

## 論文

## 작동유체 질량을 고려한 유연우주트러스구조물 제진용 반능동 댐퍼의 성능분석

오현웅\*, 최영준\*, 이경민\*

### Performance Investigation of Semi-Active Damper Considering Mass Modeling of Functional Fluid

Hyun-Ung Oh\*, Young-Jun Choi\* and Kyong-Min Lee\*

#### ABSTRACT

Semi-active vibration control is one of the attractive control methods for space application due to its robustness as passive damping system and much higher damping performance than passive system.

In this paper, performance investigation of semi-active damper considering a mass modeling of functional fluid inside of the damper has been performed. Numerical investigation results confirmed that the damper model considering the fluid mass is effective for vibration suppression performance at a relatively low viscosity range of functional fluid. Based on the analysis results, design method to enhance the performance of semi-active damper has been proposed.

#### 초 록

수동형 진동제어 방식과 같이 시스템이 안정되며, 수동형에 비해 높은 제진 효과가 기대되는 반능동 진동제어 방식은 시스템의 안정화가 요구되는 우주구조물의 제진방법에 유효한 진동제어 방식중 하나이다. 본 논문에서는 유연우주트러스구조물의 진동제어를 위해 고안된 반능동 댐퍼내 작동유체의 질량을 모델링에 고려했을 경우의 제진특성을 분석하였고 댐퍼내 작동유체의 점성이 부족감쇠를 유지 할 경우, 작동유체 질량 적용에 따른 반능동 댐퍼의 제진효과를 확인하였으며 이를 토대로 반능동 댐퍼의 성능향상을 위한 설계방법을 제시하였다.

**Key Words** : Semi-Active Control(반능동 제어), Variable Damping(가변감쇠), Functional Fluid(작동유체)

#### 1. 서 론

오늘날 우주개발에 있어 발사체의 발사능력 향상과 함께 인공위성을 비롯한 우주임무는 다양

화, 대형화 되고 있다. 통신위성의 경우, 폭 넓은 주파수에 대응하며, 비교적 광범위한 영역에서의 통신이 가능하도록 위성에 대형 안테나를 장착하고 있다. 대형 안테나와 같이 발사시 수납되어 우주공간에서 전개/조립되는 전개형 우주구조물은 경량화 요구조건 충족을 위해 일반적으로 트러스 구조를 이용한 대형유연우주구조물이 적용되고 있다.

우주구조물은 상기에서 밝힌바와 같이 궤어링

† 2009년 2월 4일 접수 ~ 2009년 4월 28일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 영상정보체계개발단

교신저자, E-mail : ohlee314kr@yahoo.co.kr

대전시 유성구 유성우체국 35-5호

내의 제한된 수납공간, 저코스트 임무구현 등의 제약조건을 고려했을 때, 가능한 경량 구조물이 궤도상에서 전개되는 전개식 구조물의 적용이 이상적이다. 이와같이 우주공간에서 전개 또는 조립에 의해 위성본체의 크기에 비해 사이즈가 증가한 대형 유연우주구조물의 경우, 강성이 낮고 상대적으로 유연하여 진동이 야기되기 쉬운 특징을 갖는다. 여기에 우주구조물의 경우 지상의 구조물들과 달리 공기저항에 의한 진동감쇠효과를 기대할 수 없기 때문에 일단 진동이 발생하면 구조감쇠만으로는 진동을 단시간에 감쇠시키기가 힘들며 이는 곧 위성체의 강제운동을 발생시켜 지향성능 등의 임무요구조건을 저하시키는 원인으로 작용하기도 한다[1-2].

유연우주구조물에 발생하는 진동을 감쇠시키는 방법을 제진이라고 하며 제진방식으로 수동형 제진[3-4], 능동형 제진 그리고 반능동형 제진이 있다. 능동형 제진방식은 진동제어용 액추에이터에 적극적으로 에너지를 인가하기 때문에 높은 제진효과를 기대할 수 있으나, spill-over와 같은 불안정요소가 존재한다[5]. 특히 우주구조물의 경우 지상시험을 수행하더라도 구조물의 정확한 동특성을 사전에 제어계 설계에 반영하기가 힘들기 때문에 능동형 제진방식을 궤도상의 제어에 적용하기에는 불안정요소가 존재한다. 한편, 구조물 자체의 감쇠특성을 효율적으로 이용하는 수동적 제진방식은 저비용, 경량화 그리고 시스템의 간략화 등의 장점으로 현재 위성의 탑재기기의 제진에 널리 활용되고 있는 방식이나 제진성능 면에서는 능동제어 방식에 비해 많이 부족한 단점을 갖는다.

