

실리카 겔의 소수화 코팅 혼합 정도에 따른 나노 충격 흡수 장치의 이력 현상에 대한 기초적 연구

Basic Study of the Hysteresis of a Nano Shock Absorbing Damper by Employing Mixed Lyophobic Coating Silica Gel

문 병 영* 김 흥 섭**
Moon, Byung Young Kim, Heung Seob

국문요약

본 연구에서는 나노기술을 이용하여 에너지 감쇄 기능을 활용한 내진용 감쇄기 개발에 대한 연구를 하였다. 구조물에 사용되는 기존의 유체 감쇄기를 대체하는 무기재료를 이용한 새로운 감쇄기에 대한 기초적 연구를 하였다. 완충역할을 하는 입자로는 미로구조를 가지는 실리카겔을 사용하였으며, 입자에 관련한 작동 유체로는 물을 사용하여 그 효과를 검증하였다. 콜로이드 감쇄기를 구현하기 위해서는 형성된 실리카 겔 입자의 표면을 유기 실리콘 매질을 이용한 소수화 코팅 처리를 하였다. 콜로이드 감쇄기의 이력곡선은 서로 다른 소수화 코팅 처리가 된 입자의 혼합과 소수화 처리시의 분자간 거리에 의해서 조절이 가능함을 알 수 있었다. 콜로이드 감쇄기의 에너지 소산량은 상이한 소수화 처리 정도와 서로 코팅처리량이 서로 다른 재료를 혼합함으로써 제어 할 수 있음을 확인 하였다. 기존의 유압 감쇄기에서는 나타나지 않는 이러한 특징은 콜로이드 감쇄기가 충격 흡수 장치로 사용 가능하다는 사실을 입증한다.

주요어 : 감쇄기, 나노기술, 이력곡선, 에너지 소산효율, 무기재료의 혼합

ABSTRACT

A novel application of nano-technology in the field of engineering, called colloidal damper, is investigated. This device is complementary to the hydraulic damper, having a cylinder-piston construction. Particularly for colloidal damper, the hydraulic oil is replaced by a colloidal suspension, which is consisted from a nano-porous matrix with controlled architecture and a lyophobic fluid. In this experimental work, the porous matrix is composed from silica gel, with labyrinth architecture, coated by organo-silicones substances, in order to achieve a hydrophobic surface. Water is considered as associated lyophobic fluid. The colloidal damper test rig and the measuring technique of the hysteresis are described. The influence of the hydrophobicity level upon the colloidal damper hysteresis is investigated, for silica gels with similar pores distribution. A certain desired shape of the hysteresis can be achieved by employing mixture of silica gels with different level of hydrophobicity and/or architecture. With these results, it is believed that the proposed damper can be designed and be applied to the desired structure.

Key words : damper, nano-technology, hysteresis, mixture of silica gels

1. 서 론

산업시설의 기계구조 중에서 외란에 대한 충격흡수 장치는 여러 가지가 있다. 이러한 기구 중에서 산업시설에 널리 사용되고 있는 것이 실린더와 피스톤 구조로 이루어진 유압 감쇄기이다(Fig. 1(a)). 유압 감쇄기⁽¹⁾는 좁은 영역의 오리피스를 지나는 유체의 흐름을 통한 에너지 소산 원리를 이용하여 임의의 구조물에 작용하는 충격이나 진동을 억제하는 원리를 이용한 기계장치로서 점성 감쇄기 역할을 기계 구조물 등에서 사용되고 있다. 그러나 유압감쇄기는 외부에서 가해진 충격을 흡수할 때 감쇄기의 유체내부에서 열이 발생하여 점성의 성질이 바뀔 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 유압 감쇄기의 단점을 보완하고 보다 효율이 높은 감쇄기를 최신기술인 나노기술을 응용하여 새로운 감쇄기에 대한 연구를 하였다. 새로운 감쇄기는 내부에 점성 유체 대신에 무

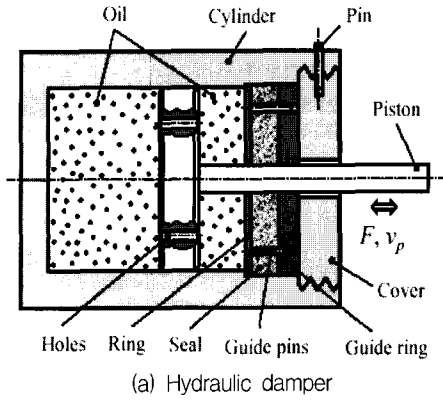
기재료의 입자를 유체와 혼합하여 콜로이드 상태로 사용하였고 오리피스를 생략함으로써 해서 보다 간단한 구조로 설계가 가능하다(Fig. 1(b)). Fig. 1은 기존의 유압 감쇄기와 콜로이드 감쇄기의 작동유체가 좁은 오리피스를 통해 유입되면서 기계적 에너지를 소산시키는 원리를 간략하게 보여주고 있다. Eroshenko⁽²⁾에 의해 제안된 이 감쇄기는 기존의 실린더 피스톤 구조의 유압 감쇄기를 대체하여 사용이 가능하다.

