳐 반복 슬립이 적용 되는 것을 알 수 있다. 따라서 상대 변위를 검토하기 위해 case 1을 마모 발생과 무관하게 step 5까지 해석을 수행하였다. 상대 변위는 각 step에서의 실린더 변위 변화에서 평판 변위 변화의 값을 뺀 것이고 실제 상대 변위 값은 각 step의 상대 변위 값의 차이로 정의 할 수 있으며 그 식은 아래와 같다.

$$(u_t)_i = (x_c)_i - (x_p)_i \tag{2}$$

$$(\Delta u_t)_{(i+1)-(i)} = (u_t)_{i+1} - (u_t)_i \tag{3}$$

여기서 u_t 는 상대 변위, x_c 는 실린더의 x방향 변위, x_p 는 평판의 x방향 변위, 하중자 i 는 각 step, Δu_t 는 실제 상대 변위를 의미 한다.

Fig. 3은 각 step에서의 상대 변위를 나타낸 것으로 수직 하중만 적용한 경우(step 1)에서는 상대 변위 값이 매우 작음을 알 수 있고 step 2, step 4에서 가장 큰 값을 가지며 변위 진폭의 조건과 동일하게 상하 대칭임을 알 수 있다. Fig. 4는 실제 상대 변위를 비교 한 것으로서 4가지의 경우 모두 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 $(u_t)_2$ 와 $(\Delta u_t)_{2-1}$ 의 상대 변위를 비교 한 것으로 step 1에서 상대 변위가 작기 때문에 상대 변위 증분 값과 step 2의 상대 변위가 동일한 것을 알 수 있다. Fig. 6은 step 5까지 실제 상대 변위 값을 모두 합한 것과 step 2의 상대 변위에 4배를 한 값을 비교 한 것으로 이 또한 동일한 결과를 나타내었다.

상대 변위 평가를 종합적으로 검토해 볼 때 총 다섯 번의 해석을 수행하여 마모 깊이 계산을 해야 하지만 해석 시간을 줄이기 위해 step 2까지만 해석 한 다음 마모 깊이 계산에서 step 2의 상대 변위를 4배하면 전체 마모 깊이와 동일한 결과를 도출하게 된다.

따라서 일률 모델 식 (1)은 아래와 같이 변경하여 마모 깊이를 계산 할 수 있다.

$$w \equiv K \cdot \sigma_p \cdot (u_t)_2 \times 4 \tag{4}$$

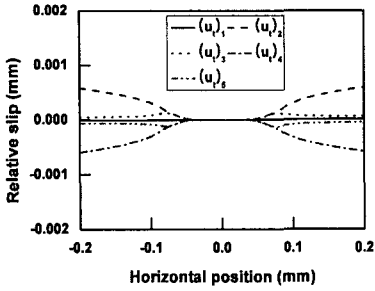


Fig. 3 Comparisons of relative slips with respect to each step

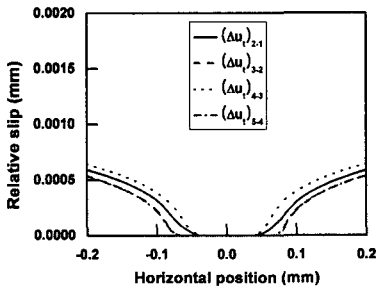


Fig. 4 Comparisons of relative slips with respect to Δu_t

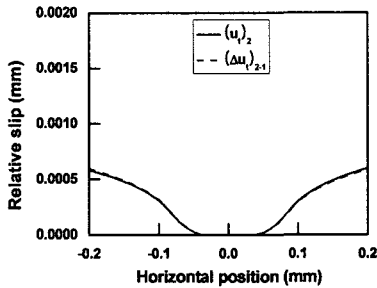


Fig. 5 Comparisons of relative slips from $(u_t)_2$ and Δu_t

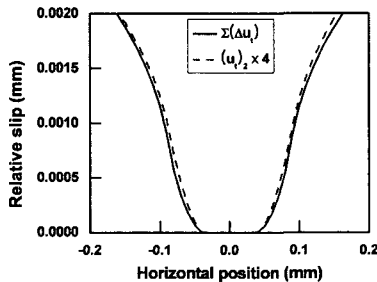


Fig. 6 Comparisons of relative slips from $\sum \Delta u_t$ and $(u_t)_2 \times 4$

