

마찰결수측정실험장치의 진동특성연구

현철, 조원남

선행연구[2]에서의 마찰결수측정실험장치는 힘측정수감부에 의한 직접적방법으로 마찰힘을 측정하기때문에 많은 원가가 들고 장치가 복잡하다.

또한 선행연구[1]에서는 진동식마찰결수측정실험장치를 제기하였지만 굴대의 합리적인 회전수에 대하여서는 제기하지 못하였다.

우리는 ADAMS를 리용하여 진동식마찰결수측정실험장치에 대한 모의를 통하여 이동판의 진동특성을 해명하고 측정을 진행할수 있는 굴대의 최소림계회전수를 결정하였다.

진동식마찰결수측정실험장치모형은 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 장치는 고정축 주위로 회전하는 반경이 같은 2개의 굴대와 그 위에 자유롭게 놓인 밀도가 고르로운 이동판으로 구성되어있다.

굴대의 결면과 이동판의 아래면에는 마찰결수를 측정하려는 재료가 부착되어있다.

먼저 2개의 굴대들을 그림 1과 같이 서로 반대방향으로(이동판을 안쪽으로 움직이도록) 같은 회전각속도 ω 로 돌린다. 이 회전수를 어떤 림계회전수이상으로 고정하고 이동판을 어느 한 굴대쪽에 편심되게 놓는다. 이때 이동판은 두 굴대로부터 방향은 반대이고 크기가 다른 마찰힘을 받게 되며 그것들의 합성힘은 편심된 방향과 반대방향으로 작용한다. 결국 이동판은 편심된 방향과 반대방향으로 움직이며 인차 반대쪽으로 편심된다. 결과적으로 이동판은 두 굴대사이에서 왕복운동을 하게 된다.

이 왕복운동을 진동으로 보면 그것의 진폭과 주기는 굴대와 이동판사이의 마찰결수에 관계된다.

이동판의 무게중심 C 의 X 축방향변위를 x , 속도를 \dot{x} , 굴대의 반경을 r , 두 굴대축들 사이의 거리를 $2l$, 이동판의 무게를 G 라고 하면 굴대 1과 2의 원둘레에서의 선속도는 각각 $v_1 = r\omega$, $v_2 = -r\omega$ 로 표시된다.

따라서 두 굴대와 이동판과의 접점 A 와 B 에서의 상대접촉속도는 각각 다음과 같다.

$$v_A = \dot{x} - v_1 = \dot{x} - r\omega, \quad v_B = \dot{x} - v_2 = \dot{x} + r\omega$$

접점 A 와 B 에서 이동판에 작용하는 마찰힘은 각각 다음과 같다.

$$F_A = \begin{cases} \mu_d(l-x)G/(2l), & |v_A| > V_d \\ -\mu(v_A)(l-x)G/(2l), & |v_A| \leq V_d \end{cases}, \quad F_B = \begin{cases} -\mu_d(l+x)G/(2l), & |v_B| > V_d \\ \mu(v_B)(l+x)G/(2l), & |v_B| \leq V_d \end{cases}$$

주어진 두 재료사이의 마찰결수 $\mu(v)$ 는 미끄럼마찰결수 μ_d , 최대정지마찰결수 μ_s 와 그

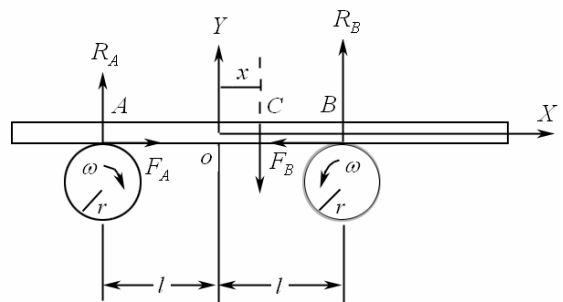


그림 1. 진동식마찰결수측정실험장치의
력학적모형

것이 나타나는 미끄럼이행속도 V_d , 정지이행속도 V_s 에 따라 변화된다.

