

# 알갱이계의 이해

Hans J. Herrmann

물리학자의 관점에서 모래사장에서 놀고 있는 아이들을 바라보고 있으면 흥미로운 점을 발견할 수가 있다. 모래더미의 표면은 쉽게 변형되며 푸석푸석한 모래는 마치 액체와 같이 흘러내리는 성질을 보인다. 그러나 뭉쳐진 모래는 아주 단단해서 해변에 있는 모래사장위로 자동차가 지나갈 수도 있다. 모래는 또한 산사태에서 볼 수 있는 바와 같이 덩어리로 움직이기도 하는데 산사태에 도달하면 그 운동에너지를 완전히 잃고 정지한다.

모래는 보통의 유체와 다르게 흐른다. 예를 들어 모래시계가 작동하는 기본적인 이유는 모래의 흐르는 양이 시간에 따라 일정하기 때문이다. 만약에 대신 물이 사용된다면 모래시계의 위쪽 방에 있는 물의 양이 줄어들면서 물의 흐르는 양도 점차 줄어들 것이다. 알갱이계는 다른 많은 흥미 있는 현상들을 보인다. 1831년에 Faraday는 진동하는 평평한 판 위에 놓여진 모래가 자발적으로 더미를 형성하는 현상을 관찰했다. 각 더미의 봉우리에서 모래는 계속 솟아오르고 더미의 표면을 따라 아래로 흘러내린다. 어떻게 난알더미가 진동에 무너지지 않고 견딜 수 있을까? 봉우리로 난알들을 밀어 올리는 힘은 무엇인가? 우리는 아직도 그 해답을 모른다.

알갱이계는 주위에서 흔하게 관측될 수 있다. 밀가루나 설탕과 같은 음식물이나 바위나 시멘트와 같은 건축재료들이 알갱이계이다. 약품들에 사용되는 원료와 그를 이용해 만든 정제들도 또한 알갱이계이다. 이러한 물질들을 산업공정에서 보다 효율적으로 사용하기 위하여 오랜동안 연구가 되어져 왔음에도 불구하고 그들에 대한 근본적인 이해는 아직도 요원한 상태이다. 이러한 물질들이 도관을 지나면서 막히는 정확한 이유와 크기가 다른 입자들이 자발적으로 나누어지는 현상 등을 아직도 이해하지 못하고 있다.

물리학자들은 19세기에 들어와서 분말의 기이한 현상들에 관심을 가지게 되었고, Faraday, Reynolds, Hagen 등이 이 흥

미로운 물질의 이해에 중요한 기여들을 하였다. 그러나 그들은 알갱이계의 변형이나 그 흐름의 속도에 대한 올바른 이론을 제시하지 못하고 다른 분야로 떠났다. 물리학자들이 알갱이계에 대한 흥미를 다시 가지게 된 것은 근래의 일이다. 무질서계에서의 집단행동을 기술하기 위하여 스스로 짜여진 고비성(self-organized criticality)의 개념이 1987년에 미국 Brookheaven연구소의 Per Bak 등에 의하여 제안되었다. 물리학자들은 이러한 개념들을 현실적인 알갱이계의 문제들에 적용하고 있다.

현대의 컴퓨터를 이용해서 다체계의 수치적 시뮬네이션이 가능하고 그 결과들을 실험결과들과 비교해 볼 수 있다. 예를 들어 분자동역학 방법을 이용하여 수만개의 모래입자의 수분에 걸친 운동을 시뮬네이션 할 수 있다. 모형을 격자에서 정의하는 등의 조금 더 단순화된 경우에 대하여서는 더 커다란 규모의 시뮬네이션도 가능하다.

이러한 알갱이계의 특이한 현상들을 설명하기 위한 많은 이론들이 제안되어졌고 이 신비한 계를 이해하기 위한 참신한 이론들이 앞으로도 계속 제안되어질 것이라 예상되어진다.

