

# 수직으로 진동하는 알갱이계에서 표면파의 거동 연구

글 \_ 이지수, 정영균 · 슈퍼컴퓨팅연구소 · jysoo, yjung@kisti.re.kr

## 1. 서론

알갱이터미에 외력을 주기적으로 가하는 경우 터미의 표면에 다양한 문양들이 생기게 되는데, 이러한 현상은 십여 년 전부터 실험 및 이론적인 방법을 통해서 많은 연구가 되어 왔다. 예로써 얇은 층의 알갱이터미에 수직으로 주기적인 진동을 가하는 경우 줄, 사각형, 및 육각형과 같은 다양한 문양들이 표면에 형성된다는 사실이 관측되었다. 알갱이터미에 가해지는 진동의 주파수 크기를 변화시키는 경우 표면에 나타나는 문양의 파장이 달라지는데 이를 나타내는 분산관계식에서 교차(crossover) 현상이 나타난다고 알려져 있다. 즉 낮은 주파수 영역과 높은 주파수 영역에서 분산관계식이 서로 다르게

주어진다. 그러나 지금까지 정상파의 교차현상 및 이의 기작에 대한 이해는 확실하게 이루어지고 있지 않은 상태이다.

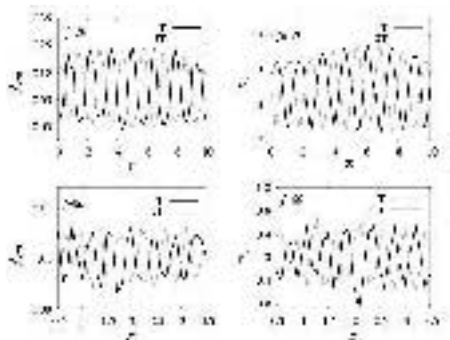
본 연구에서는 2차원 분자동역학(molecular Dynamics: MD) 방법을 이용하여 진동의 한주기 동안 입자들이 이동한 수평거리의 확률분포 및 시간에 따른 압력 텐서의 변화를 측정하여 낮은 주파수 영역에서 높은 주파수 영역으로의 전이를 설명하였다. 또한 정상파의 시간에 따른 변화를 관측하여 정상파 형성의 기작을 이해하고자 하였다.

## 2. 분자동역학 시뮬네기

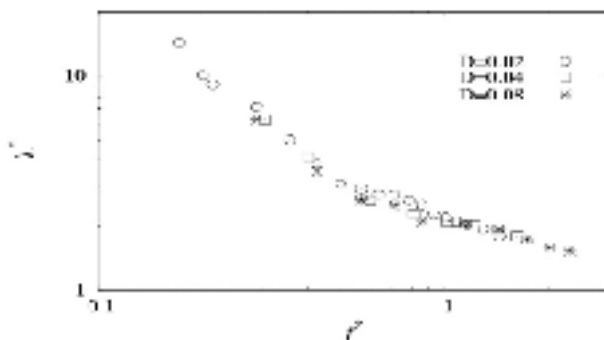
분자동역학의 기본적인 생각은 계를 구성하는 입자에 작용하는 힘을 계산하고 그의 운동방정식을 반복적으로 풀어서 그의 위치를 계산하는 것이다. 즉 한순간에 계를 구성하는 입자에 작용하는 힘들을 주어진 물리법칙에 따라 결정하고 뉴턴의 제 2법칙을 이용하여 각 입자들의 속도와 위치의 변화를 계산한다. 이렇게 얻어진 새로운 바닥 짜임새(configuration)에 대하여 위의 과정을 반복적으로 적용하면 계를 구성하는 모든 입자들의 시간에 따른 움직임을 계산할 수 있다. 입자들 사이의 상호작용은 다음과 같은 세 가지의 일반적인 요소를 포함해야 한다고 여겨지고 있다. 즉 입자 사이의 반발력, 충돌했을 때 에너지를 잃는 메커니즘, 그리고 쿨롱의 법칙에 의한 정지 끌림이 그

것이다. 이 세 가지 요소를 모두 갖춘 가장 간단한 형태의 상호작용이 Cundall과 Strack이 제안한 방식이다.

