

핵연료봉 프레팅 손상 해석을 위한 접촉 역학의 응용
제 1 편 - 영향 함수 및 수치 해석 방법

Application of Contact Mechanics for Fretting Damage of Fuel Rod

Part I - Influence Functions and Numerical Method

김형규*, 윤경호, 강홍석, 송기남

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료 봉과 지지격자 스프링 또는 덤플과의 접촉면에 발생하는 프레팅 손상을 해석하기 위한 연구로서 제 1 편인 본 논문에서는 접촉면 응력을 구할 수 있는 수치 해석 방법을 접촉역학의 이론을 이용하여 개발하였다. 접촉부는 평면 변형을 상태의 이차원 문제로 해석하였으며 접촉 수직 응력장은 헤르쯔 응력으로 가정하였다. 실제 원자로 내에서 진동하는 핵연료 봉에 의한 접촉면 상의 응력 거동을 고려하기 위해 전단 하중의 방향이 핵연료 봉의 축에 수직인 방향과 축 방향으로 순차적인 증가와 감소하는 경우를 모델로 하여 접촉 역학에서의 부분 미끄럼 문제로 해석하였다. 수치 해석을 위해 표면 접촉 영역을 미세 구간으로 나눈 후 각 구간에 이등변 삼각형의 접촉 응력 요소를 고려하여 핵연료 봉의 축에 수직인 방향과 축 방향 각각의 영향 함수를 계산하였으며 미끄럼 구간과 고착 구간에서의 변위 경계 조건을 부여하는 방법을 사용하였다. 이에 따른 수치 해석 프로그램을 개발하였으며 기존의 Mindlin-Cattaneo 문제와 비교하여 그 타당성을 확인하였다.

Abstract

For the analysis of the fretting problem of the fuel rods, present paper(Part I) shows the numerical method developed for evaluating the stresses on the contact surfaces between the fuel rods and the spacer grids. Theory of Contact Mechanics was incorporated. Contact area was regarded as a plane strain condition, so plane problem was taken into consideration. Normal stress profile on the contact surface was assumed to be Hertzian. As for the direction of the shear load, a closed load path, e.g. load 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. Partial slip problem was consulted. As for the numerical method, a triangular traction element was utilized and the corresponding influence functions were evaluated. Numerical program has been implemented for the present analysis, of which the validity was verified by comparing the Mindlin-Cattaneo solution.

1. 서 론

현재까지의 원전 운전 경험으로부터 핵연료 봉의 기계적 손상 원인으로는 원자로 내의 이물질이 원전 운전 중 핵연료 내로 유입되어 핵연료 봉의 표면에 상처를 입히고 이로부터 핵연료 봉이 파손되는 이물질 유입 손상이 가장 많은 부분을 차지하는 것으로 알려져 있으며 두 번째로 원자로 내의 냉각수 흐름으로 인한 핵연료 봉의 진동으로 (유체 유발 진동; Flow-induced Vibration) 핵연료 봉과 지지격자체와의 접촉 부분에서 마모의 형태로 발생하는 프레팅 손상 (Fretting Failure)이라고 보고되고 있다. 이물질 유입 손상에 대해서는 근본적으로 핵연료집합체 내부에 이물질이 유입되지 못하도록 하단 고정체의 설계 변경을 통해 거의 해결되었다[1]. 그러나 핵연료 봉 프레팅 손상은 그 원인이 유체 유발 진동이라는 것 외에 설계 상에서 다룰 수 있는 방법이 거의 전무한 실정이다. 실제로 대부분의 핵연료 공급자들은 핵연료 개발 시에 실험을 통하여 마모에 대한 저항성을 검토하고 있다. 그러나 실험적인 접근 방법은 실험 조건에 있어서 원자로 내에서의 핵연료 조건을 충분히 모사할 수 없으므로[2] 결과에 대한 충분한 신뢰성을 갖지 못하며, 이와 병행하여 실험 비용을 생각할 때 효율성 측면에서 더욱 연구 및 개량하여야 할 점이 많다. 또한 실험적 방법들은 결과적인 현상을 분석하는 것이며 원인을 분석할 수 있는 해석적 방법을 포함하고 있지 않으므로 궁극적인 해결 방법이 될 수 없다.

