한국소음진동공학회 2011년 추계학술대회논문집, pp.59~63

# 트러스 구조물의 1자유도 모형을 이용한 반능동 마찰 제어 방법의 과도 응답 저감 성능 비교

# Comparison of semi-active friction control method to reduce transient vibration using SDOF model of truss structure

박영민* · 김광준† · 오현웅**

**Young-min Park, Kwang-joon Kim and Hyun-ung Oh**

**Key Words :** 과도 응답(transient response), 반능동 마찰 제어(semi-active friction control)

ABSTRACT

Friction damping is one of the attractive vibration control technique for space structures due to its simplicity and large damping capacity. However, passive approaches for friction damping have a limitation because energy is no longer dissipated at sticking. In order to overcome this problem, semi-active control methods to adjust normal force at frictional interface have been studied in previous researches. In this paper, two semi-active friction control method is compared by simulating SDOF model of truss structure. The first approach is on-off control to maximize rate of energy dissipation, whereas the second concept is variable friction force control to minimize amplitude ratio for each half period. The maximum friction force, control variable in on-off control method, is obtained to minimize 1% settling time, and is different from optimal friction force in passive control. Simulation results show that performance of on-off control is better than that of variable friction force control in terms of settling time and controlled friction force.

## 1. 서 론

트러스 구조물은 가벼운 구조로 높은 강성을 얻을 수 있는 장점으로 인해 위성체의 안테나, 태양 전지판 등의 우주구조물에 많이 사용된다. 이러한 우주구조물의 지향 성능은 0.5~10Hz 내외의 저차 굽힘 모드에 의해 악화되기 쉬우며, 자체적인 감쇠가 적기 때문에 추가적인 진동 저감 방안이 요구된다.

우조구조물의 진동을 저감하는 방법은 크게 수동형 제어, 능동형 제어 및 반능동형 제어로 분류할 수 있다. 수동형 제어 방법은 비용이 저렴하고 간단한 장점을 가지고 있는데 반해 제진 요소의 구조가 결정되는 대로 제진 성능이 고정되는 한계를 가지며, 능동형 제어 방법은 제진 성능은 뛰어나나 구동기를 시스템에 에너지를 인가하기 때문에 불안정성의 위험이 존재한다. 반능동형 제어 방법은 강성, 감쇠 및 마찰 등의 시스템 매개변수를 적절히 조정하는 방법으로 수동형에 비해 제진 성능이 뛰어나고, 안정하기 때문에 우주구조물의 제진 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 지금까지 인가하는 전기장에 따라 유체의 특성이 변화하는 ER(Electro-Rheological)감쇠기[1], 자기장에 따라 유체의 특성이 변화하는 MR(Magneto-Rheological)감쇠기[2], 가변 마찰 감쇠기[3-5] 및 압전 분기(Shunted piezoelectric)감쇠기[6-7] 등에 대한 연구가 있었으며, 이 중에서 마찰 감쇠기가 구조적으로 단순하고 온도 등의 환경 조건에 덜 민감하여 실 적용에 유리하다고 판단된다.

수동형 마찰 감쇠기의 경우, 진폭이 일정 수준 이하로 작아지면 고착(sticking)이 발생하여 에너지 소

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술원
E-mail : kjkim@kaist.ac.kr
Tel :(042)350-3024, Fax :(042)350-8220
* 한국과학기술원
** 국방과학연구소

산이 발생하지 않는 한계가 있다. 수동형 마찰 감쇠의 문제점은 마찰면에서의 수직력을 적절히 조절함으로써 해결할 수 있다. 수직력 제어를 통한 마찰 감쇠 성능 개선 연구는 Ferri 등에 의해 처음 제안되어 주로 정상상태 입력 조건을 다루어 왔다[8]. 한편, Gaul은 우주 구조물의 주요 감쇠원이 조인트부임에 착안하여, 수동형 조인트를 반능동 조인트로 대체하고 압전 구동기로 수직력을 제어하였다. 기존의 문헌에서는 주로 에너지 소산율을 최대화하기 위한 On-off 제어 방법을 주로 적용하고 있으나 제어 변수인 마찰력의 설계에 대한 논의가 이루어 지고 있지 않다.

