

# 피복관 프레팅마모 해석을 위한 LuGre 마찰모델 성능 고찰

## Vibration Simulation Using LuGre Friction Model for Cladding Tube Fretting Wear Analysis

박 남 규<sup>†</sup>·김 진 선<sup>\*</sup>·김 중 진<sup>\*</sup>·김 재 익<sup>\*</sup>

Nam-Gyu Park, Jin-Seon Kim, Joong-Jin Kim and Jae-Ik Kim

(Received October 21, 2015 ; Revised November 27, 2015 ; Accepted November 27, 2015)

**Key Words** : Fretting Wear(프레팅 마모), Fuel Rod(연료봉) LuGre Friction(LuGre 마찰), Coulomb Friction(Coulomb 마찰), Stick-slip(고착-미끄럼)

### ABSTRACT

Nuclear fuels are always exposed to hot temperature and high speed coolant flow during the reactor operation. Thus the fuel rod accompanies small amplitude vibration due to the turbulent flow. The random vibration causes friction between the fuel rod and the grid structure which provides the lateral supports. The friction is critical to the fuel rod fretting wear, and it degrades fuel performance when a severe wear is developed. LuGre friction model is introduced in the paper, and the performance was evaluated comparing to the classical Coulomb model. It is shown that the developed friction force considering the Coulomb friction is not enough to stop or delay the motion while the stick-slip can be simulated using LuGre friction model. Numerical solutions of the two dimensional spacer grid cell model with the modern friction are also reviewed, and it is discussed that the new friction model simulates well the nonlinear mechanism.

### 1. 서 론

기계구조물에 수반되는 대표적 비선형 현상으로 마찰이 있으며, 마찰과 관련된 Coulomb의 실험을 시작으로 제어 및 동역학 분야에서 많은 연구가 진행되었다<sup>(1)</sup>. Coulomb 마찰은 마찰계수를 도입하여 수직항력에 비례하는 간단한 식으로 표현되므로 운동방정식에 대입하여 물체의 운동을 모사하는데 편리하다. 그러나 이상적인 Coulomb 마찰 모델의 경우, 속도가 0인 지점에서 불연속이 발생하고 수치해석상 어려움이 존재한다<sup>(2)</sup>.

마찰력은 서로 상대 운동하는 두 물체 사이에 운동 방향과 반대로 작용하는 힘이다. 마찰력은 표면 거칠기에 따라 다르며, 물체의 변위 및 속도의 함수로 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 동 연구결과에 따르면 초기 마찰력은 변위의 증가에 따라 증가 하지만, 어느 순간 변위의 증가와 무관하게 마찰력이 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 즉 초기상태에 돌출부는 서로 상대운동을 하여 탄성변형이 발생하며 마찰력이 거의 선형적으로 증가한다. 계속되는 변형으로 돌출부는 소성변형으로 전환되며, 마찰력이 약간 감소하고 이후로는 거의 일정한 수준을 유지하고 있다. 최대 마찰력 발생으로부터 일정 마찰력 발생까지의 천이

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, KEPCO NF  
E-mail:nkpark@knfc.co.kr  
<sup>\*</sup> KEPCO NF

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

구간은 마찰면 돌출부의 모든 부분이 탄성에서 소성으로 변환되는 과정으로부터 기인된다. 따라서 초기 마찰력의 대부분은 속도보다는 변위의 함수로 거동하며, 마찰면이 확대되어 전체적인 미끄러짐(gross sliding)이 발생하면 속도의 함수로 거동하는 것으로 알려졌다<sup>(3)</sup>. 위의 설명과 결과는 Dahl<sup>(4)</sup>에 의해 최초로 수학적으로 모형화 되었으며, 이후 스웨덴의 Lund 지방 및 프랑스의 Grenoble 지방의 연구기관에서 보다 정교한 마찰 모델이 제안되었으며<sup>(5)</sup> 이를 LuGre 모델이라고 부른다.

한편, 초기 마찰력의 변위 의존성 및 미끄러짐은 핵연료의 연료봉(fuel rod)을 지지하는 지지격자와 피복관(cladding tube) 사이에 발생하는 마찰현상에서도 관측된다. 즉 피복관과 지지격자의 마찰시험시, 마찰력은 초기에 변위의 함수로 증가하고 표면에 소성변형이 발생하면서 거의 일정한 마찰력을 유지한다. 여기서 피복관은 우라늄을 내장한 연료봉의 외피를 의미한다.

