

나노 진동 흡수기의 모델링 및 열역학적 특성 해석에 대한 이론적 연구

Modeling and Theoretical Analysis of Thermodynamic Characteristic of Nano Vibration Absorber

문 병 영* 정 성 원**
Moon, Byung Young Chung, Sung Won

국문요약

구조물은 지진, 풍랑 등과 같은 외부의 충격에 대해서 노출되어 있기 때문에 대규모의 피해가능성이 항상 존재한다. 이러한 외부에 대한 충격흡수 장치는 여러 가지가 있다. 이러한 기구 중에서 널리 사용되고 있는 것이 기계적 에너지를 소산시키는 유압 감쇠기이다. 본 논문에서는 유압 감쇠기의 단점을 보완하고 보다 효율이 높은 감쇠기를 나노기술을 응용하여 새로운 감쇠기에 대한 기초적 이론연구를 하였다. 새로운 감쇠기는 내부에 점성 유체 대신에 무기재료의 입자를 유체와 혼합하여 사용하였고 오리피스스를 생략함으로써 보다 간단한 구조로 설계하였다. 나노 단위 기공에서의 유동 현상을 설명하기 위해서는 기존의 유체역학에 대한 지배방정식 및 가설들이 더 이상 적용이 되지 않는 단점이 있다. 본 연구에서는 지금까지 명확하게 규명되지 않았던 감쇠기의 열 발생, 나노 유동, 그리고 에너지 소산에 대한 이론적 해석을 수행하였다. 그리고 다공 입자 구조에 따른 에너지 소산에 대한 영향을 모델링하여 조사하였다. 감쇠 효과를 검토하기 위해 기존의 유압 감쇠기와 에너지 소산 효율을 비교하였다. 또한 감쇠 효율을 수치적인 해석결과와 실험 결과를 서로 비교하여 검토하였다.

주요어 : 감쇠기, 에너지 감쇠, 표면장력, 분자 유동, 유체 역학, 나노기술, 분자 동역학

ABSTRACT

In this study, new shock absorbing system is proposed by using nano-technology based on the theoretical analysis. The new shock absorbing system is complementary to the hydraulic damper, having a cylinder-piston-orifice construction. Particularly for new shock absorbing system, the hydraulic oil is replaced by a colloidal suspension, which is composed of a porous matrix and a lyophobic fluid. The matrix of the suspension is consisted of porous micro-grains with a special architecture: they present nano-pores serially connected to micro-cavities. Until now, only experimentally qualitative studies of new shock absorbing system have been performed, but the mechanism of energy dissipation has not been clarified. This paper presents a modeling and theoretical analysis of the new shock absorbing system thermodynamics, nano-flows and energy dissipation. Compared with hydraulic system, the new shock absorbing system behaves more efficiently, which absorb a large amount of mechanical energy, without heating. The theoretical computations agree reasonably well with the experimental results. As a result, the proposed new shock absorbing system was proved to be an effective one, which can replace with the conventional one.

Key words : vibration suspension, energy dissipate, surface force, nano-flows, fluid dynamics, nano-technology, molecular dynamics

1. 서 론

산업시설의 기계구조 중에서 외부에 대한 충격흡수 장치는 여러 가지가 있다. 이러한 기구 중에서 널리 사용되고 있는 것이 피스톤, 실린더, 점성유체 그리고 좁은 관인 오리피스 구조로 이루어진 유압 감쇠기이다. Fig. 1은 기존의 유압 감쇠기의 작동유체가 좁은 오리피스스를 통해 유입되면서 기계적 에너지를 소산시키는 원리를 간략하게 보여주고 있다.

유압 감쇠기⁽¹⁾는 좁은 영역의 오리피스스를 지나는 유체의 흐름을 통한 에너지 소산 원리를 이용하여 임의의 구조물에 작용하는 충격이나 진동을 억제하는 원리를 이용한 기계장치로써 기계 구조물 등에서 사용되고 있다. 그러나 점성 감쇠기 역할을 하는 유압 감쇠기는 외부에서 가해진 충격을 흡수할 때 감쇠기의 유체 내부에서 열이 발생하여 점성의

성질이 바뀔 수 있다. 또한 가해진 충격에 의해 피스톤이 실린더 쪽으로 밀려 내려왔을 때 자력으로 복원하지 못해 스프링을 추가로 설치해야하며, 복원하는 시간이 길어 연속적

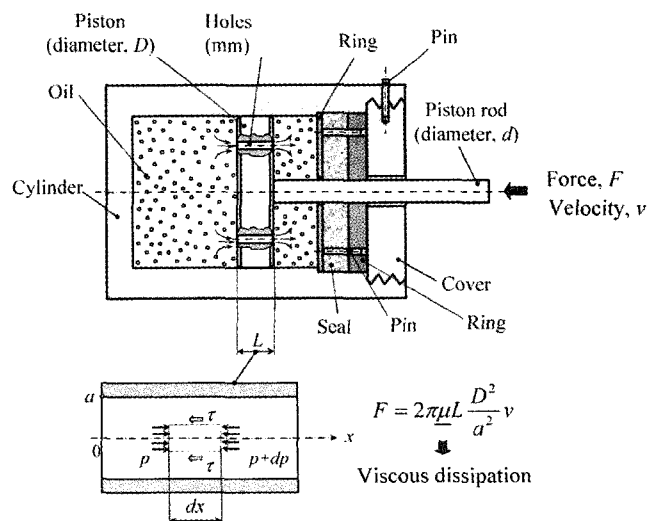


Fig. 1 Construction of hydraulic damper

* 정희원(대표저자 : moonby@pusan.ac.kr)