본 논문에서는 트러스 구조물에서 측정한 엑셀러런스(accelerance)로부터 1 차 모드에 대한 1 자유도 모형을 구성한 후, 이를 이용하여 반능동 제어 성능을 비교 하였다. 먼저, 수동형에서 최소 정착 시간을 위한 마찰력을 구하고 이를 on-off 제어에 적용한 경우와 임의의 크기를 가진 마찰력을 적용한 경우를 비교하여 적절한 on-off 제어 변수를 선정하였다. 한편, 마찰 감쇠기의 에너지 소산 특성으로부터 매 반주기마다 수직력을 적절히 조정함으로써 진폭비를 최소화할 수 있음을 알 수 있었고, 이를 기존의 on-off 제어 성능과 비교/분석하였다.

## 2. 트러스 구조물의 구조 및 동특성

트러스 구조물은 steel 재질의 트러스 멤버와 조인트를 이용하여 총 길이 3.56$m$, 총 무게 46$kg$의 실험실 규모로 제작하였으며, Fig. 1과 같이 위성체에 부착되는 것을 고려하여 고정단-자유단 경계조건을 적용하였다. x, y방향의 수직, 수평 트러스 멤버는 309$mm$의 길이와 304$g$의 무게를 가지며, 대각 방향의 트러스 멤버는 408$mm$의 길이와 404$g$의 무게를 가진다. 두 종류의 트러스 멤버는 단면은 동일하고 외경과 내경이 각각 22.5$mm$, 20.5$mm$인 중공 단면을 가지며, 조인트는 40$mm$의 길이와 84$g$의 무게를 갖는 다면체 구조를 가진다. Fig 2는 바닥으로부터 2.54$m$떨어진 높이에서 충격 실험을 통해 얻은 엑셀러런스(accelerance)이다. 측정 결과로부터 얻어진 1차 고유진동수 및 감쇠가 각각 11.6 Hz 와 2.7%였으며, 이를 대상으로 1자유도 모형을 구성하고 반능동 제어 방법을 적용하여 성능을 비교 하고자 한다.

## 3. 시뮬레이션 모형

본 논문에서는 두 가지 반능동 제어 방법 적용에

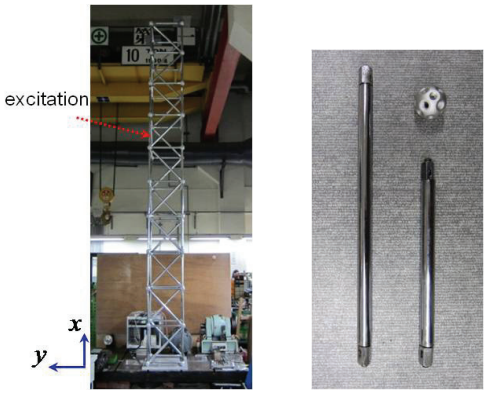


Fig. 1 Configuration of truss structure

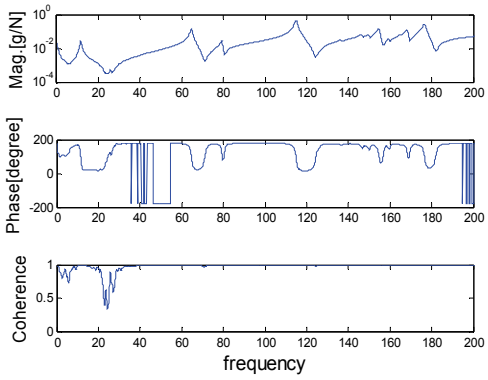


Fig. 2 Accelerance of truss structure

따른 과도 응답 저감 성능 비교가 목적이므로, 11.6Hz의 1차 모드에 대한 1자유도 모형을 구성하였다. 마찰 기구를 포함한 트러스 멤버의 저감 성능이 어떤 위치에서 최대가 될 지는 현재 알 수 없으나, 반능동 제어 적용에 따른 비교만을 위해 Fig. 3과 같이 첫 째 단에 있는 것으로 가정하였다.