## 알갱이의 비탄성충돌

알갱이계가 왜 그렇게 특별한가? 그 중요한 이유 중의 하나는 알갱이들이 충돌을 통하여 에너지를 잃는다는 점이다. 충돌 중에 일어나는 알갱이 표면의 소성변형이나 진동 등의 이유로 그 충돌은 비탄성적이 된다. 미시계와 달리 이러한 에너지는 국소적으로 없어지며 열에너지로 복사되거나 주위의 공기의 흐름에 의하여 대류되어진다. 그러므로 외부에서 에너지가 지속적으로 주입되지 않으면 알갱이계는 결국 움직이지 않게 된다. 이러한 소산계(dissipative system)의 예에는 교통현상이나 세균이나 물고기, 새 같은 생물체들의 집단운동 등이 있다.

이렇게 에너지를 잃는다는 사실은 움직이고 있는 각 난알의 속도가 계 전체의 평균속도와 유사한 값을 가진다는 것을 의미한다. 다시 말하면 무질서적인(혹은 "열적인") 속도가 평균

Hans J. Herrmann 교수는 University of Cologne 물리학 박사로서 (1981), 프랑스 Saclay, Research Associate(1982-90), 독일 HLRZ, Dir.(1990-94), 프랑스 PMMH, ESPCI, Dir.(1994-2000)을 거쳐 현재 독일 Univ. Stuttgart에서 재직 중이다.

속도와 유사한 크기를 가지며, 이 때문에 점성이 일정한 값이 아니라 층밀리기율(shear rate)이 증가함에 따라 증가하는 현상을 보인다. 모래가 비뉴턴 유체임을 의미하는 이 현상은 Bagnold에 의하여 1954년에 발견되어졌다.

충돌에 의하여 에너지를 잃는다는 사실은 또 다른 중요한 결과를 야기한다. 만약 계의 한 부분의 밀도가 주위보다 조금 더 높으면 그 지역에서 일어나는 비탄성충돌의 수가 많을 것이다. 그 결과 그 부분의 운동에너지가 줄어들고 또한 압력도 감소한다. 이는 압력의 물매를 유발하고 이 때문에 더 많은 입자들이 그 부분으로 유입되고 그 결과 밀도가 증가하게 된다. 이러한 과정을 통하여 균일한 계로부터 밀도가 높고 낮은 부분이 생긴다. 알갱이계가 도관을 통하여 흐를 때 이렇게 형성된 밀도의 요동은 교통현상에서와 같이 운동파동(kinematic wave)의 형태로 전파된다. 이러한 파동은 산업에서 이용되는 사일로의 사용에 커다란 문제를 야기한다. 즉 이러한 요동에 의한 힘이 매우 커져 사일로를 포함한 주변시설전체를 붕괴시키기도 한다.

네덜란드 Leiden대학의 K. Schick와 A. Verween은 이러한 요동이 지진과 유사한 성질을 보인다는 것을 밝혔다. 즉 그들은 이 계가 자신을 임계요동이 보이는 상태로 몰아간다는 것을 보였다. 여기에서 “임계”의 의미는 아무리 큰 요동이라도 관찰될 수가 있다는 것이다. 컴퓨터 시뮬내기를 통하여 작은

원반들이 중력에 의하여 수직의 도관을 따라 내려오며 뭉치는 모습을 연구할 수 있다. 이러한 시뮬내기에서 입자가 거의 없는 부분 사이에 밀도가 매우 높은 지역이 형성되는 것을 관측할 수 있다. 이 밀도가 높은 지역은 운동파동의 성질을 보이며 거의 일정한 속도로 움직인다. 이와 유사하게 차량이 거의 없는 부분 사이에 차량의 밀도가 높은 지역이 형성되고 또 이 지역이 거의 일정한 속도로 움직이는 현상이 교통의 흐름에서도 관측된다.

밀도의 요동은 특정한 주파수에 움직임에 해당하는 부분의 양을 나타내는 power spectrum을 이용하여 보다 자세하게 분석할 수 있다. 밀도의 power spectrum은 주파수가 큰 부분에서 멱법칙(power law)에 따라 감소하며 이는 매우 다양한 시간간격의 요동이 일어나고 있다는 것을 보인다. 여러 모형들에서 구해진 멱법칙의 지수는 항상 4/3에 가까운 값을 가지나 그 이유는 알려지지 않고 있다. 입구와 출구가 연결되어 밀폐된 계에서는 운동파동의 파장과 관련되어 power spectrum이 특정 주파수에서 극대값을 보인다.

