

## 증기발생기 2차측 프레팅 마모 문제의 유한요소 해석

### Finite Element Analysis of the Fretting Wear Problem on the Secondary Side of Steam Generator

이춘열, 채영석  
영남대학교 기계공학부  
경북 경산시 대동 214-1

#### 요 약

원자력발전소 증기발생기 내부에서는 유체유발진동(FIV)으로 인하여 증기발생기 내 튜브와 지지대와의 사이에서 미세한 진동을 발생하고, 계속적으로 진동을 받게 되면 튜브는 마모 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 프레팅 마모는 결국 튜브의 파손을 유발하며, 이로 인해 방사성 물질로 오염된 1차측 냉각재가 2차측 유체로 누설됨으로써 원자력 발전소의 안정성 및 이용성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

본 연구에서는 프레팅 마모 현상을 정량적으로 규명하기 위하여 이 현상을 전산 모사할 수 있는 유한요소 모델의 개발 및 방법론을 제시하는데 목적이 있다. 유한요소법에 의한 프레팅 마모의 해석을 위해 2차원 해석 모델과 3차원 해석 모델을 각각 선정하였다. 2차원 해석의 목적은 본 연구 해석 방법의 타당성을 입증하기 위함이며, 이를 근거로 하여 실제 프레팅 마모 실험을 모사한 3차원 해석을 하였다. 2차원 해석에서는 프레팅 마모 문제를 탄성 접촉 문제로 생각하여, 기존해가 존재하는 펀치 대 평면 접촉으로 해석을 하였다. 마모 모델 중에서는 일률모델을 택하였으며, 마모상수를 증가시키고 cycle수를 감소시켜 해석하는 방법의 타당성을 입증하였다. 이 결과를 3차원 모델로 확장 적용하여 실제 실험을 모사한 튜브 대 튜브 접촉 문제로 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

이러한 연구를 통하여 가동 중인 원자력발전소의 증기발생기 튜브 혹은 기타 원전 발전 설비의 접합부에서 발생할 수 있는 프레팅으로 인한 마모 현상을 근사적으로 예측 가능할 것이다. 이를 근거로 하여 원전 증기 발생기 튜브의 건전성 평가의 기초 자료로 활용 가능하며, 추후 증기 발생기 설계에도 간접적인 자료를 제공할 수 있다.

#### Abstract

Fretting wear, which is a special type of wear, is defined as the small amplitude

relative motion along the contacting interface between the two materials. In nuclear power plant, it could be a serious problem that flow induced vibration in a U-tube bundle in steam generator could cause fretting wear and fatigue failure. Structural integrity of the steam generator in a nuclear power plant is very much dependent upon the fretting wear characteristics of the Inconel 690 U-tube. In this study, finite element analysis of the fretting wear on the secondary side of the steam generator was investigated which arises from the FIV (flow induced vibration) between U-tubes and their supports or foreign objects.

Two-dimensional and three-dimensional models using finite element method were adopted to investigate the fretting wear problem. The purpose of two-dimensional finite element analysis, which simulates the contact between punch vs. plate, is to prove the methodology of application of finite element analysis to the fretting wear problem. Normal contact pressures and wear gaps along the contact surface were plotted under the different values of wear parameters and a number of cycles. The two-dimensional solutions of the study are in good agreement with the previous results by Strömberg. The results of the analyses showed the donut type of wear along the contacting boundary, which is a special feature of fretting wear.

In three-dimensional finite element analysis, quarterly symmetric model was taken to simulate the tubes contacting in right angle. Wear parameter of Inconel 690 in work rate model was taken  $K=267 \times 10^{-15} Pa^{-1}$  from the experiment using a piezoelectric actuator type of fretting wear test rig. Contact pressure distributions and wear gaps are plotted along the contact surface in three-dimensional finite element analysis. Three-dimensional simulation of wear volume is also done and is compared with the experimental results.

## 1. 서론

산업설비 및 구조물 등에서 파손 사고의 대부분이 그것을 구성하고 있는 부재의 마모 및 그로 인한 피로가 원인이 되어 일어난다는 것은 일반적으로 잘 알려져 있는 사실이다. 고온 피로, 부식 피로, 프레팅을 포함한 피로가 유발하는 파손 사례에 관한 연구는 비교적 오랫동안 활발히 진행되고 있으나, 이에 비하여 프레팅에 의한 마모에 대한 연구는 상대적으로 많은 연구가 진행되어 있지 않다.

프레팅의 정의는 ASM에 따르면 접촉하고 있는 두 고체의 표면 사이에 작은 진폭으로 진동하는 움직임(일반적으로 접선 방향)으로 정의되고 있다.<sup>1)</sup> Eden 등<sup>2)</sup>에 의하여 최초로 이러한 현상에 대한 보고가 있었고, Tomlinson<sup>3)</sup>이 이를 프레팅이라 명명한 이후 많은 학자들의 관심분야가 되었다. Waterhouse<sup>4)</sup>는 프레팅을 프레팅마모, 프레팅피로, 프레팅부식 등

과 같이 세 가지로 구분하였다. 기타 참고문헌<sup>5-11)</sup>에 프레팅 마모 및 프레팅 피로에 관한 일반적 이론 및 실험결과가 언급되고 있다. 최근 Vingsbo와 Söderberg<sup>9)</sup>는 프레팅 마모 영역을 고착(stick), 고착 및 미끄럼(mixed stick and slip), 미끄럼(gross slip), 미끄럼 이동(sliding) 등 네 개의 영역으로 구분하였다. Ko<sup>8)</sup> 및 Fisher<sup>10,11)</sup> 등은 프레팅 마모 문제를 증기발생기 재료에 대하여 적용하여 주로 실험적으로 마모상수를 고찰하였다. 국내에서도 원전재료인 Zircalloy 튜브와 Inconel 튜브를 중심으로 대부분 실험적인 마모상수를 도출하고 있다<sup>12-16)</sup>.