Fig. 4는 시뮬레이션을 위한 1자유도 모형을 나타낸다. 그림에서 $k_1$ 은 마찰멤버가 포함되지 않았을 때의 강성을 나타내며, $k_2$ 는 마찰멤버의 강성을 나타낸다. 매개 변수의 값은 첫 번째 단의 트러스 멤버가 있을 때 얻은 엑셀러런스에서 곡선 맞춤(curve-fitting)을 통해 $m, k_1+k_2, c$ 값을 얻었으며, $k_2$ 값은 트러스 멤버가 있을 때/없을 때 구한 강성 의 차로 얻었다. 이로부터 얻은 1자유도 계의 매개 변수 값은 Table 1에 나타내었다.

마찰 멤버에의 마찰 특성은 쿨롱 마찰로 가정하였으며, 고착(sticking)과 미끄러짐(sliding)을 고려하여 식(1)과 같이 운동방정식을 유도할 수 있다.

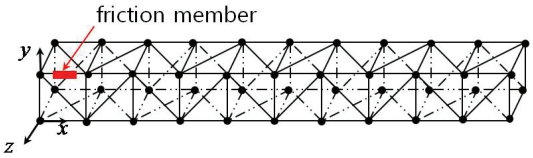


Fig. 3 Schematic diagram of truss structure with friction member

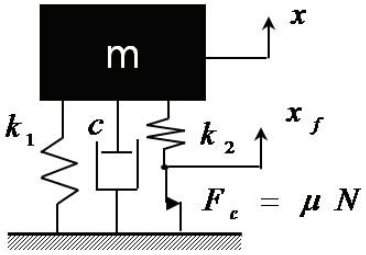


Fig. 4 SDOF model for 1st mode of truss Structure

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_1 x + F_f$$

$$F_f = \begin{cases} k_2(x - x_f) & for\ stick \\ F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) & for\ slip \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $x_f$ 는 마찰요소의 상대 변위이다.

## 4. 마찰 감쇠기를 이용한 과도응답 저감

### 4.1 수동형 제어

과도 응답 저감 성능은 일반적으로 대수 감소율 또는 정착시간을 기준으로 평가한다. 3장에서 제안한 모형은 마찰 감쇠에 의한 비선형 특성을 가지고 있기 때문에 해석적인 해를 구할 수 없으며, 점성 감쇠에 의한 지수적인 진폭 감소와 마찰 감쇠에 의한 선형적인 진폭 감소가 합해진 특성을 나타낸다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 수동형 마찰 감쇠기에서는 마찰력이 마찰 멤버의 강성과 진폭의 곱보다 클 때, 고착이 발생하여 마찰에 의한 에너지 소산이 이루어 지지 않는다. 즉, 진폭의 감소에 따라 마찰 감쇠에 의해 대수감소율이 변화하므로 정착시간을 기준으로 평가하는 것이 바람직하다고 사료되어, 본 연구에서는 1자유도 모형에서 초기변위를 가진 자유 진동 응답을 계산 하고 초기 변위의 1% 정착시간을 기준으로 감쇠 성능을 평가하였다. 그러나 정착 시간은 마찰력뿐만 아니라 점성 감쇠 항에 의해서도 변화하기 때문에 점성감쇠계수, 고유진동수

**Table 1** Parameters of SDOF system

| parameter | value | unit |
|---|---|---|
| $m$ | 18.2 | $kg$ |
| $k_1$ | $5.88\times10^4$ | $N/m$ |
| c | 62.0 | $N/(m/s)$ |
| $k_2$ | $3.70\times10^4$ | $N/m$ |

