



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

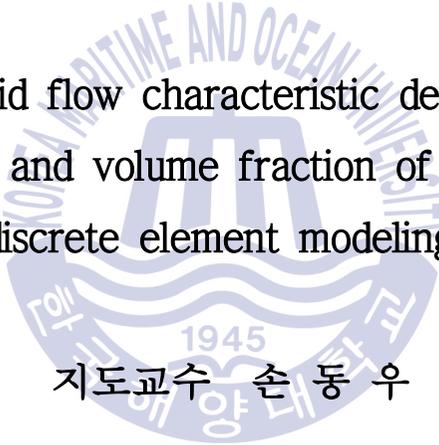
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

고체입자 크기분포와 부피분율을 고려한  
충전층의 이산요소 모델링과 유체유동  
특성 연구

A study on fluid flow characteristic depending on the  
size distribution and volume fraction of particulate solid  
materials using discrete element modeling of packed beds



지도교수 손 동 우

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

박 상 현

본 논문을 박상현의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 조 종 래 (인)

위 원 이 영 호 (인)

위원 손 동 우 (인)

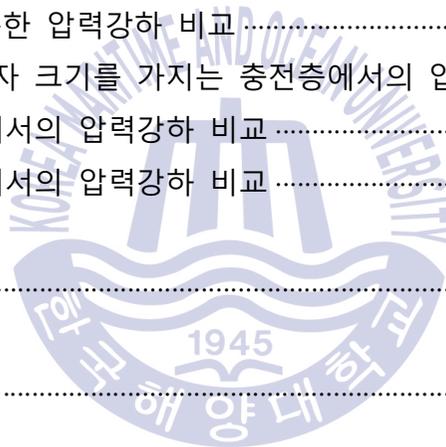
2016년 12월 20일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vi
<b>1. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	2
<b>2. 이산요소법과 충전층 모델링 .....</b>	<b>3</b>
2.1 이산요소법의 이론 .....	4
2.1.1 헤르츠 접촉 .....	4
2.2 입자 선정 .....	7
2.2.1 정규분포 .....	7
2.2.2 균일분포 .....	8
2.3 부피분율 .....	10
2.3.1 주기경계조건과 부피분율 제어 .....	11
2.3.2 유체 격자망 생성을 위한 겹침 수정 .....	13
<b>3. 전산유체역학을 통한 해석 .....</b>	<b>17</b>
3.1 격자 생성 .....	18
3.2 전산유체역학 해석을 위한 조건 부여 .....	20
3.3 해석결과 .....	22
3.4 해석결과에 따른 압력강하 분석 .....	23

3.5 모델링 유효성 평가 .....	26
3.5.1 도메인 길이에 대한 유효성 평가 .....	25
3.5.2 주기경계조건을 통한 무한영역 모사 적합성 평가 .....	27
<b>4. 충전층의 유체유동 저항에 대한 압력강하 .....</b>	<b>31</b>
4.1 Sauter Mean Diameter .....	32
4.2 수정된 레이놀즈 수 .....	33
4.3 경험적인 압력강하식 .....	34
4.3.1 Ergun's equation .....	34
4.3.2 Kozeny-Carman equation .....	35
4.4 압력강하식을 통한 압력강하 비교 .....	35
4.4.1 동일한 입자 크기를 가지는 충전층에서의 압력강하 비교 .....	36
4.4.2 정규분포에서의 압력강하 비교 .....	37
4.4.3 균일분포에서의 압력강하 비교 .....	37
<b>5. 결 론 .....</b>	<b>39</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>41</b>



## List of Tables

<b>Table 1</b> Particle size according to uniform distributions with two, four and eight levels and $\gamma = 0.5$ .....	10
<b>Table 2</b> Helium property .....	20