** 밀양대학교 기계공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 10. 27 / 심사종료일 : 2003. 11. 18)

인 외부의 충격에 대비하지 못한다. 본 연구에서는 이러한 유압 감쇠기의 단점을 보완하고 나노기술을 응용하여 보다 효율이 높은 새로운 감쇠기에 대한 기초적 이론연구를 하였다. 새로운 감쇠기는 내부에 점성 유체 대신에 무기재료의 입자를 유체와 혼합하여 콜로이드 상태로 사용하여 보다 간단한 구조로 설계하였다. Fig. 2는 기존의 유압 감쇠기에 대비하여 분말을 이용한 콜로이드 감쇠기의 기계적 에너지를 소산시키는 구조를 간략하게 보여주고 있다.

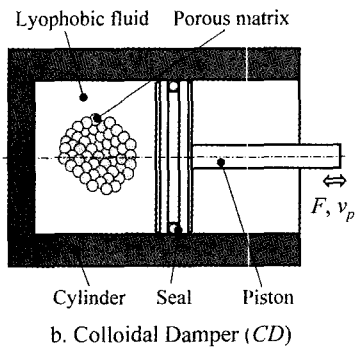


Fig. 2 Construction of colloidal damper

Eroshenko⁽²⁾에 의해 제안된 이 감쇠기는 기존의 실린더, 피스톤 구조의 유압 감쇠기를 대체하여 사용이 가능하다. 본 논문에서는 이 감쇠기를 콜로이드(colloid) 감쇠기로 표현하기로 한다. 콜로이드 감쇠기는 항공기의 랜딩기어, 운송수단의 수송차량 완충장치나 내진용 완충장치 등으로 적용이 가능하다.

현재까지는 콜로이드 감쇠기에 대한 실험적 연구만이 수행되고⁽³⁾, 감쇠기의 에너지 소산 이론과 원리에 대해서는 명백히 설명되지 않았다. 콜로이드 감쇠기를 이론적으로 해석하기 위해서는 몇 가지 어려움이 있다. 즉, 나노 단위 기공에서의 유동 현상을 설명하기 위해서는 기존의 유체역학에 대한 지배방정식 및 가설들이 더 이상 적용이 되지 않는다는 점에 있다. 나노 기공에서의 유동 특성을 해석하기 위해서는 분자동역학 해석이나 몬테카를로 해석과 같은 통계학적인 방법이 사용되어야만 한다.⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾ 또한, 콜로이드 감쇠기에 대한 이론적 연구는 입자내의 모세관 현상과 박막에서 유체역학적인 물성을 고려한 학문 분야를 바탕으로 한다. 감쇠기에서 발생하는 윤활, 부식, 부양, 거품 형성, 유화작용, 콜로이드 상태의 안정성 등과 같은 기술적인 문제의 해결 방법은 박막 액상층의 물성과 나노 단위 크기의 기공에서의 물분자들의 흡착과 탈착에 대한 메카니즘에 의해 결정된다.⁽⁷⁾ 따라서 콜로이드 감쇠기에 대한 이론적 연구는 유체 동역학, 열역학, 분자간 물리-화학을 고려한 분자동역학, 그리고 진동학 등의 다학제간 접근이 요구되어진다.

본 연구에서는 지금까지 명확하게 규명되지 않았던 콜로이드 감쇠기의 열 발생, 나노 유동, 그리고 에너지 소산에 대한 이론적 해석을 수행하였다. 그리고 다공 입자 구조에 따른 에너지 소산에 대한 영향을 모델링하여 조사하였다. 감쇠

효과를 검토하기 위해 기존의 유압 감쇠기와 에너지 소산 효율을 비교하였다. 또한 감쇠 효율을 수치적인 해석결과와 실험 결과를 서로 비교하여 검토하였다.

2. 나노 콜로이드 감쇠기의 모델링

2.1 나노 콜로이드 감쇠기의 구조

콜로이드 감쇠기는 기계공학 분야에서 나노기술을 적용한 새로운 구조물이다. 콜로이드 상태의 무기재료 입자와 유체를 혼합하여 유압감쇠기의 점성 유체를 대신하게 된다. Fig. 3에 콜로이드 감쇠기의 원리에 대한 모델을 나타내었다. Fig. 3에서 σ , θ 는 각각 표면장력, 접촉 각도를 나타낸다.

