

핵연료봉 프레팅 손상 해석을 위한 접촉 역학의 응용
제 2 편 - 순차적 전단하중에 의한 접촉응력

Application of Contact Mechanics for Fretting Damage of Fuel Rod
Part II – Contact Stresses under Sequential Shear

김형규*, 윤경호, 강홍석, 송기남

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료 봉과 지지격자 스프링 또는 덤플과의 접촉면에 발생하는 프레팅 손상을 해석하기 위하여 제 2 편인 본 논문에서는 제 1 편에서 개발된 영향 함수 및 수치 해석 방법을 이용하여 접촉 전단 하중이 접촉면 상에서 방향을 바꾸며 순차적으로 증가, 감소하는 경우의 접촉 응력을 구하였다. 해석 결과, Mindlin-Cattaneo 문제의 해를 구한 후 방향을 바꾸어 전단 하중이 증가할 때 컴플라이언스가 증가하였으며, 접촉면 상에 나타나는 미끄럼 및 고착 영역의 거동과 접촉면 상의 변위 거동을 구하였다. 고려한 하중 조건이 폐회로를 구성하며 반복적으로 작용할 때에는 접촉면 응력이 정상 상태가 된다. 이로부터 미끄럼 영역에서의 응력과 변위로부터 에너지 방출 개념을 사용한 프레팅 손상 파라미터에 대해 고찰하였다.

Abstract

For the analysis of the fretting problem of the fuel rods, present paper(Part II) shows the contact stresses on the contact surfaces between the fuel rods and the spacer grids. The influence functions and the numerical method presented in the Part I were utilized. For the shear load path, increase in transverse – increase in axial – decrease in transverse – decrease in axial – increase in transverse – increase in axial direction was considered for simulating the rod vibration in a reactor core. After the Mindlin-Cattaneo solution was obtained for the transverse direction, the increase of axial shear load was considered at first. Compliance change, the behaviour of the stick/slip region and the surface displacement were investigated as the shear load followed the closed path. When cyclic closed load path was incorporated, the steady state of the contact stresses was achieved. A fretting failure parameter was discussed with the concept of energy release.

1. 서 론

고성능, 무결함 핵연료의 개발을 위해서 유체 유발 진동에 의한 핵연료 봉의 프레팅 손상은 필수적으로 해결하여야 할 과제이다. 일반적으로 기존의 연구에서는 핵연료 봉의 프레팅 손상을 유체

유발 진동 해석으로만 접근하여 왔다[1,2]. 그러나 유체 유발 진동의 해석에서는 핵연료 봉 프레팅 손상의 원인인 진동 해석 결과만이 파악될 수 있다.

실제 핵연료 봉의 프레팅 손상 형태인 금속 박리를 설명하고 나아가 설계적으로 지지격자체를 개선하여 핵연료 봉의 손상을 억제 시키기 위해서는 고체역학적 접근이 필수적이다. 좀 더 구체적으로는 응력 및 변형율과 균열 및 피로 현상을 같이 포함하여 분석할 필요가 있다. 이는 핵연료를 포함한 원자력 분야 외의 일반적인 기계 구조물의 프레팅 손상 문제 해결을 위해 많이 도입되는 분야가 파괴역학과 접촉역학이라는 점을 보더라도 알 수 있다. 현재까지 핵연료 봉의 프레팅 손상에 접촉역학이 응용되지 못한 이유는 핵연료 봉 손상의 원인 중 가장 많은 비중을 차지하였던 이물질 유입 손상에 주된 관심이 두어졌고, 프레팅 손상은 이물질 유입 손상이 해결된 후 무손상 핵연료의 개발을 위한 연속적 연구에 따라 비교적 최근에 주목을 받기 시작하였던 때문이라 사료된다.

본 논문은 이에 따라 핵연료 봉의 프레팅 손상 해석을 위해 접촉역학의 방법을 도입하여 접촉면의 응력 및 변위장을 구하는 방법에 대하여 연구한 것이다. 이를 위해 제 1 편[3]에서는 원자로 내에서의 핵연료 봉 진동에 의해 핵연료 봉/지지격자체 사이의 접촉면에 작용하는 전단 하중을 핵연료의 반경 방향 및 축 방향으로 순차적인 증가, 감소하는 것으로 모델링하였으며 각각의 방향에 따른 영향 함수를 유도하였다. 유도한 영향 함수를 이용하여 수치적 방법으로 접촉면 응력을 구할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 그 타당성을 검증하였다.