## List of Figures

<b>Fig. 1</b> Hertz-Mindlin contact model in the DEM .....	5
<b>Fig. 2</b> Histogram of normal distribution of particle diameter in the case of $\gamma = 0.5$ .....	8
<b>Fig. 3</b> Histogram of uniform distribution of particle diameter with eight levels in the case of $\gamma = 0.5$ .....	9
<b>Fig. 4</b> Volume fraction control using the DEM simulation .....	12
<b>Fig. 5</b> Modification of particle overlap in the CFD model .....	14
<b>Fig. 6</b> Error in controlled volume fraction .....	14
<b>Fig. 7</b> Mesh configuration for CFD simulation .....	18
<b>Fig. 8</b> Periodic boundary condition of CFD model .....	19
<b>Fig. 9</b> Boundary condition of packed beds .....	20
<b>Fig. 10</b> Convergence of CFD results .....	21
<b>Fig. 11</b> Result of velocity and pressure using CFD simulation .....	22
<b>Fig. 12</b> Result of pressure drop using CFD simulation .....	23
<b>Fig. 13</b> Evaluation of domain length .....	27
<b>Fig. 14</b> Packed beds composed of 2,000 particles .....	28
<b>Fig. 15</b> Evaluation of periodic boundary condition in terms of pressure drop .....	29
<b>Fig. 16</b> Sauter Mean Diameter of uniform distribution with two levels .....	33
<b>Fig. 17</b> Pressure drop from CFD simulation, compared to Ergun's equation and Kozeny-Carman equation for the same size diameter of particles .....	36
<b>Fig. 18</b> Pressure drop from CFD simulation, compared to Ergun's equation .....	

and Kozeny-Carman equation in the case of normal distribution of particle size with  $\gamma = 0.1$  ..... 37

**Fig. 19** Pressure drop from CFD simulation, compared to Ergun's equation and Kozeny-Carman equation in the case of uniform distribution of particle size ..... 38



# **A study on fluid flow characteristic depending on the size distribution and volume fraction of particulate solid materials using discrete element modeling of packed beds**

Sanghyun Park

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## **Abstract**

Packed beds composed of large numbers of solid particles have been widely used to improve chemical and thermo-mechanical interactions between solid particles and fluid in the field of chemical and nuclear engineering. The objective of this study is to investigate the characteristic of fluid flow through a packed bed, one of important parameters for design and analysis of packed bed systems. In particular, the effects of the size distribution and volume fraction of solid particles on fluid flow are investigated in terms of pressure drop.

Discrete element method (DEM) is first used to generate packing configurations of solid particles, which is an effective method for expressing the behaviors of many solid particles. Varying the sizes of solid particles in packed beds, the packing process are simulated and then the packed bed

models are obtained. The volume fractions of solid particles in packed beds are controlled within the range of 60 to 68%, corresponding to very high values. A diameter of the individual solid particle in the packed beds varies according to the normal and uniform distributions.

Subsequently, based on the packing configurations obtained from the DEM simulations, appropriate meshes of fluid domains are constructed for computational fluid dynamics (CFD) simulations. Through a series of CFD simulations, the tendency of pressure drop for the packed beds are investigated, which depends on the size distribution and volume fraction of the solid particles. The high pressure drop is observed with high volume fraction of solid particles and with small difference in the particle size. In addition, the results from CFD simulations are compared to the Ergun's equation and Kozeny-Carman equation.

**KEY WORDS** : Packed beds 충전층, Discrete element method 이산요소법, Pressure drop 압력강하, Size distribution 크기분포, Volume fraction 부피분율

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

충전층(packed beds)은 많은 수의 고체입자로 이루어진 시스템으로 화학, 원자력, 핵융합 등 다양한 분야에서 널리 사용되는 개념이다. 이러한 충전층 내에서 고체입자의 접촉에 의한 열전달, 응력 특성 등을 해석을 접근하는 연구는 많이 이루어지고 있다.

고체로 이루어진 시스템은 주로 유한요소법(Finite element method, FEM)을 활용하여 접근한다. 하지만, 유한요소법을 통하여 많은 수의 고체입자로 이루어진 시스템으로 적용하기에는 한계가 있다. 예를 들면, 구형의 형태에 대하여 격자 구성에 있어 많은 절점수가 요구되며, 접촉 조건을 부여에도 까다로운 설정을 해야 한다. 그러므로 유한요소법을 사용하여 많은 수의 고체 입자들에 있어 거동을 파악하는데 어려움이 따른다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 이산요소법(Discrete element method, DEM)을 활용하여 연구에 접근하였다. 최근에 이산요소법을 활용하여 고체 입자의 거동을 통한 혼합에 대한 성능 평가가 진행되고 있으며 필터, 촉매, 여과기와 같이 화학적 반응을 증대하는 연구 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 이산요소법을 활용하여 충전층에 대해서 고체 입자 크기를 정규 및 균일 분포 달리하며, 높은 부피 비율에 대해서 접근하여, 상용프로그램 Star-CCM+을 통하여 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)해석을 통하여 유체유동 특성에 대해서 파악하고자 한다.