반능동형 제진방식은 수동적 제진능력을 최대한 발휘 가능하도록 마찰, 강성 그리고 감쇠 등 시스템 고유의 파라미터를 적극적으로 제어하는 방식으로 수동형 제진방식에 비해 제진효과가 높으며, 능동형 방식과 달리 수동 메커니즘에 의해 진동에너지 감쇠가 이루어지므로 구조물의 정확한 동특성 파악이 제어계 설계에 충분히 반영되지 않았다 하더라도 시스템은 항상 안정하다. 수동형과 능동형 제진의 장점을 갖는 반능동형 제어 방식은 높은 제진효과와 시스템의 안정화가 요구되는 우주구조물의 제진에 적합한 방식이다.

반능동형 제진은 댐퍼가 갖는 마찰, 강성 그리고 작동유체의 감쇠 특성을 가변시킴으로써 구현 가능하다. 댐퍼내 작동유체의 감쇠 특성을 제어하는 가변 감쇠 반응동 댐퍼로는 전자변의 오리피스 개폐에 따라 댐퍼내 작동유체의 감쇠를 가변시키는 방법[6-8], 인가전압에 따라 유체의 특

성이 변화하는 ER (Electro-Rheological)유체의 특성을 이용한 ER 유체 댐퍼[9-11], 인가자장에 따라 유체의 특성이 변화하는 MR 유체의 특성을 이용한 MR (Mageneto-Rheological) 댐퍼 [12-13] 등이 있다. ER 유체의 경우 유체의 특성 변화를 위하여 수천볼트의 인가전압을 필요로 하며 우주구조물에 적용시 EMI/EMC의 문제가 존재할 수도 있으나 이는 차폐재료의 적용으로 극복 가능하다.

상기의 작동유체를 갖는 반응동 댐퍼[6-13]는 bellows로 둘러싸인 두 개의 공간을 연결하는 관이 존재하고 구조물의 진동에 따라 bellows의 신축운동이 발생하며 이때 댐퍼내 작동유체의 이동이 발생하고 댐퍼에 전압 또는 자장을 인가하면 유체의 특성이 변하여 댐퍼의 특성이 가변되는 댐퍼이다. 즉 가변감쇠댐퍼를 이용하는 반능동 제진은 댐퍼가 최대한 진동 에너지 감쇠를 이룰 수 있도록 작동유체의 가변 감쇠 특성을 변화시켜 댐퍼자체의 신축운동을 제어하는 댐퍼라고 할 수 있다. 따라서 반능동 제진을 위해서는 댐퍼의 거동자체가 중요한 의미를 갖으며 가변 감쇠 댐퍼내의 작동 유체 등의 가동부 질량이 무시할 수 없을 경우에는 댐퍼의 동특성 파악이 무엇보다 중요하다.

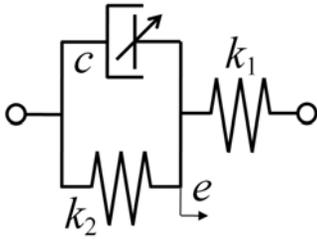
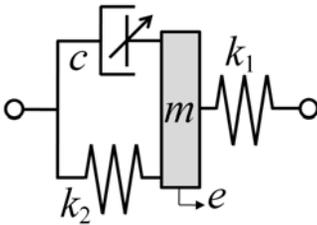
본 논문에서는 댐퍼내의 축 방향 특성을 보다 더 정확히 반영하기 위해 댐퍼내 작동유체와 bellows부의 질량을 포함하는 가동질량을 고려한 수학적 모델을 유연우주구조물 반응동 제진에 적용하여 가동질량을 댐퍼모델에 고려하지 않은 반능동 댐퍼와의 제진특성을 비교분석 하여 가동질량 적용에 따른 반능동 제진 성능을 확인하였다.