연속된 논문으로서 제 2 편인 본 논문에서는 제 1 편에서 제시한 하중 경로에 따라 개발한 수치 해석 방법을 이용하여 접촉 응력과 변위를 구한 결과를 보여 준다. 한편 계산을 수행하며 얻은 또 다른 결과로서 전단 하중이 순차적으로 방향을 바꾸며 증가할 때, 이전 하중이 감소하는 현상, 즉 컴플라이언스의 변화에 대해 분석하였다. 또 주어진 하중 경로가 사이클로 반복할 때 접촉면 응력장이 정상 상태(steady state)에 이르게 되는 것을 발견하였으며 이로부터 에너지 방출 개념을 이용한 프레팅 손상 모델링에 대해 논의하였다.

2. 수치 해석

본 장에서는 제 1 편에서 Mindlin-Cattaneo 해를 이용하여 검증한 수치 해석 방법을 확장하여 전단 하중이 순차적으로 증가, 감소할 때의 문제를 해석한다. 수치 해석에 사용되는 전단 하중, Q_x 및 Q_y 는 전단 하중에 의한 강제 변위, Δ_x 및 Δ_y 로 입력된다. 본 논문에서 고려하는 순차적 전단 하중의 경로를 그림 1에 보여 준다.

Q_y 에 의해 Mindlin-Cattaneo 문제를 해석한 후 접선 방향의 전단 하중이 90° 방향 전환하여 계속 작용하는 경우에는(그림 1에서 하중점 1로부터 2로 갈 때) 접촉면 상에 Q_y 에 의한 접선 응력 $q_y(y)$ 뿐 아니라 Q_x 의 작용에 의한 $q_x(y)$ 도 발생한다. 따라서 제 1 편에서 구한 Mindlin-Cattaneo 문제의 해인 $q_y(y)$ 는 달라져야 한다. 즉, Q_x 가 작용되기 시작할 때 이전의 Q_y 에 의해 형성된 접촉면상의 미끄럼 영역이 변할 뿐 아니라 미끄럼 영역 내의 접선 응력 $q_y(y)$ 도 Q_x 에 의해 발생하는 $q_x(y)$ 로 인하여 줄어들어야 하기 때문이다. 이때의 줄어드는 양을 찾는 것이 가장 중요하며 수치

해석 프로그램 작성에 어려운 문제였다. Q_x 및 Q_y 가 동시에 존재하는 경우, 접촉면 상의 미끄럼 영역과 고착 영역에서의 경계 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

고착 영역 내에서는 두 물체가 서로 붙어 거동을 하므로 접선 하중의 증가(δQ)에 따른 강제 변위의 증분($\delta \Delta$)이 접촉면의 변위와 같고 또 접선 응력의 벡터 합이 마찰력 보다 작아야 하므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\delta u_x - \delta \Delta_x = 0, \quad (1)$$

$$\delta u_y - \delta \Delta_y = 0, \quad \text{그리고} \quad (2)$$

$$q_x^2 + q_y^2 \leq (\mu p)^2, \quad (3)$$

여기서 $\delta \Delta_x$ 및 $\delta \Delta_y$ 는 각각 Q_x 및 Q_y 의 증분에 의한 두 물체 간의 상대적인 강제 변위의 증분이며 δu_x 및 δu_y 는 이때 접촉면 상에 발생하는 x 및 y 방향으로의 접선 응력 증분(즉 δq_x 와 δq_y)으로부터 영향 함수에 의하여 계산되는 접선 방향 변위이다. 또 μ 는 정적 마찰 계수, p 는 수직 하중에 의한 헤르쯔 응력이다.