## 1.2 연구 목적

본 연구에서는 다수의 구형의 고체 입자로 이루어진 충전층에서의 유체유동 특성을 파악하고자 한다. 충전층 수치 모델을 만드는 것은 까다로운 조건이 따른다. 예를 들면 상용프로그램에서 활용하여 부피분을 제어 및 고체 입자 분포를 설정하는 것은 어려움이 따른다. 이를 극복하기 위해 전산기법 중에 하나인 이산요소법을 이용하여 박스형 검사체적에 고체 입자들은 적층하였으며, 박스의 높이 방향의 크기를 줄여나가며 부피분율을 조절하는 작업을 진행 하였다. 그리고 주기경계조건을 부여하는 작업을 통하여 유체 저항에 있어 벽면효과를 배제하여 고체 입자들의 크기 분포에 따른 다양한 충전에 대해서 압력강하를 특성 파악을 위함이다. 이산요소법을 통하여 고체 입자들의 거동을 파악하여 3차원 모델링을 얻는 작업을 하였으며, 전산유체역학은 상용프로그램 Star-CCM+를 이용하였으며, 격자 구성과 해석을 진행하였다.

이전에 연구들을 살펴보면 Tian et al. (2016)와 Einfeld et al. (2001)는 균일한 입자로 이루어진 충전층에서 속도에 따른 유동 저항 특성을 파악하며, 압력강하를 얻는 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 이전 연구들과 달리 상용프로그램으로는 접근하기 힘든 고체 입자 크기 분포를 균일 분포와 정규 분포 관점으로 접근을 하였으며, 높은 부피분율에 해당하는 60~68% 범위에서 해석을 진행하였다. 이후 충전층의 압력강하를 실험적으로 접근하여 식을 얻은 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식의 비교를 하여 검증하는 과정을 가진다.

충전층에서 활용하는 화학, 원자력, 핵융합, 등 다양한 분야에 대해서 고체입자 크기분포에 따른 연구를 진행하게 되는 경우 성능 평가 및 요구 사항의 조건을 본 연구를 통하여 가이드를 제시하고자 한다.

## 제 2 장 이산요소법과 충전층 모델링

이번 장에서는 전산 기법 중에 하나인 이산요소법(Discrete element method, DEM)을 활용하여 다수의 고체입자로 이루어진 충전층에서의 입자 거동을 파악을 하는 작업을 하였다. 2.1절에서는 이산요소법의 정의와 이론에 대해서 파악을 하며, 2.1.1절을 통하여 이산요소법에 적합한 접촉식인 헤르츠 이론 및 고체 입자의 거동이 결정나는 뉴턴 제2법칙에 대해서 설명한다. 2.2절에서는 충전층의 고체 입자에 대하여 개수와 크기를 정의를 하며, 2.2.1절과 2.2.2절을 통하여 충전층의 고체 입자에 대한 크기분포의 종류와 분포수준에 대해서 정의를 하였다. 2.3절에서는 충전층의 부피분율에 대한 정의를 하며, 2.3.1절에서는 in-house code를 통하여 충전층에 대하여 부피분율 제어 및 주기경계조건을 고려하여 고체 입자를 적층하는 작업에 대한 설명을 다루었다. 2.3.2절에서는 전산유체역학을 접근하기 위한 격자구성에서 겹침에 대한 수정의 필요성을 설명하며, 겹침에 대한 수정을 통하여 격자구성 내용을 다루며, 마지막으로 수정된 모델이 부피분율의 변화가 미비한 것을 검증하는 내용을 다루었다. 위 과정을 통하여 이산요소법을 활용한 다양한 크기 분포의 고체 입자를 가진 충전층들을 전산유체역학 해석을 위한 모델링 작업을 진행하였다.