원자로 조건에 노출된 핵연료는 지속적으로 난류 냉각수에 의한 하중을 받으므로 연료봉 진동은 피할 수 없다<sup>(6)</sup>. 이때, 연료봉은 지지격자의 스프링/딴플과 지속적인 상대운동에 의한 마찰력이 발생한다. 마찰력으로 인한 프레팅 마모는 매우 작은 지속적인 진동에 의해 발생하며, 프레팅 마모의 정도는 마찰력의 크기 및 재료의 종류에 따라 달라진다. 대표적인 비선형 기구인 마찰력을 모사하기 위해 보편적으로 Coulomb 마찰을 이용하지만, 마찰 기구의 세밀한 모사는 불가능하다. 또한 수직항력에 비례하는 마찰력 만으로는 프레팅 마모 해석에 필요한 고착 및 미끄러짐(stick-slip) 현상을 재현하기가 어렵다. 이 논문은 이와 같은 단점을 극복하고자 LuGre 마찰 모델을 도입하여 연료봉 단순모델의 프레팅 마모거동 특성을 고찰하였으며, Coulomb 마찰 대비 LuGre 마찰 모델의 성능을 분석하였다.

## 2. LuGre 마찰모델

Dahl<sup>(4)</sup>은 고체의 응력-변형률 관계가 마찰력에도 유사하게 적용할 수 있음을 가정하였다. 즉 경한 재료(brittle material)의 인장시편의 파괴직전 까지는 두 물체의 마찰력이 점점 증가하는 현상과 유사하며, 시편의 파괴(분리)는 두 물체에 작용하는 저항이

해소되어 마찰력이 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 연성 재료의 경우는 최대인장응력이 발생하는 시점과 파괴가 발생하는 시점에 차이가 있으며, 파괴이전에 최대인장응력이 발생한다. 최대인장응력이 발생하는 시점까지는 두 물체사이의 마찰이 점점 증가하는 것과 관련이 있으며, 최대인장응력 시점으로부터 파괴가 일어나기 까지는 응력이 점점 감소하므로 Coulomb 모델과 유사한 특성이 있음을 알 수 있다. 따라서 Dahl은 마찰력이 속도와 변위의 함수로 표현할 수 있다고 가정한 실험식을 제안하였다. Dahl의 모델은 변위의 함수로 거동하는 마찰(pre-sliding) 및 히스테리시스 곡선 특성을 모사할 수 있으나, 속도에 따른 마찰력 변화, 고착 및 미끄러짐(stick-slip)을 예측하는데는 어려운 단점이 있다<sup>(5)</sup>.

한편, LuGre 모델은 Dahl 모델을 기초로 미소변위에서의 변위 의존성 및 마찰력의 속도 의존성 등과 같은 마찰 특성을 고려하기 위해 상태변수(z)를 도입하였다. 이와 관련된 상세한 설명은 참고문헌<sup>(1,3,5)</sup>에 있으며, LuGre 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{g(v)} z \tag{1}$$

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \tag{2}$$

여기서 v는 두 물체의 상대속도를 의미하며, z는 마찰면 돌출부의 평균 변형(deflection)을 의미하는 상태변수이다. 또, g(v)는 마찰력(F<sub>f</sub>)의 속도 의존성을 정의하기 위한 함수이다. σ<sub>0</sub>, σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>는 양수이며, 각각 마찰면 스프링 상수, 마찰면 감쇠상수, 점성계수를 의미한다. 이때, σ<sub>0</sub>, σ<sub>1</sub>는 미시규모의 돌기면에 작용하는 기계적 특성이며, 미시적인 규모에서의 변위 및 속도를 반영한 마찰력을 의미한다. σ<sub>2</sub>는 마찰면 분위기에 따른 점성계수이다.

## 3. 마찰모델 성능 평가

지지격자 한 셀 내의 연료봉은 궤적을 그리면서 2차원 운동을 하므로 2자유도 운동을 모사할 수 있는 모델을 대상으로 마찰모델의 적용가능성을 검증할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 마찰이 고려

된 2자유도 운동을 하는 수학적 모델을 고안하고, 이를 이용한 결과를 기술하였으며 마찰모델의 성능을 분석하였다. 해석의 신속성과 모델링 과정의 편의를 위하여 Fig. 1과 같은 모형을 도입하였다. Fig. 1에서  $g$ 는 초기 간극을 의미하며, 간극이 닫힐 경우 마찰이 발생하는 상황을 가정하였다. 또한 Coulomb 마찰 및 LuGre 마찰모델을 이용하여 두 모델간의 성능 차이를 분석하였다.