프레팅 손상이란 접촉 하중을 갖고 있는 두 물체가 서로 미세한 진폭의 상대 운동을 할 때, 접촉면에 발생하는 마모 현상 그리고/또는 물체 내부로의 피로 균열 성장으로 인해 물체가 설계 수명 이전에 파손되는 현상을 의미한다. 따라서 프레팅 현상을 근본적으로 다루기 위해서는 접촉 현상에 따른 물체의 반응, 즉 고체 역학적 해석이 필수적이다. 주로 기계 공학 분야에서 발전되어 온 접촉 역학(Contact Mechanics)은 고전 탄성론에서 Boussinesq[3]와 Cerruti[4]의 Potential 이론에 기초하고 Hertz[5]의 연구로부터 시작되었으며, 금세기 중반 이후에는 앞선 이론의 가정을 극복하는 많은 연구가 수행되어 왔다[6,7]. 접촉 역학에서 일차적인 관심을 갖는 것은 접촉 응력 상태이다. 그 이유는 접촉 응력으로부터 물체 내부의 응력 상태를 알 수 있으며, 내부의 응력은 설계시의 주요한 데이터가 될 뿐 아니라 접촉 하중 상태에서의 피로 균열을 해석할 수 있기 때문이다. 한편, 접촉 응력으로부터 접촉 표면의 고착 또는 미끄럼 상태를 알 수 있다. 접촉 표면 상에 미끄러지는 부분은 접촉 하중에 의해 접촉 부위에 가해진 일 중에서 에너지가 방출되는 곳이며, 따라서 마모 해석의 기초가 될 수 있다는 점에서 중요하다.

본 연구는 핵연료 봉의 프레팅 손상을 방지하기 위한 설계 기술 개발을 목적으로 접촉 역학을 도입하여 핵연료 봉과 지지격자체 사이의 연속된 하중 경로에 따른 표면 접촉 응력의 해석을 수행한 것이다. 국내외를 막론하고 원자력 산업계에서 추구하고 있는 ‘무 결함 핵연료 (Defect Free 또는 Zero Defect Fuel)’의 개발을 위해 핵연료 봉의 프레팅 손상을 방지하기 위한 기술 개발에 있어서 접촉 역학의 방법을 도입한데에 본 연구의 의의가 있으며 접촉 역학 분야에 있어서도 새로운 결과를 얻었다는 점에서 의미가 크다.

2. 문제의 구성

원통형 관의 형태인 핵연료 봉에 지지격자체 스프링 또는 덤플의 접촉을 고려하면 선 또는 점 접촉의 형태가 됨을 알 수 있다. 즉 기존의 핵연료 형상에서 덤플이 Oval 형태일 때에는 핵연료 봉과 점 접촉을 이루고 그 외 대부분의 스프링이나 스프링 형태의 덤플은 핵연료 봉과 선 접촉을 이룬다. 따라서 접촉면의 크기에 대한 핵연료 봉의 지름 및 두께를 고려할 때 핵연료 봉을 반무한체(Semi-infinite Body)로 가정할 수 있으며[6,8], 따라서 접촉 수직 응력장은 헤르쯔 응력으로 볼 수 있다. 또한, 핵연료 봉과 지지격자체 스프링과의 접촉 길이를 고려하면 평면 변형을 문제로 볼 수 있다.

원자로 내의 냉각수 흐름에 의하여 핵연료 봉은 진동하게 된다. 유체 유발 진동으로 설명되는 이 현상으로부터 핵연료 봉과 지지격자체 스프링 또는 덤플 사이에는 상대 운동이 발생하며 이 상대 운동으로부터 핵연료 봉과 지지격자체 스프링 또는 덤플 사이의 접촉면에 전단 하중으로 나타난다. 이 때의 전단 하중이 핵연료 봉에 프레팅 손상을 일으키는 직접적인 원인이 된다. 현재까지 많은 핵연료 공급자들은 이 전단 하중의 방향을 핵연료 봉의 축 방향에 수직한 것 (즉, 접선 방향)만 고려하고 있다(그림 1 참조).