본 논문에서는 이 감쇄기를 콜로이드(colloid) 감쇄기로 표현하기로 한다. 이러한 콜로이드 감쇄기에 대한 이론적 연구는 유체 동역학, 열역학, 분자 간 물리-화학을 고려한 분자 동역학, 무기 재료학, 그리고 시스템의 진동학 등의 다학제간 접근이 요구되어 진다. 현재까지의 콜로이드 감쇄기에 대한 연구는 초보적 단계로써 감쇄기가 제안된 상태이다.⁽³⁾ 실험으로 효과를 파악하였으나 무기재료와 유체가 혼합된 콜로이드 상태가 입자의 기공을 출입할 때의 이론적인 배경이 밝혀지지 않은 상태이다. 그러나 최근 나노 기술의 관심과 발전으로 미세기술의 어려운 점이 점점 규명되고 있다. 본 연구에서는 이러한 나노 기술의 일환으로 분자 동역학을

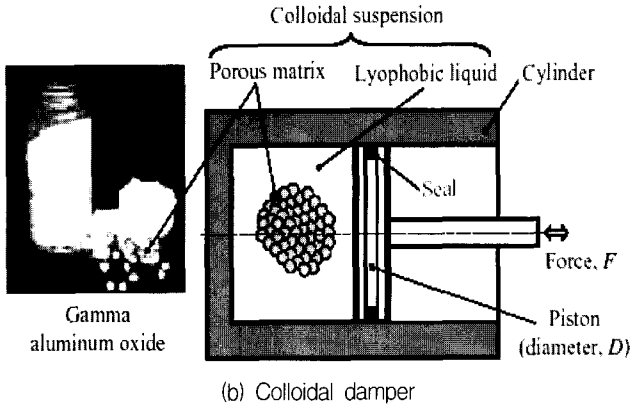
* 정회원 · 동서대학교 학술연구교수(대표저자 : moonby20@hanmail.net)

** 인제대학교, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 2. 3 / 심사종료일 : 2003. 3. 10)



(a) Hydraulic damper



(b) Colloidal damper

Fig. 1 Construction of hydraulic damper and colloidal damper

응용하여 입자에서의 유체 출입에 의한 관계를 열유체역학을 이용하여 설명하고자 한다. 또한 그 효과를 실험을 통해서 보다 구체적으로 검증하고자 한다. 나노 콜로이드 감쇄기의 원리를 규명하기 위해 다공질 입자를 간단하게 모델링하였다. 그리고 다공질 입자의 구조에 따라 모델을 달리하여 그 효과를 검토하였다. 사용 재료인 실리카 겔의 소수화 처리방법을 연구하여 그 처리 정도와 방법에 따른 효과를 검토하였다.

2. 나노 콜로이드 감쇄기의 원리

2.1 다공질 입자의 모델링

콜로이드 감쇄기는 기계공학 분야에서 나노기술을 적용한 새로운 구조물이다. 콜로이드 상태의 무기재료 입자와 유체를 혼합하여 콜로이드 상태로 만든 다음, 유압 감쇄기의 점성 유체를 대신하게 된다. 외부의 충격에 대한 완충 장치는 특수한 구조를 가진 마이크로 크기의 다공 입자로 구성된다(Fig. 2).

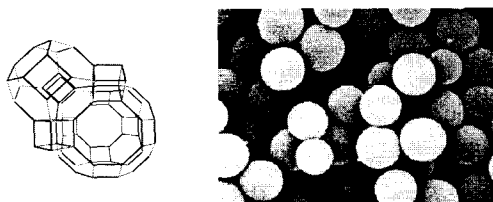
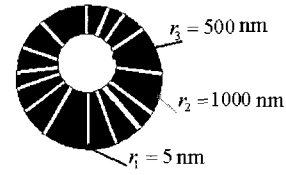
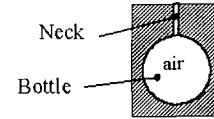


Fig. 2 Porous silica gel(5-100nm)

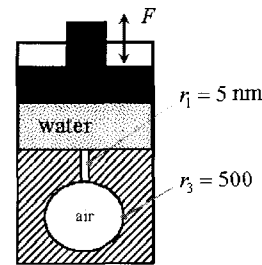
감쇄기에 사용되는 다공질의 입자는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 마이크로 단위의 크기의 중공에 나노 단위 크기의 구멍들이 연결되는 구조를 가지고 있다.



(a) Porous matrix particle



(b) Porous particle modeled by neck and bottle



(c) Model of energy dissipation

Fig. 3 Simple modeling of porous particle

이러한 구조의 다공질 입자는 유기 실리콘 물질로 처리된 실리카 겔 등으로부터 생성이 가능하다. 이러한 다공성 무기 재료가 에너지 흡수 장치에 이용되는 것을 설명하기 위해 입자를 Fig. 3(b)와 같이 병(bottle), 목(neck), 내부 공기(air)로 모델링하였다. 외부에서 압축력을 받는 유체가 목을 통해 병 내부로 공기를 압축하며 유입된다고 설명할 수 있다. 콜로이드 감쇄기의 내부에 관련된 유체로는 물이 가능하다. 콜로이드 감쇄기가 외란에 의해 압축(F)을 받으면(Fig. 3(c)), 물은 다공 입자의 나노 크기의 입자가 통과 할 수 있는 유로를 통해 입자의 중앙에 위치한 중공내로 유입되어 내부의 공기를 압축한다. 외란이 제거되어지면, 나노 유로를 통해 중공에 유입된 물은 밖으로 밀려나게 되며 이때 압축되었던 공기는 팽창하게 된다. 물이 밖으로 밀려나는 원리는 소수화 코팅처리한 다공질 입자 표면에서 표면장력이 발생하였기 때문이다. 고체의 다공성 입자와 이러한 입자에 대한 소액성의 유체가 콜로이드 완충 역할을 하게 되고 이로써 감쇄기가 될 수 있다. Fig. 3은 기존의 유압감쇄기에 대응하는 콜로이드 감쇄기가 좁은 오리피스를 통과하는 작동 유체에 의해 기계적인 에너지를 소산시키는 것을 개략적으로 보여 주고 있다. 기존의 유압감쇄기와 콜로이드 감쇄기와의 차이점은 작동유체가 이동하는 오리피스의 크기가 유압감쇄기는 밀리미터 단위, 콜로이드 감쇄기는 나노 단위(5nm 정도)인 것에 있다.