Fig. 1에 도시된 계의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= f_x(t) + N_x + F_x \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= f_y(t) + N_y + F_y \end{aligned} \tag{3}$$

여기서  $m$ ,  $c$ ,  $k$ 는 질량, 감쇠상수 및 스프링 탄성계수를 의미하며, 각각 1 kg, 11.5 Ns/m, 및 531.5 N/m를 가정하였다. 또,  $N_x$ 는  $x$ 방향으로 간극이 닫힐 때 작용하는 충격력(충돌하중)이며,  $F_x$ 는  $y$ 방향의 간극이 닫힐 때 발생하는 마찰력을 의미한다. 마찬가지로  $N_y$ 는  $y$ 방향으로 간극이 닫힐 때 작용하는 충격력이며,  $F_y$ 는  $x$ 방향의 간극이 닫힐 때 발생하는 마찰력을 의미한다. 접촉시의 강성은 스프링 탄성계수와 동일한 것으로 가정하면, 간극( $g$ )이 닫힐 때 발생하는 충격력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_x &= \begin{cases} -k(x-g), & \text{if } x > g \\ 0, & \text{if } x \leq g \end{cases} \\ N_y &= \begin{cases} -k(y+g), & \text{if } y < -g \\ 0, & \text{if } y \geq -g \end{cases} \end{aligned} \tag{4}$$

접촉 및 마찰이 동반된 계에 대한 Coulomb 및 LuGre 모델을 이용한 응답특성은 다음과 같이 기술할 수 있다.

### 3.1 Coulomb 마찰

고전적인 Coulomb마찰은 다음과 같이 정의된다<sup>(1)</sup>.

$$F_C = -\mu N \operatorname{sgn}(v) \tag{5}$$

여기서  $\mu$ 는 마찰계수를 의미하며, 특성속도를 중심으로 정적 마찰계수 및 동적 마찰계수로 분류할 수 있다.  $N$ 은 마찰력의 방향과 수직방향에서 작용하는 항력을 의미하며,  $\operatorname{sgn}(v)$ 는 속도( $v$ )의 방향

을 의미한다. 즉 식 (5)와 같이 정의된 마찰력은 항력에 비례하고 속도의 방향에 반대로 작용함을 알 수 있다.

한편, 마찰력은 수직항력의 크기에 비례하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= \begin{cases} -\mu N_y, & \text{if } y < -g \\ 0, & \text{if } y \geq -g \end{cases} \\ F_y &= \begin{cases} -\mu N_x, & \text{if } x > g \\ 0, & \text{if } x \leq g \end{cases} \end{aligned} \tag{6}$$

위의 식에서 마찰력은 다시 몇 개의 경우를 생각하여야 한다. 왜냐하면 이상적인 Coulomb 마찰을 적용할 경우, 속도가 0인 지점에서 마찰력을 일의적으로 결정할 수가 없으므로 여러 개의 마찰력이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 Karnopp<sup>(2)</sup>과 같이 상대적으로 작은 임의의 속도 범위를 정적인 구간으로 가정하면, 마찰력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= \begin{cases} -\mu_k N_y, & \text{if } y < -g \\ -\mu_s N_y |\dot{x}/v_s| \operatorname{sgn}(\dot{x}), & \text{if } y < -g \text{ and } |\dot{x}| < v_s \\ 0, & \text{if } y \geq -g \end{cases} \\ F_y &= \begin{cases} -\mu_k N_x, & \text{if } x > g \\ -\mu_s N_x |\dot{y}/v_s| \operatorname{sgn}(\dot{y}), & \text{if } x > g \text{ and } |\dot{y}| < v_s \\ 0, & \text{if } x \leq g \end{cases} \end{aligned} \tag{7}$$

여기서  $v_s$ 는 동적 마찰이 발생하는 속도를 의미하며,  $\mu_k$ 와  $\mu_s$ 는 각각 동적 및 정적 마찰계수를 의미한다. 즉, 간극이 닫히고  $v_s$ 보다 작은 속도 구간에서는 정적 마찰이 작용됨을 의미한다.

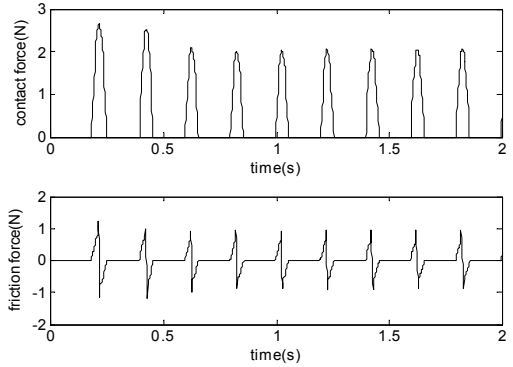
식 (3), (4) 및 식 (7)을 이용한 시뮬레이션에 필요한 모델 상수는 Table 1과 같다. 이때,  $x$  및  $y$  방향으로 작용하는 외력으로 각각  $-5\sin(10\pi)$  및  $5\sin(10\pi)$ 의 정현파를 가하였다. 따라서 두 방향으로의 응답에 영향을 주는 매개변수가 두 방향 모두 동일하다는 사실과 크기와 위상이 같고 방향만 다른 외력이 작용하는 점을 고려할 때, 이 시스템은 정확히 대각선으로 움직인다. 따라서 두 방향의 운동은 방향만 반대이며 그 크기는 같음을 알 수 있으므로  $x$ 방향의 결과를 중심으로 서술하고자 한다.