분자동역학 시뮬네기에서 입자간의 상호작용은 Cundall과 Strack이 사용한 방법을 이용하였다. 사용된 구형입자들은 중력의 영향을 받으며 외력에 의해 에너지를 얻거나 충돌에 의해 에너지를 잃게 된다. 수평방향으로는 주기적 경계조건을 사용하였고 알갱이터미가 들어있는 상자는  $A \sin(2\pi ft)$ 에 의해 지배되도록 주고 수직으로 주기적인 진동을 가하였으며 무차원 가속도  $\Gamma = A(2\pi ft)^2/g$ 을 도입하여 다양한 변수 값들에 대해서 시뮬네기를 하였다. 여기에서  $A$ 는 진폭,  $f$ 는 주파수, 그리고  $g$ 는 중력 상수이다.



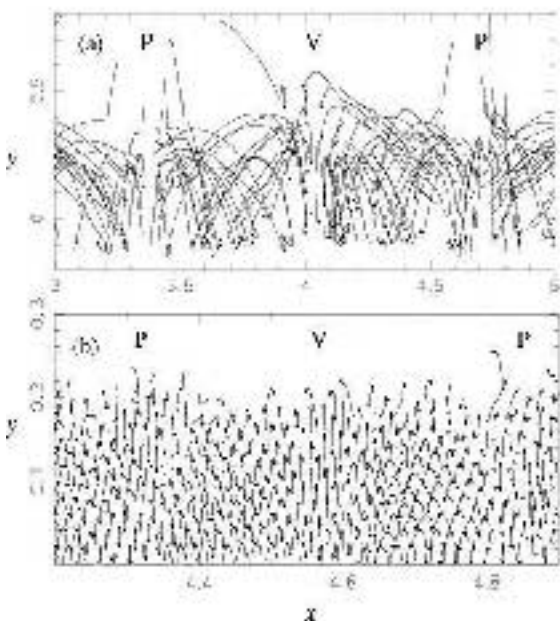
〈그림 1〉  $f=20\text{Hz}$ (위)와  $f=80\text{Hz}$ (아래)에서 질량중심의 수직성분( $y_m$ )과 속도의 수평성분( $v_x$ ). 버금어울림 정상파가 두 주파수 영역에서 분명하게 보인다.



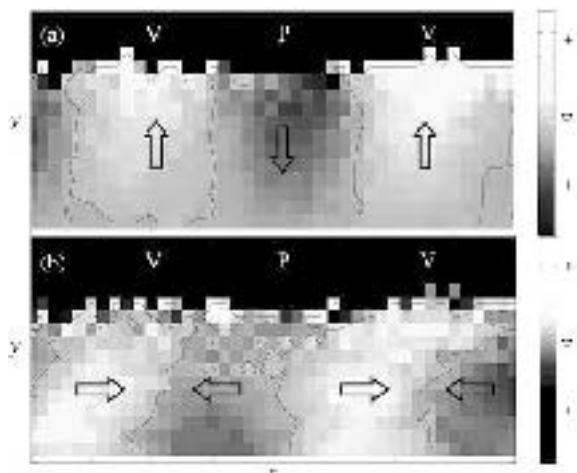
〈그림 2〉 무차원 파장  $\lambda^* = \lambda/H$ 와 무차원주파수  $f^* = f\sqrt{H/g}$ 를 세 개의 다른 직경( $D$ )에 대해서 그린 그림.

