

분체슬로싱 현상에 의한 원통형 용기에서의 에너지 소실

이수혁*, 허성모*, 조혜민*, 손현성**, 정성민***, 박준영#

Energy dissipation by particle sloshing in a rolling cylindrical vessel

Soo-Hyuk Lee*, Sung-Mo Heo*, Hye-Min Cho*, Hyunsung Son**, Seong-Min Jeong***,
Junyoung Park[#]

(Received 4 June 2010; received in revised form 28 June 2010; accepted 28 June 2010)

ABSTRACT

In the engineering field, sloshing in rolling vessel is a hot issue because of the connection with ship stability problem. The sloshing phenomena also can be utilized in the field of structure or facility vibration damper. This paper explores the possibility which sloshing of multi-particles can be used to dissipate energy in a rolling container. This energy dissipation can be utilized to the application of rotating damper. Some of the parameters expected to dissipates energy, such as vessel size, particle size, mass fraction and ramp height, have been experimentally and theoretically studied.

Key Words : Particle Sloshing (분체 슬로싱), Particle Rotating Damper(분체 회전 감쇠기), Rolling Container (회전형 용기)

1. 서 론

회전하는 용기 안에서의 슬로싱(Sloshing)현상에 의한 에너지 소실 현상은 많은 공학 분야에서 중요한 문제 중의 하나이다. 슬로싱 현상은 움직이는 (회전 또는 병진 운동) 용기에 가득 채워지지 않은

액체가 들어있을 때 액체의 지속적인 출렁거림으로 인하여 용기의 벽면에 운동에너지를 가하는 현상을 의미한다.

파도에 의한 선박의 저주파 혼들림, 바람이나 지진과 같은 자연재해에 의해 발생하는 빌딩이나 다리 등의 건축 구조물의 진동, 로켓과 터빈 블레이드등 진동을 감쇠하기 위해 이러한 슬로싱 현상이 이용되어지고 있다. 슬로싱 현상을 이용한 진동 감쇠기 (vibration damper)의 한 종류인 TLCD(Tuned Liquid Column Damper)의 설계에서도 구조물 진동 에너지를 빠르게 소실되어지도록 만드는 것을 주 목표로 하고 있다^[1,2]. 또한 이러한 액체형 진동 감

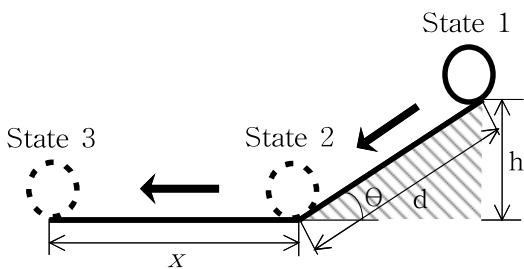
* 금오공과대학교 기계공학부

** POSCO 기술 연구소

*** 한국세라믹연구원

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : pcello@kumoh.ac.kr

**Fig. 1 Schematics of experimental setup**

쇠기는, 고온에서는 유체 점도의 상실에 의해 원래의 효과를 가질 수가 없어서, 고온 환경에서는 사용이 불가능하다. 이것을 극복하기 위하여, 고온에서도 물성변화가 없는 고체 알갱이, 즉, 분체를 이용한 진동감쇠기(Particle Damper)가 로켓엔진, 터빈블레이드의 진동을 방지하기 위해 많이 사용되어지고 있다^[3]. 한편, 회전하는 원통에서의 슬로싱 현상은 회전운동의 감쇠에 응용되어질 수 있다. 이러한 회전 감쇠에서도 유체보다 강한 상호마찰을 가진 분체에 의해 더 빠른 에너지 소실효과가 가능하다. 현재까지 분체 슬로싱에 의한 회전운동 감쇠에 관한 연구는 거의 존재하지 않고 있다^[4].