Fig. 2는  $x$ 방향의 속도와 변위 선도이며, 마찰에 의한 고착 및 미끄럼(stick-slip)상태는 찾을 수 없다. Fig. 3에 도시한 충격력은 5 Hz의 주기를 갖는 외력의 결과를 반영하여 매 0.2초에 한 번씩 충돌이 발생

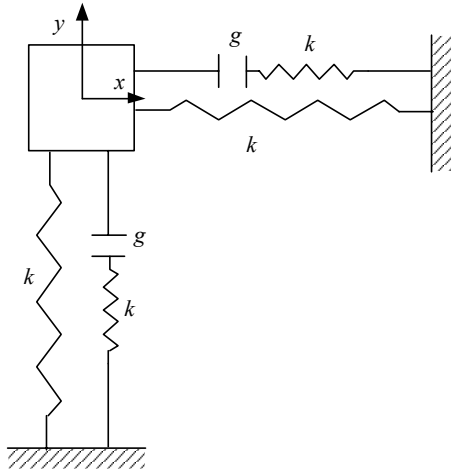
하고 있음을 알 수 있다. 또한 접촉에 따른 마찰력도 수반되고 있음을 알 수 있고, 식 (7)에서 정의한 바와 같이 매우 작은 속도 구간을 지나는 순간 순간

**Table 1** Parameters for the simulation

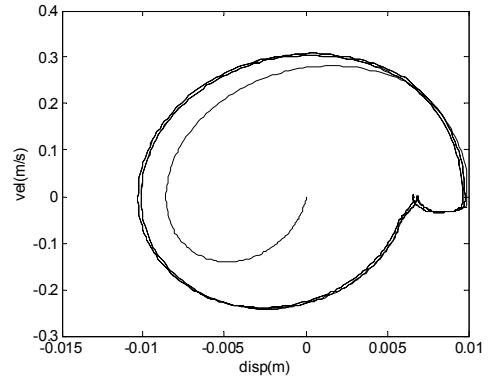
Parameters	Values	Units
$g$	0.005	m
$\mu_k$	0.3	-
$\mu_s$	0.5	-
$v_s$	0.01	m/s



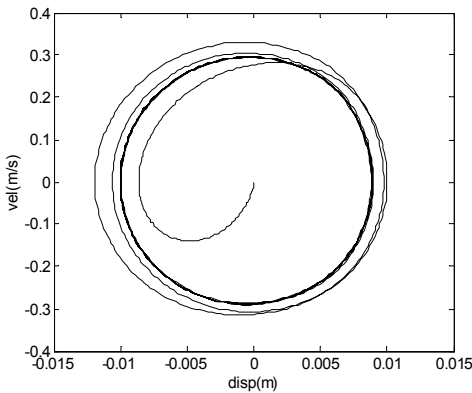
**Fig. 3** Developed contact force and friction force



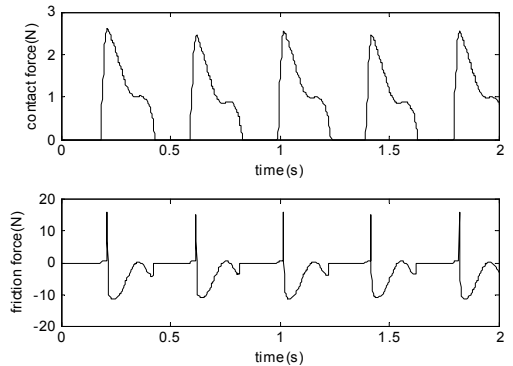
**Fig. 1** Nonlinear two degree-of-freedom system



**Fig. 4** Phase diagram with big static friction coefficient



**Fig. 2** Phase diagram of the system with Coulomb friction



**Fig. 5** Contact and friction forces with big static friction coefficient

적인 정지 마찰력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 그러나 순간적으로 작용하는 마찰력의 크기가 계의 운동을 정지시키기에는 너무 작으며, Coulomb 모델을 이용하여 고착 상태를 모사하기 위해서는 통상의 경우보다 큰 마찰계수의 도입이 필요하다. Fig. 4와 Fig. 5는 정지 마찰계수( $\mu_s$ )를 8.5로 가정한 결과이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 변위가 거의 변하지 않거나 속도가 거의 변하지 않는 고착 및 미끄럼 상태는 모사할 수 있으나 Fig. 5와 같이 마찰력의 크기가 매우 증가하고 가진 함수의 주기가 아닌 2.5 Hz의 주기를 갖고 운동하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 LuGre 마찰