### 3. 시능내기 결과 및 토의

우선 질량중심의 수직성분과 속도의 수평성분을 낮은 주파수영역( $f=20\text{Hz}$ )과 높은 주파수 영역( $f=80\text{Hz}$ )에서 측정하였다. 〈그림 1〉에서 보이는 바와 같이 두 주파수 영역 모두에서 버금어울림(subharmonic) 운동이 잘 나타난다. 하지만 주파수와 파장과의 관계인 〈그림 2〉는 교차현상이  $f^* = 0.5$  근처에서 나타남을 보여준다. 이는 낮은 주파수 영역과 높은 주파수 영역에서 서로 다른 분산관계식을 따른다는 것을 의미한다. 이 결과를 정성적으로 이해하기 위



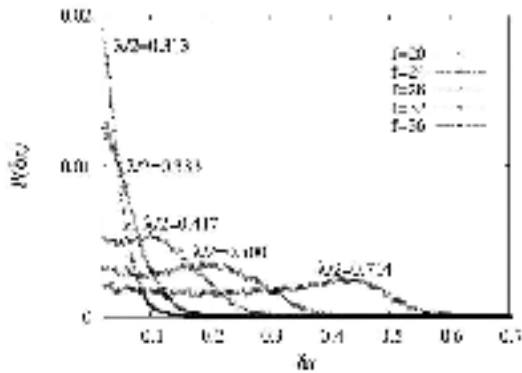
〈그림 3〉  $f=20$ (a)과  $f=80\text{Hz}$ (b)에서 한 진동주기 동안 입자들의 궤적. P와 V는 파의 봉우리와 골짜기를 나타낸다.



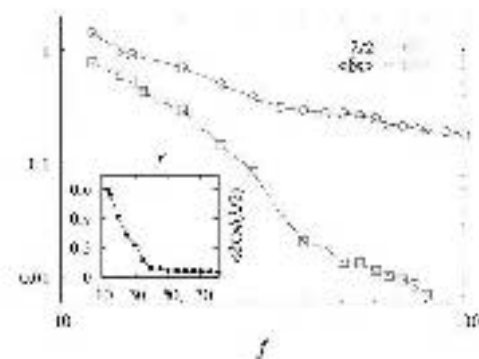
〈그림 4〉  $f=80\text{Hz}$ 인 경우에 한 진동주기동안 입자들이 이동한 거리의 수직(a) 성분과 수평성분(b). 화살표는 입자들이 움직이는 방향을 나타낸다.

해서 입자들의 궤적을 공부하였다.

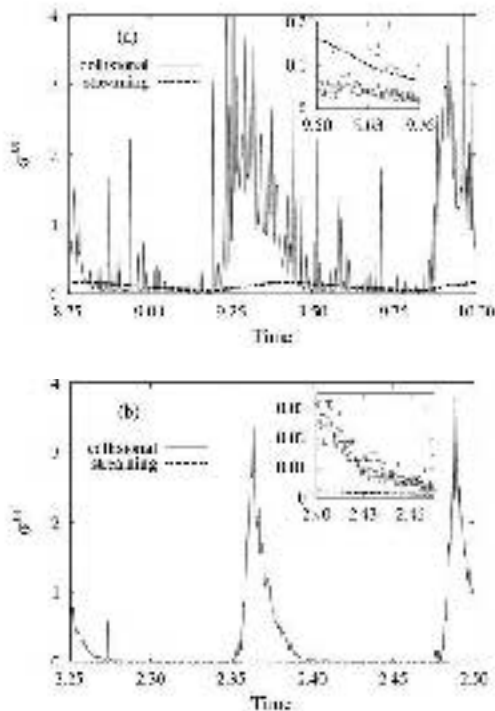
〈그림 3〉은 낮은 주파수( $f=20\text{Hz}$ )인 경우에 봉우리(P) 주변에 있는 상당수의 입자들이 골짜기(V)까지 먼 거리를 이동하는 반면, 높은 주파수( $f=80\text{Hz}$ )에서의 입자들은 파장보다 훨씬 적은 거리를 결맞는(coherent) 블록 형태로 이동함을 보여준다. 결맞는 블록 운동은 진동의 한 주기 동안 입자들이 수평(수직)으로 이동한 거리  $\Delta x(\Delta y)$ 을 측정함으로써 분명하게 확인할 수 있다. 〈그림 4〉 두 주파수 영역에서 서로 다른 형태의 운동을 한다는 위의 관측결과는 〈그림 2〉에서 나타난 분산관계식의 교차를 설명할 수 있는 단서를 제공한다.



