

## Eulerian-Granular method를 사용한 고체 입자 유동 모델 개발

이 태 규,<sup>1</sup> 신 승 원\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 기계공학과

<sup>2</sup>홍익대학교 기계 시스템 디자인공학과

### DEVELOPMENT OF EULERIAN-GRANULAR MODEL FOR NUMERICAL SIMULATION MODEL OF PARTICULATE FLOW

T.G. Lee<sup>1</sup> and S.W. Shin\*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ.

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical and System design Engineering, Hongik Univ.

*In this paper, we have developed numerical model for particulated flow through narrow slit using Eulerian-Granular method. Commercial software (FLUENT) was utilized as simulation tool and main focus was to identify the effect from various numerical options for modeling of solid particles as continuous phase in granular flow. Gidaspow model was chosen as basic model for solid viscosity and drag model. And lun-et-al model was used as solid pressure and radial distribution model, respectively. Several other model options in FLUENT were tested considering the cross related effect. Mass flow rate of the particulate through the slit was measured to compare. Due to the high volume density of the stacked particulates above the slit, effect from various numerical options were not significant. The numerical results from basic model were also compared with experimental results and showed very good agreement. The effects from the characteristics of particles such as diameter, angle of internal friction, and collision coefficient were also analyzed for future design of velocity resistance layer in solar thermal absorber. Angle of internal friction was found to be the dominant variable for the particle mass flow rate considerably. More defined 3D model along with energy equation for complete solar thermal absorber design is currently underway.*

**Key Words :** 태양열발전 흡수기(Solar thermal absorber), 다상입자유동(Particulated multiphase flow), 수치 해석(Numerical Analysis), Eulerian-Granular method, 수치모델 (Numerical modeling)

## 1. 서 론

신재생에너지 중에서 태양에너지를 사용하는 발전은 태양 에너지를 전환시키는 방식에 따라 태양광발전과 태양열발전으로 구분된다. 태양광발전은 태양전지를 통해서 직접 전기로 발전을 하고, 태양열발전은 집광장치를 이용하여 태양에너지를 모아서 얻어진 고온으로 Rankine 또는 Brayton 사이클을 운전하여 전기에너지를 얻는다. 태양열발전은 기존 화석 발전 사이클과 연동하여 추가적 수정 없이 복합적 사이클로 사용될 수 있고[1], 대규모 발전에서도 적용될 수 있다.

태양광발전과 마찬가지로 태양열발전 역시 일사량에 따라서 운전조건이나 효율이 바뀌게 된다. 일반적으로 태양열 발전의 효율을 증가시키기 위해서는 태양 복사에너지를 태양열 발전 사이클에 전달해주는 태양열 흡수기 내부 매질의 온도가 높아야만 한다. 태양열 흡수기에서 사용되는 매질은 일반적으로 기체가 주로 사용되고 있다. 최근 일부 Saudi arabia와 같은 사막 지역에서 모래와 같은 고체입자를 매질로 사용하여 태양열흡수기를 설계하려는 시도가 추진 중이다[2]. 이런 모래와 같은 고체 입자의 경우 열용량이 커서 충분한 태양 복사 에너지를 받는 경우 1000℃까지 온도를 높일 수 있는 장점을 갖고 있다. 하지만 고체 입자의 경우 태양열 흡수기 내부를 통과하는 속도가 너무 빨라서 충분한 태양 복사 에너지를 받지 못하는 문제가 발생한다. 따라서 고체입자를 효과적으로 활용하기 위해서는 태양열 흡수기 내부의 고체 입자 속도의 제어와 이에 따른 열전달 효과를 분석할 필요가 있다.

Received: May 18, 2015, Revised: June 17, 2015,  
Accepted: June 17, 2015.