한편 미끄럼 영역에서는 접선 응력의 벡터 합이 마찰력과 같아야 하고, x 및 y 방향 접선 응력의 비가 각각의 접선 하중 증분에 의한 미끄럼 양과 비례하며 방향이 반대이어야 하므로 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\left| \frac{q_x}{q_y} \right| = \left| \frac{\delta u_x - \delta \Delta_x}{\delta u_y - \delta \Delta_y} \right|, \quad (4)$$

$$q_x^2 + q_y^2 = (\mu p)^2, \quad \text{그리고} \quad (5)$$

$$q_x (\delta u_x - \delta \Delta_x) \leq 0, \quad (6)$$

$$q_y (\delta u_y - \delta \Delta_y) \leq 0. \quad (7)$$

제 1 편에서 논의한 Mindlin-Cattaneo 문제에서와 같이 접선 전단 하중이 한 개의 방향인 경우에는 표면의 미끄럼 영역에서의 접선 응력은 $+\mu p$ 또는 $-\mu p$ 중 하나임이 명백하다. 그러나 본 절에서와 같이 접촉면 상에 접선 응력이 두 개의 성분으로 되어 있는 경우에는 각각의 응력 성분의 크기는 식 (5)에 의해 당연히 $|\mu p|$ 보다 작아야 한다. 여기서 Mindlin-Cattaneo 문제에서 구한 $q_x(y)$ 는 $q_x(y)$ 의 증가에 따라 식 (4)와 (5)를 만족하며 감소하여야 한다. 수치 해석을 위해 구간 분할된 식 (4)와 (5)는 다음과 같다.

$$\left| \frac{q_x^{t-1} + \delta q_x(i,k)}{q_y^{t-1} + \delta q_y(i,k)} \right| = \left| \frac{\delta u_x(i,k) - \delta \Delta_x}{\delta u_y(i,k) - \delta \Delta_y} \right|, \quad (8)$$

$$\left\{ q_x^{t-1} + \delta q_x(i,k) \right\}^2 + \left\{ q_y^{t-1} + \delta q_y(i,k) \right\}^2 = \{ \mu p(i) \}^2. \quad (9)$$

여기서 q_x^{t-1} , q_y^{t-1} 는 앞선 하중 증분에 의해 구하여진 접선 응력이며, $\delta q_x(i,k)$, $\delta q_y(i,k)$ 그리고 $\delta u_x(i,k)$, $\delta u_y(i,k)$ 는 i 번째 collocation point 및 k 번째 반복 계산(iteration)에서의 응력 및 변위의 증분을 나타낸다.

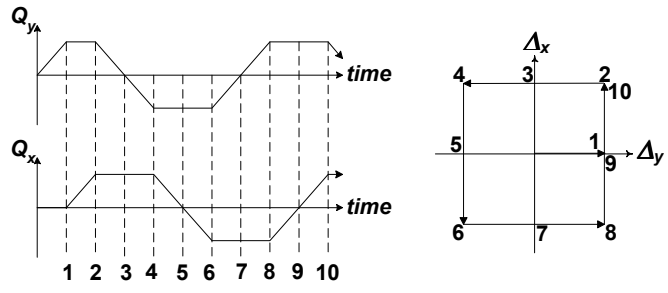


그림 1. 전단 하중 경로 및 폐회로 강체 변위.