## 2.1 이산요소법의 이론

고체의 거동을 파악하는 전산해석 기법으로 대표적으로 유한요소법(Finite element method, FEM)이 가장 활발하게 쓰이고 있다. 하지만, 다수의 고체입자의 거동을 파악하기 위해서 유한요소법을 사용하는 경우에는 각각의 입자에 조밀한 격자망을 생성함으로써 자유도 증가를 가져오며 해석시간이 많이 걸리는 단점을 가져온다. 이에 적합한 전산해석 기법으로 본 연구에서는 이산요소법으로 선정하였다. 이 기법은 각각의 입자에 대하여 3개의 병진 자유도와 3개의 회전자유도를 부여하여 쉽게 입자 거동을 파악이 가능한 장점을 가지고 있다.

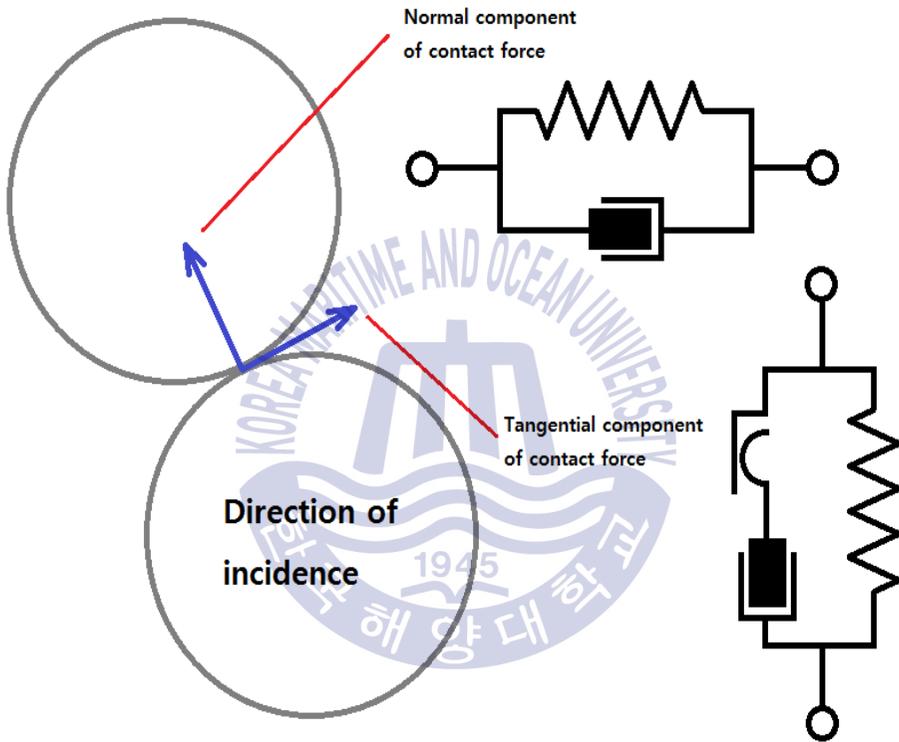
이산요소법은 개별 입자를 탄성체로 가정하고 뉴턴의 제 2 운동법칙을 적용하여 전체적인 고체 입자의 거동을 표현 한다. 최근에 많은 수의 입자의 거동의 특성을 활용하는 연구로 Nag (2013)는 드럼통에서 고체 입자들의 혼합을 통하여 열전달에 대한 문제에 접근을 하는 연구를 진행하였으며, Rahul (2016)은 분체에서의 혼합 성능을 높이기 위한 연구를 진행하는 등 이산요소법을 활용하는 연구들은 많이 진행되는 추세이다.

입자의 접촉에 대한 식은 Hertz-Mindlin 모델, 선형 스프링 모델, Walton Broun 모델 등이 활용되어진다, 본 연구에서는 대표적으로 많이 사용되는 접촉 식으로 Hertz-Mindlin 접촉을 선정하여 입자들의 거동을 파악하였다.