\* Corresponding author, E-mail: sshin@hongik.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.2.046

© KSCFE 2015

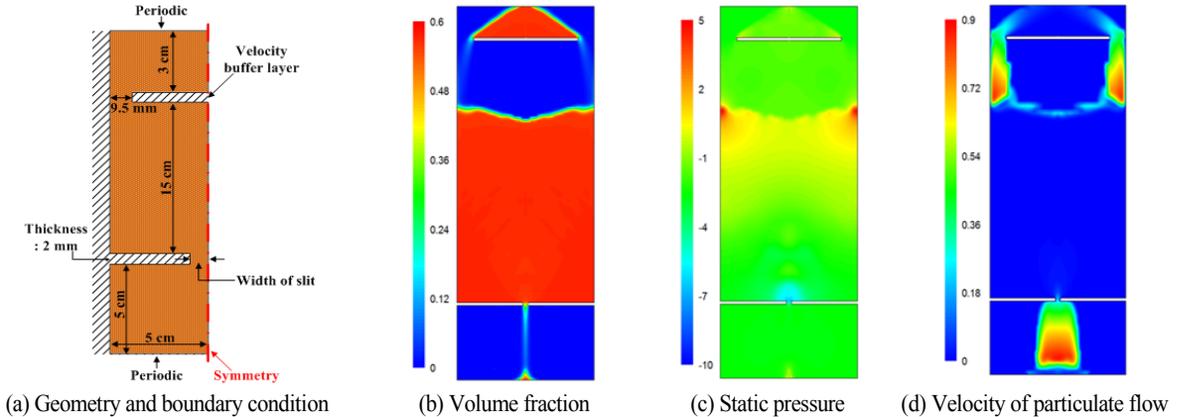


Fig. 1 Simulation geometry and a representative result

Chen et al.[3]은 태양열 흡수기 내부의 고체 입자 부피 비율이 매우 낮은 경우 속도 및 열 분포를 수치해석을 이용하여 해석하였다. Grenal[4]는 태양열 흡수기 내부에 고체 입자만 있는 경우를 단상 유동으로 가정하여 고체 입자의 크기, 노출시간에 따라 속도 분포와 온도분포를 연구하였다. Nathan et al.[5]은 고체 입자가 사용되는 태양열 흡수기 내부를 다상 유동으로 가정하였고 실험의 속도와 온도 분포 비교를 통하여 직접 개발한 수치모델의 유효성을 검증하였다. Lee et al.[6]은 다공성 매질을 사용하여 고체 입자의 낙하속도를 제어하는 연구를 수행하였다. 상용소프트웨어를 이용하여 고체 입자 유동을 분석하였고 실험과 비교하여 개발된 수치모델의 정확성을 제시하였다.

본 연구에서는 Lee et al.[6]의 연구에서 사용된 고체 입자의 유동을 묘사하는 모델을 기반으로 입자묘사에 필요한 수치모델들에 대한 추가 연구를 진행하였다. 해석 프로그램으로 사용한 상용전산수치해석 프로그램인 FLUENT에서의 고체 입자의 유동에 영향을 주는 수치해석 모델과 관련한 추가적인 영향들을 파악하고, 질량 유량에 미치는 영향을 확인해 보았다. 기존 연구[6]의 경우 물리적 타당성에 근거하여 선택된 기준모델에 대해서 실험과의 비교를 통해 수치방법의 타당성을 확인하는 데 주요 목적이 있었다. 본 연구에서는 보다 다양한 속도 저항층 형상(메쉬, 다공성물질 등) 및 추가 복사열 전달 해석을 위해서 기타 선택 가능한 모델들의 영향을 파악하는 데 그 주안점을 두고자 한다. 또한 추후 속도 저항층의 효과적 설계를 위하여 고체 입자 유동에 영향을 주는 주요 입자물성치의 민감도를 파악해 보았다.