도관이 매우 좁거나 입자의 밀도가 매우 크거나, 또는 벽면의 마찰력이 큰 경우 등에서는 도관이나 사일로가 막히는 경우가 있다. 산업공정에서 이는 매우 중요한 문제이지만 이러한 막힘현상을 예측하는 방법이 아직 알려져 있지 않다. 이러한 상황에서 수치적 시뮬내기가 기여할 여지가 있다. 예를 들면 이차원의 사일로의 시뮬내기를 통하여 난알들을 주입하는 속도에 따른 효과를 알아볼 수 있다. 예를 들어 난알들을 일정한 속도로 주입할 때는 사일로 내의 난알들이 원활하게 움직이나 주입속도가 일정하지 않고 시간에 따라 요동하면 평균적으로 같은 양을 주입하는 경우라 하더라도 막힘현상이 나타나는 것을 관찰할 수 있다 (그림 1).

## 모래더미 내의 힘의 분포

모래더미 내부의 힘은 매우 독특한 성질을 보인다. 마른 모래의 경우에 난알들간에 인력이 없기 때문에 두 난알에 장력이 작용하면 그들은 쉽게 분리가 된다. 압력이 가해지는 경우에 난알간의 힘은 그 난알의 모양에 의존한다. 예를 들어 구형의 난알들은 변위가  $\delta$ 일 때  $\delta^{3/2}$ 에 비례하는 반발력을 가진다. Hertz의 법칙으로 알려진 이 현상은 두개의 구형의 탄성체의 접촉면적이 그들에게 가해지는 압력이 증가함에 따라 늘어나는 것에 기인한다. 변위가 적은 경우에도 이 반발력은 비선형적이며 더욱 복잡한 모양의 난알들에 대해서도 유사한 비선형 관계식이 유도되어진다. 또 서로 미끄러지는 두 난알 사이에는 마찰력이 작용한다.

움직이지 않는 모래더미에서 모래의 무게들은 “힘의 줄”(“force line”)을 통하여 더미 아래로 전파되어진다. 서로 접촉하고 있는 모래들로 구성되어있는 이러한 힘의 줄은 모래의 무게를 더미의 바닥까지 전파시켜주는 역할을 한다. 힘의 줄의 방향은 모래더미가 만들어진 과정에 의존한다. Prague의 Institute of Chemical Process에 있는 J. Smid와 I. Novosad는

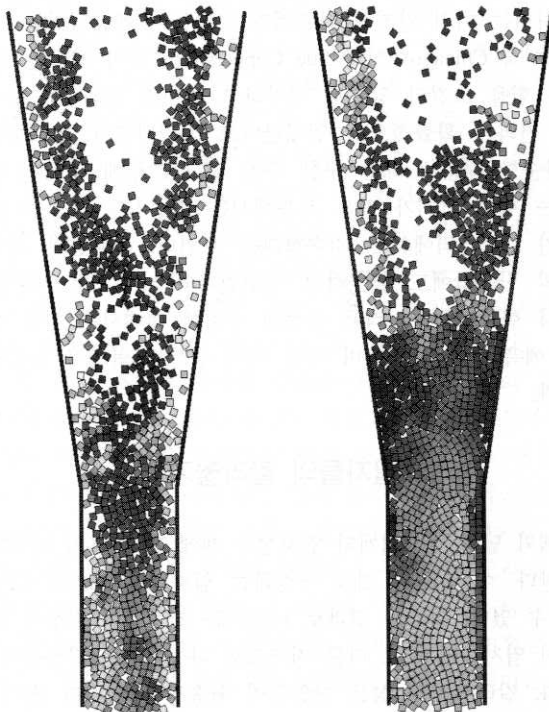


그림 1. 사일로에서 같은 크기의 난알들의 분자동역학 시뮬내기: 입자의 색(또는 음영)은 그 속력에 따라 결정되어진다. 난알들이 일정하게 주입되는 경우에는 흐름이 원활하나 (왼쪽) 주입되는 양이 시간에 따라 변화하면 막힘이 생긴다 (오른쪽). 여기에서 시간에 평균한 주입량은 동일하다.

1981년에 난알들을 연속적으로 부어서 난알더미를 만들었다. 그들은 더미의 봉우리에 상응하는 바닥면에 작용하는 압력이 국소최소(local minimum)를 보이는 것을 관측했다. 이 “더미아래의 침하”(“dip under the heap”)의 이유는 아직까지도 해결되지 않고 있다.