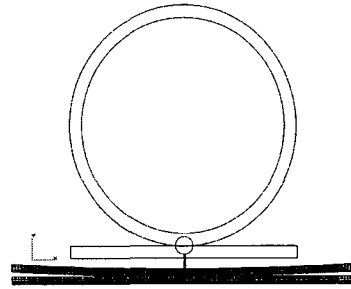


Fig. 7 Finite element substructure for tube-to-support model

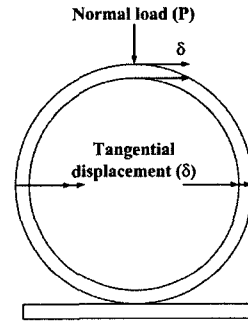


Fig. 8 Tube-to-support contact model and boundary condition

3.3 Tube-to-support 프레팅 마모 해석

3.3.1 해석 내용

앞 절에서 부분구조법의 타당성을 검증하였으며 이를 적용하여 원자력발전소 증기발생기 2차 측에 사용되어지는 Inconel 690 tube와 지지대 문제로 확장하여 2차원 유한요소 해석을 하였다. 부분구조법 해석 시 평면변형률 상태로 가정하였고 튜브의 직경은 19mm, 두께는 1mm이며, 지지대의 두께를 1mm으로 설정하여 Fig. 7과 같이 모델링 하였다. 하중과 변위의 위치는 cylinder-to-plate와 다른 형태로 변경하여 Fig. 8과 같이 적용하였다.

3.3.2 상대 변위 평가

Cylinder-to-plate 접촉 문제와 같이 상대 변위를 평가하기 위해서 Fig. 8과 같은 하중과 변위 적용 위치에 수직 하중은 30N으로 고정 시키고 변위 진폭을 5 μ m와 30 μ m의 두 가지 경우에 대해 마모와 무관하게 step 5까지 해석을 하여 상대 변위

를 비교 검토하였다.

Fig. 9는 각 step별 상대 변위를 비교 한 것으로 Fig. 9(a)처럼 변위 진폭 $5\mu\text{m}$ 에 대해서는 stick 영역이 발생되어 지는 것을 알 수 있으며 step 1에서는 cylinder-to-plate 문제와 달리 상대 변위 값이 다른 step에서와 같이 크게 나오기 때문에 마모 깊이 계산에서 식 (4)를 사용 할 수 없게 된다. 또한 step 1을 기준으로 하여 상대 변위 변화가 일어나므로 $(u_t)_1$ 의 값을 무시 할 수 없다. Fig. 9(b)는 변위 진폭 $30\mu\text{m}$ 에 대한 각 step별 상대 변위 값으로 step 1의 상대 변위 값이 작게 나왔으나 step 1을 중심으로 하여 상대 변위 변화가 일어나는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(a)은 Δu_t 을 비교 한 것으로 $(\Delta u_t)_{2-1}$ 을 제외하고 거의 좌우가 대칭이며 좌측과 우측의 상대 변위 변화의 합이 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서 $(\Delta u_t)_{2-1}$ 에 대해서도 좌우 대칭으로 만들어 주기 위해 좌우의 값을 서로 더해 주었다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\Delta u_t)_{2-1} = (\Delta u_t)_{2-1}^- + (\Delta u_t)_{2-1}^+ \quad (5)$$

여기서, $(\Delta u_t)_{2-1}$ 는 좌우 대칭된 상대 변위 증분 값이며 상첨자 x는 접촉 폭에서의 x좌표를 의미 한다. Fig. 10(b)은 $30\mu\text{m}$ 에 대한 Δu_t 을 비교 한 것으로 $(\Delta u_t)_{2-1}$ 이 중심이 되어 상 하 대칭이 되는 것을 알 수 있다. 다시 말해 $(\Delta u_t)_{2-1}$ 가 기준이 되어 실제 상대 변위 변화가 일어나는 것이다. 이 경우에도 stick-slip과 같은 조건에서 일률모델을 사용하기 위해 좌우 대칭된 상대 변위 증분 값을 만들어 주었다.