프레팅 마모에 관한 이론 해석 혹은 모델링에 관해서는 Mackin<sup>17)</sup> 등이 복합재료 내 티타늄/알루미늄 섬유와 유리 기지사이에서 표면조도가 마모에 미치는 영향 등에 대하여 적용한 사례와 Strömberg<sup>18)</sup> 가 변분법으로 마모 문제를 이론적으로 해석한 사례 등이 있다. Strömberg<sup>18)</sup>는 변분법의 일종인 augmented Lagrangian법으로 마모 문제를 정식화하고 이를 2차원 편차 및 평면 접촉에 적용하여 마모 깊이 및 수직 접촉 면압의 분포를 구하였다.

프레팅에 영향을 미치는 요인들은 접촉면 사이의 수직접촉하중, 미끄럼 변위의 진폭, 가진 주파수, 표면 및 접촉의 형태 등을 들 수 있다. 이러한 요인들을 고려하여 Archard<sup>19)</sup>는 이론적으로 마모량을 구할 수 있는 모델을 제시하였다.

$$V = K \cdot \frac{F \cdot S}{3 \cdot H} \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 마모량,  $F$ 는 수직 하중,  $S$ 는 총 이동 거리,  $H$ 는 재료의 경도, 그리고  $K$ 는 상수로 재료와 환경이 같다면 똑같은 값을 갖는다. 증기발생기 프레팅 마모로 인한 잔존 수명 예측을 위하여 Fisher<sup>10,11)</sup> 등은 일률모델(work rate model)을 제안하였다. 일률모델은 프레팅 마모 시 소산된 에너지 즉, 수직하중성분에 대한 총 이동거리의 시간에 대한 비율과 마모율을 관련지어서 다음과 같이 정의한다.

$$W = \frac{1}{t} \int F_n \cdot ds \quad (2)$$

$$V = KW \quad (3)$$

여기서  $V$ 는 마모율,  $F_n$ 는 수직 하중,  $s$ 는 이동 거리, 그리고  $K$ 는  $Pa^{-1}$ 의 단위를 갖는 마모상수로 정의한다. 최근 프레팅 마모로 인한 마모량의 계산 시에는 일률모델에서 정의한 마모상수  $K$ 를 사용하는 추세로 본 연구에서도 이를 사용하였다.

본 연구에서는 프레팅 마모 현상을 정량적으로 규명하기 위하여 이 현상을 전산 모사할 수 있는 유한요소 모델의 개발 및 방법론을 제시하는데 목적이 있다. 유한요소법에 의한 프레팅 마모의 해석을 위해 2차원 해석 모델과 3차원 해석 모델을 각각 선정하였다. 2

차원 해석의 목적은 본 연구 해석 방법의 타당성을 입증하기 위함이며, 이를 근거로 하여 실제 프래팅 마모 실험을 모사한 3차원 해석을 하였다. 2차원 해석에서는 프래팅 마모 문제를 탄성 접촉 문제로 생각하여, 기존해가 존재하는 펀치 대 평면 접촉으로 해석을 하였다. 마모 모델 중에서는 일률모델을 택하였으며, 마모상수를 증가시키고 cycle수를 감소시켜 해석하는 방법의 타당성을 입증하였다. 이 결과를 3차원 모델로 확장 적용하여 실제 실험을 모사한 튜브 대 튜브 접촉 문제로 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

본 연구의 결과는 가동 중인 원자력발전소의 증기발생기 튜브 혹은 기타 원전 발전설비의 접합부에서 발생할 수 있는 프래팅으로 인한 마모 현상을 근사적으로 예측하는데 기초 자료로 활용 가능하며, 추후 증기 발생기 설계에도 간접적인 자료를 제공할 수 있다.

## 2. 유한요소 해석

유한요소 해석에서는 2차원 문제의 해석을 통해 해석 방법의 타당성을 검증하고 이러한 방법을 실제 프래팅 마모 실험을 모사한 3차원 문제의 해석으로 적용하는 방법을 택하였다.