이러한 에너지 소실의 주원인은 분체 상호간의 충돌, 분체-용기의 충돌, 마찰에 의한 전단 댐핑 등이 있다. 이러한 요인들의 적절한 조화가 댐핑의 효과를 높일 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로는 납이나 텅스텐과 같은 밀도가 큰 입자들이 댐핑효과가 크다는 것이 알려져 있으나, 용기 및 분체의 크기, 용기의 회전속도 등의 영향은 아직 밝혀지지 않았다^[5]. 이에 본 논문에서는 이러한 물성치 변화에 따른 에너지 소실 정도를 해석하고자 한다. 특히 슬로싱에 의해서 발생하는 에너지 소실효과를 이용하여, 자동차 타이어처럼 병진운동을 하는 회전체의 제동이나, 공작기계등의 회전체의 제동등에 응용이 가능할 것으로 여겨진다. 향후, 분체의 유동을 효과적으로 나타내어 주는 수치해석 방법인 DEM(Discrete Element Method)을 이용한 본 논문과의 비교 분석을 통하여, 에너지 소실 메카니즘에 대한 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단된다^[6].

Table 1 Configuration of experiment

Height $h[m]$	Angle $\theta[^\circ]$	Vessel $D[m]$	Particle	Particle $\phi[m]$
0.070	10.08	0.10	Rice	1.87~5.35
0.105	15.22	0.15	Acrylic	13~14
0.140	20.49	0.20		

2. 실험장치 및 조건

실험은 회전하는 용기의 병진운동을 제어하여 에너지 소실 정도를 측정하도록 시행되었다. 효과적인 에너지 소실을 위한 여러 가지 인자의 영향을 알아보기 위하여, 용기의 크기, 분체의 크기, 용기 안에 들어있는 분체의 양, 경사면의 높이에 대해서 실험을 행하였다. 이러한 영향인자의 선정은 경험적으로 이루어졌다.

실험은 바닥으로부터 정해진 높이에서 원통 아크릴 용기를 경사면 위쪽에서 아래로 회전하면서 병진 운동을 하도록 실험 장비를 구성하였다. Fig.1에 보인 것처럼, h 는 경사면의 높이(빗면의 길이), d 는 일정하기 때문에, θ 는 h 에만 의존한다), x 는 용기가 경사면을 내려와서 병진 운동하여 멈추는 정지 거리를 나타낸다.

회전하는 용기의 재질은 분체의 슬로싱 현상을 관찰하기 위해 투명 아크릴로 제작하였고, 경사면과 회전하는 용기가 경사면을 내려와서 병진운동을 하는 이동 경로부분은 아크릴을 사용하였다. 분체는 아크릴 구슬과 쌀을 사용하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1에 정리하였다. 부피 분율은 팩킹 밀도 (Packing density)에 따라 입자의 양이 달라지므로, 본 실험에서는 현재 분체의 질량과 용기에 최대로 들어갈 수 있는 분체 질량의 비로 나타나는 질량 분율을 사용하였다.

첫 번째 실험은 경사면 높이 차이에 따른 에너지 소실 정도를 알아보기 위하여 Table 1에서와 같이 경사면의 높이를 바꾸어가면서 용기의 정지거리를 측정하였다. 경사면의 각도는 경사면의 길이가 일정하기 때문에 경사면의 높이에 따라서 결정되는 값이다. 두 번째 실험은 용기의 크기에 따른

영향을 알아보기 위하여 용기의 크기를 변화시켜 가면서 정지거리를 측정하였다. 마지막으로, 임자의 종류 및 크기에 의한 영향을 보기 위하여 쌀과 아크릴 구슬을 사용하여 측정하였다.

3. 이론적 해석

분체의 슬로싱 현상을 고려한 회전체에 대한 이론적 해석에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 논문에서 실험결과와의 비교를 위하여 분체의 상대 운동을 고려한 정지거리에 관한 이론식을 아래와 같이 제안한다.

Fig. 1에 보인 것과 같은 경사면을 따라 용기가 미끄러짐이 없이 흘러가는 완전 구름 상태를 가정하고, 이 때의 에너지 소실을 고려하였다. 여기서, 정지거리를 x , 경사면의 각도를 θ , 경사면의 길이를 d , 경사면의 높이를 h 로 한다. 각 상태의 에너지는 다음과 같다.