콜로이드 감쇠기의 내부에 관련된 유체로는 물이 가능하다. 콜로이드 감쇠기가 외부 압력에 의한 압축이 Fig. 3과 같이 가해지면, 물은 다공 입자의 나노 크기의 입자가 통과할 수 있는 유로(pore)를 통해 입자의 중앙에 위치한 중공내로 유입되어 내부의 공기를 압축한다. 압축이 해제되어지면, 다공질 입자 표면의 소수화 처리를 통해 발생하는 표면장력이 나노 유로를 통해 중공에 유입된 물을 밖으로 밀어내게 되며 이때 압축되었던 공기는 팽창하게 된다. 기존의 유압감쇠기와 콜로이드 감쇠기와의 차이점은 작동유체가 이동하는 경로의 크기가 유압감쇠기는 밀리미터 단위(1mm), 콜로이드 감쇠기는 나노 단위(1-10nm)인 것에 있다.

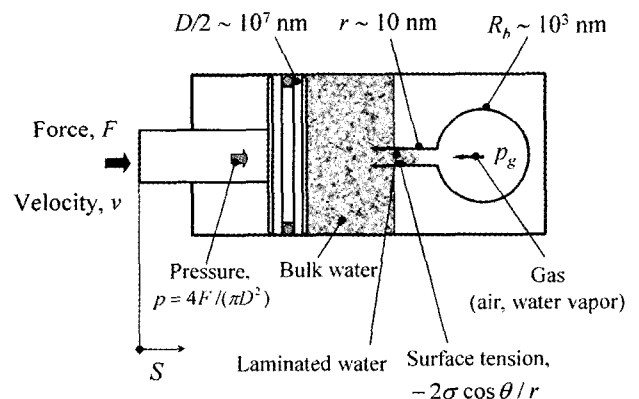


Fig. 3 Schematic model of the energy dissipation system

2.2 입자에 가해지는 압력과 표면장력

콜로이드 감쇠기의 에너지 사이클 중 압축 공정에서 작동 유체인 물은 Fig. 4와 같이 다공성 입자 내부로 유입된다.

입자의 모든 표면이 소수화 처리가 되어 있기 때문에 가해진 외부의 압력은 유입된 물을 입자 외부로 밀어내려는 라플라스 모세관(Laplace capillary) 압력과 다공 입자 중앙의 공기의 압력 p_g 에 대해서 같은 크기로 반대 방향으로 작용한다. 외부 압력 p 와 라플라스 압력 p_l 은 다음과 같이 정의할 수 있다.⁽²⁾

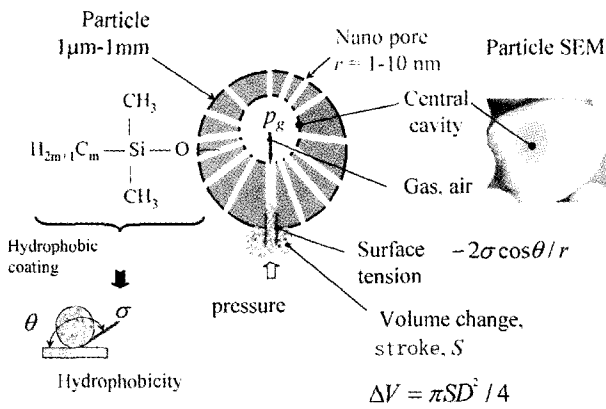


Fig. 4 Mechanism of colloidal dissipation

$$p = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

$$p_l = - \frac{2\sigma \cos \theta}{a} \quad (2)$$

여기서 F 는 가해지고 있는 외력이고 D 는 실린더의 직경이다. 전체의 압력은 다음과 같이 된다.

$$p = - \frac{2\sigma \cos \theta}{a} + p_g \quad (3)$$

2.3 에너지 소산 메카니즘

콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 메카니즘은 Fig. 3, Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 무기재료 분말에서 작동 유체의 출입으로 설명할 수 있다. 미세 분말의 기공을 병과 병목이론(Neck-Bottle theory)으로 모델링하여 유체 역학으로 설명이 가능하다.⁽⁸⁾ 감쇠기에 사용되는 다공성의 입자는 병과 병목이론에 의해 모델링할 수 있다. 다공성 입자의 병목 부위의 분자의 흡착을 결정하는 라플라스 압력(P_a)과 병 부위의 분자의 탈착을 결정하는 라플라스 압력(P_d)은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_a = \frac{2\sigma}{r_1} \quad (4)$$

$$P_d = \frac{2\sigma}{r_3} \quad (5)$$

여기서, $r_1 = 6.5\text{nm}$, $r_3 = 317\text{nm}$ 일 때, 물의 경우에는 $P_a = 225\text{bar}$, $P_d = 5\text{bar}$ 가 된다. 콜로이드 감쇠기에서의 에너지 소산은 외부 하중이 작용하는 사이클 중 감쇠기의 압축 공정과 압축 해제 공정에서 표면장력에 의해 행해진 일의 차이로 발생된다. 소산된 에너지는 이력곡선의 면적과 동일하므로 계산할 수 있다. 이것은 감쇠기를 이용하여 실험으로 검증할 수 있다. 결과적으로 액체가 다공질의 입자를 통과하면서 흡수되는 에너지 현상을 기초로 하는 이러한 원리를 충격이나 진동에 의한 에너지의 감쇠 장치에 적용할 수 있다.