### 2.1 2차원 유한요소 해석

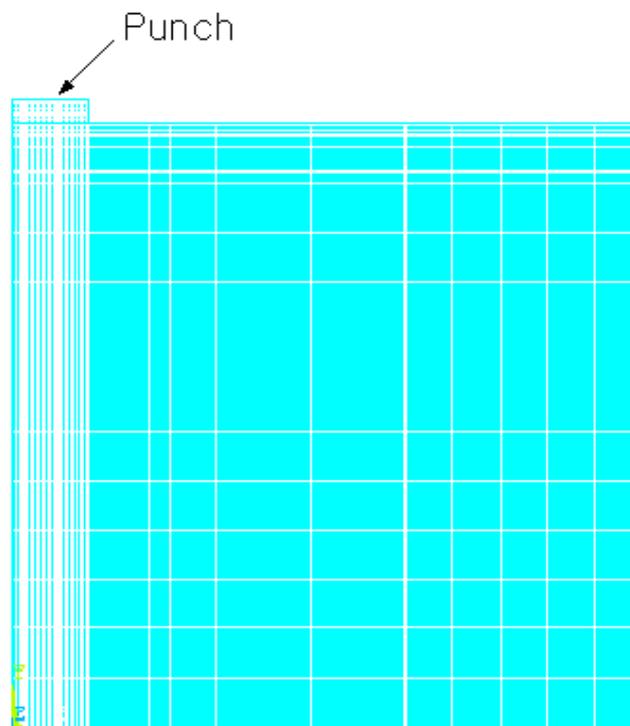


Fig. 1 Two Dimensional Finite Element Model

본 연구의 해석방법의 타당성을 검증하는 방법으로 Strömberg<sup>18)</sup>에 의한 기존해와 비교하기 위하여 2차원 펀치 문제를 택하였다. 펀치 문제는 펀치 모양의 물체와 평면사이의 마모 현상을 다룬 것으로 이때 펀치의 접촉부의 모양은  $y=c \cdot x^4$  형태의 프로파일을 가정하였고 접촉 부위만을 고려하여 그림 1과 같이 2차원 유한요소 해석 모델을 생성하였다. 이 경우 평면변형으로 가정하여 1/2 모델링 하였고 요소의 형태는 4절점 사각형요소를 사용하였다. 모델의 재료는 탄성계수  $E=210 \times 10^9$ , 포와송 비  $\nu=0.3$ , 마찰계수  $\mu=0.4$ , 마모상수  $K=1.0 \times 10^{-11} Pa^{-1}$ , 펀치의 형상계수  $c=0.75m^{-3}$ , 및 indentation은  $0.1 mm$ 로 놓고 해석을 수행하였다<sup>18)</sup>.

일률모델(work rate model)로부터 마모 깊이(wear gap)는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{wear gap} \equiv K \cdot u_t \cdot \sigma_n \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 마모상수,  $u_t$ 는 접선변위의 차이로 정의되는 상대슬립,  $\sigma_n$ 은 법선접촉응력으로 정의한다. 탄성 2차원 유한요소 해석으로 각 절점 및 요소의 응력장과 변위장을 구한 후, 일률모델을 적용하여 마모 깊이를 구한다. 첫 번째 cycle이 지나면 그 다음 cycle에서는 마모 깊이가 발생한 만큼 유한요소 mesh를 이동하여 해석하는 알고리즘으로 전체적인 유한요소 해석을 행한다.

## 2.2 3차원 유한요소 해석

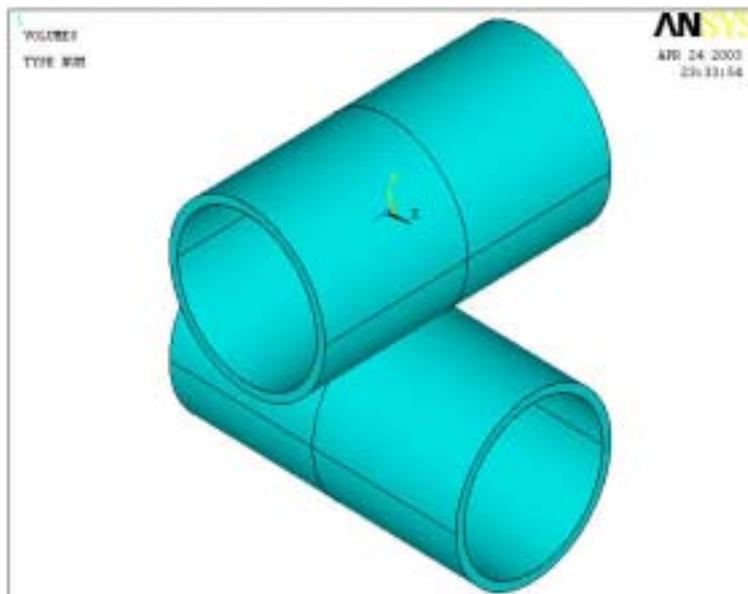


Fig. 2 Three Dimensional Model (Full)

3차원 해석에서는 실제 실험을 모사하여 그림 2와 같이 두개의 원통형 Inconel 시편이 서로 직각으로 교차하면서 접촉 및 프레팅 마모를 발생시키는 것으로 모델링을 하였다. 이 때 원통형 Inconel 시편의 지름은 19mm, 두께 1mm, 길이 35mm 이다. 3차원 해석의 간략화와 해석 시간의 단축을 위해 그림 3과 같이 1/4 대칭 3차원 유한요소 모델을 생성하였으며, 요소의 형태는 8절점 사각형요소를 사용하였다.

접촉부위에는 심각한 응력의 구배가 예상되어 전체 영역과 접촉부위 요소의 크기를 다르게 처리하였다. 접촉부위를 제외한 전체 영역은 비교적 크게 meshing 하였고, 접촉부위에는 좀 더 세밀하게 40×40 모델로 하여 총 요소 수는 12800개, 총 절점 수는 40512로 해석을 수행하였다. 하중 조건은 모델에 굽힘 현상이 생기지 않도록 하기 위하여 자른 단면의 수직 방향으로 구속하였고 70N의 정하중을 위쪽 시편에 수직방향의 압력으로 환산하여 1 MPa을 적용하였다. 또한 프레팅 마모의 진폭을 실험조건<sup>20)</sup>과 같이 100 μm로 가하였으며, 해석결과는 2차원 해석에 비하여 많은 해석 시간의 소요가 예상되었다.

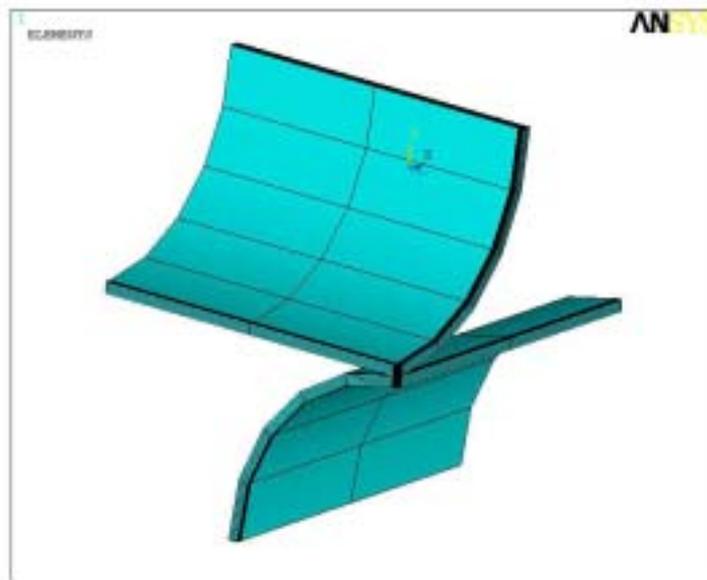


Fig. 3 Three Dimensional Finite Element Model

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 2차원 펀치 문제의 해석 및 결과

2차원 모델의 유한요소 해석 시 총 요소 수 및 절점 수가 많은 이유로 1 cycle 해석 시 소요되는 시간은 약 4분이며, 전체적으로 16000 cycles 을 해석한다면 총 44일의 소요시간을 예상할 수 있다. 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위한 방법으로 마모상수에 일정한