## II. 본 론

### 2.1 수치해석 모델과 운동방정식

Fig. 1은 반능동 가변감쇠댐퍼[6-13]의 수학적 모델로  $\alpha$ 는 유체의 특성변화에 따른 가변점성감쇠계수,  $k_2$ 는 bellows의 축방향 강성, 그리고  $k_1$ 은 유체의 체적강성을 나타낸다.

반능동 가변 감쇠댐퍼에는 bellows의 축방향 신축운동에 따라 이동하는 작동유체의 질량이 존재한다. Bellows부의 축방향 이외에는 변위가 존재하지 않고 내부 작동유체의 체적강성이 높을 경우에는 유체의 질량을 Fig. 1의  $k_1$ 을 제외한 Voigt 모델의 우측 절점에 집중질량으로 고려할 수 있으나 이 경우 댐퍼 모델링 자체에는 작동유체 질량이 반영되지 않는다.

Fig. 1. Semi-Active Damper Model ( $m=0$ )Fig. 2. Semi-Active Damper Model ( $m \neq 0$ )

Bellows에 축방향 이외에도 변형이 있고 유체의 체적강성이 존재하여 댐퍼의 모델을 Fig. 1과 같이 나타낼 경우에는 우측 절점에 유체의 질량을 집중질량 형태로 모델링 할 수 없으며 댐퍼내의 자유도에 작동유체 질량 모델링을 반영하여야 한다. 따라서 작동유체 질량을 댐퍼내 자유도에 집중질량 형태로 고려하여 Fig. 2와 같은 가동질량을 고려한 댐퍼모델을 제안하였다.  $m$ 은 댐퍼내 작동유체의 가동질량을 나타낸다.

Fig. 3은 수치해석에 사용된 유연 트러스 구조를 나타내며 트러스의 제진을 위해 트러스 고정단에 반응동 댐퍼를 배치하였다. Fig. 1과 같이  $i$  번째 댐퍼내 작동유체의 가동질량을 고려하지 않은 트러스의 운동방정식( $m_i=0$ )은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + Kx + HD\dot{e} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{e} = (p_i - k_{2i}e_i)/c_i \quad (2)$$

$$p = -D(H^T x + e) \quad (3)$$

$$D = \text{diagonal}[k_{1i}k_{3i}/(k_{1i} + k_{3i})] \quad (4)$$

여기서

$$e = [e_1, e_2, \dots, e_{n_d}]^T \quad (5)$$

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_{n_d}]^T \quad (6)$$

$M$ 은 질량 매트릭스,  $K$ 는 댐퍼를 갖는 트러스 부재의 dashpot 변위량  $e_i$ 가  $c_i = \infty$ 로 인해  $e_i=0$ 일 경우의 트러스의 강성 매트릭스,  $D$ 는  $i$ 번째 댐퍼

와 연결되는 트러스 부재의 강성  $k_{3i}$ 와  $k_{1i}$ 으로부터 이루어진 매트릭스,  $H$ 는 댐퍼를 갖는 트러스 부재의 방향성을 나타내는 매트릭스,  $p_i$ 는 스프링  $k_{1i}$ 에 작용하는 장력을 나타낸다.

Fig. 2와 같이 댐퍼의 작동유체 질량을 고려한 반응동 댐퍼를 갖는 트러스의 운동방정식( $m_i \neq 0$ )은 상기의 운동방정식과 동일하며 식(2) 대신에 작동유체의 질량  $m_i$ 을 고려한 운동방정식으로 다음식이 적용가능하다.

$$m_i \ddot{e}_i + c_i \dot{e}_i - (p_i - k_{2i}e_i) = 0 \quad (7)$$

## 2.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에는 Fig. 3과 같이 반응동 댐퍼를 배치한 길이 3.8m의 10 bay 트러스 구조물로 1차 모드주파수가 0.6Hz인 유연구조물[10]을 적용하였다. 트러스의 1차 모드 변위에  $q_1 = 25mmkg^{1/2}$  초기변위를 인가 후, 자유감쇠진동하에서 반응동 제어를 실시하여 작동유체의 가동질량 고려에 따른 반응동 제어 성능을 가동질량을 고려하지 않은 경우와 비교/분석하였다. 시뮬레이션에서 고려된 댐퍼 수학모델의 강성치  $k_1$ 과  $k_2$ 는 참고문헌 [10]에서 측정된 값인  $1.02 \times 10^5 N/m$ 과  $2.2 \times 10^4 N/m$ 이 각각 적용되었다.