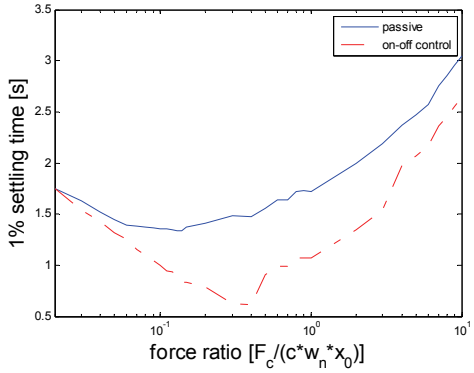


Fig. 4 1% settling time vs. force ratio

및 초기 변위의 곱으로 정규화한 마찰력의 크기 변화에 따라 정착시간을 수치적으로 구하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같으며, 수동형에서는 마찰력이 최대 점성 감쇠력의 0.14배 될 때 최소 정착 시간을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 4.2 반능동형 제어

(1) On-off 제어

On-off제어 방법은 반능동 제어 분야에서 많이 적용되는 제어 방법이며, 시스템의 에너지 소산율을 최대화하는 문제에서 유도할 수 있다. 3장의 1자유도 모형에서 계의 총 기계적 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{1}{2}m_1\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}k_1 q_1^2 \quad (2)$$

식 (2)의 도함수를 구한 후, 식(1)의 운동 방정식을 대입하면 아래와 같이 에너지 소산율을 구할 수 있다.

$$\dot{V} = -c\dot{x}^2 - F_f\dot{x} \quad (3)$$

여기서 점성감쇠계수와 마찰 계수는 고정되어 있으므로 수직력을 적절히 조정함으로써 에너지 소산율을 증가시킬 수 있다. 마찰력과 속도의 방향이 같을 때, 마찰기구에서는 미끄러짐(sliding)운동이 발생하고 수직력을 최대로 만듦으로써 에너지 소산율을

최대화 할 수 있다. 반대로 마찰력과 속도의 방향이 반대가 될 때, 마찰기구에서 에너지가 소산되는 것이 아니라 증가하기 때문에 이를 방지하기 위해 수직력을 0으로 만들어 준다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &if\ \ \mathrm{sgn}(F_f\dot{x}) > 0,\ F_c = \mu N_{\max} \\ &if\ \ \mathrm{sgn}(F_f\dot{x}) \le 0,\ F_c = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 제어 변수인 최대 마찰력의 선정이 필요하다. On-off제어를 적용했을 때, 정규화한 마찰력에 따른 정착시간의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그래프를 보면 4.1절에서 언급한 바와 같이 수동형에서는 0.14의 정규화된 마찰력에서 최소 정착 시간을 얻을 수 있는데 반해, 반능동형에서는 0.4에서 최소 정착 시간을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 때 얻은 마찰력을 on-off제어에서의 제어 변수로 선정하였다.

(2) 가변 마찰력 제어

마찰 멤버를 포함한 1자유도 모형에서 해석적인 해는 얻을 수 없으나 매 반주기에 대한 에너지 평형을 이용하여 진폭비를 구할 수 있으며, 이를 최소화 하는 방향으로 마찰력을 제어해 나갈 수 있다. 초기변위를 가진 자유진동 시, 마찰멤버에서 나타나는 이력곡선은 Fig. 5와 같으며, 반 주기 동안 마찰멤버에서 소산되는 에너지는 식 (5)과 같다.

$$\Delta W = \left(X_i - \frac{F_c}{k_2}\right)F_c + \left(X_{i+05} - \frac{F_c}{k_2}\right)F_c \tag{5}$$