### 2.1.1 헤르츠 접촉

Hertz-Mindlin 접촉은 입자와 입자, 또는 입자와 다른 물체 사이에 발생한 접촉에 의한 발생한 힘을 접선 방향과 법선 방향으로 나누어 계산하는 것으로 Fig. 1와 같이 Spring-dashpot 모델을 사용하며, 법선 방향과 접선 방향의 합으로 고체입자의 거동이 파악이 된다. 아래에서 식 (1)에서 (3)까지는 접선 성분의 힘의 성분들을 구하는 식이며, 식 (4)에서 (6)까지는 법선 방향 성분의 힘의 성분을 구하는 식이다. 위 식들의 접선방향과 법선방향의 힘을 통하여 전체 힘을 구한 최종식은 식 (7)식에 의해서 정리가 된다. 여기에서  $F$  는 힘 성분,  $K$  는

스프링 상수,  $N$  는 댐핑 상수를 의미한다. 아래 첨자  $n$  은 접선 방향,  $t$ 는 법선 방향을 의미하며, 여기에서  $\delta$ 는 입자간의 겹침(overlap),  $v$  는 입자의 속도,  $E$  는 탄성계수,  $R$  은 고체입자의 반지름,  $M$  은 고체 입자의 질량,  $C_{fs}$  는 정마찰계수(static friction coefficient),  $G$  는 전단탄성계수를 의미한다.(Cundall et al. (1979), Kim (2008))



**Fig. 1** Hertz-Mindlin contact model in the DEM

$$F_n = -K_n \delta_n - N_n v_n \quad (1)$$

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{\delta_n R_{eq}} \quad (2)$$

$$N_n = \sqrt{(5K_n M_{eq})} N_{n \text{ damp}} \quad (3)$$

$$F_t = \frac{|K_t \delta_t| C_{ft} \delta_t}{|\delta_t|} \quad (4)$$

$$K_t = 8G_{eq}\sqrt{\delta_t R_{eq}} \quad (5)$$

$$N_t = \sqrt{5K_t M_{eq}} N_{t \text{ damp}} \quad (6)$$

$$F = F_n + F_t \quad (7)$$

위와 같은 식은 대표적인 전산 기법인 유한요소법 방식과 같이 엄격한 접촉 조건을 부여하지 않아도 되는 장점이 있으며, 다수의 고체 입자라도 비교적 절점수가 적어 계산 속도가 빠른 장점을 가지고 있다.

뉴턴 제 2법칙을 적용하여 힘의 합력에 의해서 물체의 거동이 파악 된다. 아래 식을 살펴보면 힘에 대한 합력과 회전에 대한 합력들의 영향이 반영되는 것이 확인 가능하다. 식 (8), (9)는  $a$ 는 가속도,  $\omega$ 는 각속도를 의미한다. 식 (10), (11)에서 이산요소법을 적용하여 힘들의 합력에 의해 입자의 거동이 결정된다.

$$F = Ma \quad (8)$$

$$T = I\omega \quad (9)$$

$$m_i \frac{dv}{dt} = \sum_j F_{ij}^c + \sum_k F_{ik}^{mc} + F_i^f + F_i^g \quad (10)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (11)$$

본 연구에서는 충전층을 구성하는 과정에서 이산요소법을 활용하며, Hertz-Mindlin 접촉식 및 뉴턴 제2 법칙을 통하여 고체 입자의 대한 거동을 파악하였다.(Lee et al (2014), O'sullivan (2011), Zhang et al (2011), Zhu et al (2007))

## 2.2 입자 선정

본 연구에서 충전층내에 고체 입자의 크기 분포에 따라 유체 흐름에 대한 특성을 파악하고자 한다. 상용프로그램을 활용하여 충전층내에 고체 입자의 크기를 다양하게 부여하는 것은 어려움이 따른다. 하지만 본 연구에서는 다양한 입자 분포를 가진 충전층에 대한 압력강하를 비교하고자 한다. 다양한 충전층에서의 고체 입자의 크기 분포는 정규분포와 균일분포에 크게 나누어서 접근을 하였다. 기준입자크기와 입자크기 분포수준에 대해서 정의 할 필요가 있다. 본 연구에서는 기준 입자의 크기는 1 mm 의 지름을 가지며, 표준편차  $\gamma = 0 \sim 0.5$  내에서 충전층을 구성하였다. 고체입자의 개수는 1,000개로 충분한 적층한 통해 충전층으로 정의 될 수 있는 범위에서 연구를 진행하였다.