본 논문에서는 작동유체 질량의 모델링이 반응동 제어 성능에 미치는 영향을 분석함이 목적이므로 트러스의 제어에는 선형제어이론(Linear Quadratic)으로부터 얻어진 다음의 반응동 제어기법[7]을 적용하였다.

$$\begin{aligned} c_i &= c_{imin} & \text{when } \dot{e}_i e_{Ti} > 0 \\ c_i &= c_{imax} & \text{when } e_i e_{Ti} < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서,  $c_{imin}$ 은 댐퍼로의 인가전압 off시의 점성감쇠계수의 최소치,  $c_{imax}$ 는 댐퍼의 인가전압 on에 의해 얻어지는 점성감쇠계수의 최대치를 나타낸다.  $e_{Ti}$ 는 선형제어이론으로부터 얻어진 댐퍼모델의 dashpot 요소 변위 최적치로 본 논문에서 적용된 반응동 댐퍼는  $e_i$ 를 직접 제어 할 수 없으므로  $c_i$ 를  $c_{imin}$  또는  $c_{imax}$ 로 가변시켜  $e_i$ 가  $e_{Ti}$ 에 최대한 접근 가능하도록 하는 반응동 제어법이다.

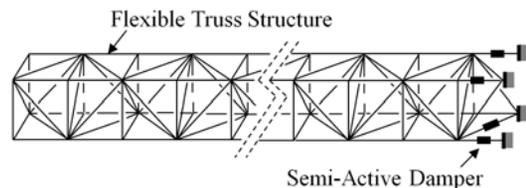


Fig. 3. Numerical Simulation Model

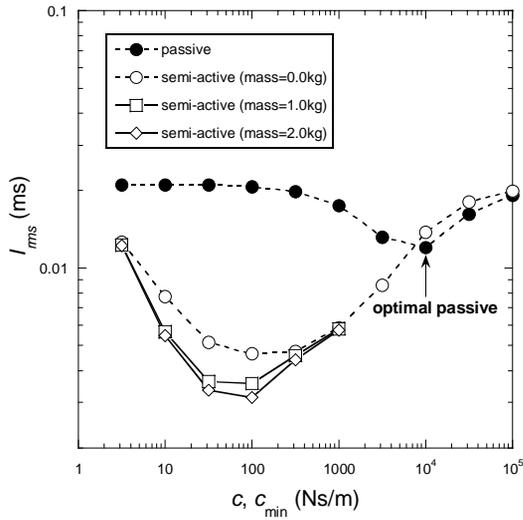


Fig. 4. Vibration suppression performance comparison of semi-active damper with and without fluid mass (semi-active damper:  $c_{max} = 10^3 c_{min}$ )

Fig. 4는 반능동댐퍼내 작동유체 질량 적용에 따른 제진성능을 비교하기 위한 시뮬레이션 결과로 각각의 감쇠점성계수 값에 따른 성능지표인  $I$  를 나타낸다. 여기에서,

$$I = \int_0^{\tau} \delta dt \quad (9)$$

$\delta$ 는 트러스 각 절점의 변위의 rms치,  $\tau=10$  sec가 적용되었다.

Fig. 4에서  $c=constant$ 인 수동댐퍼를 적용하였을 경우,  $c=10^4 Ns/m$ 가 최적화된 수동댐퍼의 점성감쇠계수임을 알 수 있다.  $c$ 가 가변하는 반능동 제어를 실시 할 경우,  $c_{min}(c_{max} = 10^3 c_{min})$ 치가 낮은 영역에서는 최적화된 수동댐퍼보다 높은 제진효과가 얻어짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2와 같이 반능동 댐퍼내의 작동유체 질량을 모델링에 고려했을 경우,  $c_{min}$ 가 비교적 낮은 특정 영역에서는 Fig. 1의 작동유체 질량을 고려하지 않은 경우에 비해 제진효과가 높음을 알 수 있다. 작동유체 질량은 참고문헌 [10]과 [12]의 ER/MR 댐퍼의 댐퍼내 유체의 질량과 댐퍼 가동부의 bellows 질량을 고려하여 1.0kg를 적용하였고, 질량증가에 따른 댐퍼성능 비교를 위하여 2.0kg를 적용하였다.