고착 및 미끄럼 특성과 속도의 변화에 따른 마찰력 변화를 고려하기 위해 LuGre 마찰 모델을 도입하여 Coulomb 마찰과 비교하였다. 식 (3), 식 (4)는 공통적으로 적용 할 수 있다. 한편, LuGre 마찰모델에 의한 마찰력은 다음과 같다<sup>(1,3,5)</sup>.

$$\begin{aligned}
 F_x &= \begin{cases} \sigma_0 z_x + \sigma_1 \dot{z}_x + \sigma_2 v_x, & \text{if } y < -g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\
 F_y &= \begin{cases} \sigma_0 z_y + \sigma_1 \dot{z}_y + \sigma_2 v_y, & \text{if } x > g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서  $z_x, z_y$ 는  $y$ 방향 및  $x$ 방향의 간극이 닫힌 경우에 발생하는 마찰면의 상태변수를 의미한다. 면의 특성에 따라 계수가 달라질 수 있으나, 여기서는 편의상 모든 접촉 면의 계수가 같음을 가정하여  $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ 는 순서대로 15 N/m, 200 Ns/m, 0 Ns/m로 설정하였고 두 접촉면에서 모두 동일함을 가정하였다. 이때, 접촉면의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_x &= v_x - \sigma_0 |v_x| g^{-1}(v_x) z_x \\
 \dot{z}_y &= v_y - \sigma_0 |v_y| g^{-1}(v_y) z_y
 \end{aligned} \tag{9}$$

따라서, 식 (8) 및 식 (9)를 동시에 풀어서 모든 상태변수를 예측하여야 한다. 상기 식에서  $g(v_x)$  및  $g(v_y)$ 는 다음과 같이 정의 된다<sup>(7,8)</sup>.

$$\begin{aligned}
 g(v_x) &= F_c + (F_s - F_c) \exp(-|v_x/v_s|) \\
 g(v_y) &= F_c + (F_s - F_c) \exp(-|v_y/v_s|)
 \end{aligned} \tag{10}$$

위의 식으로부터  $F_c \leq g(v) \leq F_s$ 의 관계를 만족함을 알 수 있으며,  $F_c, F_s$ 는 정상상태의 마찰 및 고착(stick) 상태의 마찰을 의미하며, 마찰력은 표면상태에 따라 달라지므로 그 계에 적절한 값을 정해야 한다. 한편,  $v_s$ 는 최대 마찰력이 발생하는 순간의 속도를 의미하며, 역시 적절한 값을 찾아야 한다.

시뮬레이션에 필요한 모델 상수는 Table 1과 동일하며,  $F_c$ 와  $F_s$ 는 2.0 N 및 2.5 N으로 가정하였다. 외력의 경우에도, 전과 동일하게  $x$  및  $y$ 방향으로 각각  $-5\sin(10\pi)$  및  $5\sin(10\pi)$ 의 정현파를 가하였다. 속도대 변위 선도(Fig. 6)에 도시한 바와 같이 변위 및 속도가 상대적으로 일정한 값으로 유지되는 구간을 확인 할 수 있으며, 충격 및 마찰력은 Fig. 7과 같이 외력의 주기와 동일하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

한편, Coulomb 마찰과 달리 표면의 상태가 개입하도록 정의된 LuGre 마찰 모델은 제 3의 상태변수( $z$ )를 도입하였다. Fig. 8은  $x$ 방향에 대한 표면 상태의 운동이며, 충격력 및 마찰력과 동일한 패턴이 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉 식 (8)과 같이 정의된 마찰력은 마찰표면의 상태변화에 따라 마찰력의 크기가 결정됨을 알 수 있다.

### 4. 지지격자 셀 내에서의 운동

지지격자의 한 셀은 4면의 스트랩으로 구성되며, 각 면마다 덤플 또는 스프링 구조가 있다. 한편 덤플은 스트랩의 위쪽과 아래쪽에 각각 1개씩 존재하며, 스프링은 스트랩 중앙에 1개가 있다. 또 덤플이 존재하는 스트랩에서 마주보는 스트랩에는 스프링 구조가 있다. 따라서 한 셀 내에는 2쌍의 스프링과 덤플이 각각 존재하며, 연료봉을 지지하고 있다. 연료봉은 빔 요소로 모사할 수 있으나, 이 연구에서는 평면상에서 4면에 부딪히는 2자유도 물체의 운동을 고찰하였다. 따라서 이 연구에서 고려한 셀 모사체는 Fig. 9와 같다.