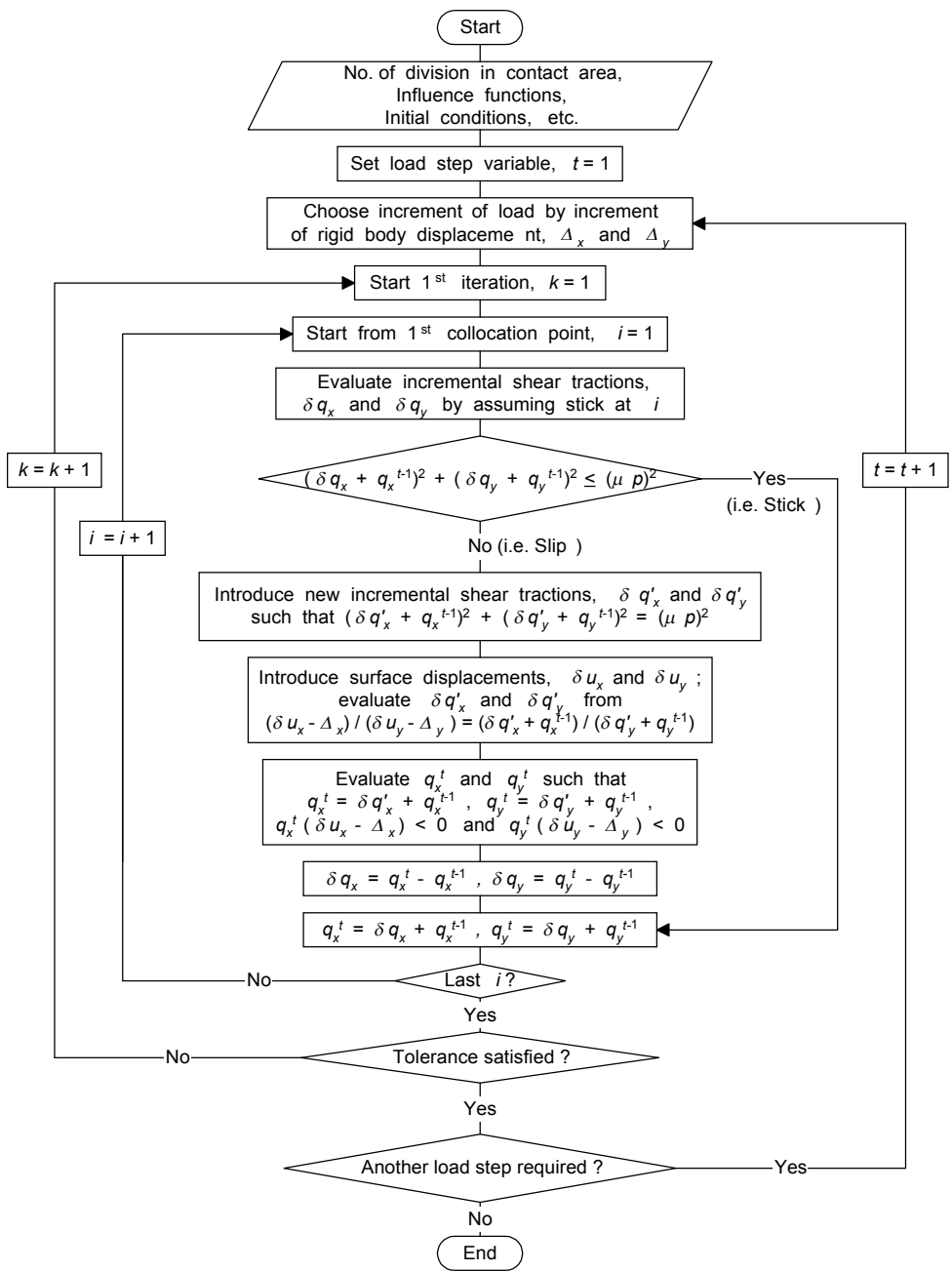


그림 2. 수치 해석 프로그램 흐름도.

식 (8)과 (9)에서 $\delta u_x(i,k)$ 와 $\delta u_y(i,k)$ 가 각각 $\delta q_x(i,k)$ 와 $\delta q_y(i,k)$ 의 함수이므로 결국 $\delta q_x(i,k)$ 또는 $\delta q_y(i,k)$ 중 하나의 미지수를 갖는 방정식으로 된다. 그러나 $\delta q_x(i,k)$ 또는 $\delta q_y(i,k)$ 를 구하는 것은 간단하지 않다. 왜냐하면 제 1 편에서 유도하였던 영향 함수의 형태가 복잡하여, 경우에 따라 복소수 처리를 하여야 하기 때문이다. 실제로 계산 시간의 대부분은 미끄럼 영역에서의 미지수 $\delta q_x(i,k)$ 또는 $\delta q_y(i,k)$ 를 구하는데 사용되었다. 제 1 편에서 기술한 방법과 같이 수치 해석을 위한 접촉 구간 분할은 구간을 29 개의 이등변 삼각형 접선 응력 요소($S = 15$)로 나누어 수행하였으며, Mathematica™ Version 3.0 을 이용하여 프로그램하였다. 작성한 프로그램의 흐름도는 그림 2 에 보여 준다.

3. 해석 결과

Q_y 가 일정하게 작용하는 상태에서 x 방향으로의 접선 하중 Q_x 가 작용하기 시작하는 경우를 고려한다. 이를 위해 y 방향으로의 Mindlin-Cattaneo 문제의 해를 구한 후 Q_x 가 작용하기 시작할 때부터 y 방향으로의 상대 강체 변위, $\Delta_y = 0$ 으로 한다.