3. 이론적 해석

3.1 콜로이드 감쇠기의 열역학적 해석

콜로이드 감쇠기는 가열 현상이 거의 없이 기계적인 에너지의 소산이 가능하며, 강력하고 효과적인 에너지 블랙홀이라고 일컬어진다(e.g., $E=100\text{ J}$, Fig. 5에서).

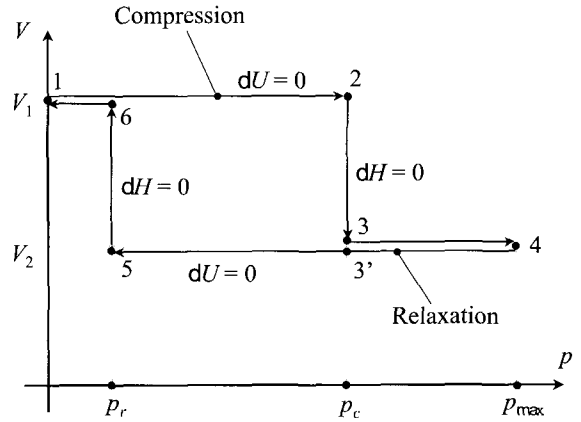


Fig. 5 Ideal thermodynamic cycle of the Damper

콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 사이클의 엔탈피는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$(\Delta H)_{cycle} = (1 - T\alpha)E = (\Delta Q)_{cycle} + E \quad (6)$$

여기서,

T : 절대 온도

Q : 발생열량

α : 팽창계수(The expansion coefficient)

따라서, 에너지 소산 사이클 동안 콜로이드 감쇠기에서 외부로 전달되는 열량은 다음과 같이 계산되어 진다.

$$(\Delta Q)_{cycle} = - TaE \quad (7)$$

여기에 $T = 293.15\text{K}$, $E = 100\text{J}$, 그리고, $\alpha_{water} = 10^{-4}\text{K}^{-1}$ 값을 적용하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$(\Delta Q)_{cycle} = -3\text{J} \quad (8)$$

다시 말하면, 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산과정에서 발생하는 열량은 소산된 에너지의 대략 3%임을 알 수 있다.

콜로이드 감쇠기에 1kW 파워의 진동기를 1시간동안 부하를 작용시켰을 때의 온도 상승량은 20°C이다.⁽¹⁾ 동일한 작동 환경 하에서 기존의 유압 감쇠기에서의 온도 상승량은 대략 2000°C가 될 것이다. 앞서 언급한 열역학적 계산식을 이용하여 콜로이드 감쇠기와 유압감쇠기에 대한 실험적 결과의 설명이 가능하다. 콜로이드 감쇠기의 경우에는 소산된 에너지량이 1kW 일 때, 에너지 소산 사이클 동안 열 발생량은 대략 30W(작은 전구 출력)가 된다. 발생된 열에 의한 온

도 상승량은 거의 무시할 만하다. 콜로이드 감쇠기의 경우 이러한 현상이 가장 중요한 장점이라 할 수 있다.

3.2 기공의 유동에 대한 해석

3.2.1 기공에서 포이젤(Poiseuille flow) 유동

기존의 유압감쇠기와 콜로이드 감쇠기내의 유동을 포이젤 유동의 형태로 가정을 한다면, 감쇠기에서의 기계적 에너지 소산은 유동내의 점성력에 의해 발생한다고 말할 수 있다. 이때, 마찰력, F_f 은 Fig. 7(a)에서 알 수 있는 바와 같이 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁹⁾

$$F_f = 2\pi\mu\nu_p L D_p^2 / a^2 \quad (9)$$

여기서,

- μ : 유체 동점성계수
- ν_p, D_p : 각각 피스톤의 속도와 직경
- L, a : 각각 좁은 오리피스스의 길이와 반경

유압감쇠기와 콜로이드 감쇠기에 동일한 피스톤의 속도와 직경을 적용시키면, 마찰력의 비는 각각의 감쇠기 외부로 전달되는 발열량(Q)의 비로 표현할 수 있다(CD : colloidal damper, HD : hydraulic damper).

$$\frac{F_{f,CD}}{F_{f,HD}} = \frac{(\Delta Q)_{CD}}{(\Delta Q)_{HD}} = \frac{\mu_{CD}}{\mu_{HD}} \times \frac{L_{CD}}{L_{HD}} \left(\frac{a_{HD}}{a_{CD}} \right)^2 \quad (10)$$