Fig. 11에 상대 변위 증분의 합과 $(\Delta u_t)_{2-1}$ 의 값을 2배한 결과를 비교 한 것으로 외부 변위 $5\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 두 경우 모두 거의 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 식 (5)에서 정의한 상대 변위를 이용하면 마모 깊이 계산은 아래 식으로 대체 할 수 있다.

$$w \equiv K \cdot \sigma_p \cdot (\Delta u_t)_{2-1} \times 2 \quad (6)$$

위의 상대 변위 계산 방법을 토대로 여러 하중과 변위 변화에 대해 미세관과 지지대의 프레팅 마모맵(wear map)을 구현하였다. (Fig. 12)

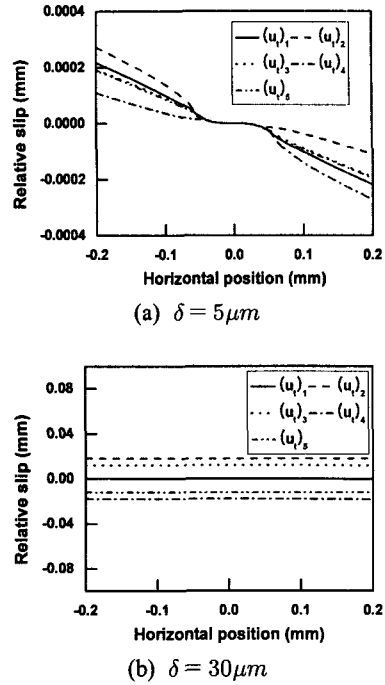


Fig. 9 Comparisons of relative slips with respect to each step

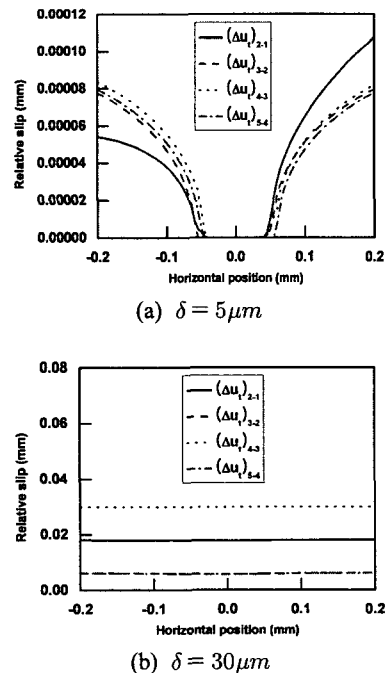
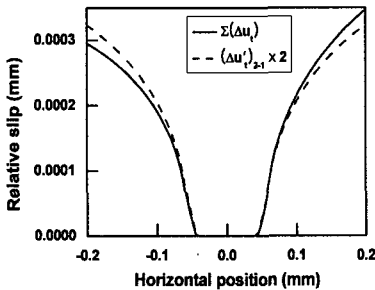


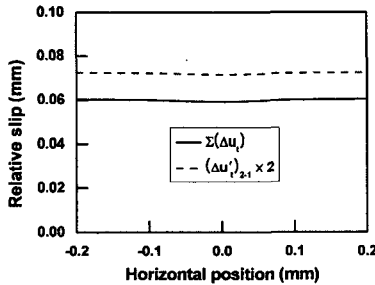
Fig. 10 Comparisons of relative slips with respect to Δu_t

Table 2 Parameters for tube-to-support model

	Normal load (N/mm)	Displacement (μm)
Case 1	30	10
Case 2	30	20



(a) $\delta = 5 \mu m$



(b) $\delta = 30 \mu m$

Fig. 11 Comparisons of relative slips from $\sum \Delta u_i$ and $(\Delta u_i)_{2-1} \times 2$