$$\text{State 1: } E_1 = mgh \quad (1)$$

$$\text{State 2: } E_2 = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (2)$$

$$\text{State 3: } E_3 = 0 \quad (3)$$

여기서, E 는 에너지, m 은 분체와 용기를 포함한 전체 질량, I 는 관성 모멘트, ω 는 각속도, V 는 속도를 나타낸다. 또한 각 과정 중에 행해진 일은 다음과 같다. 우선 1-2구간에서의 마찰력에 의해서 행해진 일은 용기에 의한 일, W_{1-2v} 와 분체에 의한 일, W_{1-2p} 로 구분 되어진다.

$$\text{Work by vessel at 1-2:} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} W_{1-2v} &= \mu_v N d \\ &= \mu_v \cdot mg \cos\theta \cdot \frac{h}{\sin\theta} \\ &= \mu_v \cdot mgh \cot\theta \end{aligned}$$

$$\text{Work by particle at 1-2:} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} W_{1-2p} &= \mu_p N d \\ &= \mu_p \cdot M_F m_p g \cos\theta \cdot \frac{r}{R} d \cdot C_r \\ &= \mu_p \cdot M_F m_p g h \frac{r}{R} \cot\theta \cdot C_r \end{aligned}$$

여기서, μ_v 와 μ_p 는 각각 용기/바닥면, 용기/분체 및 분체/분체의 마찰 계수(용기와 분체는 같은 재

질)를 나타낸다. 또한, M_F 는 분체의 질량분율, m_p 는 M_F 가 1일 때의 분체의 질량, g 는 중력가속도, d_p 는 분체의 상대운동거리, C_r 은 수정계수를 나타낸다.

분체의 상대운동 거리는 분체의 채워진 정도에 따라서 비례적으로 감소한다. 즉, 분체가 가득 채워진 100%(M_F 가 1에 해당)에 가까울수록 d_p 는 0에 가까워지고, 분체의 채워진 정도가 0%에 가까워질수록, d_p 는 용기의 외경이 거리 d 만큼 움직일 때 내경 위의 한 점의 운동거리, 즉, $r/R*d$ (용기내의 1개의 분체의 상대운동거리)에 가까워진다. r 과 R 은 용기의 각각 내외경을 나타낸다. 이러한 함수관계는 실험 또는 다른 이론에 의해서 수정계수에 함수형태로 부여되어야 하며 본 실험에서는 가장 간단한 함수 형태인

$$C_r = 1 - M_F \quad (6)$$

의 형태로 가정한다. 그러므로, 1-2과정 중의 총 일은,

$$\text{Work at 1-2:} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} W_{1-2} &= W_{1-2v} + W_{1-2p} \\ &= \mu_v mgh \cot\theta + \mu_p M_F m_p g h \frac{r}{R} \cot\theta C_r \\ &= mgh \cot\theta \left(\mu_v + \mu_p M_F \frac{m_p}{m} \frac{r}{R} C_r \right) \\ &= mgh \cot\theta \cdot A \end{aligned}$$

여기서,

$$A = \mu_v + \mu_p M_F \frac{m_p}{m} \frac{r}{R} C_r \quad (8)$$

이다. 마찬가지로, 2-3구간 중에 마찰력에 의해서 행해진 일은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Work at 2-3:} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_{2-3} &= W_{2-3v} + W_{2-3p} \\ &= \mu_v mgx + \mu_p M_F m_p g \frac{r}{R} x \cdot C_r \\ &= mgx \left(\mu_v + \mu_p M_F \frac{m_p}{m} \frac{r}{R} C_r \right) \\ &= mgxA \end{aligned}$$

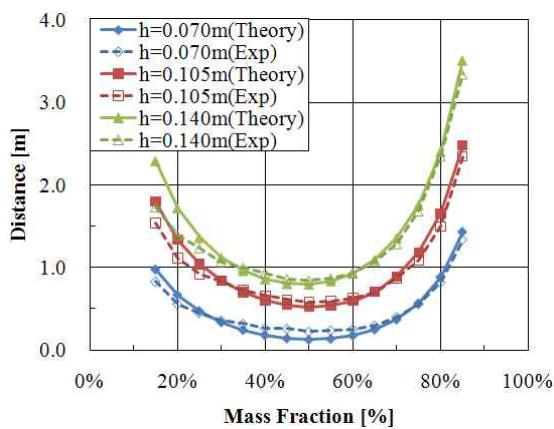
1-2구간에서의 에너지 보존식, $E_1 = E_2 + W_{1-2}$ 에 의해 상태 2에서의 속도는

$$V_2 = \left(\frac{4}{3}gh(1 - A \cot\theta) \right)^{1/2} \quad (10)$$

와 같이 주어진다. 또한 2-3구간에서의 $E_2 = E_3 + W_{2-3}$ 로부터

Table 2 Measured values from experiment

Variables	Value	Unit
μ_v	0.001183	
μ_p	0.350	
r	0.065	m
R	0.075	m
m_p	2.237	kg
m_v	1.467	kg