한편, 식 (3)은 Fig. 9의 해석에 사용할 수 있다. 그러나, 4면에서 접촉 및 마찰하중이 발생하므로 4면에서의 접촉하중 및 LuGre 마찰모델 적용을 위한 4 마찰면에서의 상태를 고려할 수 있어야 한다. 따

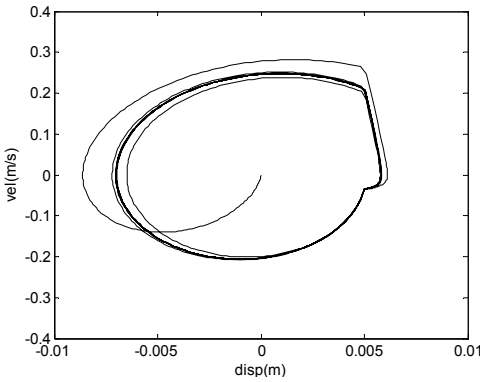


Fig. 6 Phase diagram of the system with LuGre friction

$$N_x = \begin{cases} -k_s(x-g), & \text{if } x > g \\ -k_d(x+g), & \text{if } x < -g \\ 0, & -g \leq x \leq g \end{cases}$$

$$N_y = \begin{cases} -k_s(y-g), & \text{if } y > g \\ -k_d(y+g), & \text{if } y < -g \\ 0, & -g \leq y \leq g \end{cases}$$
(11)

여기서  $k_s$ 와  $k_d$ 는 스프링과 댐핑의 탄성계수를 의미한다.

$$F_x = \begin{cases} \sigma_0 z_x + \sigma_1 \dot{z}_x + \sigma_2 v_x, & \text{if } |y| > g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_y = \begin{cases} \sigma_0 z_y + \sigma_1 \dot{z}_y + \sigma_2 v_y, & \text{if } |x| > g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$
(12)

이때 접촉면의 상태는 상/하/좌/우로 고려하여야 하므로 접촉면의 상태 방정식은 식 (9)에서 다시 각각 2개의 경우로 나누어야 한다. 즉 상/하/좌/우로 접촉면의 상태가 다르므로 다음과 같이 구분된다.

$$\dot{z}_y^L = v_x - \sigma_0 |v_x| g^{-1}(v_x) z_y^L$$

$$\dot{z}_y^R = v_x - \sigma_0 |v_x| g^{-1}(v_x) z_y^R$$

$$\dot{z}_x^T = v_y - \sigma_0 |v_y| g^{-1}(v_y) z_x^T$$

$$\dot{z}_x^B = v_y - \sigma_0 |v_y| g^{-1}(v_y) z_x^B$$
(13)

여기서  $z_y^R$ ,  $z_y^L$ 는 우측 및 좌측 접촉 시 수직(y)방향으로 발생하는 마찰면의 상태변수이며,  $z_x^T$ ,  $z_x^B$ 는 상측 및 하측 접촉 시 수평(x)방향으로 발생하는 마찰면의 상태변수를 의미한다. 또, 식 (10) 역시 4면 접촉을 고려하기 위해 위와 같은 방식으로 4면에서의 함수를 정의하여야 한다.

시뮬레이션에 필요한 매개변수의 정의는 Table 1과 같다. 단 간극의 크기는 원자로 주기말 조건을 고려하여 0.05 mm로 정의하였다. 스프링과 댐핑의 강성( $k_s$ ,  $k_d$ )은 특정 지지격자의 측정 결과를 바탕으로 결정되었으며, 각각 53.1 kN/m 및 354.3 kN/m이다. 기타 변수는 전술한 시뮬레이션 매개변수와 동일하며 해석의 편의상 감소는 작용하지 않음을 가정하였다.  $x$  및  $y$ 방향으로 각각  $5\sin(10\pi)$ 의 정현파를 가하였고, Fig. 10과 같은 변위의 궤적을 볼 수