영국 Cambridge대학의 Sam Edwards 등은 이 현상에 대한 직관적인 모형을 제시하였다. 즉 아치가 더미 안에서 형성되어 이들이 더미의 바닥까지 힘을 전파한다고 주장했다. 이러한 생각을 기반으로 영국 Edinburgh 대학의 Joachim Wittmer

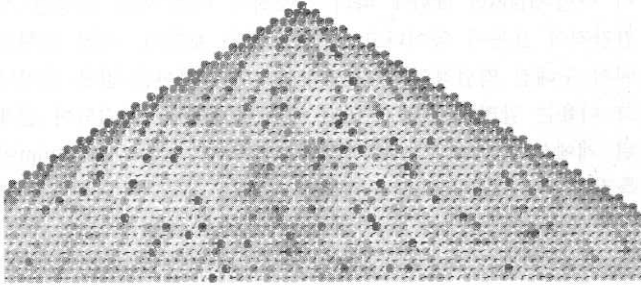


그림 2. 분자동역학 시뮬네이션을 통하여 얻어진 이차원의 규칙적인 난알더미 내부의 힘의 분포. 이 더미는 1717개의 원반으로 구성되어 있으며 그 크기들의 변분은 5%이다. 각 입자의 색(또는 음영)은 가해지는 압력에 따라 결정되어진다.

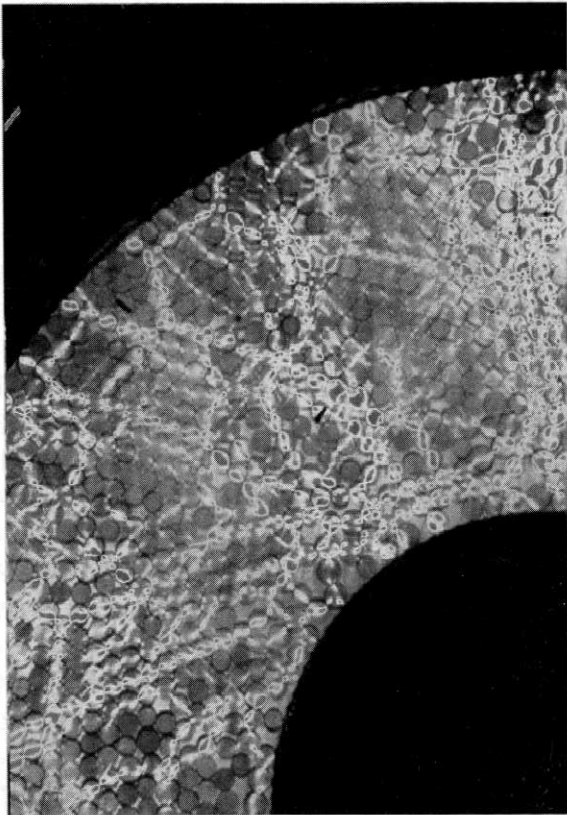


그림 3. 반대방향으로 회전하고 있는 두 개의 중심원을 이루는 비퀴들 사이에 plexiglass로 만들어진 원반들을 넣어서 얻어진 변형력의 분포.

등은 변형력텐서의 주축이 증력에 대하여 일정한 방향으로 고정되어 있다는 고정주축이론(fixed principal axis: FPA)을 주장했다. 이들은 모래를 연속적으로 부어 더미를 형성하는 과정에서 그러한 고정주축이 형성된다고 가정하였다. 이는 난알들의 탄성변형이 고려되지 않은 대담한 가정이었으나 FPA 모형은 “더미아래의 침하” 현상을 최초로 재현한 이론이다.

컴퓨터 시뮬네이션은 “더미아래의 침하”현상을 이해하는데 도움을 주었다. 독일 Stuttgart 대학의 Stefan Luding은 시뮬네이션을 이용하여 규칙적으로 배열된 난알더미 내부의 힘을 구했다. 이 결과에는 Edwards 등에 의하여 주장된 힘을 전달하는 아치가 분명하게 보인다. 또 복잡하게 얽혀진 “힘의 그물”(force network)의 모습도 보인다 (그림 2).