2.2 열유체 역학적 에너지 소산 특성

콜로이드 댐퍼에서 사용되는 역학적인 이론은 기존의 고전역학으로 해석이 어려운 부분이 있어 현재까지 에너지 소산에 대한 이론적인 설명이 행해지지 않았다. 콜로이드 감쇠기에 사용되는 입자의 기공(pore)을 통과하는 물분자의 흐름에 적용되는 역학은 지금까지 추측으로 에너지의 소산을 알 수 있었다. 그러나 이러한 실험 결과의 에너지 소산 과정을 역학적으로 규명할 필요가 있다. 이 역학적인 규명은 향후 감쇠기의 설계에 있어 기초적인 자료가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 분자 동력학적으로 입자의 에너지 소산 과정을 모델링하여 미시 동력학 및 유체역학을 적용하여 에너지 소산 특성을 설명하고자 한다.

콜로이드 감쇠기의 작동과정은 한 개의 병과 병목을 가지고 이상화한 과정으로 표현 될 수 있고 이 과정을 압축과정과 압축 해제 후 복원 과정으로 나누어 Fig. 4(a), (b)에 나타내었다. 유입되는 에너지는 피스톤을 통해 압력으로 전달이 되며, 물에 전달되어 유동이 시작이 된다. 물은 압축성의 거의 없으므로, 정적 변화를 시작하며, 병목의 표면장력을 이기는 에너지가 유입되면 병목으로 물이 유입되기 시작한다. 곧 병으로 유입된 물은 공기를 병 중앙으로 압축해 들어가며 공기의 압축성은 이미 표면장력을 누르기 위해 소모한 에너지 외에 잔류 에너지를 흡수하는 완충의 역할을 한다 (Fig. 4(a), 1→2→3→4). 복원 과정은 공기의 압축성에 따른 팽창력으로 대기압 수준의 압력이 될 때까지 복원 과정을 거치고 병목 부위의 공기는 물의 표면장력에 의해 밀려 나가게 된다. 이후 물은 원래의 실린더 상태로 복원된다(Fig. 4(b), 5→6→7→8).

이러한 감쇠기의 압축, 압축해제 과정에서 발생한 에너지를 열역학적으로 해석하여 그 효과를 기존의 유압 감쇠기와 비교하고자 한다. 콜로이드 감쇠기의 특징은 가열 현상이 거의 없이 기계적인 에너지의 소산이 가능하다. 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 사이클의 엔탈피는 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

여기서, T는 절대 온도, Q는 발생열량, 그리고 α 는 팽창계수(The expansion coefficient)를 나타낸다. 따라서 에너지 소산 사이클 동안 콜로이드 감쇠기에서 외부로 전달되는 열량은 다음과 같이 계산되어진다.

$$(\Delta Q)_{cycle} = -T\alpha E \quad (2)$$

만일, 여기에 $T = 293.16 K$, $E = 100 J$ 그리고, $\alpha_{water} = 10^{-4} K^{-1}$ 값을 적용하면, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

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

다시 말하면, 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산과정에서 발생하는 열량은 소산된 에너지의 대략 3%임을 알 수 있다. 이 에너지 소산과정을 실험적으로 검증하기위해 $E = 100 J$ 일때의 발생 열량 계산하여 그래프로 표현하면 Fig. 5와 같다. 콜로이드 감쇠기의 기본 개념은 가해지는 힘(force)과 실린더의 변위(stroke) 선도의 압축과 압축 해제 곡선 상에서 이력현상(hysteresis)이 발생한다는 것으로 설명 할 수 있다. 그리고 소산된 에너지는 이력곡선의 면적과 동일하므로 계산 할 수 있다. 결과적으로 액체가 다공질의 입자를 통과 하면서 흡수되는 에너지 현상을 기초로 하는 이러한 원리를 충격이나 진동에 의한 에너지의 감쇄 장치에 적용할 수 있다.

콜로이드 감쇠기에 1kW 파워의 진동기를 1시간동안 부하를 작용시켰을 때의 온도 상승량은 20℃이다. 동일한 작동 환경 하에서 기존의 유압 감쇠기에서의 온도 상승량은 이론적으로 대략 2000℃가 된다. 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 열이 대류적으로 소산된다 하더라도, 온도 상승량은 거의 무시할 만하다. 콜로이드 감쇠기의 경우 이러한 현상이 가장 중요한 장점이라 할 수 있다.