## 2. 수치 해석 모델

본 연구에서는 공기와 고체 입자가 같이 흐르는 다상유동

을 묘사하기 위해 Eulerian-Eulerian two-fluid models을 이용한 수치모델을 개발하였다. 고체 입자를 표현하는 방법에는 고체 입자의 움직임에 직접 추적하는 Discrete Element Method (DEM)와 공기와 고체 입자의 상이 완전히 섞여진 상태로 고려하는 Eulerian-Eulerian two-fluid models이 있다. 태양열 흡수기 내부에서 고체 입자의 유동을 제어하기 위해 속도 저항층(다공성 물질, 메쉬와이어 등)을 사용하게 되며, 이에 따라 속도 저항 근처에서 고체 입자가 차지하는 부피 비율이 커지게 된다. 일반적으로 고체입자가 차지하는 부피비율이 큰 유동의 경우 입자수의 증가로 인해서 Eulerian-Eulerian two-fluid models이 계산이 용이하다. 이는 2개의 상을 연속체처럼 간주하여 계산이 진행되는데 고체 입자를 유체로 가정하여 해석하기 때문에 특히 복잡한 형상에서 보다 효과적인 계산이 가능하게 된다. 본 연구에서는 각각의 입자에 대한 연속 방정식과 운동량 방정식으로 식 (1), (2)를 사용하였다. 식 (2)에서 사용되는  $\nabla p$ 를 통해서 고체입자의 압력분포를 표현가능하게 하고 교환 계수  $K_{pq}$ 를 이용하여 유체와 고체 입자간의 점성과 항력을 고려하게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q v_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q v_q) \\ = \alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_q \rho_q g + \sum_{p=1}^n K_{pq}(v_p - v_q) \end{aligned} \tag{2}$$

본 연구에서 사용된 수치모델의 형상은 Fig. 1과 같다. 좌우가 대칭인 점을 이용해서 오른쪽 변을 기준으로 대칭조건을 사용하였다. 계산형상의 아래쪽에 슬릿형상의 속도 저항층이 존재한다. 고체입자가 속도 저항층 위쪽에 쌓이게 되고 슬릿을 통과하는 질량 유량이 정상 상태가 될 때 까지 계산을 진

행하였다. 질량 유량이 정상상태가 되기 위해서 윗면과 아랫면을 이어주는 주기조건을 이용하였다. 주기조건을 통해 아래로 떨어진 입자들이 다시 위 경계면으로 연결된다. 다만 주기조건으로 인해 슬릿을 통과해서 떨어지는 고체 입자의 속도가 가운데로 물리면서 빨라지기 때문에, 입구에서의 속도를 제어하기 위해서 계산영역 위에 속도 완충층을 추가하였다. 나머지 면들은 모두 벽면으로 고정하였다. 사용한 격자는 10,000 ~ 40,000개까지 민감도 계산을 진행해보았고, 질량유량에 큰 변화가 없어서 10,000개의 격자를 이용하여 계산을 진행하였다.

초기 고체 입자의 양은 계산 공간 전체에 대해 부피비율 0.3으로 설정하였다. 계산에 사용된 고체 입자의 종류는 fracking sand로 실제 실험에서 사용된 입자이다. 고체 입자의 지름은 0.229 mm, 밀도는 2600 kg/m<sup>3</sup>, 최대 충전률은 0.6, 입자간 충돌 계수는 0.9이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치 해석 모델 비교 및 검증

상용전산수치해석 프로그램 FLUENT의 Eulerian-Eulerian two-fluid models을 사용하여 고체 입자를 표현하기 위해서는 고체 입자의 특성을 정확히 수치모델로 표현해야 한다. 특히 Eulerian-Eulerian two-fluid models에서 중요하게 선택해야 하는 수치모델에는 고체 입자의 점성과 항력, 고체 압력, 지름 분포 함수 등이 있다. 이 수치모델들은 지배방정식에 소스항으로 고려되어 고체 입자가 유체 유동처럼 움직이게 표현해준다. FLUENT에서 고체 입자의 점성과 항력의 관계를 표현하는 모델에는 Gidaspow, Wen-yu, Syamlal-et-al이 있다. 이 모델들은 식 (2)에서 유체-고체 교환 계수  $K_{PM}$ 를 구하는 방법이다. 교환 계수는 Re 수와 입자 지름의 함수로 각 모델을 통해 다른 값을 갖는다. 고체 압력을 표현하는 방법으로는 lun-et-al,

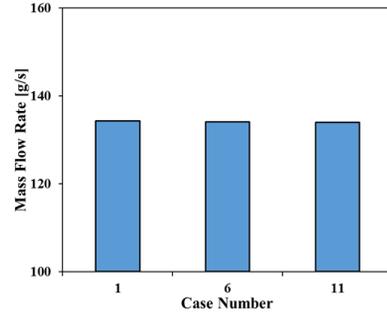


Fig. 2 Comparison of mass flow rate from different granular drag and viscosity model

Syamlal Obrien, Ma-Ahmadi가 있다. 고체입자가 영향을 미치는 영역을 나타내는 지름 분포 함수에는 lun-et-al, Syamlal Obrien, Arastoopour 모델이 사용가능하다. 고체 압력 과 지름 분포 함수 모델은 식 (2)의  $\nabla p$ 를 나타내기 위한 방법이다. 각 모델들은 물리적으로 타당한 상황에 각각의 방법들을 적용하여야 하며 각 모델의 상세한 사용과 설명은 ANSYS Fluent theory guide에서 확인할 수 있다[7]. 또한 각각의 고체 입자의 물성을 나타내는 방법들은 복합적으로 사용될 수 있다.