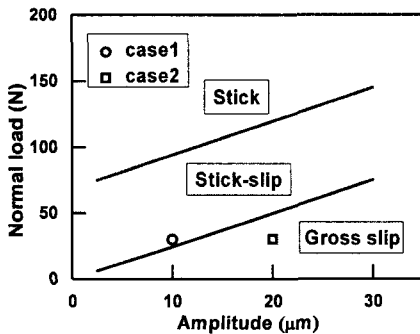
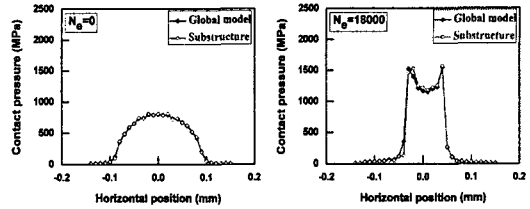
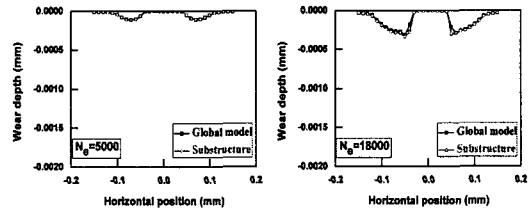


Fig. 12 Fretting wear map for tube-to-support model



(a) Contact pressure



(b) Wear depth

Fig. 13 Comparisons of results from global and substructure (case 1)

Inconel 690 tube와 지지대의 마모 특성을 알아보기 위해서 Table 2와 같이 두 가지의 경우에 대해서 프레팅 마모 문제를 해석을 수행하여 비교 검토하였다. Case 1은 stick-slip 영역이며 case 2는 gross slip 영역의 마모 해석이다.

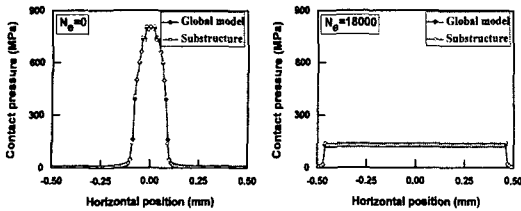
지지대의 재료는 SS440이며 Inconel 690의 마모 상수 값은 $K = 25 \times 10^{-15} Pa^{-1}$ 이나 유한요소 해석 시 해석시간을 줄이기 위해 유효 마모상수^{6,7} 값을 도입하였고 마찰 계수는 $\mu = 0.6$ 으로 설정하였다.

4. 프레팅 마모 해석 결과

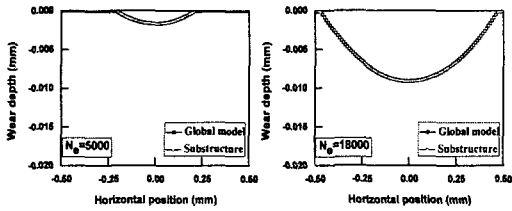
4.1 Cylinder-to-plate 프레팅 마모 해석 결과

Fig. 13과 Fig. 14는 전체 모델과 부분구조법을 이용한 해석 결과를 비교한 것으로 그 결과 접촉 압력 및 마모량의 변화 등 case 1, case 2 모두 아주 유사한 결과를 나타내었다. 따라서, 부분구조법을 이용한 프레팅 마모 해석이 타당하다고 할 수 있다.

해석 시간을 비교하여 보면 전체 모델 사용 시 한 사이클 해석 시간은 158초이며 부분구조법을 이용할 경우에는 약 30초의 시간이 소요 된다. 이는 부분구조법을 사용하면 전체 해석 시간을 현저히 줄일 수 있어 효과적이라 할 수 있다.