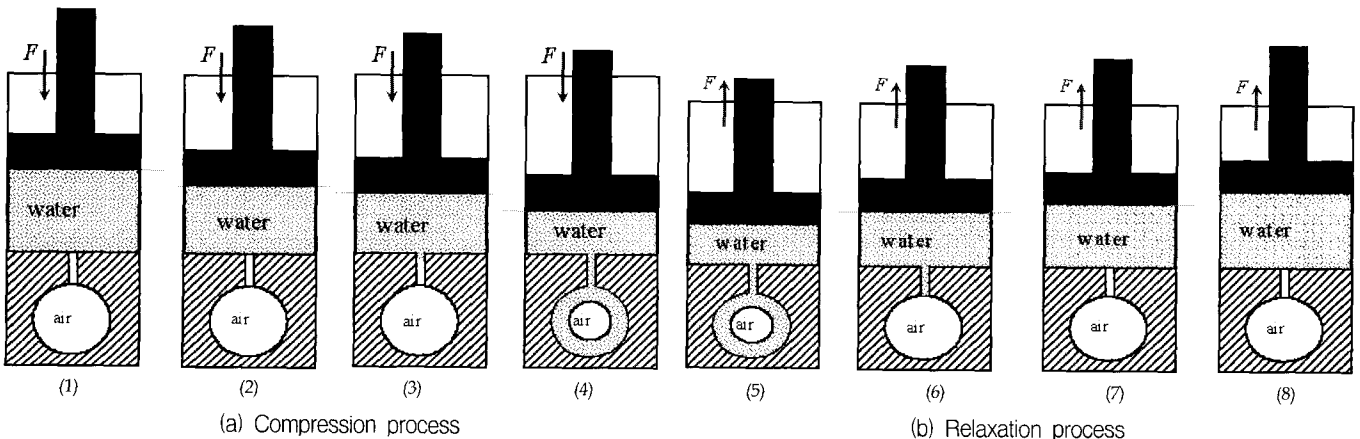


Fig. 4 Process of energy dissipate cycle model

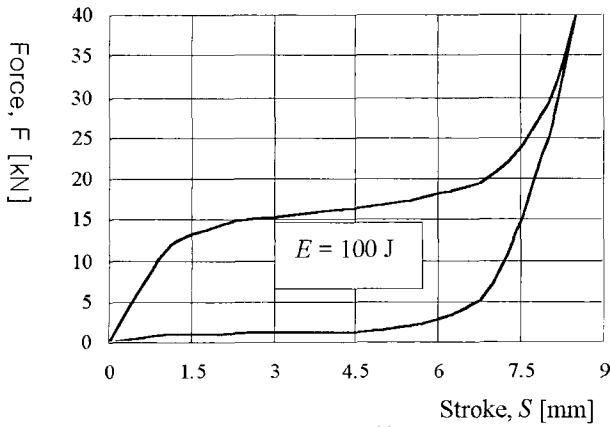


Fig. 5 Experimental working cycle

2.3 다공질 입자의 재료 및 구조

다공성 입자로 구성되는 구조는 실리카 겔, 에어로 겔, 세라믹(AL-Si, C-Si, Cr-Si), 유리, 제올라이트(zeolite), 테프론(PTFE), 파라핀, 탄소재료(graphite, charcoal, fullerenes, 탄소나노튜브), 알루미늄 옥사이드, 폴리스틸렌 등의 다양한 종류의 재료를 이용하여 생성이 가능하다. 다공성 입자와 함께 사용할 수 있는 소액성(lyophobic)의 유체로는 물, 수성의 용매, 자성 액체, 수은, 납과 같은 액상 금속, 액성 플럭스(flux), 액상 소금 등이 사용 가능하다. 다공성 입자와 소수성 유체로 실리카 겔과 물을 사용하는 것이 환경친화적이며 경제적인 측면에서 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 실리카 겔과 물을 사용하여 콜로이드 완충구조를 구성하였다. 콜로이드 감쇄기의 다공성 입자의 구조는 외부에서 가해지는 외란의 종류와 감쇄기의 사용 용도에 따라 크게 네 가지로 분류할 수 있다. 단일유로 구조(Fig. 6(a)), 미로구조(Fig. 6(b)), 이중유로 구조(Fig. 6(c)), 그리고 중공 구조(Fig. 6(d))와 같이 다공입자의 내부구조에 따라 나눌 수 있다.

2.4 다공질 입자의 소수화 코팅

본 연구에서는 소수성 특성을 띄기 위한 유기 실리콘 매

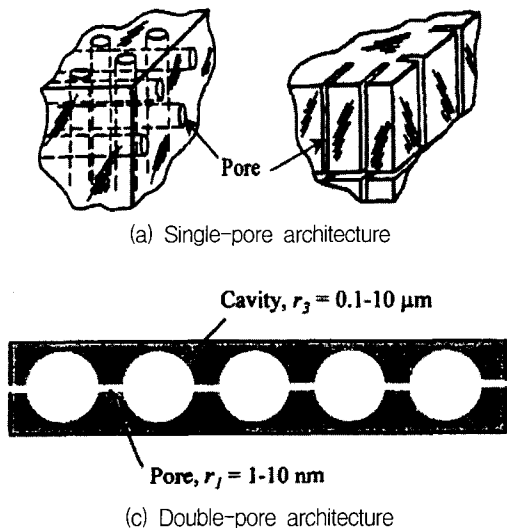
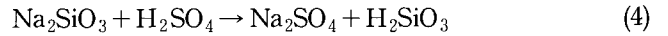


Fig. 6 Architecture of the porous matrix

질로 표면 처리가 이루어진 Fig. 7과 같은 미로 구조의 실리카 겔로 구성된 다공성 입자를 사용하여 감쇄기의 효율을 검토하였다. 실리카 겔(SiO₂)은 Fig. 2와 같이 높은 다공성과 순도를 가지는 구조의 제질로써 합성되어 제작된 재료를 사용하였다.

규산(silicic acid)은 규산나트륨(sodium silicate)과 황산(sulfuric acid)의 화학물의 반응으로써 제조가 가능하다.



이 과정을 통하여 실리카가 주로 균일한 크기의 입자로 생성된다. 규산의 화학적 분해 작용으로 생성되는 이산화 규소는 초기 입자의 형태를 구성한다.