본 연구에서 사용되는 수치형상을 고려할 때, 입자의 부피 비율이 상당히 큰 경우이기 때문에 고체입자 점성 및 항력모델로 Gidaspow와 고체 압력, 지름분포함수로 lun-et-al 모델을 기본으로(Table 1에서 case 1에 해당함) 설정하였다[6]. 또한 다른 수치모델들을 복합적으로 사용한 다양한 경우에 대해서, 수치모델이 유동에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 다른 모델들을 복합적으로 사용한 다양한 경우에 따라 슬릿을 통과하는 질량유량 값의 변화를 파악하였다.

먼저 고체 입자의 점성을 표현하는 방법은 항력을 표현하

Table 1 Case study of model combinations of granular flow

Test Case	Viscosity Model	Drag Model	Solid Pressure Model	Radial Distribution Model	Mass flow rate[g/s]
1	Gidaspow	Gidaspow	lun-et-al	lun-et-al	134.2
2	Gidaspow	Gidaspow	Syamlal Obrien	lun-et-al	132.6
3	Gidaspow	Gidaspow	Ma-Ahmadi	Ma-Ahmadi	133.0
4	Gidaspow	Gidaspow	lun-et-al	Syamlal Obrien	135.9
5	Gidaspow	Gidaspow	lun-et-al	Arastoopour	134.2
6	Gidaspow	Wen yu	lun-et-al	lun-et-al	134.1
7	Gidaspow	Wen yu	Syamlal Obrien	lun-et-al	131.5
8	Gidaspow	Wen yu	Ma-Ahmadi	Ma-Ahmadi	136.5
9	Gidaspow	Wen yu	lun-et-al	Syamlal Obrien	142.1
10	Gidaspow	Wen yu	lun-et-al	Arastoopour	138.5
11	Syamlal-et-al	Syamlal-et-al	lun-et-al	lun-et-al	134.0
12	Syamlal-et-al	Syamlal-et-al	Syamlal Obrien	lun-et-al	131.5
13	Syamlal-et-al	Syamlal-et-al	Ma-Ahmadi	Ma-Ahmadi	137.4
14	Syamlal-et-al	Syamlal-et-al	lun-et-al	Syamlal Obrien	133.4
15	Syamlal-et-al	Syamlal-et-al	lun-et-al	Arastoopour	136.9