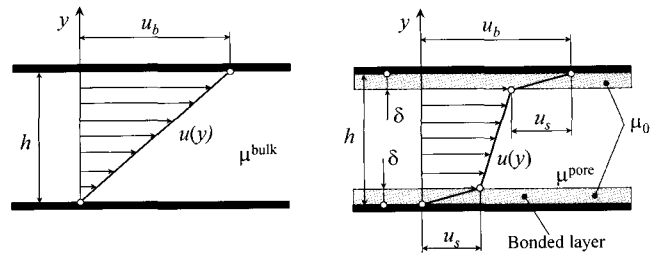
여기에,

$$\begin{aligned} \mu_{CD}(\mu_{water}) &= 10^{-3} Pa \cdot s, \\ \mu_{HD}(\mu_{oil}) &= 10^{-2} Pa \cdot s, \quad L_{CD} = r_2 - r_3 = 500nm, \\ a_{CD} = r_1 = 10nm, \quad a_{HD} &= 1mm, \quad L_{HD} = 5mm \text{ 값을 적용하면} \\ \frac{(\Delta Q)_{CD}}{(\Delta Q)_{HD}} &= 10^5 \text{ 같은 결과를 얻을 수 있다. 다시 말하면,} \end{aligned}$$

포이젤 유동과 관련한 계산 방법을 이용하면, 기존의 유압감쇠기보다 콜로이드 감쇠기에서 더 많은 양의 열이 발생하게 된다. 나노 유동 흐름에 대한 기존 포이젤 유동에 관련한 가정은 마찰력, 즉 발열량이 상당히 높게 계산되어 있다. 그러나 실제로, 콜로이드 감쇠기의 실험적 고찰 결과는 거의 열이 발생하지 않는다. 따라서 이러한 이론 계산 결과는 감쇠기의 실험적 고찰 결과와 일치하지 않고 있다. 결과적으로, 나노 유동 흐름에 대해서는 기존의 포이젤 유동의 가정이 적용될 수 없음을 보여 주고 있다. 따라서 나노 유동에 대해서 분자 동력학을 고려한 새로운 유체역학적 모델과 이론이 필요하다.

3.2.2 Couette 흐름에서의 슬립(Slip) 현상

일반적인 관의 유로에서의 흐름은 Fig. 6(a)와 같이 나타낼 수 있다. 그러나 나노미터 크기의 유로내 유동은 기존의 흐름에 비해서 정적 및 동적 물성에 급격한 변화가 발생한다.



(a) Couette flow without slip (b) Couette flow with slip

Fig. 6 Couette flow without and with slip

이러한 현상 중의 하나로써 나노 유로내의 유동 고정 벽면과 유동내에서 물 분자 클러스터가 각각의 층간에서 직선적으로 정해진 흐름을 보여주는 슬립현상이 발생한다(Fig. 6(b))⁽⁶⁾. 유체의 유동 내에서 발생하는 슬립 현상은 액체가 유로내 벽면에서 점착력을 잃어버리고, 벽면을 따라 흐르며 표면을 따라 미끄러짐이 발생하는 현상을 말한다. Fig. 7은 물 분자가 온도의 변화에 따라 운동이 활발해 지는 현상을 나타내고 있다. 콜로이드 감쇠기내 다공 입자의 나노 단위 기공 유로에는 소수 처리를 한 박막 코팅층(μ_{pore}, μ_0)은 벽면에 고정되어 슬립이 발생하지 않는 경계층을 이룬다. 그러나 좀더 자세하게 보면 이 박막의 경계층은 유동내 클러스터 상호간의 점성력으로 인해 벽면에서 유효 역할을 하게 된다.⁽⁷⁾ 그래서 전체적인 흐름은 박막내의 경계층에서 슬립으로 보여진다. 이러한 유동내 슬립 현상은 일반적인 연속체 역학의 가정이 충족되지 않을 때 발생되어 진다.

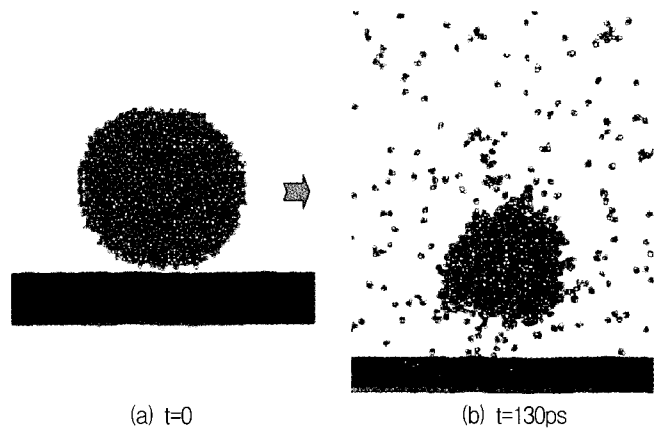


Fig. 7 Water cluster decomposition when temperature increases

3.2.3 포이젤 크리핑(Poiseuille creeping) 유동

콜로이드 감쇠기의 관내 경계층 흐름의 특성을 조사하기 위해 Fig.8과 같은 흐름의 모델을 만들었다. 콜로이드 감쇠기 내의 나노 유로의 직경을 10nm, 클러스터의 크기를 2nm 라 가정하면, 나노 유로 내에는 5층의 마크로 분자 유동 경계층이 형성된다(Fig. 8(a)). 나노 유로 관내의 얇은 박막층은 소수화 처리를 위한 코팅층이 강하게 흡착되어 있고 이것이, 표면을 형성하여 벽면을 구성하고 있다. 포이젤 크리핑 유동에서는 각각의 분자층 유동이 서로 독립적으로 흘러가며, 각각의 분자층 유동의 속도 분포는 Fig. 8(b)과 같다. 이때 각