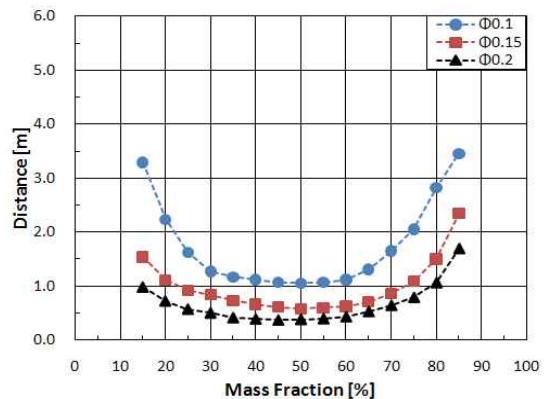
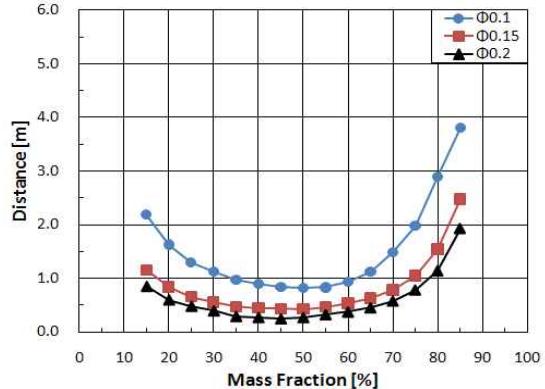
**Fig. 2 Experimental rolling distance shows a good agreement with theoretical value.**

$$x = \frac{3}{4} \cdot \frac{V_2^2}{Ag} \quad (11)$$

으로 주어진다. 그러므로,

$$x = \frac{1 - A \cot \theta}{A} \cdot h \quad (12)$$

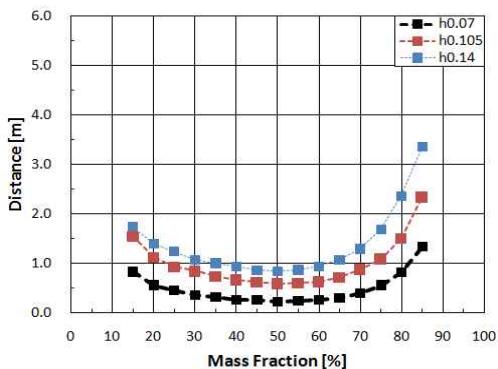
이다. 여기서, θ 는 h 의 함수이고, A 는 식 (8)에 나타낸 것과 같이 용기와 분체에 의한 유효 마찰계수값으로 질량분율 M_F 의 함수로 표현되므로, 결국, 정지거리 x 는 높이 h 와 질량분율 M_F 의 함수로만 나타나게 된다. 특수한 경우인, 분체의 상대운동이 없을 경우($M_F=0$, 빙 용기)를 대상으로 하여 μ_v 값을 측정하였고, μ_p 값은 가득 찬 용기($M_F=1$)를 대상으로 하여 측정하였다. 계산에 사용되어진 변수의 값들은 Table 2에 나타내었다.