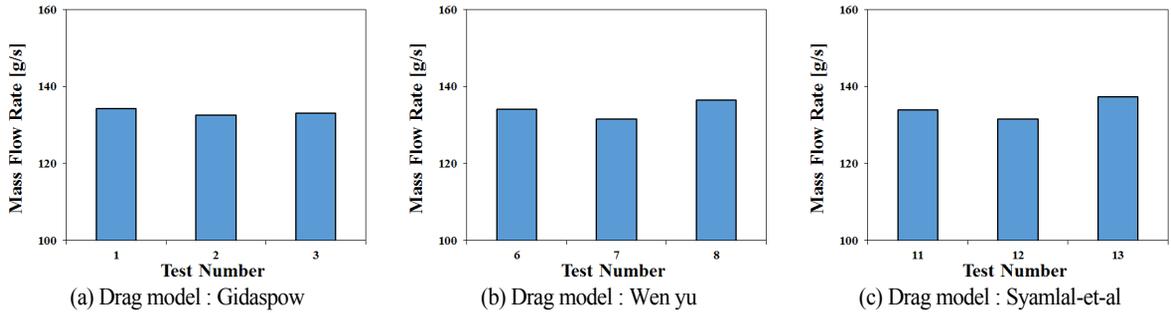


Fig. 3 Comparison of mass flow rate from different solids pressure model

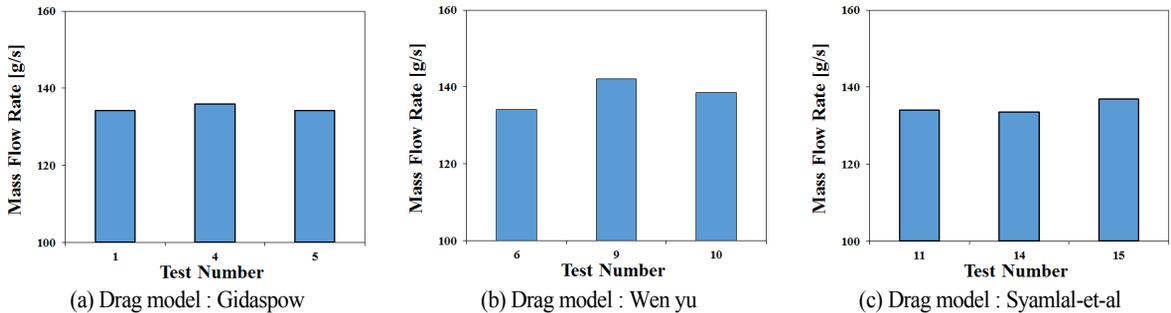


Fig. 4 Comparison of mass flow rate from different radial distribution function model

는 방법과 연관이 있다. 따라서 항력 모델에 따라서 입자의 점성을 표현하는 방법이 결정 되는데 고체 입자와 공기 사이의 항력을 표현하는 모델의 영향에 대한 테스트는 Table 1에서 1, 6, 11의 경우이다. 본 연구에서 사용하는 형상은 속도 저항층 근처에서 높은 고체 입자의 부피 비율을 갖게 된다. Gidaspow는 고체 입자가 높은 부피 비율을 갖는 경우 적합한 방법이라고 알려져 있다[8]. 그리고 Gidaspow를 사용하는 경우 고체 입자의 점성을 계산 모델도 Gidaspow로 짝을 이루어 계산하여야 한다. Gidaspow를 기준 모델로 선택하여 계산하였고 고체 입자 유동의 영향을 파악하기 위해서 슬릿 출구에서의 질량 유량을 측정 하였다. 다른 항력 모델인 Wen-yu의 경우 고체 입자의 부피 비율이 기체의 부피 비율보다 작은 경우에 사용되고, Syamlal-et-al은 기체와 고체의 다상유동의 경우 크게 제약받지 않고 사용된다. Fig. 2에 각 점성과 항력 모델에 따른 결과를 나타내었다. Fig. 2의 결과를 비교해보면 항력 모델에 따라서 고체 입자의 질량 유량이 거의 바뀌지 않은 것을 확인할 수 있다.

고체 압력을 표현하는 모델은 고체 입자 유동의 압력 분포를 계산하고 고체 입자들 간의 반응으로 생기는 항력을 나타낸다. 고체 압력은 물리에너지와 충돌에너지로 구성되어있고 표현 방식에 따라서 Table 1의 1, 2, 3과 같이 3종류로 나뉘진다. lun-et-al은 기본적인 모델로 물리에너지와 충돌에너지의 2개의 영향을 모두 고려한다[9]. Syamlal Obrien은 고체 입자의

충돌에너지의 영향만을 반영한다. Ma-Ahamadi 방법은 물리에너지와 입자의 충돌에너지에 추가적으로 입자 사이의 마찰 점성을 넣어서 계산한다. 가장 일반적인 경우인 lun-et-al로 기준을 정하여 계산을 진행하였고 항력 모델과 점성 모델은 Gidaspow인 경우를 비교하였다. 추가적으로 Syamlal Obrien 방법과 Ma-Ahamadi 방법이 고체 입자의 질량 유량에 미치는 영향을 확인하기 위해 계산하였고 Fig. 3(a)에 그 결과를 나타냈다. 계산 결과는 3개의 다른 고체압력모델에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이 외에도 점성과 항력 모델을 바꿔가면서 위의 과정을 반복하였다. 항력 모델이 Wen-yu인 경우의 결과는 Fig. 3(b)이고 Syamlal-et-al인 경우는 Fig. 3(c)이다. 다른 항력 모델이 적용되는 경우에 고체 입자 유동의 질량 유량에 차이가 나고 경향이 다소 달랐지만 차이 값이 매우 작아서 큰 영향이 없는 것으로 간주할 수 있다. 이는 제작한 형상에서는 큰 고체입자 비율로 인해서 고체 압력에서 물리에너지의 영향과 충돌에너지의 영향이 상대적으로 작아서 질량 유량에 크게 차이를 주지는 않는 것으로 파악되었다.