Fig. 5는 최적 수동댐퍼와 반능동 댐퍼( $m=0.0kg$ )를 적용한 경우의 트러스 1차모드 변위

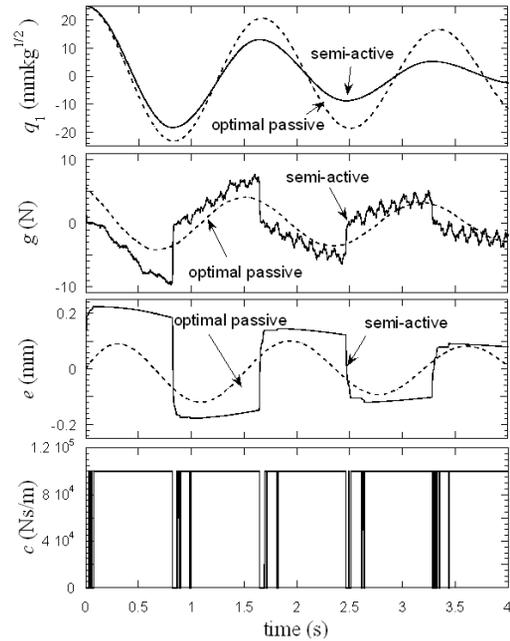


Fig. 5. Time history of 1st modal displacement obtained from semi-active system with and without mass under  $c_{min} = 10^2 Ns/m$  and  $c_{max} = 10^3 c_{min}$

( $q_1$ ), 댐퍼 모델의 dashpot 요소에 작용하는 장력 ( $g = p - k_2 e$ ), dashpot 요소의 변위 ( $e$ ) 그리고 반능동 제어시 댐퍼 내 작동유체의 점성( $c$ )의 스위칭 프로파일을 나타낸다. 댐퍼 모델의 dashpot 요소  $e$ 의 변위는 에너지 감쇠를 의미하며, 반능동제어시  $c$ 가  $c_{max}$ 로부터  $c_{min}$ 으로 스위칭 될때  $c_{max}$ 에 의해 구속되어있던  $e$ 가 스텝상으로 크게 변화하여 진동에너지를 감쇠 시킨 결과, 최적화된 수동 댐퍼에 비해 반능동 댐퍼의 높은 제진효과를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 작동유체 질량  $m=0.0kg$ 와  $m=1.0kg$  적용시 반능동 댐퍼로부터 얻어진 트러스의 1차 모드 변위를 나타내며,  $m=1.0kg$  적용시에는 작동유체 질량을 고려하지 않은 반능동 댐퍼에 비해 높은 제진효과를 확인할 수 있다.

Fig. 7과 8은 각각 댐퍼의 수확등가모델에서의 dashpot 요소에 작용하는 장력  $g$  ( $g = p - k_2 e$ )와 dashpot 요소 변위  $e$ 의 프로파일을 나타낸다.  $m=0.0kg$ 인 경우,  $g$ 가 0가 되었을 때  $c$ 가  $c_{min}$ 로부터  $c_{max}$ 로 스위칭 되고  $c_{max}$ 에 의해  $e$ 의 변위가 구속되지만  $m=1.0kg$  경우에는  $g$ 가 0가 되더라도 집중질량의 관성효과로 인해  $e$ 는 계속해서 변위