이동판의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} (G/g)\ddot{x} + \mu_d(G/l)x = 0 & (|v_A| > V_d, |v_B| > V_d) \\ (G/g)\ddot{x} + [\mu(v_A)(l-x) - \mu(v_B)(l+x)]G/(2l) = 0 & (|v_A| \leq V_d \text{ 또는 } |v_B| \leq V_d) \end{cases} \quad (1)$$

방정식 (1)의 풀이를 구하면 다음과 같다.

① $|v_A| > V_d, |v_B| > V_d$ 인 경우 $\ddot{x} + k^2x = 0$ 이다. 여기서 $k = (\mu_d g/l)^{1/2}$ 이다.

이때 이동판의 진동은 조화진동 $x = X_0 \sin(kt + \alpha)$ 로 된다.

초기조건을 고려하면 $X_0 = x(0)$, $\alpha = \pi/2$ 이며 진동주기는 $T = 2\pi(l/(\mu_d g))^{1/2}$ 이며 미끄럼마찰계수는 $\mu_d = 4\pi^2 l/(gT^2)$ 이다.

실천에서는 두 재료사이에 점성마찰도 존재하므로 진폭이 감소하는 경향이 있다.

② $|v_A| \leq V_d$ 또는 $|v_B| \leq V_d$ 인 경우 해석적풀이가 주어지지 않는다.

결국 이 장치로부터 정확히 측정할수 있는 마찰계수는 $\mu_d = 4\pi^2 l/(gT^2)$ 에 의하여 결정되는 미끄럼마찰계수 μ_d 이며 그것도 $|v_A| > V_d, |v_B| > V_d$ 가 성립되는 경우 즉 점 A, B에서의 상대접촉속도가 모두 미끄럼이행속도보다 큰 경우에만 가능하다는것을 알수 있다. 즉 $|X_0 k \cos(kt + \alpha) \pm r\omega| > V_d$. (2)

$-X_0 k \leq X_0 k \cos(kt + \alpha) \leq X_0 k$ 이고 $r\omega > 0$ 임을 고려하면 $t \in (0, \infty)$ 에서 식 (2)가 성립되기 위해서는 $r\omega > X_0 k + V_d$ 여야 한다.

따라서 굴대의 각속도와 회전주파수는 근사적으로 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\omega > X_0/r \cdot \sqrt{\mu_d g/l} + V_d/r, \quad f > X_0/(2\pi r) \cdot \sqrt{\mu_d g/l} + V_d/(2\pi r)$$

결국 μ_d 를 정확히 측정할수 있는 굴대의 최소림계각속도 ω_{\min} 과 최소림계회전수 f_{\min} 은 $\omega_{\min} = X_0/r \cdot \sqrt{\mu_d g/l} + V_d/r$, $f_{\min} = X_0/(2\pi r) \cdot \sqrt{\mu_d g/l} + V_d/(2\pi r)$ 와 같다.

논문에서는 굴대에 고무를 씌웠을 때 강철로 만든 이동판의 운동을 ADAMS로 모의하였다. 이때 최대정지마찰계수와 미끄럼마찰계수는 각각 $\mu_s = 0.80$, $\mu_d = 0.76$ 이며 실험장치의 기타 파라미터들은 $r = 0.050$ m, $l = 0.125$ m, $X_0 = 75$ mm이다.

논문에서는 굴대의 회전각속도를 $\omega = 30.0, 12.0, 11.9, 6.0, 2.0$ rad/s로 변화시키면서 이동판의 질량중심의 변화를 모의를 통하여 결정하였다.(그림 2)