### 2.2.1 정규분포

정규분포(normal distribution)는 세상의 일어나는 수 많은 현상에 대한 발생 확률이라고 정의되기도 한다. 생산 공정에서 고체 입자 크기의 신뢰도를 의미한다. 정규분포는 가우스 분포라고 칭하기도 하는데, 식 (8)와 같이 표기한다. 여기에서  $\gamma$  는 표준편차 수준을 의미하며,  $m$  은 평균 값을 의미한다. Fig. 2는 고체입자  $D = 1 \text{ mm}$  에 표준편차 수준  $\gamma = 0.5$  부여하였을 때, 1,000개의 입자의 지름의 크기 및 개수의 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 가로축은 표준 편차에 따른 입자의 지름을 세로축은 입자 개수를 의미한다.

$$f(x) = \frac{1}{\gamma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\gamma}\right)^2} \quad (12)$$

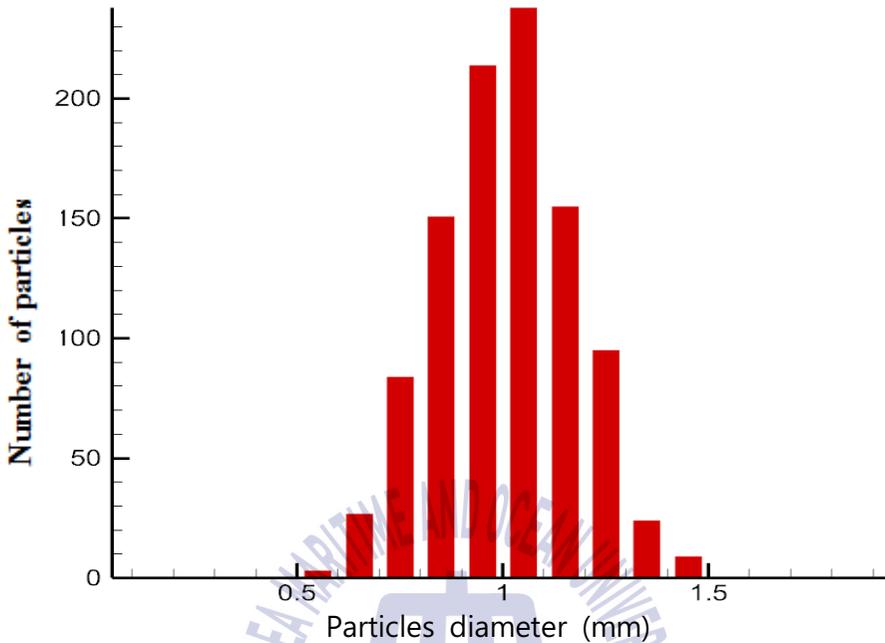


Fig. 2 Histogram of normal distribution of particle diameter in the case of  $\gamma = 0.5$