(a) Contact pressure



(b) Wear depth

Fig. 14 Comparisons of results from global and substructure (case 2)

4.1.2 Tube-to-support 프레팅 마모 해석 결과

Fig. 15~16은 마모 발생에 따라 각 사이클에서의 접촉 압력 변화에 대해 유한요소 해석 결과를 나타내었다. Fig. 15의 stick-slip 경우는 slip이 발생하는 곳에 유한요소 모델의 격자가 미세하게 변화하며 Fig. 16의 gross slip에서는 사이클이 증가함에 따라 하중을 가하기 전 점 접촉에서 점차 간격이 벌어져 선 접촉으로 변화되는 것을 알 수 있다. 이것은 접촉 압력 결과처럼 gross slip 경우 접촉 압력 범위가 점점 넓어지게 되는 것을 의미하며 반면 stick-slip 경우 초기 점 접촉을 유지하기 때문에 접촉 폭의 변화가 거의 없게 된다.

Fig. 17은 case 1의 결과로 사이클 변화에 따른 접촉 압력과 마모량을 나타 낸 것으로 사이클 수가 증가함에 따라서 stick-slip 경계에서 접촉 압력과 마모량이 급격히 진행되는 것을 관찰할 수 있으며 이는 일반적인 실험에서와 같이 유사한 도넛 모양의 마모 형태라 할 수 있다.

Fig. 18은 case 2의 결과로 사이클이 진행함에 따른 접촉 압력과 마모량의 변화로써 사이클이 진행 될수록 접촉 압력이 점점 감소하고 접촉면이 넓어지면서 접촉면 전체에 걸쳐서 많은 마모량이 발생하는 gross slip의 결과를 보였다.

한 사이클 동안의 해석시간을 검토해 볼 때 전체 모델에 대해서 약 1/5의 시간을 절감 할 수 있었다.

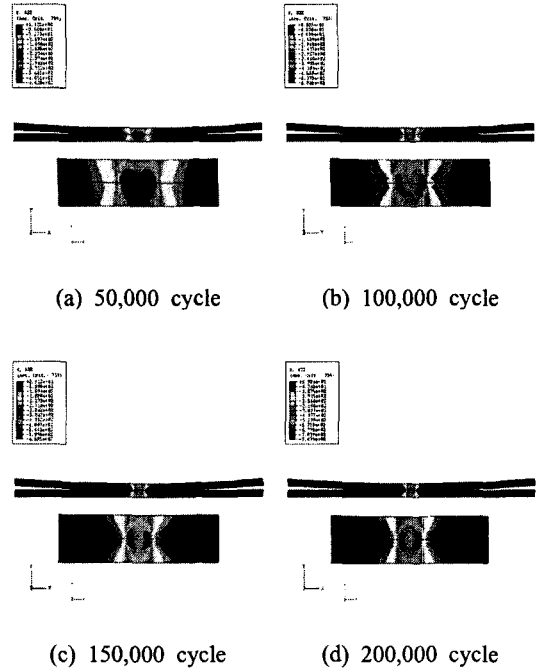


Fig. 15 Variations of normal stresses (case 1)

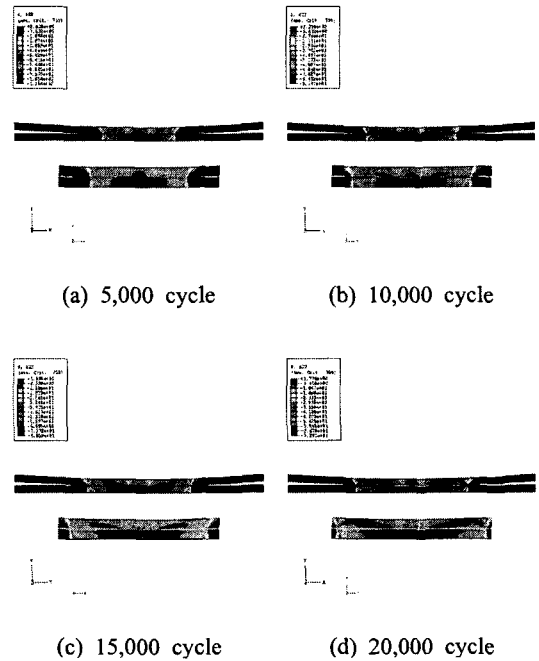


Fig. 16 Variations of normal stresses (case 2)