물체에 가해지는 변형력의 세기에 따라 광축이 바뀌는 plexiglass 같은 물질을 사용한 실험에서는 힘의 그물의 모습을 선명하게 보여줄 수 있다. 서로 수직하게 배열된 두 개의 편광판 사이에 그런 물질로 만들어진 원반이 놓여져 있으면 큰 변형력이 작용하는 부분은 밝게 드러난다. 미국 Duke대학의 Bob Behringer 등에 의하여 얻어진 이와 같은 사진은 층밀림띠(shear band)에 있는 힘의 그물을 뚜렷하게 보여준다 (그림 3).

특히 흥미 있는 것은 난알을 담고 있는 용기의 벽면에 작용하는 힘의 세기이다. 벽면의 특정 지역에 힘의 줄이 집중되며 난알의 채우기 구조에 기인한 가리기 효과 때문에 다른 지역은 거의 힘이 작용하지 않는다. 지난 몇 년간 이러한 현상을 설명하려는 여러 가지의 확률적인 모형들이 제안되었다. 예를 들어 미국 Chicago대학의 Sue Coppersmith 등이 제안한 “q-모형”은 힘을 스칼라 양으로 생각하고 더미의 층과 층 사이의 힘의 전파가 확률적으로 일어난다고 가정하였다. 이 모형은 그 단순함 때문에 해를 구할 수가 있고 그렇게 구해진 힘의 분포는 힘의 크기가 작은 부분에서는 딱법칙을 따르고 힘의 크기가 큰 영역에서는 지수형태를 보인다. q-모형의 결과는 모형의 단순함에도 불구하고 실험결과와 매우 잘 일치한다. 그러나 힘의 세기가 작은 부분의 성질에 대해서는 여러 이론들의 예측이 서로 다르며 이는 아직 실험에 의하여 검증되지 않았다.

## 입자들의 갈라놓기

유체와 달리 알갱이계의 입자성은 계에 또 하나의 자유도를 부여한다. 예를 들어 계를 구성하는 입자들의 크기와 모양이 다를 수 있다. 이러한 결과로 나타나는 전형적인 현상이 다른 종류의 입자들이 서로 다른 지역으로 나누어지는 갈라놓기 현상이다. 갈라놓기 현상은 난알들이 활송장치를 따라 흘러 내려가거나 회전하는 원통(rotating drum) 내부 등의 많은 실제적인 상황에서 일어나며 소행성대 내부에서 관측되어지기도 한다.

갈라놓기는 시멘트나 약의 성분, 그 외 여러 종류의 난알들

을 균일하게 섞어야 하는 산업공정에서 심각한 문제로 대두된다. 갈라놓기 현상 중에 잘 알려진 것이 “Brazilian nut” 효과이다. 이 현상은 두 가지 종류의 열매를 섞은 후에 그 용기를 흔들어 주면 크기가 큰 열매가 항상 더미위로 떠오르는 것을 말한다. 이 현상은 그 열매에 대하여 아직도 확실한 결론이 나와있지 않고 아마도 여러 가지의 상이한 열매들이 동시에 작용하고 있으리라 생각된다. 미국 Carnegie Mellon 대학의 Anthony Rosato 등은 작은 입자들이 커다란 입자들 아래 형성된 공간에 더 쉽게 들어갈 수 있고 이로 인하여 커다란 입자들이 위로 떠오른다는 이론을 제기하였다. 이에 반해서 미국 Chicago 대학의 알갱이계 연구그룹은 좁고 긴 용기에 존재하는 난알의 대류 때문에 이 현상이 일어난다고 주장하였다. 프랑스의 Ecole Supérieure de Physique et de Chemie Industrielles(ESPCI)의 Emanuele Cagliot 등은 또 다른 이론을 제기하였다. 즉 큰 입자들이 흩어지기의 효과로 그 이동도가 더 높아지고 이 결과 더 “뜨거워져서” 더미의 위로 상승한다는 것이다.

난알들은 회전하는 원통 내에서 드럼의 회전축의 방향과 수직인 방향으로 띠를 이루며 갈라놓기를 한다. 이러한 갈라놓기는 산업공정에서 매우 성가신 현상이지만 이를 방지하기 위해 필요한 이해는 아직도 많이 부족하다.