상수를 곱하는 반면, 해석 cycle수는 일정한 상수로 나누어서 실제 해석 cycle 수를 줄이는 방안을 생각하였다. 먼저 마모상수  $K$  와 해석 cycle수  $N$  에 파라메타  $s$ 를 곱하여 유효마모상수 (effective wear constant)  $K_e (= K \cdot s)$  와 유효 cycle수 (effective cycle number)  $N_e (= N \cdot s)$ 를 각각 정의한다. 본 모델에서 택한 마모상수는  $K=1.0 \times 10^{-11} Pa^{-1}$ 이나 실제 해석 시에는 마모상수를  $s$ 배한 유효마모상수  $K_e (= K \cdot s)$  로 해석하고, 실제 해석 cycle 수  $N$  은 유효 cycle수 (effective cycle number)  $N_e$  를  $\frac{1}{s}$  배로 줄여서 ( $N = \frac{N_e}{s}$ ) 해석하여도 유효 cycle 수만큼 해석하는 효과를 도입하였다. 이와 같은 방법으로 파라메타  $s$ 를 변화시키면서 해석한 후 결과가 동일하다면 이러한 파라메타 도입 방법이 타당하다고 볼 수 있다.

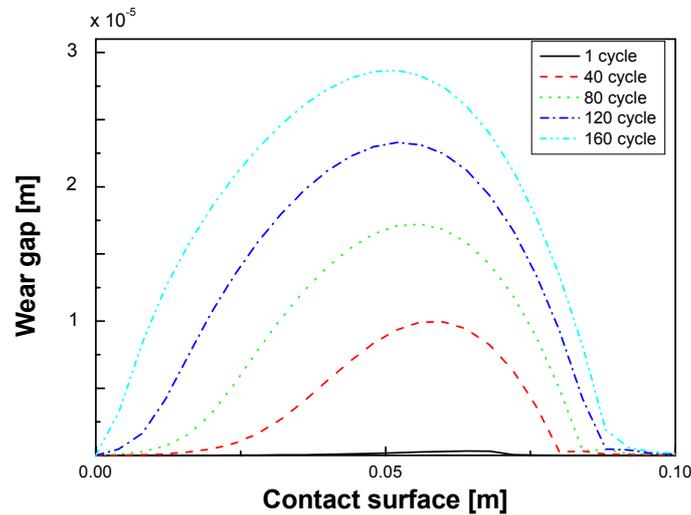


Fig. 4 Distributions of Wear Gaps Along the Contact Surface with Increase of Cycle Numbers ( $s=100$ )

먼저  $s=100$  ( $K_e=1.0 \times 10^{-9} Pa^{-1}$ ,  $N=160$ ) 일 때 수행한 해석 결과를 그림 4, 5 및 6에 나타내었다. 그림 4에는 펀치와 평면의 접촉면을 따라 마모 깊이의 분포가 cycle 수의 변화에 따라 진전되는 모양을 나타내었다. 접촉 중앙부 ( $x=0.0$ ) 에는 대칭조건으로 인하여 상대슬립( $u_t$ )이 없으므로 마모가 발생하지 않는다. 접촉영역의 크기는 cycle 수의 증가에 따라 증가하였다. 최대 마모 깊이는 접촉중앙부와 접촉경계부의 사이에서 발생하였고, 이는 프레팅 마모에서 관찰되는 특징 중 하나인 동심원 형태 도넛 모양의 마모 표면을 설명해 주고 있다. 그림 5에는 cycle 수의 증가에 따라 최대마모깊이의 값의 변화를 나타내었다. 마모 cycle이 증가함에 따라 최대마모깊이는 비교적 선형성을 가지면서 증가

하였다. 그림 6에는 접촉면을 따라 법선접촉응력의 분포가 cycle 수의 변화에 따라 진전되는 모양을 나타내었다. 초기 cycle에서의 법선접촉응력은 접촉경계부를 제외하고는 균일한 분포를 가지다가 cycle수가 증가할수록 접촉중앙부에서 응력 값이 매우 증가하였다.

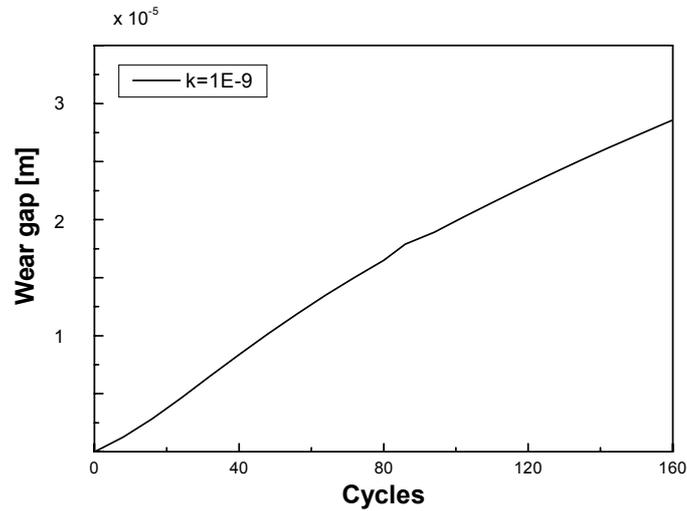


Fig. 5 Variation of Maximum Wear Gap with Increase of Cycle Numbers ( $s = 100$ )