Mindlin-Cattaneo 문제에서 $Q_y/\mu P = 0.33$ 에 도달한 후 $Q_x/\mu P = 0.2, 0.33, 0.5$ 로 증가할 때의 접선 응력 q_x 및 q_y 를 그림 3(a), (b) 및 (c)에서 보여주고 있다. 한편 그림 3 에는 $Q_y/\mu P = 0.33$ 일 때 Mindlin-Cattaneo 문제의 해 (q_y^0 로 표기함)를 점선으로 나타내어 Q_x 가 작용할 때 q_y 의 변화를 쉽게 알 수 있도록 하였다. 그림 3(a)에서 알 수 있는 것은 미끄럼 영역에서 q_y 가 q_y^0 에 비하여 감소하고 대신 고착 영역에서는 증가 한다는 것이다. 이것은 예상하였던 결과로서 Q_x 의 작용에 의한 미끄럼 영역에서의 q_x 의 발생이 q_y 를 감소시킨 것이며 하중 평형(Q_y 의 보존)을 위해 고착 영역에서의 q_y 가 증가한 것이다. 특이한 것은 Mindlin-Cattaneo 문제에서는 미끄럼/고착 영역의 경계가 응력 q_y 의 불연속점과 일치하였으나 그림 3(a)에서의 q_x 는 그렇지 못하였다. 그러나 Q_x 가 증가함에 따라 q_x 역시 미끄럼/고착 영역의 경계가 응력의 불연속점과 일치하게 되며 그림 3(b) 및 (c)에서 이를 보여 주고 있다. 하중을 여러 가지로 변화 시키며 계산한 결과에 의해 Q_x 의 크기가 Q_y 와 같아질 때부터 미끄럼/고착 영역의 경계가 서로 일치하며 또한 각각 응력의 불연속점과 일치하게 됨을 알 수 있었다. 한편, 그림 3(a), (b), (c)의 상호 비교에 의해 Q_x 가 증가함에 따라 접촉 구간 내의 미끄럼 구간이 안쪽으로 팽창함을 알 수 있다. 이것은 타당한 결과로서 전체적인 접선 전단 하중이 증가함에 따라 미끄럼 영역이 커진 것이다.

미끄럼 영역의 팽창은 접촉면에서의 컴플라이언스를 증가시켜 기존의 Q_y 를 감소시키게 된다. 본 연구에서 사용한 수치적 방법에서는 접선 하중의 증가를 상대 강체 변위의 증가를 통해 계산하고 있다. 따라서 Q_x 를 작용시키기 위해 Δ_x 를 증가시킬 때 고정 값으로 사용하는 $\Delta_y = 0$ 는 Q_x 의 작용 직전에 Mindlin-Cattaneo 문제를 해결할 때 사용된 Q_y 를 감소시키게 된다. 그림 4 에는 이러한 현상을 보여 주고 있으며 Mindlin-Cattaneo 문제에서 $Q_y/\mu P = 0.167, 0.33, 0.5, 0.7, 0.833$ 등으로 증가한 후 각각으로부터 Q_x 가 증가할 때 Q_y 가 감소하는 양을 나타내고 있다. 여기서 Q_x 가 작용하기 이전의 Q_y 가 클수록 Q_y 가 감소하는 양이 크다는 것을 알 수 있다. 한편 그림 4 에는 접촉 물체가 전체적인 미끄럼 (gross sliding)을 일으키는 원호 $Q_x^2 + Q_y^2 = (\mu P)^2$ 를 함께 나타내어 본 연구에서 다루고 있는 문제가 부분 미끄럼 문제임을 다시 한번 보여 준다.