그러나 이러한 시각은 위에서 열거한 하중이 발생할 때 핵연료 봉과 지지격자체 사이의 접촉면에 핵연료 봉의 축 방향으로 상대 운동에 따른 전단 하중이 발생하게 됨을 간과하고 있다. 즉, 핵연료 봉이 반경 방향으로의 변위를 가질 때 핵연료 봉의 길이가 신축을 반복하는 것은 아니므로 핵연료 봉은 그림 2에서 보여 주는 것과 같이 축 방향으로의 변위를 가져야만 한다. 실제로 고리 2 호기 국산 핵연료의 프레팅 손상을 분석한 결과[9]로부터 핵연료 봉 표면에 나타나 있는 프레팅 손상 흔적의 크기를 주의 깊게 관찰하여 보면 그 폭이 지지격자체 스프링 또는 덤플의 폭과 거의 일치하며 길이는 스프링 또는 덤플의 그것 보다 긴 것을 알 수 있다. 다시 말하여 핵연료 봉에 프레팅 손상을 일으키는 접촉력을 분석할 때에는 기존의 반경 방향 및 축 방향에 수직한 접선 방향 뿐 아니라 축 방향으로의 접선 방향에 대한 분석이 수반되어야 한다. 실제 원자로 내부에서는 이러한 하중이 복합적이며, 또한 임의의 방향으로 발생할 것이다. 본 연구에서는 이러한 전단 하중을 이론적으로 분석하기 위하여 핵연료 봉에 수직 하중이 작용하고 있는 상태에서 축 방향 및 축 방향에 수직한 방향으로의 전단 하중이 순차적으로 작용하는 경우를 고려하였다. 그림 3에 본 연구에서 풀고자 한 문제의 기하학적 구성을 보여준다. 실제의 경우는 본 연구에서 고려한 하중 상태를 임의로 조정하여 결과를 구할 수 있으므로 본 연구 결과를 쉽게 응용할 수 있다. 한편, 핵연료 봉의 프레팅 손상이 핵연료 봉과 지지격자체 사이의 접촉력이 완전히 소멸되기 전에 발생하는 점으로 보아[9], 본 문제는 접촉역학적 해석에서 전단 하중의 크기가 접촉면 마찰력 보다 작은 경우인 부분 미끄럼(Partial Slip) 문제로 본다. 부분 미끄럼 상태에서는 접촉면 상에 서로 미끄러지는 부분(Slip Region)과 고착되어 상대 운동이 없는 부분(Stick Region)으로 나누어 진다[10].

3. 영향 함수(Influence Function)

접촉 하중이 물체의 표면에 작용할 때 반작용으로 작용하는 응력을 고려한다면 하중의 작용점으로부터 어떤 거리만큼 떨어진 표면 위치에서의 응력에 의한 탄성 변위를 생각할 수 있다. 이때의

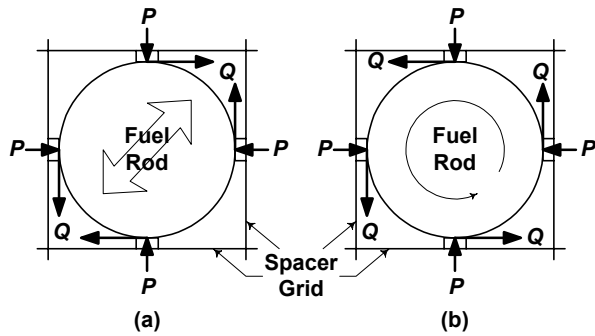


그림 1. 유체 유발 진동 시 핵연료 봉의 반경 및 접선 방향으로의 하중, (a) rubbing, tapping or impacting; (b) whirling.