고체 입자들 사이의 충돌영향을 보정해주는 역할을 하는 지름 분포 함수는 Table 1의 1, 4, 5로 3개의 종류가 있다. Syamlal Obrien의 경우 hard sphere 혼합물의 경우 적합하며 lun-et-al과 비슷한 모델이다. Arastoopour의 경우 입자의 부피 비율이 매우 큰 경우 사용하기 때문에 각 모델의 영향을 확인할 필요가 있다. 각 모델의 영향을 Fig. 4(a)에 질량 유량으

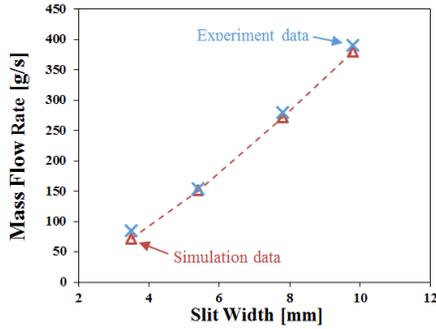


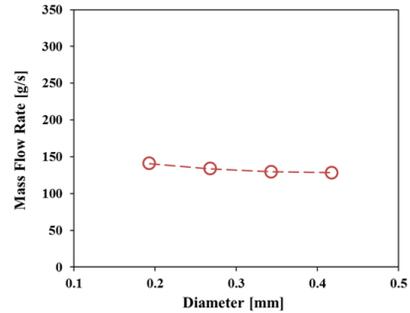
Fig. 5 Comparison between experiment and numerical result for the mass flow rate through varying slit

로 비교하였다. 결과를 확인하면 hard sphere 개념을 이용한 Syamlal Obrien 모델의 결과가 다른 2개의 모델보다 약간 큰 값을 갖으나 그 차이가 작다. 그리고 Arastoopour 모델의 경우 물리적으로 타당하지만 그 차이가 lun-et-al과 비교하여 작기 때문에 일반적으로 사용되는 lun-et-al을 기준모델로 정하였다 [9]. Wen-yu의 항력 모델을 갖는 경우 결과는 Fig. 4(b)이고 Syamlal-et-al의 경우는 Fig. 4(c)이다. 각 항력 모델에 따라서 약간 다른 경향을 갖는 것을 확인을 할 수 있다.

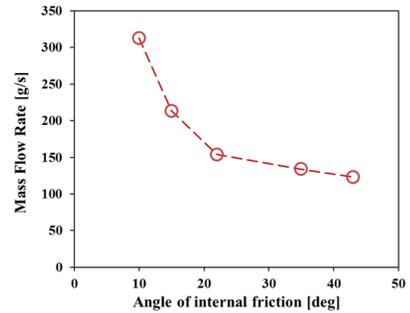
본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 고체입자가 차지하는 부피 비율이 큰 경우이다. 종합적인 결과 분석으로부터 추가적인 모델 변화에 따라 질량유량의 변화가 크게 없다는 것을 확인하였다. 앞서 정한 기준모델(항력과 점성 모델은 Gidaspow, 고체 압력 및 지름 분포 함수 모델로 lun-et-al)을 확정하고, 그 정확성을 파악하기 위해서 실험을 진행하였고[6] 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 속도 저항층의 슬릿 너비를 3.5 ~ 9.8 mm로 바뀌가면서 질량 유량의 변화를 확인하는 실험을 수행하였고 수치 해석 모델 또한 슬릿 너비 변화를 통해서 질량 유량 변화를 확인하였다. 보다 자세한 실험장치 및 절차는 Reference[6]에서 확인할 수 있다. 실험과 개발한 모델과의 질량유량의 오차는 5% 미만으로 매우 정확한 것을 확인하였다. 본 연구에서 슬릿의 간격을 변화하여 측정된 실제 질량 유량의 운용범위는 50 ~ 400 g/s 이다. 실험 시 측정오차는 대략 최대 6% 정도이고, 수치해석 결과의 경우 Table 1에서 확인할 수 있듯이 전체 평균값으로부터 최대 5% 정도 차이를 나타낸다. 따라서 모델들의 선택에 따른 결과변화가 실험오차 근처가 되기 때문에, 고체 입자의 부피비율이 큰 경우 모델변화에 대한 효과는 중요하지 않음을 확인하였다.