그리고 반주기 동안에 강성 요소 $k_1$에 저장되는 에너지와 점성감쇠요소 $c$에 의한 소산 에너지를 고려하면 다음과 같이 반 주기에 대한 에너지 평형 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}\left[k_1X_i^2 + k_f\left(\frac{F_c}{k_f}\right)^2\right] - \frac{1}{2}\left[k_1X_{i+0.5}^2 + k_f\left(\frac{F_c}{k_f}\right)^2\right] \\ &= \frac{\pi c\omega}{4}\left(X_i^2 + X_{i+0.5}^2\right) + \left[X_i + X_{i+0.5} - \frac{2F_c}{k_2}\right]F_c \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)를 이용하여 반주기 동안의 진폭비를 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{X_{i+0.5}}{X_i} = \frac{-k_2F_{r,i} + \sqrt{(k_2F_{r,i})^2 - (2k_1 + \pi c\omega)\left(-\frac{k_1}{2} + k_2F_{r,i} - 2k_2F_{r,i}^2 + \frac{\pi c\omega}{4}\right)}}{k_1 + \frac{\pi c\omega}{2}} \tag{7}$$

여기서, $F_{r,i} = \frac{F_c}{k_2X_i}$ 로 정의되며 1보다 클 경우 고착이 발행하여 마찰 멤버에서 에너지 소산이 발생하지 않는다. 식(7)을 이용하여 $F_{r,i}$의 변화에 따른 반주기 동안의 진폭비를 Fig. 6에 나타내었다. 그래프에서 $F_{r,i}$의 증가에 따라 진폭비가 감소하다가 $F_{r,i}$이 약 0.4일 때, 최소 진폭비를 가지고 그 이상의 $F_{r,i}$ 값에서는 다시 진폭비가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이로부터 알 수 있는 또 하나의 결과는 고정된 마찰력 하에서는 진폭이 감소함에 따라 $F_{r,i}$이 변화하므로 최적의 진폭비를 가질 수 없기 때문에, 진폭비를 최소화하기 위해서는 진폭이 감소하는 매 반주기마다 마찰력의 크기를 줄여나가야 한다.

### 4.3 반능동 제어 결과 비교

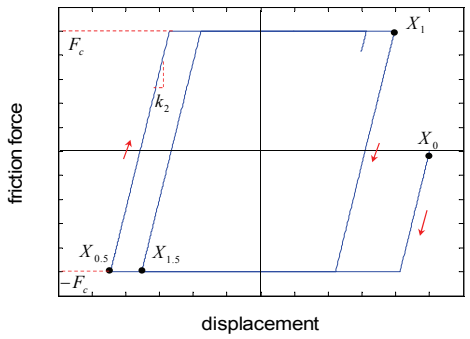


Fig. 5 Hysteresis curve of friction member

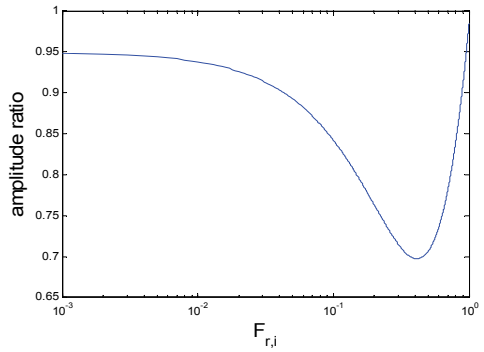


Fig. 6 amplitude ratio for an half cycle vs. $F_{r,i}$

본 절에서는 초기 변위를 임의의 값(0.01m)으로 주고, 과도 응답에 대한 반능동 제어 성능을 비교하였다. 수동형에서는 4.1절에서 구한 마찰력을 적용하였으며, on-off제어에서는 4.2절 (a)에서 구한 마찰력을 적용하였다. 수동형, on-off제어 및 가변 마찰력 제어의 적용에 따른 자유 진동 응답은 Fig 7과 같다. 상대적으로 큰 진폭 구간에서 수동형과 on-off제어의 경우에는 마찰력에 의한 선형적인 진폭감소가 관찰되나, 가변 마찰력 제어에서는 4.2절 (b)에서 구한 최적 진폭비와 같이 매 반주기 마다 0.7배씩 진폭이 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