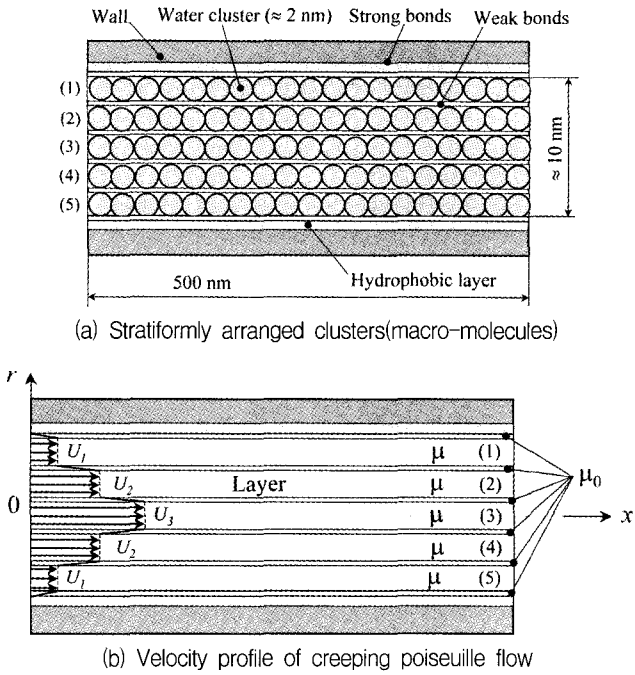


Fig. 8 Creeping Poiseuille flow with slip

층간에는 약한 상호 작용이 발생하여 마치 기차의 레일 위를 두 대의 기차가 평행하게 서로 다른 속도로 달리고 있는 것처럼 미끄러짐이 발생한다. 그리고 각각 분자층 내부의 속도 변화량이 거의 0에 가깝기 때문에 전단 응력은 아래의 식과 같이 거의 존재하지 않는다.

$$\tau = \frac{\mu}{\partial r} \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

각각의 분자의 흐름으로 인한 경계층 유동 사이에서는 속도 변화량이 0이 아니다. 그러나, 분자층 유동 사이의 점성에 의한 전단력이 거의 0에 가깝기 때문에 전단 응력 또한 무시할 만한 수준이 된다. 이것은 속도가 거의 영에 가깝게 가는 경향이 있기 때문이다. 즉, 아주 적은 분자간 상호작용이 크리핑 흐름 중에 깨어 졌다고 할 수 있다. 따라서, 유체의 마찰과 콜로이드 감쇠기의 열발생 ($\Delta Q_{CD} \cong 0$)은 거의 무시할 수 있고 마찰력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_f = \int_A \tau \cdot dA \cong 0 \quad (10)$$

4. 실험과 이론에 의한 감쇠기의 효율해석

4.1 감쇠기의 이론적 효율

콜로이드 감쇠기와 기존의 유압감쇠기에 대해 에너지 소산 효율 측면에서 비교를 하는 것은 매우 중요한 것이다. 감쇠기의 효율 (η) 는 외부 하중에 의한 압력 변화 사이클 동안 소산된 에너지, E 와 사이클 중 압축 공정에서 가해진 에너지, $E_{Loading}$ 의 비로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{E}{E_{Loading}} \quad (11)$$

각 감쇠기의 최대 효율 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{max, HD} = 1 - \left(\frac{D_{pr}}{D_p} \right)^2 \quad (12)$$

$$\eta_{max, CD} = 1 - \left(\frac{r_1}{r_3} \right) \quad (13)$$

만일 피스톤 직경 $D_{pr} = 0.7 D_p$, 분말의 크기 $r_1 = 6.5nm$, $r_3 = 317nm$ 로 가정하면, 각 감쇠기의 최대 효율은 $\eta_{max, HD} = 0.51$, $\eta_{max, CD} = 0.98$ 과 같이 계산되어진다. 따라서 대략 콜로이드 감쇠기의 효율이 기존의 유압감쇠기의 2배 정도로 높은 것을 확인할 수 있다.

4.2 감쇠기의 실험

본 연구에서는 정적 하중 상태에서의 콜로이드 감쇠기에 대한 실험을 수행하였다. 실험적 연구는 입력과 결과를 측정하는 방법을 Fig. 9와 같이 구성하여 감쇠기 이력현상에 대한 영향을 검토하였다. Fig. 9는 실험 과정과 감쇠기의 측정된 자료를 고속 푸리에 변환장치에 의해 기록하는 실험 장치의 구조도를 보여준다.