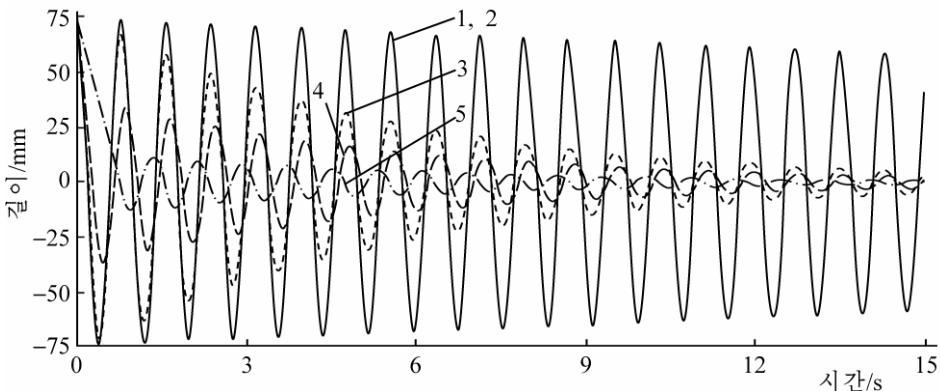


그림 2. 이동판의 진동곡선

1- $\omega = 30.0 \text{ rad/s}$, 2- $\omega = 12.0 \text{ rad/s}$, 3- $\omega = 11.9 \text{ rad/s}$,
4- $\omega = 6.0 \text{ rad/s}$, 5- $\omega = 2.0 \text{ rad/s}$ 인 경우

그림 3에서 보는바와 같이 $\omega=30.0, 12.0 \text{ rad/s}$ 인 경우 진동주기는 진폭감소가 적고 주기가 비교적 고르로우며 $\omega=11.9, 6, 2 \text{ rad/s}$ 인 경우 진폭이 크게 감소하여 10s이후에는 진폭이 1cm이하로 작아지며 주기도 고르롭지 못하다.

이동판을 굴대위에 놓은 순간부터 10s후의 초기위치 X_0 에 대한 상대진동진폭 X/X_0 는 굴대의 회전각속도에 따라 그림 3과 같이 변화된다.

그림 3에서 보는바와 같이 $\mu_d = 4\pi^2 l / (gT^2)$ 에 의한 마찰측정을 진행할수 있는 굴대의 최소림계각속도는 12.0 rad/s 라는것을 알수 있으며 따라서 논문에서 주장하는 굴대의 최소림계각속도 $\omega_{\min}=11.9 \text{ rad/s}$ 와 상대오차 0.8%의 정확도로 거의 일치된다는것을 알수 있다.

결국 논문에서 얻어낸 최소림계각속도리론의 타당성은 검증되었다.

한편 $\omega=30.0, 12.0 \text{ rad/s}$ 인 두 경우 $\mu_d = 4\pi^2 l / (gT^2)$ 로부터 얻은 미끄럼마찰계수는 $\mu'_d=0.72$ 로서 정확한 값과의 상대오차는 5%이다. 이것은 ADAMS의 모의오차로 인한것이라고 볼수 있다.

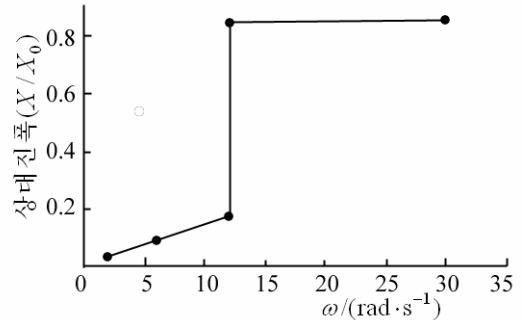


그림 3. 굴대의 회전각속도에 따르는 상대진동진폭의 변화

참 고 문 헌

- [1] 김연봉; 력학실험, 김일성종합대학출판사, 3~78, 1990.
- [2] V. L. Popov; Contact Mechanics and Friction, Springer, 45~187, 2010.

주체105(2016)년 9월 5일 원고접수

On the Oscillation Characteristics of Friction Testing Equipment

Hyon Chol, Jo Won Nam

This study is concerned with mechanical modelling of friction testing equipment using oscillation method. In consequence the minimum critical angle velocity of the wheel to measure the kinetic coefficient of friction was obtained and proved using ADAMS simulation.

Key word: friction testing equipment