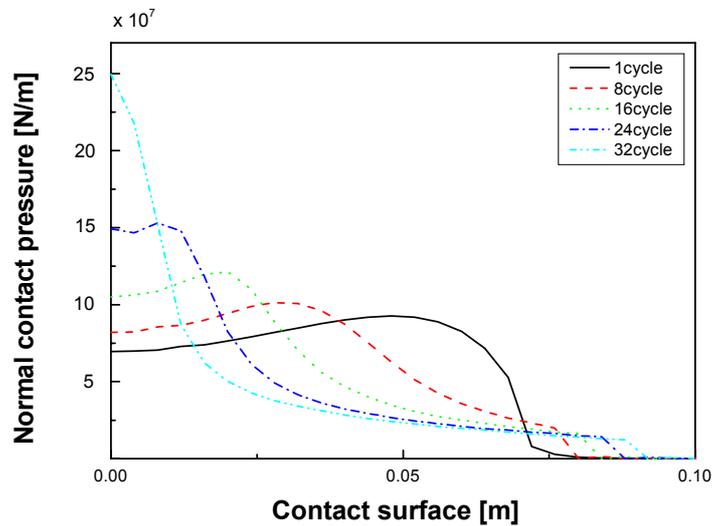


Fig. 6 Distributions of Normal Contact Pressures Along the Contact Surface with Increase of Cycle Numbers ( $s = 100$ )

파라메타  $s$  도입 방법의 타당성을 증명하기 위하여  $s$ 를 100, 200, 500의 서로 다른 값들로 택하여 해석한 후 결과를 그림 7과 8에 나타내었다. 그림 7에는 접촉면을 따라 최종 cycle ( $N_e = 16000$ )에서 마모 깊이의 분포를 파라메타  $s$ 를 변화시키면서 그려보았다. 그림 8에는 cycle 수의 증가에 따라 최대마모깊이의 값의 분포를 파라메타  $s$ 를 변화시키면서 나타내었다. 두 결과 모두 동일하므로 마모상수를 늘여 마모량을 증가시키고 cycle 수를 비례적으로 줄여서 해석하는 방법이 타당함을 증명하였고 이는 최소한의 해석시간으로 타당한 해석결과를 얻을 수 있는 방법임이 입증되었다.

그림 9 와 10 에서는 본 연구에서 구한 해와 Strömberg<sup>18)</sup>의 해를 비교하여 본 연구의 타당성을 증명하였다. 그림 9에는 접촉면을 따라 마모 깊이의 분포가 cycle 수의 변화에 따라 진전되는 모양을 비교하였다. 정성적인 비교로는 유사한 거동을 보였으나 정량적인 값에서는 최대상대오차 50% 범위에서 차이를 보였다. 두 해석 모두 마모 모델에서는 일률모델을 택하였으므로 마모량은 cycle 횟수에 비례하리라 예상하여 본 연구의 결과가 좀 더 타당할 수 있다. 이러한 정량적인 차이는 Strömberg<sup>18)</sup>의 해의 경우 이론적인 정식화 후 수치해석 시 유한요소 mesh의 제한적인 사용 등이 원인이 될 수 있다. 그림 10에는 접촉면을 따라 법선접촉응력의 분포가 cycle 수의 변화에 따라 진전되는 모양을 비교하였다. 이 역시 초기 cycle에서의 법선접촉응력은 접촉경계부를 제외하고는 비교적 균일한 분포를 가지며, cycle수가 증가할수록 접촉중양부에서 응력 값이 증가하는 등의 정성적으로는 유사한 결과를 보인다.

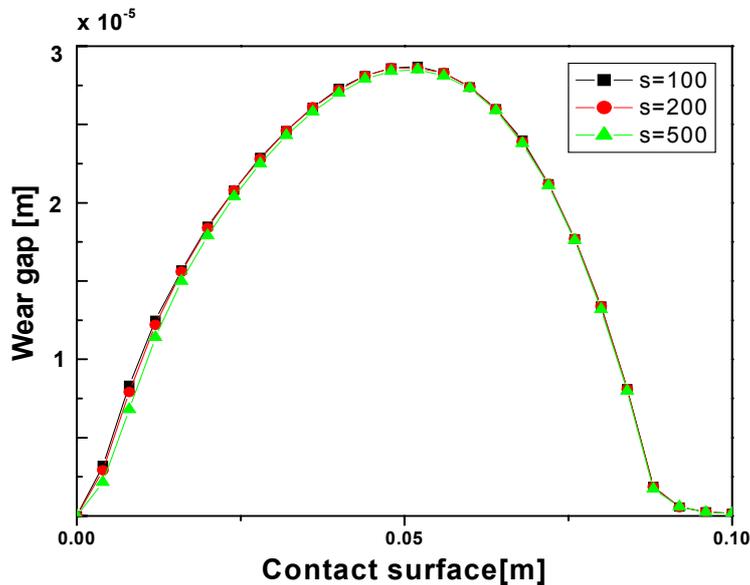


Fig. 7 Comparison of Wear Gaps with Position under Different Levels of Parameter  $s$