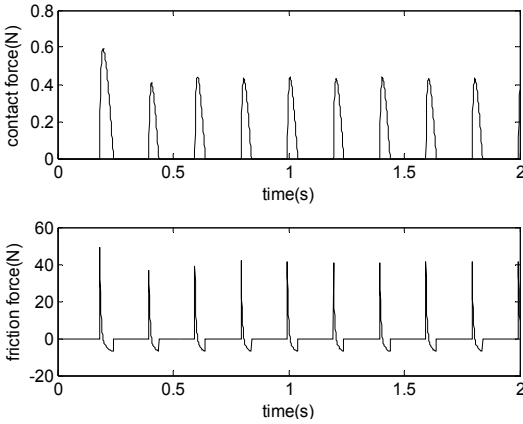


Fig. 7 Contact force and friction force

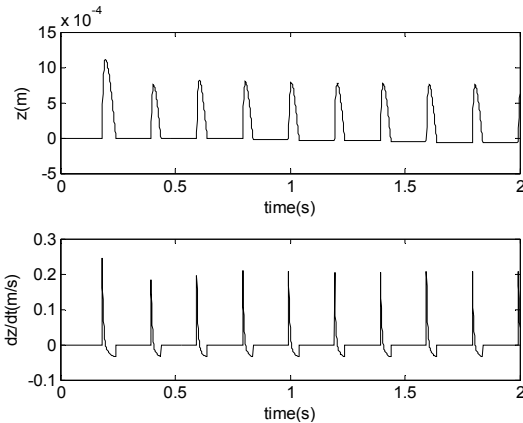
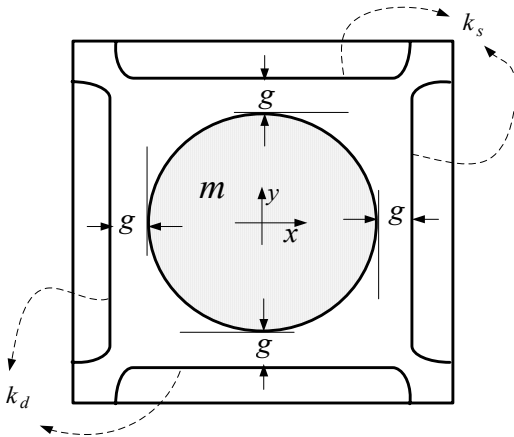
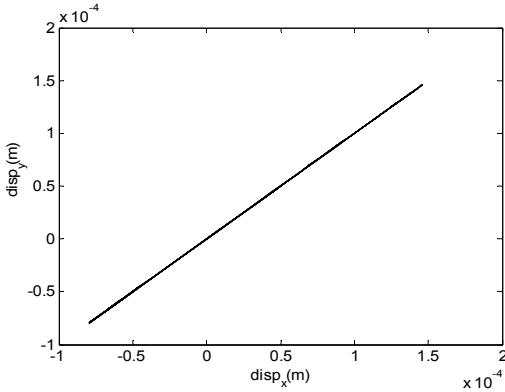


Fig. 8 Friction surface states

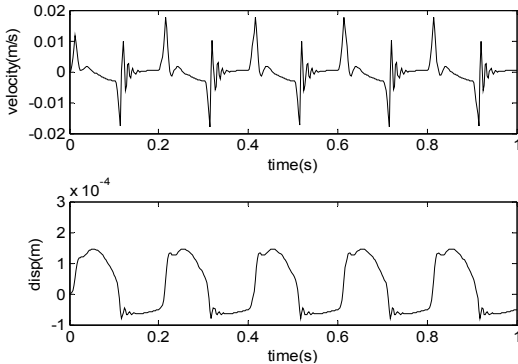
라서 충격력( $N$ ), 마찰력( $F$ )은 각각 식 (11) 및 식 (12)와 같다.



**Fig. 9** Simulation model of one grid cell( $g=0.05$  mm). One cell consists of 4 straps with dimple or spring structure