각각의 경우에 대한 1%정착 시간은 1.34초, 0.59초및 0.78초로 정착 시간 측면에서는 on-off제어가 우수한 성능을 나타내나, 반능동 마찰 구현을 위해서는 구동기에 요구되는 파워까지 포함해서 고려하는 것이 타당하다고 사료된다. 본 시뮬레이션에서는 마찰력 제어를 위한 구동부를 직접적으로 모형화하고 있지 않으나, 구동기의 입력 전압이 증가할 때 마찰력도 증가할 것으로 가정하고 식 (8)과 같이 마찰력을 1%정착시간까지 적분하여 간접적인 제어 성능을 비교하였다.

$$performance = \int_0^{t_s} F_f dt \qquad (8)$$

그 결과 On-off제어와 가변 마찰력 제어에서 각각

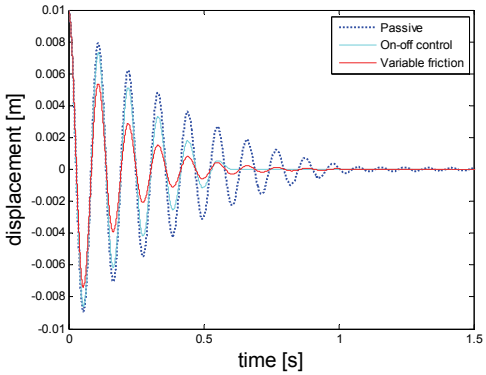


Fig. 7 Free vibration response by passive and semi-active control

8.95Ns, 10.40Ns로 On-off제어가 가변 마찰력 제어에 비해 우수한 성능을 보였다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 수동형 마찰 감쇠기의 한계를 극복하기 위해 제안된 두 가지 반능동 마찰 제어 방법의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 시뮬레이션에서는 실험실 모델로 제작한 트러스 구조물에서 측정한 엑셀러런스로부터 1자유도 모형을 구성하고 수동형과 반능동 제어 적용에 따른 과도 응답 특성을 관찰하였다.

수동형과 on-off제어에서는 1% 정착 시간을 최소화 하기 위한 최적 마찰력을 선정하였다. 가변 마찰력 제어는 매 반주기에 대한 에너지 평형으로부터 유도하였으며, 이를 적용하여 매 반주기의 진폭에 따라 마찰력을 조정하였다. 실 적용을 고려하여 반능동 제어 동안 작용한 마찰력과 정착시간을 함께 고려했을 때 on-off제어 방법이 가변 마찰력 제어 방법에 비해 우수한 성능을 보였다.

## 참 고 문 헌

(1) Onoda, J., Oh, H. U. and Mnesugi, K., 1997, Semiactive Vibration Suppression with Electrorheological Fluid Dampers, AIAA Journal, Vol. 35, No. 12,

(2) Oh, H. U. and Onoda, J., 2002, An Experimental Study of a Semiactive Magneto-Rheological Fluid Variable Damper for Vibration Suppression of Truss Structures, Smart Materials and Structures, Vol. 11, pp. 156-162.

(3) Doupont, P., Kasturi, P. and Stokes, A., 1997, Semi-Active Control of Friction Dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 202, No. 2, pp. 203-218.

(4) Gaul, L., Albrecht, H. and Wirnitzer, J., 2004, Semi-Active Friction Damping of Large Space Truss Structures, Shock and Vibration, Vol. 11, pp. 173-186.

(5) Gaul, L. and Nitsche, R, 2000, Friction Control for Vibration Suppression, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No. 2, pp. 139-150.

(6) Hagood, N.W. and Crawley, E.F., 1992, Experimental Investigation of Passive Enhancement of Damping for Space Structures, Journal of Guidance, Control and Dynamcs, Vol. 14, No. 6, pp. 1100-1109.

(7) Onoda, J., Makihara, K. and Minesugi, K., 2003, Energy-Recycling Semi-Active Method for Vibration Suppression with Piezoelectric Transducers, AIAA Journal, Vol. 41, No. 4, pp. 711-719.

(8) Lane, L. Ferri, A. and Heck, B., 1992, Vibration Control Using Semi-Active Force Generators, Friction-Induced Vibration, Chatter, Sqeual and Chaos, Vol.49, pp. 165-171.