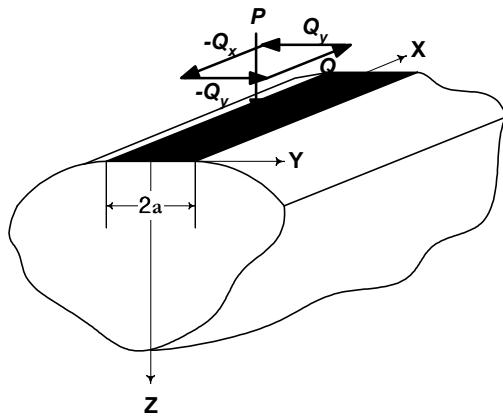


그림 3. 본 연구에서 해석한 기하학적 모델.

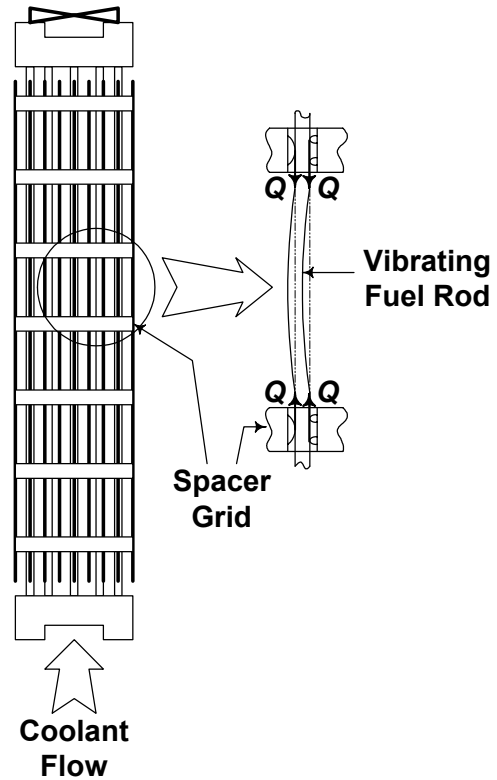


그림 2. 유체유발진동 시 핵연료 봉의 축방향 전단 하중.

변위는 응력의 형태(profile)에 의존하며 접촉 문제가 변위 경계 조건을 가질 때, 주어진 경계 조건을 만족하도록 하는 응력을 구할 수 있을 것이다. 한편 응력이 미소 응력 요소로 구성되어 있다고 생각할 때, 구하고자 하는 것(변위)이 주어지는 조건(응력 요소)에 의해 영향을 받으며 상호 함수적 관계에 있으므로 이 둘 사이의 관계를 영향 함수라 하고 이를 이용한 해석 방법을 영향 함수법이라 한다.

본 연구에서의 해석에는 접선 전단 응력 요소의 형태로 이등변 삼각형을 취하였으며 이로부터 전체적인 표면 접선 응력의 형태는 각 이등변 삼각형의 꼭지점을 연결하여 구할 수 있다. 응력 요소로서 이등변 삼각형을 이용하면 변위장이 부분적인 연속(piecewise continuous)이 될 뿐 아니라 본 문제는 접촉 수직 하중으로부터는 헤르쯔 응력 상태가 되므로 접촉부의 경계에서 하중이 0이 되는 것을 모사할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서의 수치 해석을 위하여 접촉부의 길이(그림 3에서 $2a$)를 $2S$ 등분한 하나의 구간을 d 라 할 때 밀변이 $2d$ 인 이등변 삼각형 접선 응력 요소를 그림 4과 같이 서로 겹치게 배열한다. 따라서 전체 접촉 구간에는 $2S - 1$ 개의 이등변 삼각형이 생긴다. 이때 이등변 삼각형 밀변의 양 끝점과 중앙 점의 개수도 총 $2S - 1$ 개가 되며 이들이 수치 해석에서 이용할 collocation point 들이다. 구성된 이등변 삼각형의 전체 면적은 접촉 물체에 작용하는 접선 전단 하중이 된다. 본 문제의 해석은 접선 하중이 핵연료 봉의 축 방향에 수직인 방향(transverse direction, 그림 4에서의 y 방향)으

로 작용하는 경우 및 축 방향의 접선 하중도 고려한다. 이를 위하여 영향 함수 역시 각각의 방향에 대하여 따로 구하여야 한다.