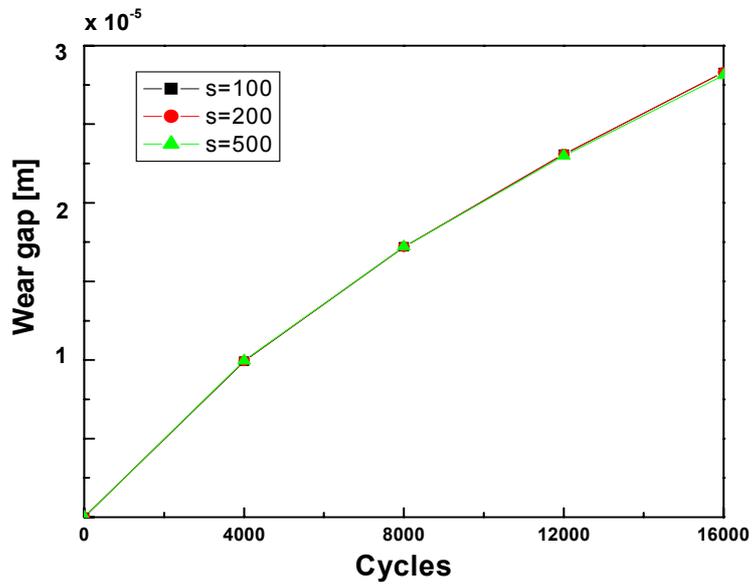


Fig. 8 Comparison of Maximum Wear Gaps with Increase of Cycle Numbers under Different Levels of Parameter  $s$

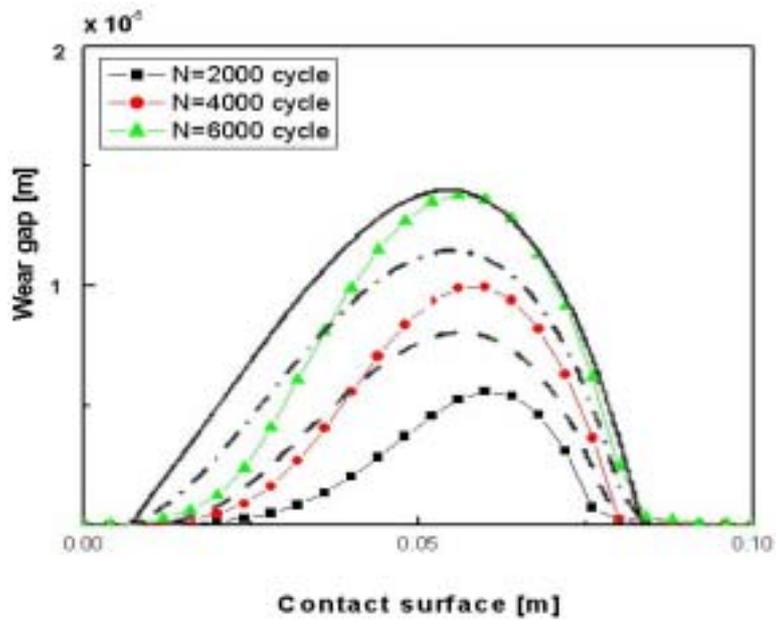


Fig. 9 Comparison with the Solution by Strömberg : Distributions of Wear Gaps

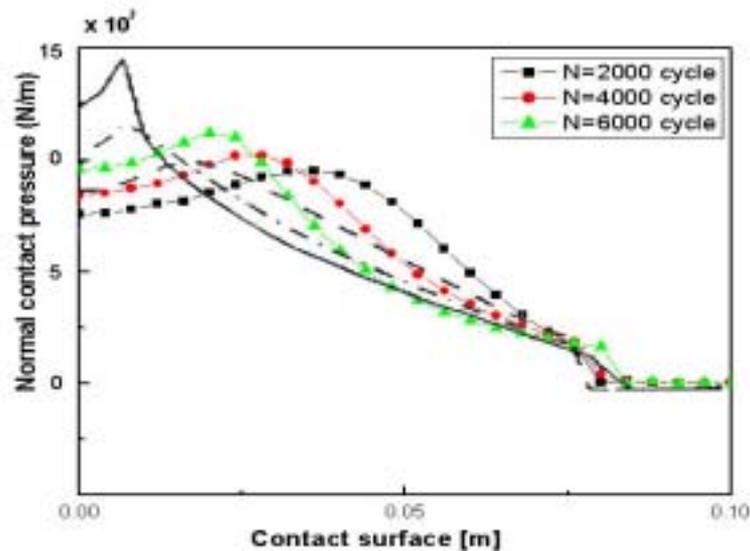


Fig. 10 Comparison with the Solution by Strömberg :  
Distributions of Normal Contact Pressures

### 3.2 3차원 문제의 해석 및 결과

2차원 해석을 통해 해석 방법의 타당성을 검증한 후 이러한 방법을 실제 프레팅 마모 실험에 적용하여 원자력발전소 증기발생기 2차 측에서 사용하는 두개의 Inconel 튜브형 시편을 그림 2와 3 등과 같이 3차원 유한요소 해석을 행하였다. 실험적 접근방법으로는 전기적인 방식의 압전소자를 이용하여 마모시험기를 개발하고 실제 마모 실험을 하였다.<sup>20)</sup> 압전소자를 이용하여 개발한 마모시험기는 기존의 기계적인 방식의 마모시험기에 비하여 미세변위구동이 가능하고 강성이 크며, 빠른 응답 등의 장점을 가진다. 개발된 시험기를 이용하여 Inconel 690 튜브에 대하여 실제 프레팅 마모 실험을 수행하였으며 마모상수를  $K=267 \times 10^{-15} Pa^{-1}$ 로 구하여 유한요소 해석의 입력데이터로 사용하였다.

2차원 해석과 같이 일률모델을 적용하여 마모 깊이를 구하고 다음 cycle에서는 마모 깊이가 발생한 만큼 유한요소 mesh를 이동하여 해석하는 알고리즘으로 해석하였다. 3차원 접촉 문제와 마모 문제의 유한요소 해석 시에는 해의 불안정성으로 인한 수렴성이 항상 문제가 되고 있으므로 주의를 요한다. 한 cycle당 소요되는 해석 시간은 CPU 2.4 GHz를 기준으로 약 32분이 소요되었다.