5. 결론

- 부분구조법을 이용한 유한요소 모델을 제시하였고 이를 2차원 cylinder-to-plate 접촉 문제에 전체 모델과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

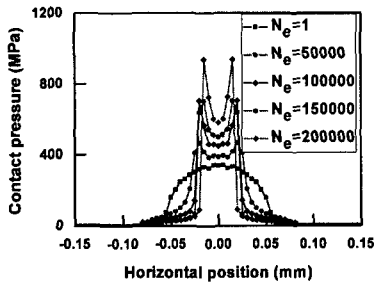
- 증기발생기 내 Inconel 690 세관과 지지대를 모사한 2차원 tube-to-support 모델을 개발 및 프레팅 마모 해석을 수행하여 각 영역에서의 접촉 압력과 마모량의 변화를 사이클 증가에 따라 분석하였다.

- 실제 마모 실험과 정량적 비교는 하지 못하였으나, 프레팅 마모 면적 및 마모 경향 등은 정성적으로 유사한 거동을 나타내었다.

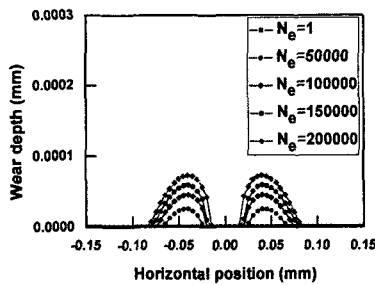
- 본 연구에서 제시한 부분구조법을 이용하면 약 1/5 정도의 해석 시간을 절약할 수 있다.

참고문헌

- (1) Waterhouse, R.B. and Lindley, T.C., 1994, "Fretting Fatigue," *Mechanical Engineering Publications Limited*, London.
- (2) Ko, P.L., 1979, "Experimental Studies of Tube Fretting in S/G and Heat Exchange," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 101, p. 125.
- (3) Mackin, T.J., Yang J. and Warren, D., 1992, "Influence of Fiber Roughness on the Sliding Behavior of Sapphire Fiber and Matrices," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 75, p. 3358.
- (4) Strömberg, N., 1997, "An Augmented Lagrangian Method for Fretting Problem," *Eur. J. Mech. A/Solid*, Vol. 16, No. 4, p. 573.
- (5) McColl, I.R., Ding, J. and Leen, S.B., 2004, "Finite element simulation and experimental validation of fretting wear," *Wear*, Vol. 026, p. 521.
- (6) Chai, Y.S., Lee, C.Y., Bae, J.W. and etc, 2005, "Finite Element Analysis of Fretting Wear Problems in Consideration of Frictional Contact," *Key Eng. M ails.*, Vol. 298, p. 1406.
- (7) Chai, Y.S., Bae, J.W. and Lee, C.Y., 2006, "Finite Element Analysis of Fretting Wear under Various Contact Conditions," *Key Eng. Mails.*, Vol. 312, p. 375.
- (8) ABAQUS 6.5, 2005, "User's and Theory Manual," *HKS Inc.*, US.

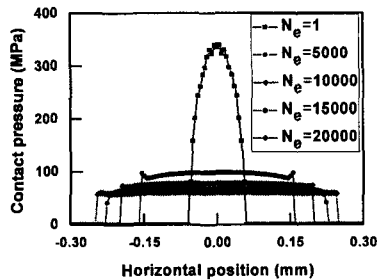


(a) Distributions of contact pressure

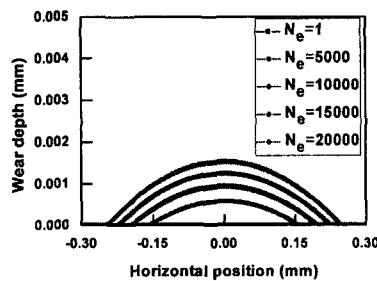


(b) Distributions of wear depth

Fig. 17 Fretting wear simulations with increase of cycle numbers (case 1)



(a) Distributions of contact pressure



(b) Distributions of wear depth

Fig. 18 Fretting wear simulations with increase of cycle numbers (case 2)