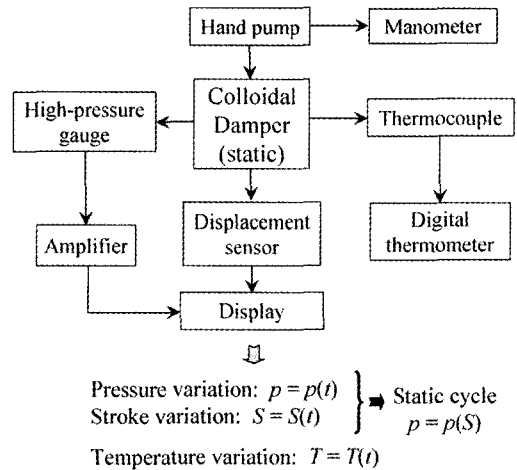


Fig. 9 Experimental measurement equipment

콜로이드 감쇠기에 대한 정적 실험에서 실린더의 변위(S), 감쇠기 챔버 내의 압력(p), 그리고 챔버 내의 온도(T)를 측정하였다. 이러한 실험 데이터는 측정시간, t 에 따라 고속 푸리에 변환장치(FFT Analyzer - Fast Fourier Transform Analyzer)에 다음과 같이 기록된다. 측정된 압력과 실린더 변위 사이의 시간은 무시하였기 때문에 가역적 콜로이드 감쇠기의 정적 이력곡선에서 압력은 변위의 함수로 나타내어진다.

$$p = p(S) \quad (14)$$

5. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 콜로이드 감쇠기 내의 다공성 입자들이 $r_1 = 6.5nm$, $r_2 = 700nm$, 그리고 $r_3 = 317nm$ 인 동일한 구조를

가지는 입자를 사용하여 콜로이드 감쇠기를 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 다공성 입자는 실리카겔을 사용하였으며, 다공성(Porosity) 계수($\beta=0.8$)이다. 작동 유체인 물의 압축성(Compressibility) 계수(c)는 압력에 대하여 Table 1과 같다.

Table 1 Water compressibility

P[bar]	0	350	700	1050
c[%]	0	1.6	3.0	4.0

콜로이드 감쇠기의 압축 및 압축 해제 사이클에 대한 수치적 해석을 위하여 감쇠기 내의 다공질 입자는 초기의 부피, $V_0=6000\text{mm}^3$ 로 한다. 이에 대해 다공질 입자 구조는 초기의 전체 부피를 흡수할 수 있고, 이때에 어느 순간에도 피스톤에 의한 외부 압력은 다음과 같다.

$$P = \frac{2\sigma}{r} + P_{air} \quad (15)$$

여기서,

r : 공정별 유로의 반경

P_{air} : 다공성 입자 내부 공간의 공기로 인한 압력

공기는 외부 압력 P_a 과 체적 $\frac{4\pi\beta r^3}{3}$ 을 가지고 입자 내부 증공의 압력 P_{air} 과 평형 상태의 체적으로 단열 변환을 거친다.

Fig. 10은 두 가지 경우, 즉 실리콘 오일과 세라믹 입자, 물과 세라믹 입자를 이용한 콜로이드 감쇠기의 외란 이 작용했을 때의 압력변화 사이클을 보여 주고 있다. 각각의 경우 발생된 에너지 소산량의 비를 나타내면 다음과 같다.

$\left[\frac{E_{silicon}}{E_{water}}\right]_{exp} = 0.19$. 물과 실리콘 오일의 경우, 표면장력은 다음과 같다.

$$\sigma_{water} = 0.073 \text{ N/m}, \quad \sigma_{silicon} = 0.015\text{N/m}$$

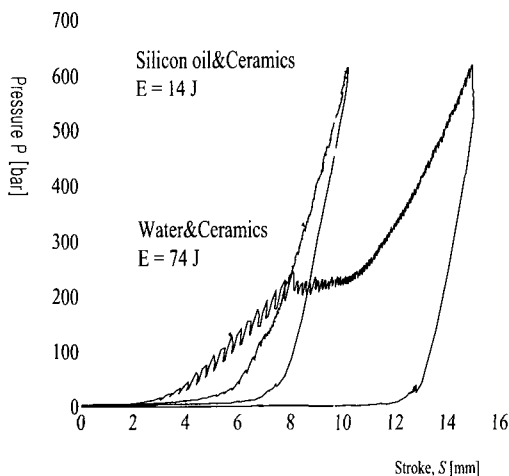


Fig. 10 Ceramics against water and against silicon oil

표면장력에 의한 힘으로 인해서 발생한 에너지 손실을 고려하여 계산한 소산된 에너지의 이론적인 비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{E_{silicon}}{E_{water}}\right]_{th-\sigma} = \frac{\sigma_{silicon}}{\sigma_{water}} \quad (13)$$

$\frac{\sigma_{silicon}}{\sigma_{water}} = 0.21$ 위와 같은 결과는 실험으로 얻어진 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

콜로이드 감쇠기의 나노 유로 내 유동을 기존의 포이젤 유동이라 가정한다면, 소산된 에너지의 비는 유체 동점성 계수의 비로 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{E_{silicon}}{E_{water}}\right]_{th-\mu} = \frac{\mu_{silicon}}{\mu_{water}} \quad (14)$$

$\frac{\mu_{silicon}}{\mu_{water}} = 1000$ 여기서, $\mu_{silicon} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이다. 포이젤 유동에 대한 가정을 통해서 얻어진 계산 결과는 실험치와 서로 상이한 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 기존의 포이젤 유동에 대한 가정 및 이론은 나노 입자의 관내 흐름에 대한 감쇠기의 유체 유동에는 적용될 수가 없음을 알 수 있다.⁽¹²⁾ 이러한 모델을 이용한 시뮬레이션 결과는 이상적인 가정을 통해 계산되어진 이론적인 결과로써 Fig. 11에서와 같이 실험결과와 대략적인 근사를 보여준다.