70N의 정하중 상태에서 3차원 유한요소 해석을 한 결과 접촉영역의 폭은 0.6 mm 정도로 나타났으며 그림 11에는 파라메타  $s = 10^5$  ( $K_e = 267 \times 10^{-10} Pa^{-1}$ )의 경우, Inconel 시편의 접촉 영역을 따라 마모 깊이의 분포가 cycle 수의 변화에 따라 진전되는 모양을

나타내었다. cycle 수의 증가에 따라 마모량은 증가하며, 마지막 cycle로 갈수록 뚜렷한 형태의 도넛 모양의 마모 형태를 보여준다. 전체적인 형상은 2차원 경우와 다르지만 프레팅 마모의 전형적인 형태를 나타낸다. 그림 12에는 접촉 영역을 따라 법선접촉응력의 분포가 cycle 수의 변화에 따라 진전되는 모양을 나타내었다.

3차원 유한요소 해석을 수행한 후 추후 실험으로 구한 마모량 혹은 마모 형상과 비교하기 위하여 해석결과를 접촉면적을 따라서 3차원 그래픽 처리를 하여 그 결과를 그림 13에 나타내었다. 그림 13의 결과는 70N의 하중 상태 및 파라메타  $s = 10^5$ 의 경우에서 40 cycle 수행 후 얻어진 결과로, 마모 깊이를 실험적 측정으로 측정할 시 어려움으로 인하여 정량적 비교는 하지 못하였으나, 프레팅 마모 면적 및 마모 경향 등 정성적으로는 유사한 결과를 보였다.

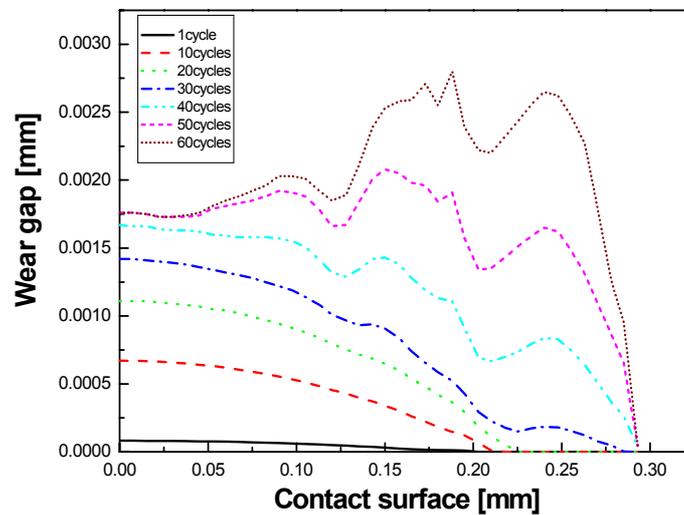


Fig. 11 Distributions of Wear Gaps Along the Contact Surface with Increase of Cycle Numbers in Fretting

Wear Simulation ( $s = 10^5$ )

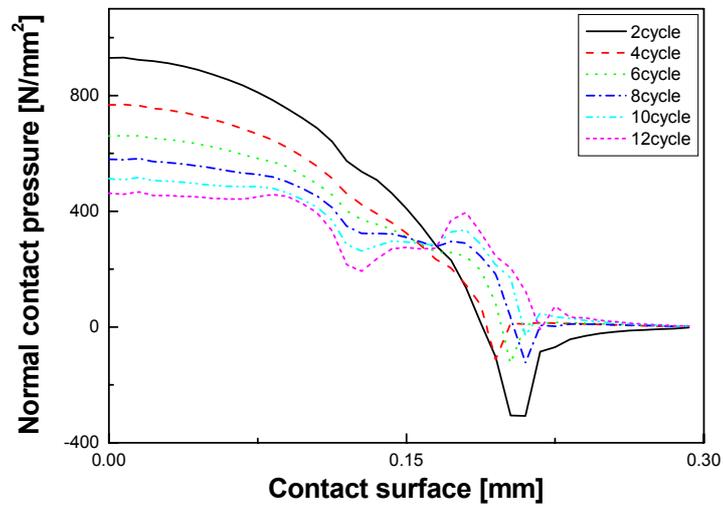


Fig. 12 Distributions of Normal Contact Pressures Along the Contact Surface with Increase of Cycle Numbers in Fretting Wear Simulation ( $s = 10^5$ )