입자의 표면에서는 규산의 상이한 화학적 분해 작용으로 물에 강한 친화력을 띄는 수산화 이온(-OH) 그룹이 형성된다. 결과적으로 이러한 화학작용으로 생성된 실리카 겔 입자들은 본질적으로 강한 친수성을 띄는 물질이다. 다공성 입자의 삼차원 구조는 화학적 결합이 형성되는 동안 초기 입자에 의해 형성된다. 이렇게 생성된 다공성 입자는 큰 내부 표면적과 높은 다공성을 보유하게 된다.⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾ 예를 들어, 티스푼 하나의 실리카 겔은 일반적인 테니스 코트의 면적보다 더 큰 표면적을 가진다. 초기 입자의 형성 조건을 조정함으로써 서로 다른 나노 유로 직경과 다공성을 가지는 다양한 구조의 실리카 겔을 생성할 수 있다.

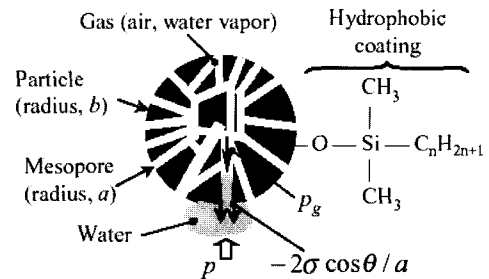


Fig. 7 Hydrophobic coating of particle

3. 콜로이드 감쇠기의 실험 해석

콜로이드 감쇠기의 이력특성을 측정하기 위하여 시험 장치를 구축하고 측정 방법에 대해서도 이력특성을 구하기 위한 새로운 방법을 시도하였다. 본 연구에서는 미로구조 입자를 선택하여 실험하였다. 소수화 처리된 실리카 겔 입자와 혼합하는 소액성의 작동 유체로는 물(증류수)이 사용되었다. 동일한 나노 유료를 가지는 실리카 겔 다공성 입자의 소수화 처리 정도가 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 특성에 미치는 영향에 대한 연구와 서로 다른 소수화 코팅 재료의 혼합에 따른 에너지 소산 정도를 조사하였다.

3.1 가역적 콜로이드 감쇠기의 실험 장치

Fig. 8은 가역적 콜로이드 감쇠기에 대한 정적 실험장치를 보여 주고 있다. 콜로이드 감쇠작용은 고압 실린더내의 실험 챔버에서 발생한다. 직경, $D=20\text{mm}$ 인 고압 실린더와 고압 용 압력 게이지, 그리고 스레드 플러그(thread plug)가 챔버를 구성하며 장착되어 있다. 실험 챔버에 120MPa 정도의 고압을 발생시킬 수 있도록 실험 챔버는 구리 가스킷과 O형 고리(ring), V형 패킹으로 밀폐되어 있다. 직경, $D_{ha}=80\text{mm}$ 인 저압 실린더는 직경비, $(D_{ha}/D)^2=16$ 을 유지하고, 펌프 압력 P_p 의 유압증폭기 역할을 한다. 낮은 피스톤 속도 또는 주파수의 정적 실험은 수동 펌프를 이용하여 수행하였다. 피스톤의 최대 속도는 다음의 식으로 구하였다.

$$v_{\max} = 4 \frac{Q_{\max}}{(\pi D_{ha}^2)} \quad (6)$$

수동 펌프에서의 유체가 최대 유량 $Q_{\max}=5\text{ml/s}$ 의 비율로 전달되었을 때, 피스톤의 최대속도, $v_{\max}=1\text{mm/s}$ 가 된다.

감쇠기 피스톤이 5~200mm/s⁽⁴⁾ 정도의 임계 속도 영역에 다다를 때까지는 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 사이클은 등온상태(isothermal)를 유지한다. 그리고 피스톤의 임계속도는 다공질 입자의 특징에 따라 바뀐다. 피스톤이 임계 속도 영역을 넘어선 상태에서는 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 사이클이 준 단열 상태(quasi-adiabatic)가 된다. 본 연구의 실험에서는 주목할 만한 큰 발열 현상이 발생하지 않았다. 각각의 콜로이드 감쇠기에 대한 정적 실험에서 실린더의 변위(S), 감쇠기 챔버 내의 압력(p), 그리고 챔버 내의 온도(T)를 측정하였다. 이러한 실험 데이터는 측정시간, t에 따라 고속 푸리에 변환장치(FFT analyzer - fast Fourier transform analyzer)에 기록된다.

Fig. 9는 측정된 자료를 고속 푸리에 변환장치에 의해 기록하는 실험 장치의 구조도를 보여준다. 측정된 압력과 실린더 변위 사이의 시간은 무시하였기 때문에 가역적 콜로이드 감쇠기의 정적 이력곡선에서 압력은 다음과 같이 변위의 함수로 나타내어진다.