그러나 실제 다공성 입자는 동일한 크기의 병목과 병을 가지고 있지 않기 때문에 실험값과 이론 계산 값과의 차이가 생긴다고 볼 수 있다. 또한 다공성입자내의 큰 유로가 먼저 물로 채워지고 다음에 적은 입자의 유로가 물로 채워지는 현상이 있기 때문에 실험값과 이론 계산 값과의 차이가 생긴다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 Fig. 11에서의 이상적인 값으로 계산된 직선의 값은 오차를 가진 기울어진 값으로 나타나고 있다. 따라서 동일한 크기를 가진 이상적인 입자로 가정하여 계산한 값으로 인한 오차를 줄이기 위해서는 입자의 크기를 실제의 크기에 맞게 개선되어 표현되어야 한다.

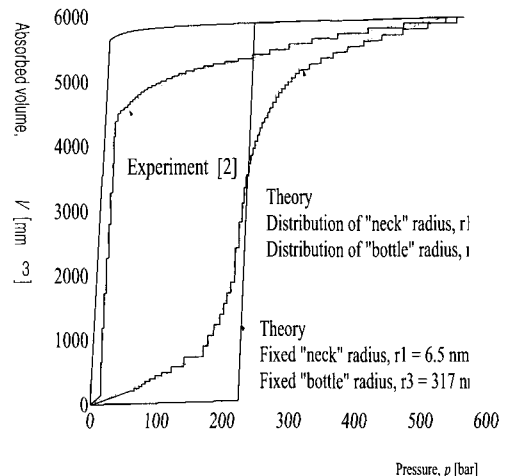


Fig. 11 Theoretical and experimental cycle of damper

5. 결 론

본 연구에서는 외부의 충격과 진동에너지 흡수 장치에 대한 새로운 감쇠기를 나노 기술을 이용하여 설계하는 기초적인 이론연구를 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 콜로이드 감쇠기를 무기재료 분말을 이용하여 모델링하여 감쇠기의 에너지 소산 메커니즘을 이론적으로 규명하였다.
- (2) 감쇠기는 다공성 입자내 나노 기공에서의 작동유체의 슬립현상을 이용하여 기계적인 에너지를 소산시킴을 확인하였다.
- (3) 제안된 감쇠기의 효율은 기존의 유압감쇠기보다 2배 정도 높은 효율을 가진다.

이 연구를 통해 이론을 바탕으로 한 수치 해석 결과와 콜로이드 감쇠기의 실험에 의한 결과가 동일한 경향을 가짐을 알 수 있었고 이 결과는 실제의 감쇠기를 설계하고 적용하는데 이론적 근거가 될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R08-2003-000-11075-0 (2003))의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Chironis, N. P., *Spring Design and Application*, McGraw-Hill, New York, 1961.
2. Eroshenko V. A. and Fadeev A. Y., "Intrusion and

- Extrusion of Water in Hydrophobized Porous Silica", *Colloid J.*, No. 57, 1995, pp. 480-483.
3. Eroshenko V. A. and Fadeev A. Y., "A Study of the Surface of Chemically Modified Porous Silicas by Water Porosimetr," *Russian J. Physical Chemistry*, No. 70, 1996, pp. 1380-1383.
4. McGrother, S. C. and Gubbins, K. E., "Constant Pressure Gibbs Ensemble Monte Carlo Simulation of Adsorption into Narrow Pores," *Journal of Molecular Physics*, Vol. 97, No. 8, 1999, pp. 955-965.
5. H. Wang et al., "Molecular Dynamics Study on Interfacial Slip Phenomenon on Ultra-Thin Lubricating Films," *ITC Nagasaki-2000*, 1F4-1, 2000, p. 49.
6. D. Frenkel and B. Smit., *Understanding Molecular Simulation, From Algorithms to Applications*, Academic Press, New York, 1996.
7. J. Clifford., *Water a Comprehensive Treatise. Properties of Water in Capillaries and Thin Films*, Pergamon. New York, 1993.
8. R. Defay et al., *Surface Tension and Adsorption*, Longmans, London, 1966.
9. F. M. White., *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, 1974.
10. H. Kuhn and H. D. Forsterling., *Principles of Physical Chemistry*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
11. E. Sakir and E. Guneyler., "Molecular Dynamics Simulation of Water Clusters," *Physica E.8*, 2000, pp. 40-49.
12. Iwatsubo, T., Suci, C. V., and Deki, S., 2001, "Theoretical Investigation of a Colloidal Damper," *Asia-Pacific Vibration Conference*, Hangzhou, China, pp. 223-229.