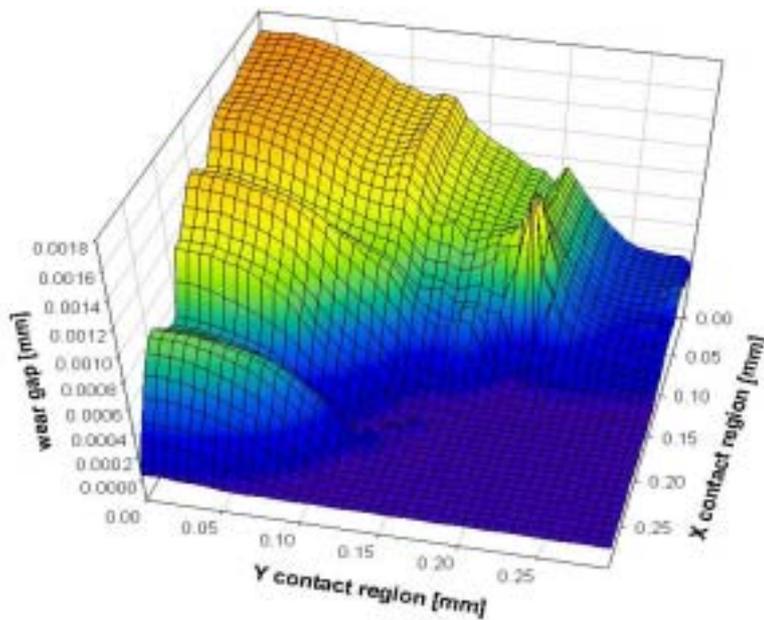


Fig. 13 Three Dimensional Graphical Representation of Wear Amount ( $s = 10^5$ ,  $N = 40$  cycle  $\ddot{\times}$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 프레팅 마모 현상을 정량적으로 규명하기 위하여 유한요소 모델을 개발하였다. 유한요소법에 의한 프레팅 마모의 해석을 위해 2차원 해석 모델과 3차원 해석 모델을 각각 선정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 2차원 유한요소 해석에서 프레팅 마모 문제를 탄성 접촉 문제로 생각하여, 기존해가 존재하는 편치 대 평면 접촉으로 해석을 하였다. 기존 해와의 비교를 통하여 마모상수를 증가시키고 cycle수를 감소시켜 해석하는 방법의 타당성을 입증하였다.
- 2차원 유한요소 해석에서 마모 깊이 및 범선접촉응력 등을 그려본 결과 프레팅 마모에서 관찰되는 특징 중 하나인 동심원 형태 도넛 모양의 마모 형상을 관찰하였다.
- 2차원 해석을 확장 적용하여 실제 실험을 모사한 튜브 대 튜브 접촉 문제로 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 3차원 유한요소 해석에서도 마지막 cycle로 갈수록 뚜렷한 형태의 도넛 모양의 마모 형태를 볼 수 있었으며, 접촉 전 영역에 걸친 마모 형상을 3차원 그래픽 기법을 이용하여 나타내었다.

본 연구의 결과는 가동 중인 원자력발전소의 증기발생기 튜브 혹은 기타 원전 발전설비의 접합부에서 발생할 수 있는 프레팅으로 인한 마모 현상을 근사적으로 예측하는데 기초 자료로 활용 가능하며, 추후 증기 발생기 설계에도 간접적인 자료를 제공할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- (1) ASM Handbook, 1995, "Friction, Lubrication and Wear Technology," edited by Peter J. Blau, et al., Vol. 18, pp. 242-270.
- (2) Eden, E.M., Rose, W.N., and Cunningham, F.L., 1911, "Endurance of Metals", *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 4, pp. 839-974.
- (3) Tomlinson, G.A., 1927, "The Rusting of Steel Surfaces in Strength", *Proc. R. Soc. (London)*., A, Vol. A115, pp. 472-483.
- (4) Waterhouse, R.B., 1972, "Fretting Corrosion", Pergamon, Oxford.

- (5) Waterhouse, R.B., 1981, "Fretting-fatigue", Applied Science, London.
- (6) Feng, I.M. and Uhlig, H.H., 1954, "Fretting Corrosion of Mild Steel in air and Nitrogen", *J . Appl. Mech.*, Vol. 21, pp. 354-400.
- (7) J de Gee, A.W., Commissaris, C.P.L. and Zaat, J.H., 1964, "The Wear of Sintered Aluminium Powder(SAP) under Directions of Vibrational Contact", *Wear*, Vol. 7, pp. 535-550.
- (8) Ko, P.L., 1979, "Experimental Studies of Tube Fretting in S/G and Heat Exchange.", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 101, pp. 125-133.
- (9) Vingsbo, O. and Söderberg, S., 1988, "Fretting Maps", *Wear*, Vol. 126, pp. 131.
- (10) Fisher, N.J., Chow, A.B. and Weckwerth, M.K., 1995, "Experimental Fretting Wear Studies of Steam Generator Materials", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 117, pp. 312-320.
- (11) Guerout, F.M., Fisher, N.J., Grandison D.A. and Weckwerth, M.K., 1996, "Effect of Temperature on Steam Generator Fretting Wear", *ASME PVP*, Vol. 328, pp. 233-246.
- (12) Cho, K.H., Kim, T.H. and Kim, S.S., 1998, "Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4Tube", *Wear*, Vol. 219, pp. 3-9.
- (13) Kim, D.G., and Lee, Y.Z., 2001, □□Experimental Investigation in Sliding and Fretting Wear of Steam Generator Tube Materials", *Wear*, Vol. 250, pp. 673-680.
- (14) Kim, H.K., Kim, S.J., Yoon, K.H., Kang, H.S. and Song, K.N., 2001, "Fretting Wear of Laterally Supported Tube", *Wear*, Vol. 250, pp. 535-543.
- (15) Lee, Y.H., Kim, H.K., Kim, H.D., Park, C.Y., Kim, I.S., 2003, "A Comparative Study on the Fretting Wear of Steam Generator Tubes in Korean Power Plants", *Wear*, Vol. 255, pp. 1198-1208.
- (16) Hong, J.K., and Kim, I.S., 2003, "Environment Effects on the Reciprocating Wear

of Inconel 690 Steam Generator Tubes”, *Wear*, Vol. 255, pp. 1174–1182.

- (17) Mackin, T.J., Yang J. and Warren, D., 1992, “Influence of Fiber Roughness on the Sliding Behavior of Sapphire Fiber and metrics”, *J. An. Ceram. Soc.*, Vol. 75, pp. 3358.
- (18) Strömberg, N., 1997, “An Augmented Lagrangian Method for Fretting Problem”, *Eur. J. Mech. A/Solid*, Vol. 16, No. 4, pp. 573.
- (19) Suh, N.P., 1986, “Tribophysics”, Prentice–Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- (20) 박상신, 이춘열, 황평, 채영석, 2004, “압전소자를 이용한 Inconel 690 프레팅 마모 실험”, 한국윤활학회 춘계학술발표회.