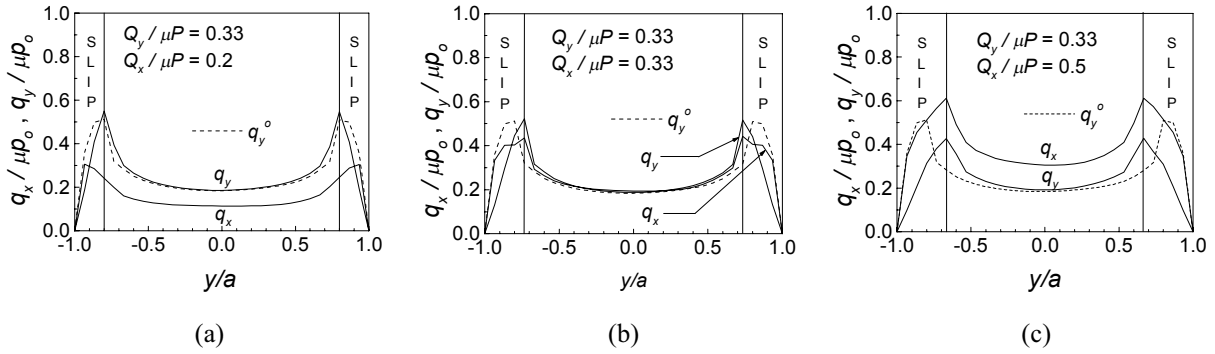


그림 3. 접촉면 전단 응력: (a) $Q_x < Q_y$ 일 때; (b) $Q_x = Q_y$ 일 때; (c) $Q_x > Q_y$ 일 때.

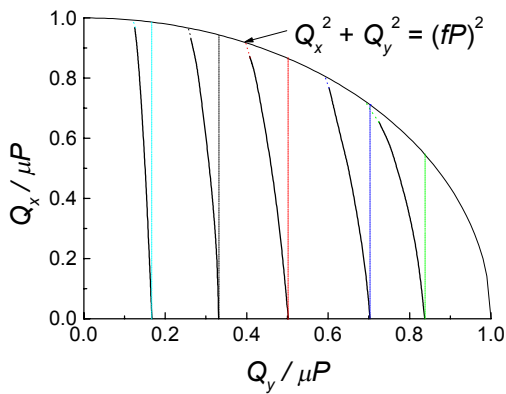


그림 4. Q_x 가 작용할 때의 컴플라이언스 변화.

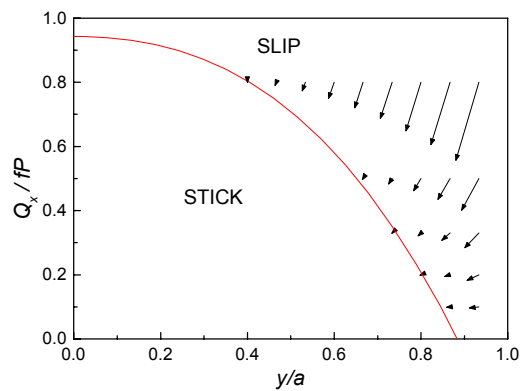


그림 5. 상대 미끄럼 변위의 벡터도.

q_x 및 q_y 에 의해 계산된 접촉면 접선 변위를 관찰하여 본다. 그림 5에는 $Q_y / \mu P = 0.33$ 의 상태에서 Q_x 를 증가시킬 때 계산된 접촉면 상대 미끄럼 변위를 Q_x 의 크기에 따라 상대적으로 비교한 것이다. 접촉면 변위의 크기는 q_x 및 q_y 에 의해 각각 $u_x(y)$ 및 $u_y(y)$ 를 구한 후 이들의 벡터 합으로 구하였다. 한편 그림 5에는 미끄럼 영역 및 고착 영역을 함께 표시하여 고착 영역에서는 상대 미끄럼 변위가 없음을 보여 주고 있다. 이것은 수치 해석에서 고착 영역일 경우 접선 하중에 의한 상대 강제 변위가 상대 접선 변위와 같고, 미끄럼 영역에서는 상대 미끄럼 변위가 존재하므로 나타난 결과이다. 상대 미끄럼 변위는 접선 하중에 의한 상대 강제 변위와 접선 응력에 의한 상대 탄성 변위와의 차로 정의된다. 한편 상대 미끄럼 변위의 방향은 y 방향 변위와 x 방향 변위의 합성 벡터가 y 축으로부터 반 시계 방향으로 이루는 각도로 정의하였으며 $y/a \rightarrow 1$, 그리고/또는 $Q_x / \mu P \rightarrow 1$ 일 때 x 축과 나란한 방향에 가까이 각도가 증가한다.