**(a) Acrylic bead****(b) Rice****Fig. 3 Variation of x with mass fraction and vessel diameter. All experiments are performed at 0.105m height.**

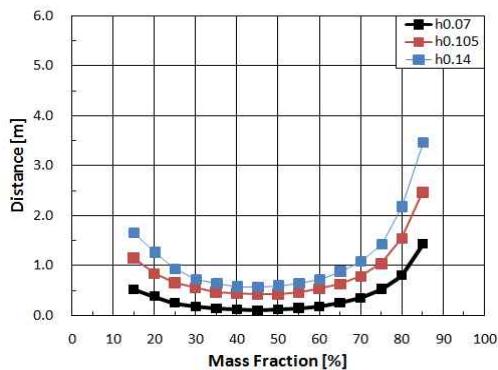
4. 결과 및 고찰

Fig. 2은 14mm 아크릴 구슬과 $\Phi 0.15\text{m}$ 의 용기를 사용한 실험결과와 이론식의 결과를 나타내고 있다. 이론식과 실험결과는 대체적으로 잘 일치하고 있다. 하지만, 질량분율이 작은 영역에서는 실험치와 이론치가 차이를 보이고 있다. 이는, 빗면을 따라 내려올 때, 용기와 빗면이 완전 구름상태가 아닌 미끌림이 약간씩 일어나는 현상에 의한 것으로 판단된다.

위에서 언급된 바와 같이 정지거리는 질량, 빗면높



(a) Acrylic bead

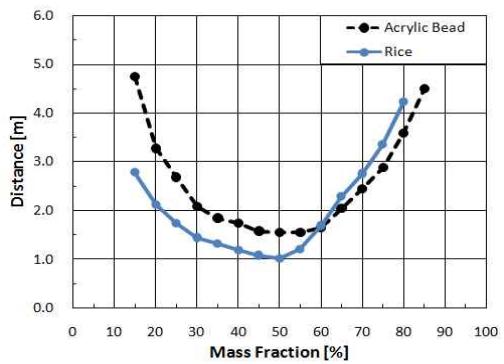


(b) Rice

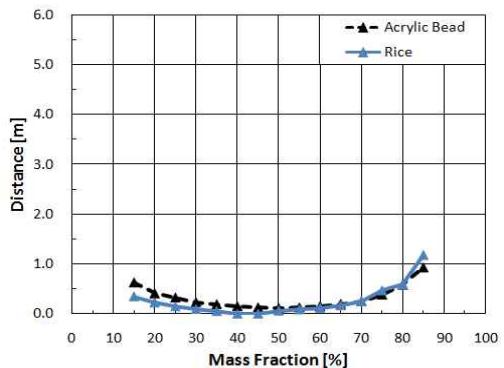
Fig. 4 Variation of x with mass fraction and ramp height. All experiments are performed with 0.15m vessel

이, 분체의 상대운동거리만의 함수이다. 실험에서는 질량과 빗면 높이는 직접적으로 변화시켰고, 분체의 상대운동거리는 상대운동 거리를 변화 시킬 수 있는 변수들이 채택되었다. 즉, 본 논문에서는 분체의 크기와 용기의 크기를 변화시켜서 실험하였다.

Fig. 3(a)와 (b)는 각각 아크릴 구슬과 쌀의 질량 분율과 용기 지름에 따른 정지거리의 영향을 보여주고 있다. 질량분율은 15%~85%, 용기 지름은 10cm~20cm까지 변화시켜 가면서 측정하였다. 분체의 상대운동을 고려한 식 (12)와 같이, 실험 결과는 질량분율에 따라서 정지거리가 U자형 커브를 보여주고 있다. 질량분율이 50%부근에서 최저치를



(a) the case of ramp height 0.14m and vessel diameter 0.10m.



(b) the case of ramp height 0.20m and vessel diameter 0.07m.

Fig. 5 Variation of x with mass fraction and particle size

보여주고 이는 용기에 절반정도 분체가 채워졌을 때 가장 빨리 에너지를 소실하는 것을 보여준다는 것을 보여주고 있다. 또한 대체로 질량분율이 높은 쪽 보다는 낮은 쪽이 정지거리가 짧은 것을 보여주고 있다. 재료의 급격한 변화(쌀과 아크릴 구슬)에도 불구하고, Fig. 3(a)와 (b)의 정지거리에는 거의 큰 차이가 없다. 용기의 크기에 의한 영향은 용기의 크기가 작을수록 정지거리가 길어졌는데, 이것은 용기 자체의 영향보다는 용기 안에 담긴 분체의 개수가 작은 용기에서는 줄어듬에 따라서 분체의 상호운동이 줄어들어서, 정지거리가 늘어난 것으로 판단된다.