## 외부에서 압력을 가한 모래더미

위에서 살펴본 바와 같이 알갱이더미의 성질은 그 밀도에 민감하게 의존한다. 채워넣기밀도가 매우 높거나 낮은 경우에는 지난 30년 동안 개발된 연속체 이론이 있고 이를 통하여 계의 행동을 어느 정도 예측할 수 있다. 예를 들면 토양과 같이 밀도가 높은 알갱이계에서 일어나는 변형은 특별한 종류의 소성이론을 이용하여 예측할 수 있다. 이 이론은 변형력에 대한 몇 개의 결합된 비선형 미분방정식으로 주어지고 그 해를 구함으로써 원하는 양에 대한 예측을 할 수가 있다. 금속에서의 소성변형과는 달리 알갱이계의 소성변형은 팽창성(dilatancy)을 보이고 이는 부피의 변화를 동반한다.

Reynolds가 1885년에 수행한 실험을 통하여 팽창성의 개념을 설명해보자. 모래와 물을 풍선에 채우고 유리관을 꽂아 물의 높이를 재도록 하자. 외부에서 힘을 가하여 풍선을 변형시키면 유리관의 수위가 내려가는 것이 관측된다! 만약 모래가 없고 물로만 채워져 있으면 수위는 당연히 올라갈 것이다. 이 현상이 일어나는 이유는 변형이 일어나기 위해서는 모래의 밀도가 Reynolds 밀도라는 특정 값 이하로 감소해야만 하기 때문이다. 즉 Reynolds 밀도 이하에서의 모래는 쉽게 변형될 수 있으나 그 보다 밀도가 높아지면 난알들이 서로 움직이는 것을 방해한다.

풍선 안에 있는 모래들은 팽창해야만 움직일 수 있기 때문에 모래사이에 공간이 넓어지고 그 결과 수위가 감소한다. 이와 동일한 현상을 해변에서 볼 수 있다. 해변에 있는 모래를



그림 4. 수치적 시뮬레이션으로 보여진 알갱이계에 나타나는 전형적인 층밀림띠(shear band)의 그물. 각 변의 길이가 500 단위세포인 사각격자가 사용되었고, 그림에 나타난 색은 각 부분의 국소적인 층밀림속도(shear velocity)에 따라 정해진다.

밟으면 발 주위에 있는 모래가 마르는 것을 관찰할 수 있다. 이는 발 주위에 있는 모래들이 팽창하여 그 사이의 공간에 물을 더 포함할 수 있기 때문이다.

이러한 이론들은 토양역학(soil mechanics)분야 외에도 다양하게 적용될 수 있다. 예를 들어 위의 이론은 산업체에서 사용되는 사일로 안에 있는 마른 입자들의 움직임이 늦어지는 것을 설명하기도 하고 외부 변형력이 작용하는 알갱이더미의 표면의 모양의 예측에도 사용된다. 또 이러한 소성이론이 성공적으로 예측하는 것이 층밀림띠(shear band)이다. 모래가 가득 찬 상자의 벽면이 천천히 서로 평행하게 움직이면 표면에는 층밀림면(shear plane)과 같은 방향으로 평행선들이 형성된다. 이러한 층밀림면에서의 난알의 밀도는 주변보다 낮아 더 쉽게 변형이 가능하다. 독일 Jülich 연구소의 Alex Poliakov 등은 시뮬레이션을 통하여 층밀림띠의 복잡한 그물 구조를 보였다(그림 4). 이 시뮬레이션은 수직인 벽면들에 동시에 압력이 가해지고 수평한 벽면들이 동시에 당겨지는 상황이다. 여기에서는 사각격자가 사용되었고 격자의 간격을 줄일수록 층밀림띠의 굵기는 가늘어지고 그 수가 늘어나는 것이 관측되었다. 이 계는 임계상태로 접근하는 것처럼 보이고 층밀림띠의 밀도가 격자의 길이에 따라 멱법칙의 형태로 증가한다. 또 이 “그물”의 구조는 fractal이고 한가지의 길이나 시간의 단위로 기술될 수 없다.

그러나 소성이론은 알갱이계의 밀도가 높을 때에만 적용될 수 있고 이 조건을 만족하지 못하는 상황들은 주위에서 매우 흔하게 관측될 수 있다.