핵연료 봉의 축 방향에 수직인 방향으로 작용하는 접선 하중인 경우의 영향 함수를 구하면, $y = \xi$ 의 위치에 있는 삼각형 (그림 4에서 n^{th} Triangle) 응력 요소, $q_{ny}(\xi)$ 에 의한 접촉 표면의 탄성 변위는 다음과 같이 구해진다[6].

$$\frac{\partial u_y(y)}{\partial y} = -\frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \int_{\xi-d}^{\xi+d} \frac{q_{ny}(\xi)}{y-\xi} d\xi, \quad \text{여기서 } q_{ny}(\xi) = q_{ny} \left(1 - \frac{|y-\xi|}{d} \right). \quad (1)$$

식 (1)로부터 변위 $u_y(y)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$u_y(y) = -\frac{(1-\nu^2)}{2\pi E} \frac{q_{ny}}{d} \left[\{(y-\xi)+d\}^2 \ln \left\{ \frac{\{(y-\xi)+d\}}{d} \right\}^2 + \{(y-\xi)-d\}^2 \ln \left\{ \frac{\{(y-\xi)-d\}}{d} \right\}^2 - 2(y-\xi)^2 \ln \left\{ \frac{y-\xi}{d} \right\}^2 \right] + const. \quad (2)$$

식 (2)를 유도할 때 사용한 이등변 삼각형을 전체 접촉 구간의 중심으로부터 n 번째 삼각형이라 할 때 이에 의한 m 번째 삼각형의 중심 위치에서의 접선 방향 변위 $u_y(m)_n$ 은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 식 (2)에서 ξ 를 an/S , d 를 a/S 로 각각 치환하면 되므로,

$$u_y(m)_n = -\frac{(1-\nu^2)}{2\pi E} \frac{a}{S} q_{ny} \left\{ (m-n+1)^2 \ln(m-n+1)^2 + (m-n-1)^2 \ln(m-n-1)^2 - 2(m-n)^2 \ln(m-n)^2 \right\} + const \quad (3)$$

이 되며 접촉 하중을 구성하는 모든 삼각형으로부터의 변위는 식 (3)의 선형 합으로 나타낼 수 있다. 즉 주어진 접선 전단 응력 요소들에 대한 $y = am/S$ 에서의 y 방향 접선 변위 $u_y(m)$ 은 다음과 같다.

$$u_y(m) = -\frac{(1-\nu^2)}{2\pi E} \frac{a}{S} \sum_{n=(S-1)}^{S-1} q_{ny} \left\{ (m-n+1)^2 \ln(m-n+1)^2 + (m-n-1)^2 \ln(m-n-1)^2 - 2(m-n)^2 \ln(m-n)^2 \right\} + const. \quad (4)$$

이제, 그림 4에서 x 방향의 응력 요소 q_{mx} 를 발생토록 한 축 방향(x 방향)의 접선 전단 하중 Q_x 를 생각하자. 이때 Q_x 에 의해 물체 내에 원점으로부터 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 전단 응력 τ_{rx} 를 고려하여 Q_x 에 의한 접촉 표면에서의 x 방향 변위 $u_x(y)$ 는 전단 강성 계수(Shear Modulus), G 와 함께 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{Q_x}{\pi G y}, \quad (5)$$

$$u_x(y) = -\frac{Q_x}{\pi G} \ln|y| + const. \quad (6)$$

이제 접촉면의 이등변 삼각형 응력 요소 q_{mx} 를 고려하면(그림 4 참조) $Q_x = q_{mx} (1 - |y|/d)$ 이므로 τ_{yx} 는 다음과 같이 된다.