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 아크릴 구슬과 쌀의 질량

분율과 경사면 높이에 따른 정지거리의 영향을 보여주고 있다. 질량분율은 15%~85%, 경사면 높이는 7cm~14cm까지 변화시켜 가면서 측정하였다. 예상되는 바와 같이 경사면의 높이가 낮을수록 정지거리는 짧아 졌으며, 용기 지름의 영향과 마찬가지로 U자형 커브를 보여준다. 또한 정지거리가 좌우 비대칭형 형태를 보여주는 것은 적은 질량분율 영역에서 완전 구름 상태가 아닌 미끌림이 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 아크릴 구슬과 쌀의 질량분율과 분체 크기에 따른 정지거리의 영향을 보여주고 있다. 분체 크기의 영향이 가장 큰 차이를 보이는 경우에 해당하는 (a)의 경우와 최소에 해당하는 (b)의 경우만을 표시하였다. 즉, 분체 크기에 의한 영향은 질량분율뿐만 아니라, 용기의 크기와 경사로의 높이에 의해서도 달라진다. Fig. 5(a)에서 보인바와 같이 분체 크기에 의한 영향이 가장 큰 차이를 보이는 경우, 50%이하에서는 큰 차이를 보이지만 50% 이상에서는 차이가 많이 줄어드는 현상을 보여주고 있다. 이는 분체 크기의 영향이 가장 작게 나타나는 Fig. 5(b)에서도 마찬가지 현상을 보여주고 있다. 이렇듯 분체크기에 따른 영향은 한두 개의 영향인자에 의해서 결정되지 않음에 따라 향후 좀 더 논의 되어질 필요가 있으며, 용기와 밑면과의 미끌림 현상뿐만 아니라 분체와 용기의 미끌림 현상에 의해 낮은 질량분율에서 분체 크기에 의한 차이가 생기는 것으로 생각된다.

5. 결 론

앞에서 서술한 바와 같이 본 실험은 슬로싱에 의해서 발생하는 에너지 소실 효과를 측정하기 위하여 행하여 졌다. 본 논문을 통하여 도출된 결론은 아래와 같다.

1. 이론적인 접근에서는 정지거리는 경사면의 높이와 질량분율만의 함수로 나타난다.
2. 실험적인 접근에서는 정지거리는 경사면의 높이를 포함한 용기, 분체의 크기, 질량분율의 함수로 나타난다.
3. 용기의 크기는 정지거리와 반비례적인 관계를 가진다.

4. 경사면의 높이는 정지거리와 비례적인 관계를 가진다.
 5. 분체의 크기의 영향은 질량분율이 낮을수록 커진다.
 6. 질량분율과 정지거리의 관계는 U자형 커브 형태를 가지며, 약 45%~50%의 질량분율에서 최소 값을 가진다.
- 단, 본 논문은 분체간의 정전기력을 무시하였으므로, 분체의 크기가 최소 1mm이상의 경우와, 빗면과 용기와의 미끌림이 발생하지 않는 완전구름 조건하에서만 적용되어질 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

참고문헌

1. Kim, D. H., and Choi, J.W. and Park, M. K., "Analysis of Liquid-Sloshing Effect for a Launch Vehicle and Attitude Controller Design Using Sloshing-Filter," Journal of KSAS, Vol. 28, No. 8, pp.89~97, 2000
2. You, K. "The Vibration Performance Experiment of Tuned Liquid Damper and Tuned Liquid Column Damper," Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 21, No. 5, pp.19~26, 2005
3. Rongong, J. A., "The design of particle dampers for supressing resonant vibrations," Engineering Integrity, Vol. 16, pp. 24-30, 2004
4. Dragomir, S. C., Semercigil, E. S. and Turan, O. F., "Induced Particle Sloshing in a Rotating Container," Proc. of 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Gold Coast, Australia, pp.1207~1212, 2007
5. Xua, Z., Wang. M. Y., Chen, T., "Particle damping for passive vibration suppression: numerical modeling and experimental investigation," Journal of Sound and Vibration,

Vol. 279, pp. 1097~1120, 2005

6. Cleary, P., "DEM simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills," Powder Technology, Vol. 109, pp.83-104, 2000