$$p = p(S) \quad (7)$$

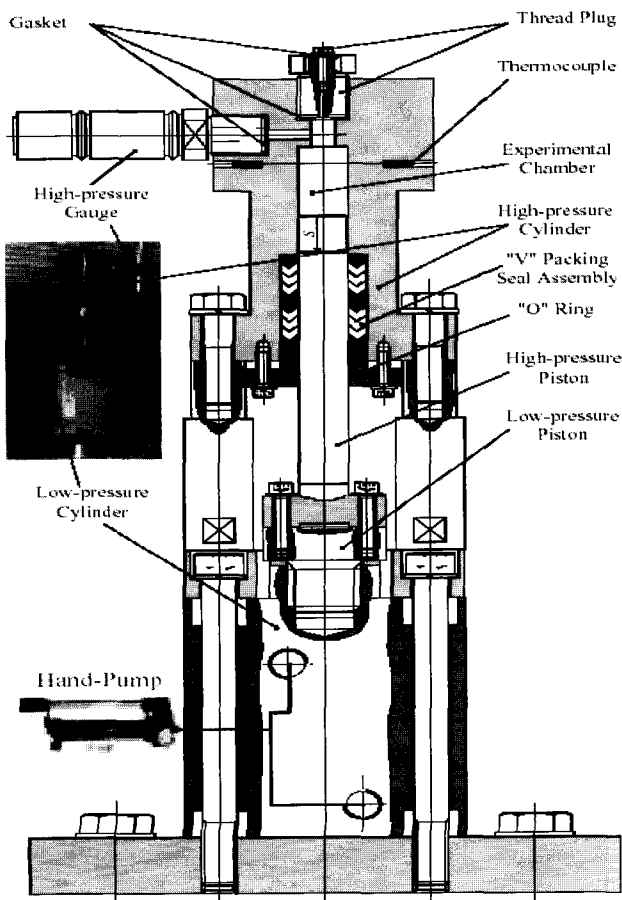


Fig. 8 Colloid damper static test rig

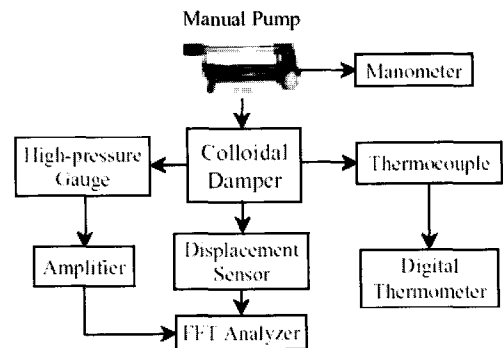


Fig. 9 Measurement equipment

3.2 실험 해석 결과

다공질 무기재료 분말 실리카 겔과 작동유체 물을 사용하여 콜로이드 감쇠기를 구성하고 실험을 수행하였다. 감쇠의 기본 개념은 가해지는 힘(Force)과 실린더의 변위(stroke) 선도의 압축과 압축 해제 곡선 상에서 이력현상(hysteresis)이 발생하는 것⁽⁸⁾이므로 이를 구하여 결과를 검토하였다.

3.3 소수화 코팅의 양에 따른 감쇄 효과

다공성 입자의 소수화 코팅은 원래의 분말에 결합되는 분자체인의 구조에 따라 긴 선형 n-알킬실레인(n-alkylchlorosilanes)의 분자체인($n=18$, $-\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{C}_{18}\text{H}_{37}$, 약자포사; C18) 또는 짧은 친수성의 수소화 이온 그룹($n=1$, $-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, 약

자표시; C1)으로 처리할 수 있다. 따라서 두 가지 종류의 코팅처리를 한 실리카 겔을 얻을 수 있다. 이렇게 함으로써, 콜로이드 감쇠기는 친수성의 수소화 이온의 그룹으로 구성된 표면을 알킬실레인을 이용한 결합형태로 전환된 실리카 겔을 소수성을 띠는 표면의 다공성 입자로 이루어지 구조로 만들 수 있다. 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 능력은 소수화 처리가 완료된 표면적의 비율과 소수화 코팅을 위해 사용되는 화학 시료의 분자 간 선형 결합 길이에 의해 아주 큰 영향을 받는다. 참고문헌 [4]에 의하면, 이들 두 가지 종류의 실리카 겔을 사용하여 그 혼합하는 배합 율에 따라 각 코팅 처리에 대한 효과를 구하여 확인하였다. 그 효과를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Influence of the hydrophobic coating on the hysteresis

Surface hydrophobicity	PCS[%]	Chain type	Energy hysteresis
Fully	> 85	Long	Reversible, Large
Fully	> 85	Short	Reversible, Small
Partial	> 40 ; < 80	Long/Short	Irreversible, Large
Low	< 20	Long/Short	Irreversible, Small

(PCS : percentage of the coated surface)

다공질 입자표면적이 85%이상 long chain type으로 코팅되었을 때 에너지는 크게 소산되어 가역적인 사이클을 보여 주어 진동 감쇄장치로써 적합함을 알 수 있다. 또한, 다공질 입자표면적이 40%이상 85%미만의 부분 코팅으로 Long chain type과 short chain type으로 혼합되어 코팅되었을 때 에너지는 크게 소산되어 비가역적인 사이클을 보여 주어 충격 흡수장치로써 적합함을 알 수 있다. 이와 같이 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 능력은 소수화 처리가 완료된 표면적의 비율과 소수화 코팅을 위해 사용되는 화학 시료의 분자 간 선형 결합 길이에 의해 아주 큰 영향을 받는다. 이 효과는 다음의 그래프에서 확인할 수 있다. 다공질 입자표면적이 85%이상 전체 소수화 코팅하였을 때 코팅 chain type에 따른 에너지 소산 사이클을 압력이 가해진 순서(1st, 2nd, ... nth cycle)에 따라 Fig. 10(a), (b)에 나타내었다. 선형 결합 chain의 길이에 따라 에너지 소산능력이 차이가 있음을 알 수 있다(long chain결합이 큰 에너지를 소산). 다공질 입자표면적을 부분적으로(40<PCS<80%, PCS<20%) 소수화 코팅하였을 때 코팅 chain type에 따른 에너지 소산 사이클을 압력이 가해진 순서(1st, 2nd, ... nth cycle)에 따라 Fig. 10(c), (d)에 나타내었다. 20%이하의 코팅으로 짧은 선형 결합 chain일 때 에너지 소산능력이 가장 적음을 알 수 있다.