$$\tau_{yx} = -\frac{q_{mx}}{\pi d} \int_{-d}^d \frac{(d-|\eta|)(y-\eta)}{(y-\eta)^2 + z^2} d\eta \quad (7)$$

$$= -\frac{q_{mx}}{\pi d} \left(d \ln \frac{d+y}{d-y} + y \ln \frac{d^2-y^2}{y^2} \right), \quad (|y| \leq d \text{ 일 때}) \quad (8)$$

따라서, x 방향 변위 $u_x(y)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_x(y) = \frac{1}{G} \int \tau_{yx} dy \quad (9)$$

$$= -\frac{q_{mx}}{\pi d G} \left\{ \frac{1}{2} (y^2 + d^2) \ln(d^2 - y^2) + y d \ln \frac{d+y}{d-y} - y^2 \ln y \right\} + const, \quad (|y| \leq d \text{ 일 때}) \quad (10)$$

위의 식 (2), (3), (4), (6) 및 (10)에서 응력을 적분하여 얻게 되는 상수는 접촉 표면에서부터 물체 내 임의의 기준 점까지의 거리에 의존하며 2 차원 탄성 문제에서 항상 나타나는 것이다. 식 (10)에서 접선 응력 q_{mx} 의 이등변 삼각형 요소의 중심이 그림 4에서와 같이 $y = \xi$ 로 이동되어 있는 경우를 고려하면 식 (10)은 다음과 같이 된다.

$$u_x(y) = -\frac{q_{mx}}{\pi d G} \left[\frac{1}{2} \left\{ (y-\xi)^2 + d^2 \right\} \ln \left\{ d^2 - (y-\xi)^2 \right\} + (y-\xi) d \ln \frac{d+(y-\xi)}{d-(y-\xi)} - (y-\xi)^2 \ln(y-\xi) \right] + const. \quad (11)$$

한편 식 (2)와 식 (11)을 비교하면 각각의 수식에서 상수가 동일하고 (즉, 접촉 물체 내의 동일한 기준 점을 취하고) 접선 응력 요소의 크기가 동일 할 때 (즉, $q_{my} = q_{mx}$ 일 때) 축 방향 변위 및 그에 수직인 변위의 비는 $E = 2G(1+\nu)$ 의 관계를 이용하여 $(1-\nu)$ 가 됨을 알 수 있다.

식 (11)를 수치 해석에 이용하기 위하여 식 (3) 및 (4)과 같이 분할하면 다음과 같이 된다.

$$u_x(m) = -\frac{1}{4\pi G S} \frac{a}{S} \sum_{n=-(S-1)}^{S-1} q_{mx} \left\{ (m-n+1)^2 \ln(m-n+1)^2 + (m-n-1)^2 \ln(m-n-1)^2 - 2(m-n)^2 \ln(m-n)^2 \right\} + const. \quad (12)$$

식 (4) 및 (12)가 본 문제의 수치 해석에 필요한 영향 함수이다.

4. 수치 해석 방법

부분 미끄럼 접촉 문제에서 영향 함수를 이용하여 접촉 응력장을 구하는 방법은 구하고자 하는 응력장과 이로부터 계산되는 접촉 표면의 변위장이 각각 접촉 표면의 응력 및 변위 경계 조건을 만족하도록 하는 것이다. 이를 위해 접촉 전단 하중의 증분에 의한 접촉 물체의 강체 변위 증분을 생각한다. 즉 어떤 시점에 접촉 물체에 작용하는 전단 하중, Q_x 와 Q_y 로부터 시간이 경과하며 각각 δQ_x 와 δQ_y 만큼 하중이 증가하였다고 하면, δQ_x 와 δQ_y 에 의해 증가한 접촉 물체의 강체 변위, $\delta \Delta_x$ 및 $\delta \Delta_y$ 를 생각할 수 있고, 역시 δQ_x 와 δQ_y 에 의해 증가한 표면 접촉 응력의 증분, δq_x 및 δq_y 와 이로부터 계산되는 접촉 표면의 탄성 변위의 증분, δu_x 및 δu_y 를 생각할 수 있다. 수치 해석 방법에서는 이와 같이 하중 증분(즉, 강체 변위의 증분)에 따른 접촉면의 응력장 및 변위장의 변화를 계산하게 된다.