〈그림 5〉 한 주기 동안 입자의 수평이동거리  $\langle \Delta x \rangle$ 의 분포. 낮은 주파수 (28Hz 이하)의 경우에는 "bump"가 존재한다.



〈그림 6〉 입자의 평균 수평이동거리  $\langle \Delta x \rangle$ 와 정상파의 반파장  $\lambda/2$ 를 주파수의 함수로 그린 그림.  $\langle \Delta x \rangle$ 와  $\lambda/2$ 의 비는  $f = 30\text{Hz}$  근처에서 갑자기 감소한다.

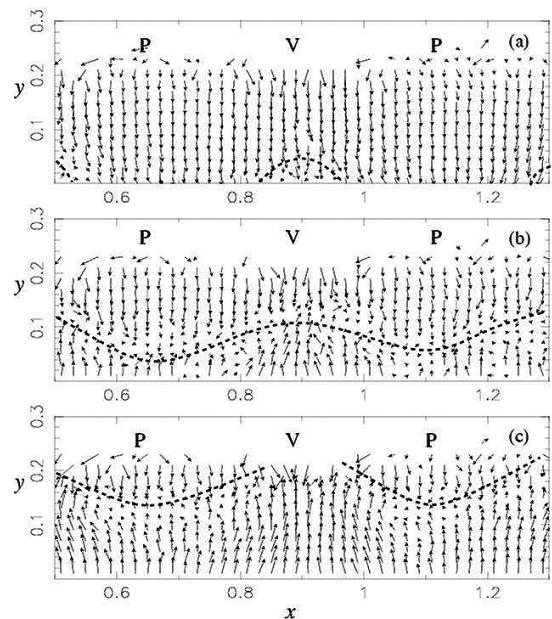


〈그림 7〉  $f = 20\text{(a)}$ 와  $f = 80\text{Hz(b)}$ 에서 시간의 함수로 그린 흐름압력텐서와 충돌압력텐서

위에서 얻어진 결과들을 정량적으로 설명하기 위하여 한 주기 동안 입자가 이동한 수평거리  $\Delta x$ 의 확률분포  $P(\Delta x)$ 를 측정하였다. 〈그림 5〉는 5개의 주파수 영역에서 확률분포를  $\Delta x$ 에 대해서 그린 그림인데,  $f = 30\text{Hz}$  근처에서 정량적인 변화를 보인다.

낮은 주파수 영역에서는 "Bump"가 존재하는 반면 높은 주파수 영역에서는 bump가 존재하지 않는다. 이는 낮은 주파수의 경우에 많은 수의 입자들이 먼 거리까지 이동함을 의미한다. Bump가 사라지는 주파수의 값은 분산관계식의 교차 주파수와 일치한다. 또한 낮은 주파수 영역에서 입자가 한 주기 동안 이동한 평균거리  $\langle \Delta x \rangle$ 가 정상파의 반파장  $\lambda/2$ 에 비견되었으나, 높은 주파수에서는 정상파의 반파장 값보다 훨씬 작게 나타났다 〈그림 6〉 이는  $\langle \Delta x \rangle / \lambda/2$ 를 주파수  $f$ 의 함수로 그린 그림에서 잘 나타난다.