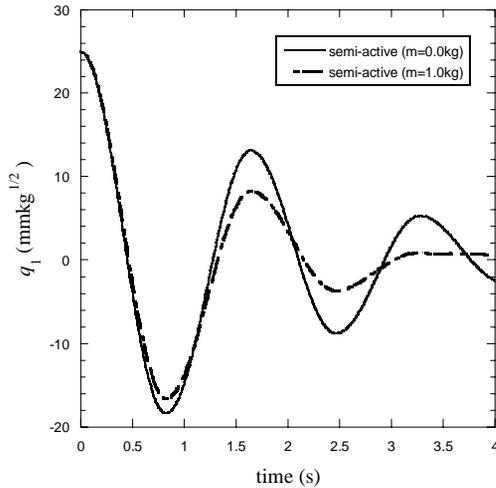


Fig. 6. Time history of 1st modal displacement obtained from semi-active system with and without mass under  $c_{min} = 10^2 Ns/m$  and  $c_{max} = 10^3 c_{min}$

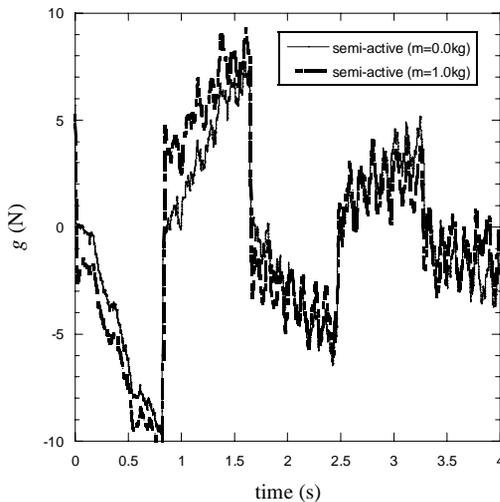


Fig. 7. Time history of  $g$  obtained from semi-active system with and without mass under  $c_{min} = 10^2 Ns/m$  and  $c_{max} = 10^3 c_{min}$

한다. 이 결과  $m=0.0kg$  인 경우 보다도  $c=c_{min}$  으로 스위칭시  $e$ 의 큰 이동량이 얻어지고 에너지 감쇠도 크게 이루어져 Fig. 6과 같은 집중질량 고려에 따른 높은 제진효과를 얻을 수 있다. 또한  $m=1.0kg$ 의 경우,  $c_{min}$ 로부터  $c_{max}$ 로 스위칭

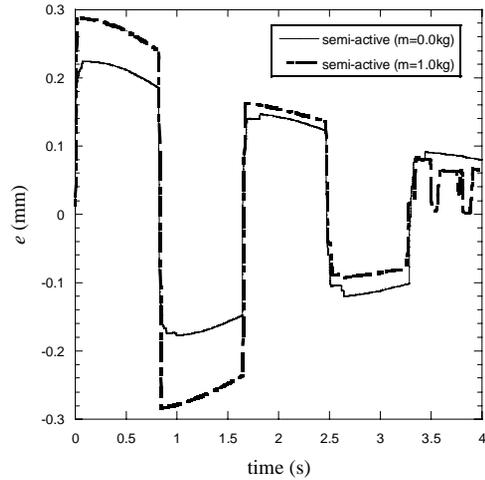


Fig. 8. Time history of  $e$  obtained from semi-active system with and without mass under  $c_{min} = 10^2 Ns/m$  and  $c_{max} = 10^3 c_{min}$

될 때에도  $m=0.0kg$ 의 경우와는 달리  $g$ 는 0을 통과하고 over shoot되어 반대방향에 위치하고 있다. 이러한 over shoot에 따라 제어가 on으로 스위칭 된 이후에도 off로 스위칭 되기 전까지 높은 레벨의  $g$ 를 유지하며 스위칭시  $e$ 의 변위를 크게하는 원인으로 작용한다. 이와 같이  $m=1.0kg$ 의 작동유체 질량을 고려했을 경우에는 집중질량의 관성효과에 의해 제어 off시에도 on시에도 에너지 감쇠 효과가 크게 작용함을 알 수 있다.