본 연구에서는 이러한 연구 결과를 토대로 콜로이드 감쇠기에 미로구조의 소수화 정도가 서로 상이한 다공성 실리카 겔 입자를 사용하여 감쇠기를 구성하였다. 실험에 사용된 다공성 입자를 이루는 무기재료의 주요 특성 값들을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

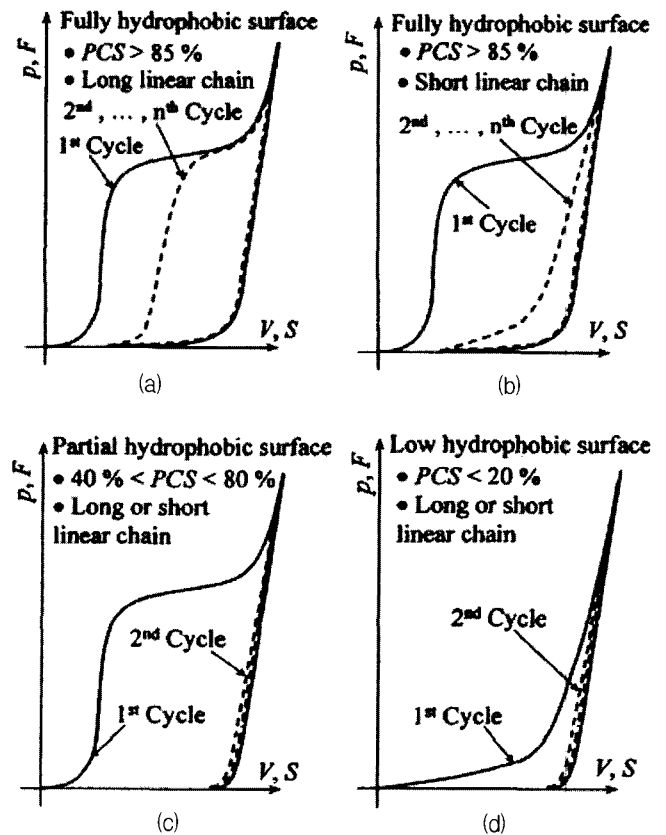


Fig. 10 Influence of the hydrophobic coating of the hysteresis

Table 2 Silica gel characteristics

Silica gel	PCS [%]	(r ₁) _{mean} [nm]	(r ₂) _{mean} [nm]	Density [g/cm ³]
A	0	-	-	0.187
B	20	9.1	1316	0.120
C	41	10.6	2103	0.294
D	94	12.8	1729	0.283

소수화 처리를 위한 표면 코팅에는 짧은 분자 간 결합 거리를 가지는 알킬실레인(-Si(CH₃)₃)을 사용하였다. Table 1에 있는 실리카겔 A, B, C, D를 사용하여 실험에 의한, 콜로이드 감쇠기의 에너지 소산 이력곡선을 구하여 에너지 소산 정도를 검토하였다. 소수화(hydrophobicity) 처리 정도의 영향을 각 소수화 처리 정도에 따라 Fig. 11(a), (b), (c), (d)에서 보여 주고 있다. 소수화 처리가 되지 않은 친수성의 실리카 겔 A는 에너지 소산현상이 전혀 발생하지 않는다. 친수성을 강하게 띠고 있기 때문에 대기압 상태 하에서 작동유체인 물이 다공성 입자의 유로 내로 유입되어 그 안에서 내재되어 있게 된다. 결과적으로 콜로이드 감쇠기를 구성하기 위해서는 다공성 입자에 대한 소수화 처리가 반드시 요구되어 진다는 것을 알 수 있다(Fig. 11(a)).

20% 정도의 소수화 처리를 한 실리카 겔 B의 경우는 사이클이 비가역적이며, 작은 에너지를 소산하고 있음을 알 수 있다(Fig. 11(b)). 41% 정도의 소수화 처리를 한 실리카 겔 C의 경우는 사이클이 비가역적이며 보다 큰 에너지를 소산하고

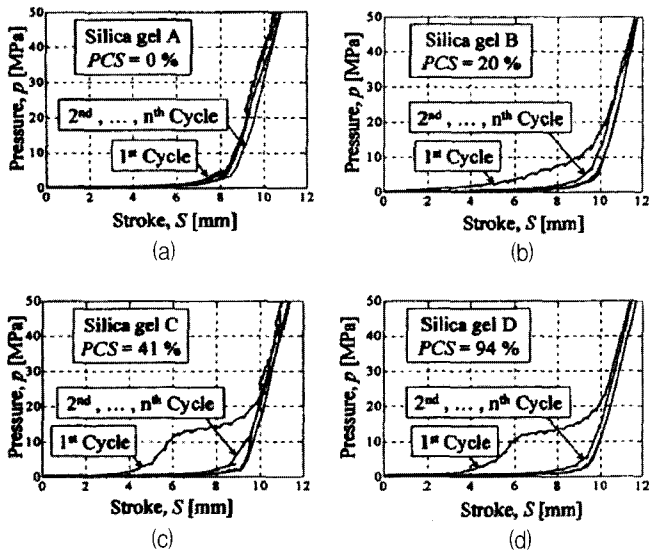


Fig.11 Influence of the hydrophobicity level on the hysteresis

있다(Fig. 11(c)). 94% 정도의 소수화 처리를 한 실리카 겔 D의 경우는 사이클이 가역적으로 에너지를 소산하고 있다(Fig. 11(d)). 이 결과는 Table 1와 Fig. 10에서 검토한 내용과 일치하며, 따라서 실험 결과는 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