## 그 외의 이론들

알갱이계의 밀도가 낮은 경우에는 다른 이론적인 접근이 가능하다. 만약 모래가 세차게 휘저어져서 입자들 사이의 거리가 커지면 기체 운동학이론(kinetic theory)과 유사한 이론을 적용할 수가 있다. 미국 Caltech의 Peter Haff와 Cornell 대학의 Jim Jenkins, 그리고 캐나다 McGill 대학의 Stuart Savage 들에 의하여 이러한 이론이 제안되었다. 이 이론을 이용하여 Bagnold에 의해 관측된 점성의 밀도의존성을 예측할 수도 있고 진동하는 용기 안에 들어있는 낱알의 평균속도의 높이를 예측할 수가 있다. 그러나 이 이론은 갈라서기 현상이나 낱알더미가 운동을 시작하는 멈춤각(angle of repose) 등의 예측에는 사용될 수가 없다.

그러나 알갱이계에서 일어나는 많은 흥미 있는 현상들은 확립된 연속체 이론이 없는 중간 값의 밀도에서 일어난다. 모래를 진동시키거나 충밀림을 가하면 국소적으로는 그 밀도가 감소한다. 그러나 흩어짐 때문에 낱알들은 에너지를 잃고 다시 뭉친다. 이러한 상호작용의 결과로 모래더미의 표면에서 일어나는 무너짐과 같이 낱알들은 간헐적인 운동을 보인다. 이 상호작용은 또 앞에서 설명한 도관 내에서의 밀도의 요동을 유발시킨다.

이러한 계들은 문턱현상을 보인다. 예를 들면 모래더미의 경우에는 더미의 멈춤각이 특정값보다 커졌을 때 무너짐의 현상을 보인다. 그리고 입자의 양으로 정의되는 무너짐의 크기는 멱법칙에 따르는 분포를 보인다. 즉 한 개의 시간이나 길이의 단위로 계가 기술되어질 수 없는 이러한 현상들에는 스스로 짜여진 고비성(self-organized criticality)의 개념이 적용될 수 있다. 이 개념을 알갱이계에 적용하면 Reynolds 밀도보다 작은 경우에는 다양한 크기의 유체의 성질을 가지는 부분이 나타나야 한다고 예측할 수 있다. 실제로 작은 크기의 모래더미와 타원형의 쌀로 이루어진 낱알더미에서는 무너짐의 크기가 멱법칙의 성질을 보인다.

이러한 멱법칙의 성질은 모래에 충밀리기 변형을 가하거나 수직의 도관을 통과하는 모래의 밀도 요동에서도 관측되어졌다. 이에 반해서 커다란 크기의 모래더미의 무너짐은 보통 특정한 시간과 주기를 갖는데 이는 정지마찰력과 운동마찰력의 차이로 설명되어진다.

## 앞으로의 전망

알갱이계에는 아직도 해결되지 않은 문제들이 많이 있다. 아주 높거나 낮은 밀도의 경우에 적용되는 이론들은 실험들과 비교적 잘 일치하고 있으나 이러한 이론들은 대부분의 실제적인 경우에 해당하는 중간 값의 밀도를 가진 경우에는 적용될 수 없다. 이 계를 이해하는 데 겪는 어려움의 한 원인은 알갱이계에 자주 보여지는 임계성 때문이다. 또 연속체 이론들의 어려움은 알갱이계가 다양한 입자들로 구성되어 갈라서기 현상 등을 보일 수가 있다는 점이다.

통계물리와 비선형동역학에서 나온 새로운 개념들은 알갱이계의 이해에 커다란 발전을 가져오고 있다. 이 계가 가지고 있는 무한한 산업에의 응용을 생각해 볼 때, 이러한 발전은 계속되리라 생각된다.

## 읽을거리

- [1] R. P. Behringer and J. T. Jenkins (eds), *Powders & Grains 97* (Balkema, Rotterdam, 1997).
- [2] A. Hansen and D. Bideau (eds), *Disorder and Granular Media* (North-Holland, Amsterdam, 1992).
- [3] H. M. Jaeger and S. R. Nagel, *Science* **255**, 1523 (1992).
- [4] H. M. Jaeger, S. R. Nagel, and R. P. Behringer, *Physics Today* (April issue), 32 (1996).

다음호(2002년 6월호) 특집

“놀이기구의 물리학”