Fig. 9와 10은  $c$ 가  $c_{max}$  또는  $c_{min}$ 으로 스위칭 될 때의 댐퍼모델 dashpot 요소의 속도  $\dot{e}$ 와  $c$ 의 스위칭 프로파일로 각각  $m=0.0kg$ 와  $m=1.0kg$ 을 적용한 경우의 해석결과를 나타낸다. 반능동제어의 경우,  $c_{min}$ 으로 스위칭시 집중질량에 작용하여 축적된 스프링력을 단시간에 해방시켜 dashpot가 가급적 크게 변위할 수 있도록 함으로써 에너지 감쇠를 촉진한다.  $\dot{e}$  프로파일을 보면,  $m=0.0kg$ 의 경우, 스위칭시 순간적으로 속도가 높게되고 그후 식(2)로부터 알 수 있듯이 점근곡선을 이룬다.  $m=1.0kg$ 의 경우,  $\dot{e}$ 는 감쇠주기운동의 반주기분으로 속도가 0에서  $c$ 가  $c_{max}$ 로 스위칭되고 이때 가속도가 최대가 되며 이것에 따라 관성력과  $g$ 가 평형상태를 이루기 때문에 스프링력에 over shoot가 발생한다.

$m=1.0kg$ 을 적용한 경우의 임계감쇠계수는  $c_{critical} = 295 Ns/m$ 로 해석에 적용한  $c_{min} = 10^2 Ns/m$ 은  $c_{critical}$ 보다 작으므로 반능동댐퍼 계는 부족감

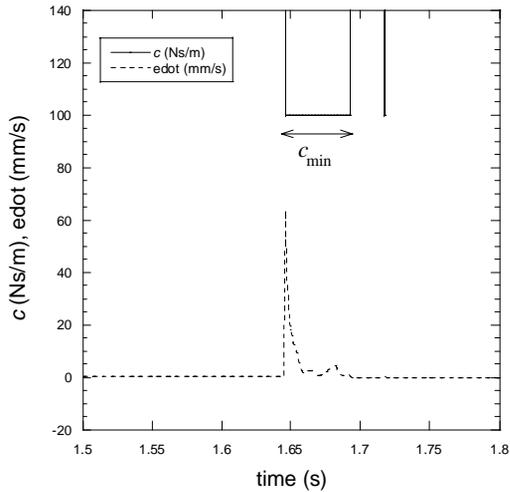


Fig. 9. Time history of  $c$  and  $\dot{e}$  for semi-active damper when  $m=0.0$  kg

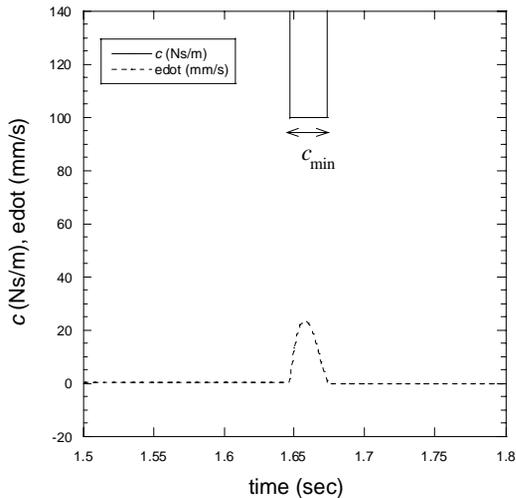


Fig. 10. Time history of  $c$  and  $\dot{e}$  for semi-active damper when  $m=1.0$  kg

최계임을 알 수 있다. 댐퍼계가 부족감쇠계이면 집중질량  $m$ 은 Fig. 10에서 알 수 있듯이 감쇠주기운동이 가능하고 dashpot 요소  $e$ 가 변위하기 쉽기 때문에 반응동제어에 있어 질량에 의한 관성효과로 제진성능향상이 가능하다. 그러나 Fig. 4에서도 알 수 있듯이  $c_{min} = 10^3 Ns/m$ 에서는  $c_{min} = 10^2 Ns/m$ 과 달리 작동유체 집중질량의 관성효과에 의한 제진성능이 나타나지 않고  $m=0.0kg$ 인 경우와 제진성능이 동일한 이유는 반응동 댐퍼계가 부족감쇠계가 아닌 과감쇠계가 되어 작동유체 질량에 의한 관성효과가 나타나지 않기 때

문이다. 따라서 반응동계가 부족감쇠계일 경우에는 작동유체 질량을 모델링에 고려하여야 하지만 과감쇠계에서는 Fig. 1과 같이 작동유체의 집중질량을 제외한 모델링을 하여도 반응동 댐퍼의 특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

### III. 결 론

반응동 댐퍼내 작동유체의 질량을 포함하는 가동질량을 고려한 수학적 모델을 유연우주구조물 반응동 제진에 적용하여 작동유체 질량을 댐퍼모델에 고려하지 않은 반응동 댐퍼와의 제진특성을 비교/분석 하여 가동질량 적용에 따른 반응동 제진의 성능을 수치해석적으로 확인하였다.