그림 6에 그림 1에서의 하중 경로 상에서 구한 전단 응력을 보여 준다. 여기서 그림 1의 하중 점 3에서의 전단 응력을 그림 6(b)에 보여 주고 있으며 Q_y 가 완전히 해중 되었을 때에 전단 응력이 0이 되지 않고 자기 평형 상태를 이루는 유한한 응력을 갖게 됨을 볼 수 있다. 이것은 전단 하중을 가중할 때 접촉면 상에 발생한 접선 응력의 형태는 해중할 때의 그것과 다르다는 것을 보여 주는 것으로서 전단 응력의 비가역성(irreversible)을 나타낸다. 한편 그림 6(a)와 (d)는 동일한 하중점인 2와 10에서의 전단 응력이나, 서로 다름을 알 수 있다. 그러나 하중점 10을 지나 다시 한

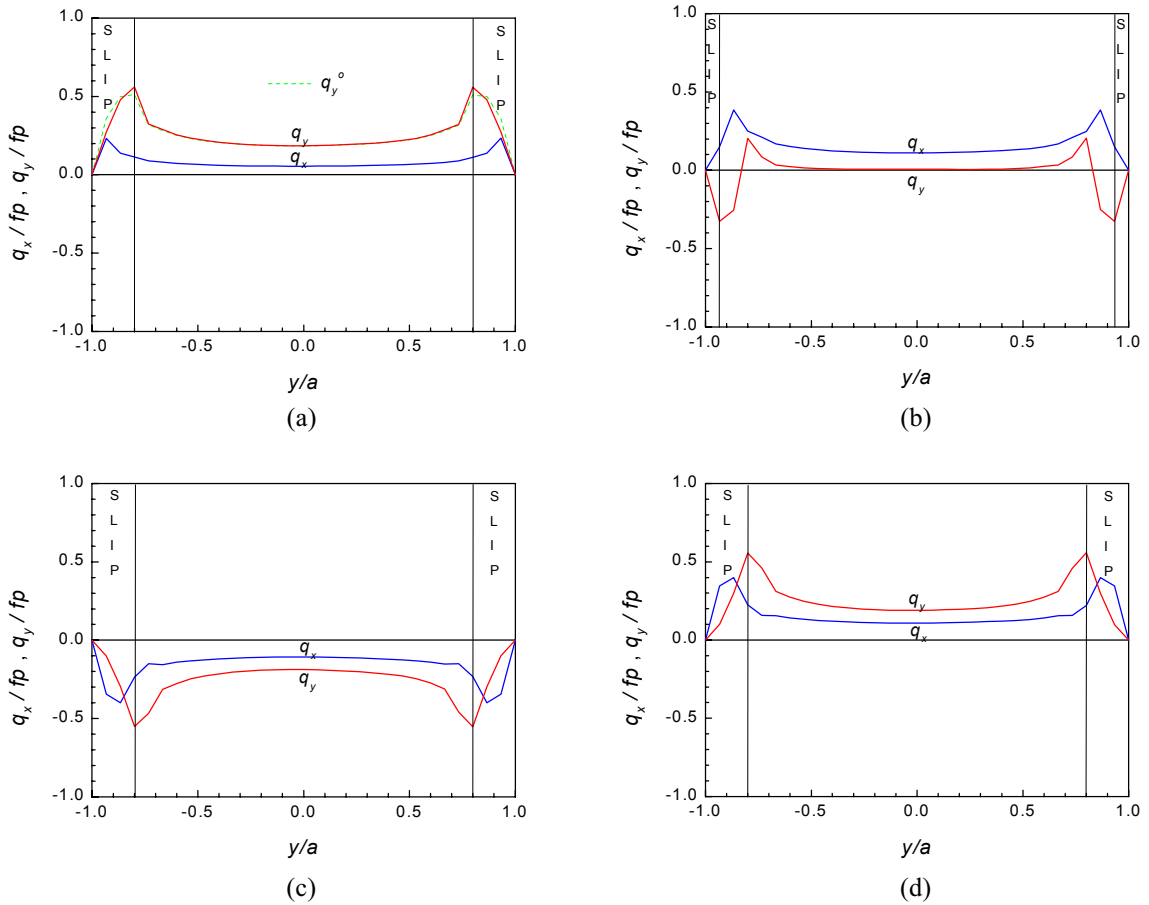


그림 6. 그림 1의 하중 경로 상 전단 응력: (a) 하중점 2; (b) 하중점 3; (c) 하중점 6; (d) 하중점 10.