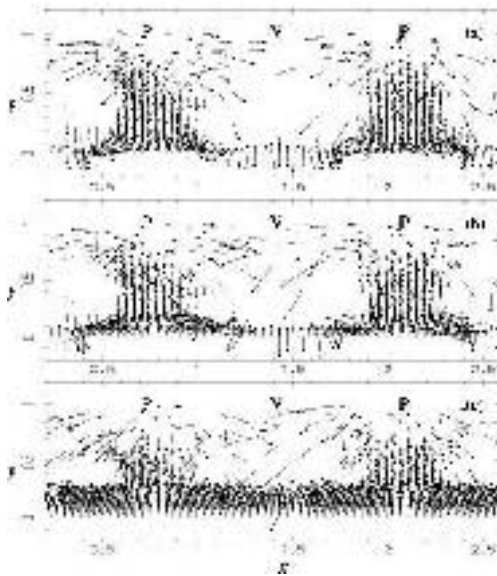
다음으로 압력텐서의 시간에 따른 변화를 측정하였다. 압력텐서는 움직이는 입자들이 그들의 운동량을 운반하면서 생기는 흐름압력과 입자간 충돌에 의해 운반되는 운동량과 관계하는 충돌압력으로 나눌 수 있다. 〈그림 7(a)〉에서 보이는 바와 같이 낮은 주파수 영역에서는 흐름압력텐서의 값이 충돌압력텐서 보다 큰 반면, 높은 주파수 영역에서는 〈그림 7(b)〉 흐름압력텐서 값이 충돌압력텐서의 값에 비해 무시할 정도로 작은 값을 가진다는 사실은 볼



〈그림 8〉  $f=80\text{Hz}$ 인 경우 입자 속도의 순간사진. 점선은 방향이 반대되는 입자들이 만나는 "충돌영역"이다.

수 있다. 이는 낮은 주파수 영역에서는 많은 수의 입자들이 먼 거리까지 수평이동을 할 수 있는 반면, 높은 주파수 영역에서는 잦은 충돌로 인하여 입자들이 거의 움직이지 못한다는 사실을 의미한다.

낮은 주파수 영역에서 높은 주파수 영역으로의 전이는 정상파를 형성하는 입자선속의 기작을 공부함으로써 확인할 수 있다. <그림 8>과 <그림 9>는 입자들이 바닥에 부딪치는 순간, 주파수가  $f = 80\text{Hz}$ 와  $f = 80\text{Hz}$ 인 경우 속도장의 순간사진이다. <그림 8>은 파의 골짜기에 있는 입자들이 다른 입자들에 비해 바닥에 일찍 도달하고(a), 바닥과 부딪친 입자들은 방향을 바꾸어 위로 향하는 모습을 보여준다(b). 이 입자들은 위로 올라가면서 여전히 내려오고 있는 입자들과 충돌하면서 수평입자선속을 유발하는데, 골짜기에서는 충돌영역이 빠르게 사라지는 반면, 봉우리는 여전히 내려오는 입자들과 충돌하고 있다(c). 이러한 운동은 입자들이 다음 주기에 바닥과 충돌할 때, 골짜기는 봉우리가 되고, 봉우리는 골짜기가 됨을 설명한다. 낮은



<그림 9>  $f = 20\text{Hz}$ 에서 입자 속도의 순간사진

주파수 영역에서는 <그림 9>에서와 같이 충돌영역이 봉우리에만 존재하고 골짜기에 있는 입자층이 얇은 것만 제외하면 높은 주파수 영역에서 보이는 현상과 동일하다.

## 4. 결론

수직으로 진동하는 알갱이터미에서 형성되는 정상파의 거동을 분자동역학 방법을 이용하여 공부하였다. 입자의 수평 이동거리의 확률분포 및 압력텐서를 측정하여 다른 주파수 영역에서 서로 다른 분산관계식이 나타나는 이유를 설명하였다. 낮은 주파수 영역

에서는 정상파가 한 진동주기 동안 많은 수의 입자들이 먼 거리까지 이동 하는 반면, 높은 주파수 영역에서는 결맞는 블록의 형태로 입자들이 움직이는 것을 알아냈다. 또한 정상파의 시간에 따른 변화를 심도 있게 공부하였다.