### 3.2 주요 변수의 민감도 해석

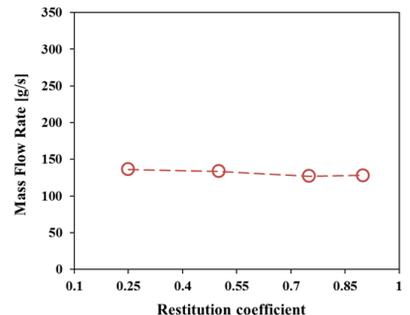
본 연구의 목표인 고체 입자의 속도 제어를 위해서 효과적인 지배변수를 구성하고 이를 통해 적절한 성능변화를 확인해야한다. 형상적인 측면에서 슬릿의 너비를 변화시키는 것이



(a) Diameter



(b) Angle of internal friction



(c) Restitution coefficient

Fig. 6 Effect from particle characteristics on the mass flow rate

매우 큰 영향을 미치는 것을 실험을 통해서 확인하였다. 따라서 추가적인 속도 제어를 위해서는 고체 입자의 특성에 따른 속도 변화를 파악할 필요가 있다. 이런 기초 계산을 통해서 차후 경제적이고 효율적인 실험과 설계에 도움이 될 것이다.

본 연구에서 기초적으로 파악된 고체 입자의 유동에 크게 영향을 주는 특성은 입자의 지름, 내부마찰각(angle of internal friction), 입자간 충돌 계수이다. 각 물성치의 영향을 파악하기 위해서 형상은 위에서 개발한 모델과 동일하게 사용하고, 점성과 항력들의 모델은 기준모델을 사용하였다. 계산의 조건을 동일하게 하기 위해서 9.8 mm의 슬릿을 통과하게 하였고 슬릿위에 쌓이는 고체 입자의 높이를 같게 하여서 압력을 비슷하게 유지시켰다. 결과는 앞서 동일하게 슬릿을 통과하는 고체 입자의 질량 유량을 측정하였다.

첫 번째로 고체 입자의 지름에 대한 영향을 파악하였다. 입자의 지름을 0.193 mm에서 0.343 mm까지 바꾸면서 질량유량을 확인해 보았다. Fig. 6(a)가 입자의 지름에 따른 질량 유량 그래프이다. 결과 그래프를 보면 지름이 커지면서 질량유량이 감소하는 경향을 나타낸다. 하지만 질량 유량의 변화폭이 10 g/s로 거의 없는 것을 알 수 있다. 결과를 보면 입자의 지름 변화는 슬릿위에 쌓이는 고체 입자에 가하는 힘이나 속도에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인된다.

두 번째로 확인한 고체 입자의 물성치는 내부마찰각이다. Fig. 6(b)는 내부마찰각의 값을 10 ~ 45까지 변화시키면서 질량 유량의 변화를 확인한 것이다. 내부마찰각은 밀집된 고체 입자 사이에서 전단응력에 대한 저항을 나타내는 값으로, 입자들을 원뿔 형태로 쌓이는 경우 원뿔과 지면이 이루는 각도를 통해 간접적으로 측정가능하다. 그림에서 확인할 수 있듯이 내부마찰각도가 증가함에 따라서 질량 유량은 크게 감소한다. 특히 10 ~ 20 사이에서 감소폭이 크게 나타나고 점점 커질수록 수렴하는 경향을 보인다.