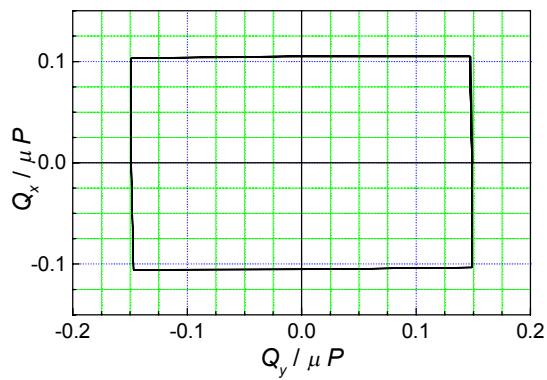


그림 7. 전단 응력의 정상 상태.

싸이클이 진행하고 나면 하중점 10에서의 응력(그림 6(d))와 같아졌다. 이와 같은 현상은 그 이후 싸이클이 계속될 때 변함없이 관찰되었으며 접촉 하중의 반복 싸이클에서 접촉면 전단 응력이 정상 상태에 빨리 도달하게 됨을 의미한다. 그림 7에 하중점 10 이후 세 번의 싸이클이 연속적으로 작용된 경우의 하중 선도를 보여 주고 있으며 전단 응력의 정상 상태를 알 수 있다. 그림 7을 위한 예제 계산에서는 그림 1의 하중점 1에 해당되는 전단 하중을 $Q_y/\mu P = 0.15$ 로 한 경우이다. 프

레팅 하중 조건에서 접촉면 응력이 사이클 진행에 따라 빨리 정상 상태에 도달하게 되는 이 결과는 매우 유용한 것으로서 이러한 정상 상태는 접촉 피로 시의 접촉면 응력장이 사이클의 변화에 무관하다고 생각하고 그 이후의 해석을 진행할 수 있는 편의성을 제공하기 때문이다.

핵연료 봉의 프레팅 손상 현상은 접촉면에서 마모 이물질(wear debris)이 발생하고 반복되는 접촉 물체의 상대 변위에 의해 접촉면으로부터 마모 이물질의 생성 및 방출이 지속적으로 발생되어 핵연료 봉에 손상이 발생하는 현상이라 설명할 수 있다. 이때, 마모 이물질의 생성을 위한 에너지는 접촉면 계에서 미끄럼에 의해 방출되는 에너지라고 생각할 수 있다. 본 연구를 통하여 구할 수 있는 미끄럼 변위 및 접선 응력의 곱은 이러한 개념의 에너지 방출이므로 손상 해석에 이용할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 접촉 구간을 좀 더 세밀하게 분할하고 2차원 평면 문제를 3차원으로 확장하여야 할 필요도 있을 것이다. 그러나 이러한 과제는 본 연구에서 이용한 영향 함수법의 확장으로 가능하며 따라서 개발한 프로그램의 보완을 통하여 수행할 수 있다.

4. 결 론

제 1 편에서 개발된 수치 해석 방법을 이용하여 원자로 내에서 핵연료 봉이 유체 유발 진동에 의해 받는 전단 하중을 순차적으로 방향을 바꾸며 증가, 감소하는 폐회로 하중 경로로 모사하여 접촉면 전단 응력장을 구하였다. 해석 결과, 전단 하중의 킴플라이언스 증가, 미끄럼 및 고착 영역의 변화와 전단 응력의 비가역성 등, 물리적인 현상을 본 연구에서 개발한 수치 해석 방법은 잘 나타낼 수 있었다. 전단 하중이 반복적인 사이클로 작용할 때, 전단 응력은 한 번의 사이클 이후에는 정상 상태를 보였으며 이로부터 본 해석 방법의 유용성을 강조할 수 있다. 핵연료 봉 프레팅 손상을 에너지 방출 개념으로 설명할 경우, 본 연구에서 사용한 방법은 이론적 모델링을 가능하게 하는 유용한 도구가 될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. M.W. Kennard et al (1995) A Study of Grid-to-Rod Fretting Wear in PWR Fuel Assemblies, S.M. Stoller Corporation.
2. 김상녕, 정성엽 (1998) 핵연료 봉의 Fretting Wear 에 대한 열수력학적 원인 분석, '98 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 496-501.
3. 김형규 외 3명 (1998) 핵연료봉 프레팅 손상 해석을 위한 접촉 역학의 응용-제 1 편, '98 추계학술발표회, 한국원자력학회, submitted.