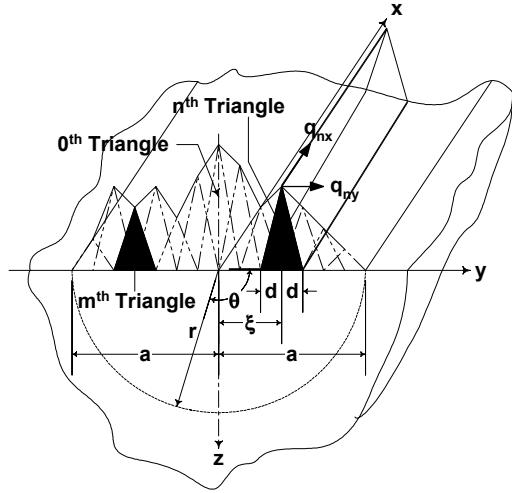


그림 4. 이등변 삼각형 응력 요소.

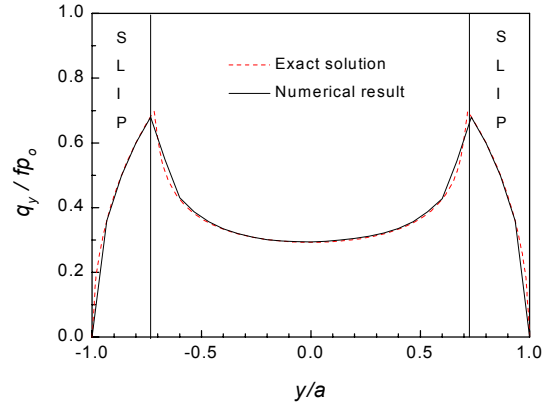


그림 5. Mindlin-Cattaneo 문제의 수치 해석 결과.

본 연구에서는 이와 같이 서로 접촉하고 있는 두 물체에 전단 하중이 방향을 바꾸며 순차적으로 변화하는 경우의 수치 해석 방법을 개발하였으며 이는 본 논문과 연결된 후속 논문에서 논의하겠다. 본 논문에서는 접촉 수직 응력장이 헤르쯔 응력일 때, 한 방향으로의(y 방향) 전단 하중 증가에 따른 접촉면 전단 응력을 구하는 Mindlin-Cattaneo 문제에 대해 개발된 수치 해석 방법을 적용하여 그 타당성을 확인하고자 한다.

Mindlin-Cattaneo 문제의 엄밀해는 다음과 같이 주어 진다[11].

$$q_y = \mu p_0 \sqrt{1 - (y/b)^2}, \quad c \leq |y| \leq b$$

$$= \mu p_0 \left\{ \sqrt{1 - (y/b)^2} - (c/b) \sqrt{1 - (y/c)^2} \right\}, \quad |y| \leq c \quad (13)$$

여기서, p_0 는 헤르쯔 응력의 최대값이며 c 는 접촉면 상의 고착 구간 길이의 반이다. 한편, 수치 해석을 위한 Mindlin-Cattaneo 문제에서 경계 조건은 다음과 같다.

미끄럼 영역에서는

$$q_y = \pm \mu p, \quad \frac{q_y}{|q_y|} = - \frac{\delta s_y}{|\delta s_y|} \quad \text{그리고} \quad q_y \cdot \delta s_y \leq 0. \quad (14)$$

고착 영역에서는

$$-\mu p \leq q_y \leq \mu p \quad \text{그리고} \quad \delta s_y = 0. \quad (15)$$

식 (14) 및 (15)에서 미끄럼 변위의 증분은 $\delta s_y \equiv \delta u_y - \delta \Delta_y$ 로 정의된다.