댐퍼내 작동유체 질량을 고려했을 경우에는 집중질량의 관성효과에 의해 에너지 감쇠를 의미하는 댐퍼 모델의 dashpot 요소의 변위  $e$ 가 크게되고 가동질량을 고려하지 않은 계에 비해 높은 제진효과를 얻을 수 있다. 또한 반응동 제어용 댐퍼 거동에 있어  $c_{min}$ 으로 스위칭시 댐퍼 자체의 계가 과감쇠 또는 부족감쇠에 따라 거동에 차이가 존재한다. 부족감쇠의 경우에는 작동유체의 집중질량을 모델링에 고려할 필요가 있으며 부족감쇠 특성을 이용하면 반응동제어의 제진성능을 향상시킬 수 있음을 검증하였다. 그리고 과감쇠시에는 작동유체의 질량을 제외한 모델링을 하여도 반응동 댐퍼의 특성을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

- 1) Rodden, J. J., Dougherty, L. F., Reschke, M. D., Hasha and Davis, L. P., "Line-of-Sight Performance Improvement with Reaction-Wheel Isolation", *Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference*, Keystone, CO, Sandiego, CA, Univelt, Inc., February, 1986.
- 2) Maly, J. R., Pendleton, S. C., Salmanoff, J., Blount, G. J., and Mathews, K., "Hubble Space Telescope Solar Array Damper", *Smart Materials and Structures: Passive Damping and Isolation*, Newport Beach, CA, March, 1999.
- 3) Porter, D., David, C., and John, H., "Advanced 1.5 Hz Passive Viscous Isolation System", *35th AIAA SDM Conference*, Hilton Head, South Carolina, April, 1994.

- 4) Denoyer, K. K., and Johnson, C. D., "Recent Achievements in Vibration Isolation Systems for Space Launch and On-Orbit Applications", 52nd International Astronautical Congress, Toulouse, France, October, 2001.
- 5) Balas, M. J., "Active Control of Flexible Systems", *Journal of Optimization and Theory*, Vol. 25, No. 3, 1978.
- 6) Onoda, J., and Minesugi, K., "Semiactive Vibration Suppression by Variable Damping Members," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 2, 1996.
- 7) Oh, H. U., Izawa, K., and Taniwaki, S., "Development of Variable-Damping Isolator using Bio-Metal Fiber for Reaction Wheel Vibration Isolation", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, September. 2005, pp. 928~933.
- 8) Oh, H. U., Taniwaki, S., Naofumi, K., and Katsuhiko, I., "Flywheel Vibration Isolation Test Using A Variable-Damping Isolator", *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, January. 2006, pp. 365~370.
- 9) Oh, H. U., Onoda, J., and Minesugi, K., "Semiactive Isolator with Liquid-Crystal Type ER Fluid for Momentum-Wheel Vibration Isolation", *Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 126, April. 2004, pp. 272~277.
- 10) Onoda, J., Oh, H. U. and Minesugi, K., "Semiactive Vibration Suppression with Electrorheological Fluid Dampers", *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 12. 1997.
- 11) Onoda, J., Oh, H. U. and Minesugi, K., "Improved Electrorheological Fluid Variable Damper Designed for Semiactive Vibration Suppression", *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 9. 2000.
- 12) Oh, H. U. and Onoda, J., "An Experimental study of a Semiactive Magneto-Rheological Fluid Variable Damper for Vibration Suppression of Truss Structures", *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, February. 2002, pp. 156~162.
- 13) Oh, H. U. "Experimental Demonstration of an Improved Magneto-Rheological Fluid Damper for Suppression of a Vibration of a Spcae Flexible Structure", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, September. 2004, pp. 1238~1244.