마지막으로 Fig. 6(c)에 내부 충돌 계수에 따른 질량유량의 변화를 보았다. 충돌 계수는 입자들 간의 충돌을 나타내는 상수이고, 그래프를 보면 충돌 계수가 증가함에 따라서 질량 유량이 감소하게 된다. 이는 충돌계수가 증가함에 따라 입자들 간의 충돌이 더 활발해지고 그에 따라 유동저항이 증가한 것으로 분석된다. 하지만 충돌 계수가 변함에 따라서 변화폭이 그리 크지 않는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Eulerian-Eulerian two-fluid models을 이용하여 공기와 고체 입자가 같이 움직이는 다상 유동을 모사하는 2차원 모델을 개발하였다. 그리고 Granular method에서 고체 입자 유동을 유체처럼 표현하는데 필요한 입자의 점성과 항력, 고체 압력, 지름 분포 함수의 타당한 모델 선택과정을 보았다. 각각 Gidaspow(입자 점성과 항력)[8], lun-et-al(고체 압력)[9], lun-et-al(지름 분포 함수)[9]을 기준모델로 선택하였고 그 외의 모델들의 특징과 고체 입자의 질량 유량에 주는 영향을 살펴 보았다. 기준 모델 외의 다른 모델들의 복합적인 영향들이 있었지만 이는 고체 입자의 질량 유량에 주된 영향을 주지는 못하였다. 이는 고체 입자의 특성을 표현하는 방법들의 영향이 큰 고체입자 부피비율로 인해 그리 크지 않다는 것을 나타낸다. 본 연구와 비슷한 형상적 특성(고체입자의 부피비율이 높은 경우)을 갖는 2유체 유동장을 해석하는 경우에 본 연구의 내용을 참고하여 적절한 모델 선택이 가능할 것이다.

그리고 기준으로 선택한 모델의 유효성을 검증하기 위해서 슬릿 너비를 바꿔가는 실험을 진행하였고 개발한 모델과 질

량 유량을 비교한 결과 오차가 5%아래로 매우 정확한 것을 확인하였다. 또한 고체 입자 유동에 영향을 주는 물성을 파악하기 위해서 민감도 해석을 진행하였다. 실질적으로 고체 입자의 물성치가 질량 유량에 주는 영향은 내부마찰각을 빼면 그 영향이 모두 미미한 것을 확인하였다.

#### References

- [1] 2014, Hong, H., Peng, S., Zhao, Y., Liu, Q. and Jin, H., "A Typical Solar-coal Hybrid Power Plant in china," *Energy Procedia*, Vol.49, pp.1777-1783.
- [2] 2014, Golob, M., Jeter, S., Abdel-Khalik, S.I., Sadowski, D., Al-Ansary, H. and El-Leathy, A., "Development and design prototype 300 kW-Thermal high temperature particle heating concentrator solar power system utilizing thermal energy storage," *Proceedings ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability and 12th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference*, Boston, USA.
- [3] 2006, Chen, H., Chen, Y., Hsieh, H-T. and Siegel, N., "Computational fluid dynamics modeling of gas-particle flow within a solid-particle solar receiver," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.129, pp.160-170.
- [4] 2009, Grena, R., "Thermal Simulation of a Single Particle in a Falling-particle Solar Receiver," *Solar Energy*, Vol.83, pp.1186-1199.
- [5] 2010, Nathan P.S., Clifford, K.H., Siri, S.K. and Greogory, J.K., "Development and Evaluation of a Prototype Solid Particle Receiver : On-Sun Testing and Model Validation," *Journal of solar energy engineering*, Vol.132.
- [6] 2015, Lee, T., Lim, S., Shin, S., Sasowski, D., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S. and Al-Ansary, H., "Numerical simulation of particulate flow in interconnected porous media for central particle-heating receiver applications," *Solar Energy*, Vol.113, pp.14-24.
- [7] ANSYS Academic Research, Help System, *Fluent Theory Guide*, ANsys Inc.
- [8] 1992, Gidaspow, D., Bezburuah, R. and Ding, J., "Hydrodynamics of circulating fluidized beds: Kinetic theory approach," *Proceedings of the Seventh Engineering Foundation Conference on Fluidization*.
- [9] 1984, Lun, C.K.K., Savage, S.B., Jeffrey, D.J. and Chepurniy, N., "Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field," *J. Fluid Mech.*, Vol.140, pp.223-256.