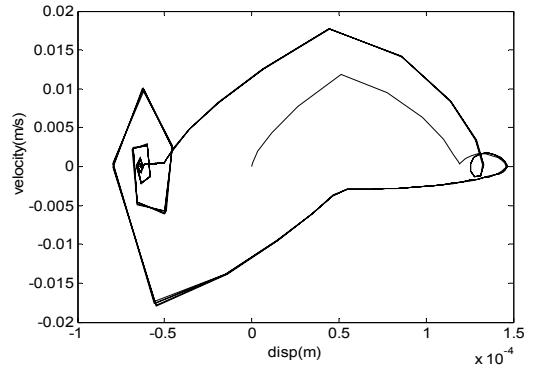


**Fig. 10** Motion of the system

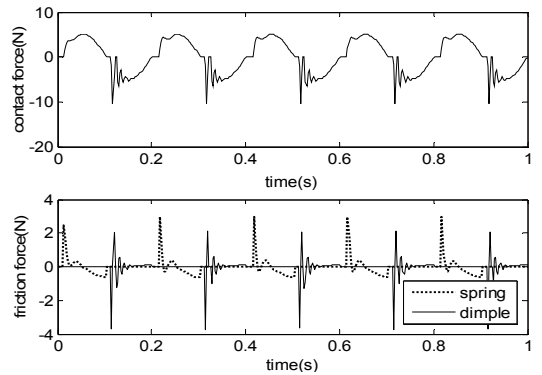


**Fig. 11** Velocity and displacement in the x-direction

있다. 이것은 Fig. 9의 모델을 고려하면 대각선 방향으로 짝을 이루는 지지점의 강성이 동일하므로 양방



**Fig. 12** Phase diagram in the x-direction



**Fig. 13** Contact and friction forces in the x-direction

향으로 동일한 움직임이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 11은  $x$ 방향의 속도와 변위이다. 뎀플 강성 ( $k_d$ )이 스프링 강성( $k_s$ )보다 약 6배가량 크므로 Fig. 11에서 보듯이 뎀플 방향(음의  $x$ 방향)으로의 움직임에 더 제약이 심함을 알 수 있다. 또한, 스프링과의 충돌에 비해 충돌 순간의 떨림이 심하게 발생함을 알 수 있다. 속도 대 변위선도(Fig. 11, Fig. 12)에서도 좌/우 충돌 시에 고착 및 미끄럼이 발생함을 확인 할 수 있다. 그때 발생하는 충격력과 마찰력은 Fig. 13과 같고, 한 방향으로 2개의 마찰력이 작용하므로 스프링과 뎀플에 걸리는 마찰력을 구분하였다.

### 5. 결 론

연료봉은 지지격자 셀의 마찰력으로 지지되며 정 위치를 유지할 수 있다. 노내조건에 장시간 노출된 연료봉은 지지격자 셀 내부에서의 충돌 및 마찰로

인해 피복관 마모가 진행된다. 이 논문에서는 피복관 마모와 관련하여 연료봉 진동 시뮬레이션 모델에 사용될 마찰모델성능을 확인하고자 Coulomb 및 LuGre 마찰모델을 이용한 수치해석 결과를 기술하였다.

2 자유도 물체를 대상으로 마찰이 동반된 충돌현상을 모사하였으며, Coulomb 모델의 경우 마모진행에 매우 중요한 고착 및 미끄럼 현상을 적절히 모사할 수 없음을 검토하였다. 이는 정의된 마찰력의 크기가 계의 움직임에 영향을 주지 못함에 기인하며, 인위적으로 과도한 마찰계수를 정의하여 사용할 경우 고착을 모사할 수는 있으나 통상적으로 예측되는 마찰계수의 범위보다 매우 큰 값이 필요하므로 물리적으로 적절치 않다.

연료봉의 진동으로 발생하는 프레팅 마모는 지지격자와의 마찰 및 충돌에 의한 현상이며, 한 셀 내에 4면에 충돌하면서 운동하는 계에 대한 해석을 수행하여 고착 및 미끄럼의 물리적 현상을 모사하기 위해서 LuGre 모델이 유용하게 사용될 수 있음을 고찰하였다. 그러나, LuGre 마찰 모델은 표면상태를 정의하는 여러 개의 매개변수가 필요하며, 조도(roughness) 및 환경조건 등을 고려한 최적의 매개변수를 정의하여야 한다. 계의 응답은 이러한 매개변수에 그 결과가 달라지므로 매개변수 규명과 관련한 시험적으로 검증한 결정된 사례를 참고하여 피복관 표면의 상태에 대한 연구가 필요하다.

References

(1) Berger, E. J., 2002, Friction Modeling for Dynamic System Simulation, ASME Applied Mechanics Reviews, Vol. 55, No. 6, pp. 535~577.  
 (2) Karnopp, D., 1985, Computer Simulation of Stick-slip Friction in Mechanical Dynamic Systems, J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 107,

No. 1, pp. 100~103.  
 (3) Swevers, J., Al-Bender, F., Ganseman, C. G. and Prajogo, T., 2000, An Integrated Friction Model Structure with Improved Presliding Behavior for Accurate Friction Compensation, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 45, No. 4, pp. 675~686.  
 (4) Dahl, P. R., 1977, Measurement of Solid Friction Parameters of Ball Bearing, The Aerospace Corporation Technical Report, SAMSO-TR-77-132.  
 (5) Canudas de, W. C., Olsson, H., Åström, K. J., Lischinsky, P., 1995, A New Model for Control of Systems with Friction, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419~425.  
 (6) Park, N. G., Jeon, S. Y., Suh, J. M., Kim, K. T., 2006, Vibration Characteristics of a Nuclear Fuel Rod in Uniform Axial Flow, Transactions of the Korean Society for Noise and vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1115~1123.  
 (7) Bo, L. C. and Pavelescu, D., 1982, The Friction-speed Relation and Its Influence on the Critical Velocity of the Stick-slip Motion, Wear, Vol. 82, No. 3, pp. 277~289.  
 (8) Armstrong-Helouvry, B., 1991, Control of Machines with Friction, Springer.



**Nam-Gyu Park** has been in charge of Mechanical Test & Analysis Section in KEPCO Nuclear Fuel since 2012. He received Ph.D. in mechanical engineering from Korea Advanced Institute of Science & Technology in 2002. His job is to develop analytical methodologies as well as test mechanical test to verify nuclear fuel integrity.