수치 해석 방법은 임의의 전단 하중의 증분(δQ_y)이 있을 때, 모든 collocation point가 고착 영역 내에 있다고 가정하여 각 collocation point에서 표면 전단 응력의 증분, δq_y 를 구한다. 하중 증분이 있고 난 후, 각 collocation point에서의 전단 응력, q_y 를 구할 수 있으며 $\mu p \geq |q_y|$ 를 만족하는지 조사한다. 만일 만족할 경우 그 collocation point는 고착 영역 내에 있음이 분명하다. 만일 만족하지 못하는 경우에는 그 collocation point가 미끄럼 영역 내에 있으므로, q_y 는 $\pm \mu p$ 가 되어야 하며 부호는 식 (14)를 만족하게끔 취한다. 이러한 방법으로 모든 collocation point에 대해 순차적인 계산이

완료되면 다시 첫번째 collocation point로부터 재 계산한다. 각 collocation point에서 재 계산에 의해 얻어진 δq_i 가 앞선 계산 결과와 비교하여 요구하는 범위 내의 차이를 보일 때까지 반복 계산을 수행하며, 결과적으로 주어진 하중 증분에서 수렴된 해를 구하게 된다. 그림 5에 보여 주는 Mindlin-Cattaneo 문제에 대한 본 연구의 수치 해석적 결과와 엄밀해의 비교로부터 본 연구의 해석 방법 및 프로그램이 타당하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

핵연료/지지격자체의 접촉에 의한 프레팅 손상을 분석하기 위하여 접촉면 응력장을 수치적으로 해석할 수 있는 방법을 접촉 역학의 이론을 이용하여 개발하였다. 기존의 연구는 핵연료의 축 방향에 수직인 방향으로의 전단 응력에 대해서만 고려하여 왔으나 실제의 접촉면에는 축 방향의 전단력도 존재하며 순차적으로 작용하는 경우를 고려하여야 한다. 따라서 축 방향 및 그에 수직인 방향의 전단 하중이 존재하는 경우를 해석하기 위해 각 방향의 영향 함수를 유도하였다. 구해진 영향 함수를 이용하여 프레팅 하중 상태에서의 표면 응력장과 접촉면 거동을 분석할 수 있는 수치 해석 프로그램을 개발하였으며 Mindlin-Cattaneo 문제의 해석을 통하여 개발된 프로그램이 본 연구에서 고려하는 문제를 잘 해석할 수 있음을 확인하였다. 핵연료 봉의 프레팅 문제를 해석하기 위한 접촉면 응력장 및 거동은 본 논문에서 개발된 방법을 이용하여 구하였으며 이는 연속되는 제 2편[12]에서 다루도록 하였다.

참고문헌

1. 정진곤, 김형규의 (1995) KEPRI-94Z-J05, 한국전력공사, 199-420.
2. M.W. Kennard et al (1995) A Study of Grid-to-Rod Fretting Wear in PWR Fuel Assemblies, S.M. Stoller Corporation.
3. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier (1970) Theory of Elasticity, 3rd Ed. Article 36.
4. Y.C. Fung (1965) Foundation of Solid Mechanics, 200-201.
5. H. Hertz (1882) J. reine und angewandte Mathematik, 92, 156-171.
6. K.L. Johnson (1989) Contact Mechanics, ISBN 0-521-25576-7, Cambridge Univ. Press.
7. D.A. Hills, D. Nowell and A. Sackfield (1993) Mechanics of Elastic Contacts, ISBN 0-7506-0540-5, Butterworth-Heinemann Ltd.
8. D. Nowell and D.A. Hills (1988) Int. J. Solids Struct., 24(1), 105-155.
9. 이상근, 김형규의 (1993) KAERI/TR-387/93, 한국원자력연구소.
10. R.D. Mindlin (1949) J. Appl. Mech., 16, 259-268.
11. D.A. Hills and D. Nowell (1994) Mechanics of Fretting Fatigue, ISBN 0-7923-2866-3, Kluwer Academic Publishers.
12. 김형규 외 3명 (1998) 핵연료봉 프레팅 손상 해석을 위한 접촉 역학의 응용-제 2편, '98 추계학술발표회, 한국원자력학회, submitted.