3.4 무기재료의 혼합량에 따른 감쇄 효과

Fig. 12는 실리카 겔 B(코팅 20%, $(r_1)_{mean}=9.1nm$, $(r_2)_{mean}=1316nm$, 밀도=0.12[g/cm³])와 실리카겔 C(코팅 41%, $(r_1)_{mean}=10.6nm$, $(r_2)_{mean}=2103nm$, 밀도=0.294[g/cm³])를 사용하였을 때의 에너지 소산 사이클을 보여준다. 그리고 실리카 겔 B, C의 각각 50%씩 혼합비가 1:1로 혼합하여 사용하였을 경우의 콜로이드 감쇄기의 이력곡선을 나타내고 있다. 실리카 겔 코팅량이 많은 C가 B보다 큰 면적의 에너지 이력 곡선을 보여주고 있다. 실리카 겔 B, C를 혼합한 경우의 이력 곡선은 실리카 겔 B, C 각각의 이력곡선 선형 조합과 같이 그 사이에서 발생함을 알 수 있다. 이러한 실험의 결과는 각각 다른 정도의 소수화 코팅 정도와 서로 다른 다공구조의 입자들의 혼합으로 콜로이드 감쇄기의 이력 정도를 제어할

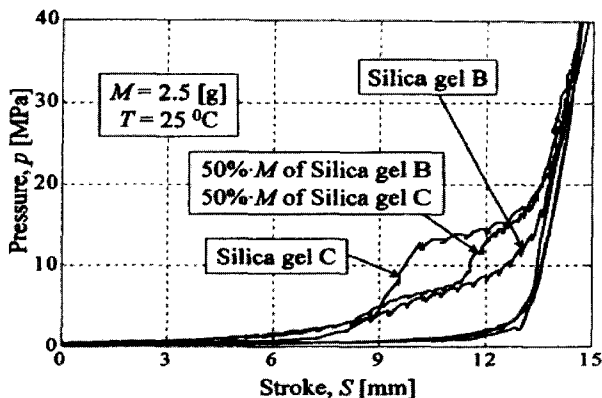


Fig. 12 Hysteresis for silica gels B, C and their 1:1 mixture

수 있다는 사실을 보여 준다.

또한 콜로이드 감쇄기의 가역성은 사용된 나노 입자의 구조가 이중 유로 또는 중공형 구조를 가질 때에 나타날 수 있다. 이러한 입자 구조들은 입자내 큰 체적을 가질 수 있고 압축 해제 공정시 유입된 작동 유체를 쉽게 배출할 수 있다. 그러나, 작동 압력이 낮은 환경(16.5MPa) 하에서는 미로 구조의 다공성 입자를 이용하여도 콜로이드 감쇄기의 가역적 작동을 가능하게 한다. 높은 작동 압력(25MPa 이상) 영역에서는 이력 사이클이 비가역성을 띄게 됨을 Fig. 11과 Fig. 12에서 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 외부의 충격에 대한 새로운 감쇄기를 나노 기술을 이용하여 설계하는 기초적 연구를 하였다. 콜로이드 완충역할을 하는 입자로는 미로 구조를 가지는 실리카 겔을 사용하였고, 입자에 관련한 작동 유체로는 물을 사용하여 실험적으로 그 효과를 검증하였다. 콜로이드 감쇄기를 구현하기 위해서는 형성된 실리카 겔 입자의 표면을 유기 실리콘 매질을 이용한 소수화 코팅 처리를 하였다. 콜로이드 감쇄기의 이력곡선은 서로 다른 소수화 코팅 처리가 된 입자의 혼합과 소수화 처리시의 분자간 거리에 의해서 조절이 가능함을 알 수 있었다. 콜로이드 감쇄기의 에너지 소산량은 상이한 소수화 처리 정도와 서로 코팅처리량이 서로 다른 재료를 혼합함으로써 제어 할 수 있음을 확인하였다. 기존의 유압감쇄기에서는 나타나지 않는 이러한 특징은 콜로이드 감쇄기가 진동, 충격 흡수 장치로 사용 가능하다는 사실을 입증한다. 이 새로운 감쇄기를 다양한 종류의 기계 시스템에 채용되어 사용된다면 산업시설에 경제적인 뿐만 아니라 유용한 시스템이 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국 학술 진흥 재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-050-D00001).

참고 문헌

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 Journal*, 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 Journal of Physical Chemistry*, No. 70, 1996, pp. 1380-1383.
4. Fadeev, A. Y. and Eroshenko, A. V., "Study of pene-

- tration of water into hydrophobized porous silica," *Journal of Colloid and Interface Science*, No. 187, 1997, pp. 275-282.
5. Snyder, L. R. and Kirkland, J. J., *Introduction to Modern Liquid Chromatography*, John Wiley & Sons, New York, 1979.
 6. Staroverov, S. M. and Fadeev, A. Y., "Apparent simplicity of reversed stationary phases for high-performance liquid chromatograph," *Journal of Chromatography*, No. 544, 1991, pp. 77-98.
 7. Unger, K. K., *Porous Silica - Its Properties and Use as Support in Column Liquid Chromatography*, Elsevier, Amsterdam, 1988.
 8. Harris, C. M. and Crede, C. E., *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1968.