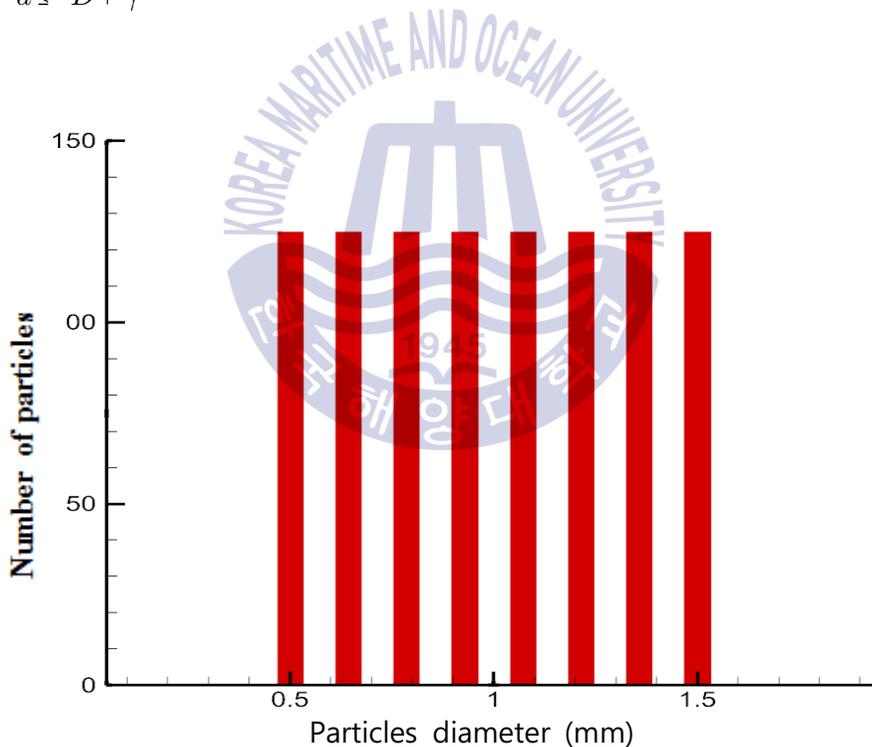
## 2.2.2 균일분포

균일분포(uniform distribution)는 일정 간격의 값을 가지는 분포를 의미하는데, 본 연구에서는 균일분포에 따른 입자지름 크기 차이가 유체유동 특성에 대한 영향을 주는 요소로 접근하였다. 입자 크기의 차이에 따른 유체유동 특성에 있어 영향을 주는 인자를 파악하기 위해서 본 연구에서는 균일분포를 통하여 다양한 충전층을 통한 접근을 진행하였다.

균일분포에 따른 고체 입자 크기 정의는 입자지름의 크기는  $D = 1.0 \text{ mm}$  로 하며, 입자크기 수준  $\gamma = 0 \sim 0.5$  범위내에서 연구를 진행하였으며, 균일분포 수준은 2, 4, 8, 16, 1,000 로 각각 진행하였다. 아래 식 (9)에서  $d$ 는 균일분포의 지름의 범위를 의미하며, Fig. 3은 고체입자  $D = 1 \text{ mm}$  에 입자크기 수준  $\gamma = 0.5$  이고 균일분포 수준은 8로 부여하였을 때, 1,000개의 입자의 지름의

크기 및 개수의 분포를 나타낸 그래프이다. Table 1 살펴보면 입자크기 수준  $\gamma = 0.5$  일 때, 균일분포 수준이 2, 4, 8에 대해 지름과 개수를 명시하였다. 균일분포 수준 2의 경우에는 고체입자 지름이 0.50 mm 와 1.50 mm 가 각각 500개를 가지는 분포이며, 수준 4는 고체 입자 지름 0.50, 0.83, 1.16, 1.50 mm 에 대해서 각각 250개를 분포이다. 마찬가지로 수준 8 에서도 고체 입자 지름 0.50, 0.64, 0.78, 0.93, 1.07, 1.21, 1.35, 1.50 mm 각각 125개를 가진다. 균일분포 수준 16 에서도 같은 16등분하여 균일한 개수의 고체 입자를 부여 하였다. 마지막으로 균일분포 수준 1,000에서는 입자크기 수준  $\gamma$ 의 범위 안에서 고체입자의 크기는 전체 다른 것을 의미한다.

$$D - \gamma \leq d \leq D + \gamma \tag{13}$$



**Fig. 3** Histogram of uniform distribution of particle diameter with eight level in the case of  $\gamma = 0.5$

**Table 1** Particle size according to uniform distributions with two, four and eight levels and  $\gamma = 0.5$

2 Level	4 Level	8 Level
500 particles of $d = 0.5$ mm	250 particles of $d = 0.50$ mm	125 particles of $d = 0.50$ mm
	250 particles of $d = 0.83$ mm	125 particles of $d = 0.64$ mm
500 particles of $d = 1.5$ mm	250 particles of $d = 1.16$ mm	125 particles of $d = 0.78$ mm
	250 particles of $d = 1.50$ mm	125 particles of $d = 0.93$ mm
		125 particles of $d = 1.07$ mm
		125 particles of $d = 1.21$ mm
		125 particles of $d = 1.35$ mm
	125 particles of $d = 1.50$ mm	

### 2.3 부피분율

부피분율(volume fraction)은 정해진 검사 체적에서 고체입자 또는 다른 물체에 대한 부피비를 의미한다. 부피분율의 반대 개념으로 기공률(porosity) 용어도 많이 사용되어 진다. 이들 모두 다공성 재료로 구성되는 촉매 담체, 흡착제, 이온교환 물질, 필터 등에서 많이 쓰이는 표현이다.

아래 와 같이 부피분율은 식 (10)으로 표현된다. 여기에서  $V_f$  는 부피분율,  $V_p$  는 고체입자 혹은 검사체적 내에 있는 물질에 대한 부피,  $V$  는 검사체적을 의미한다.

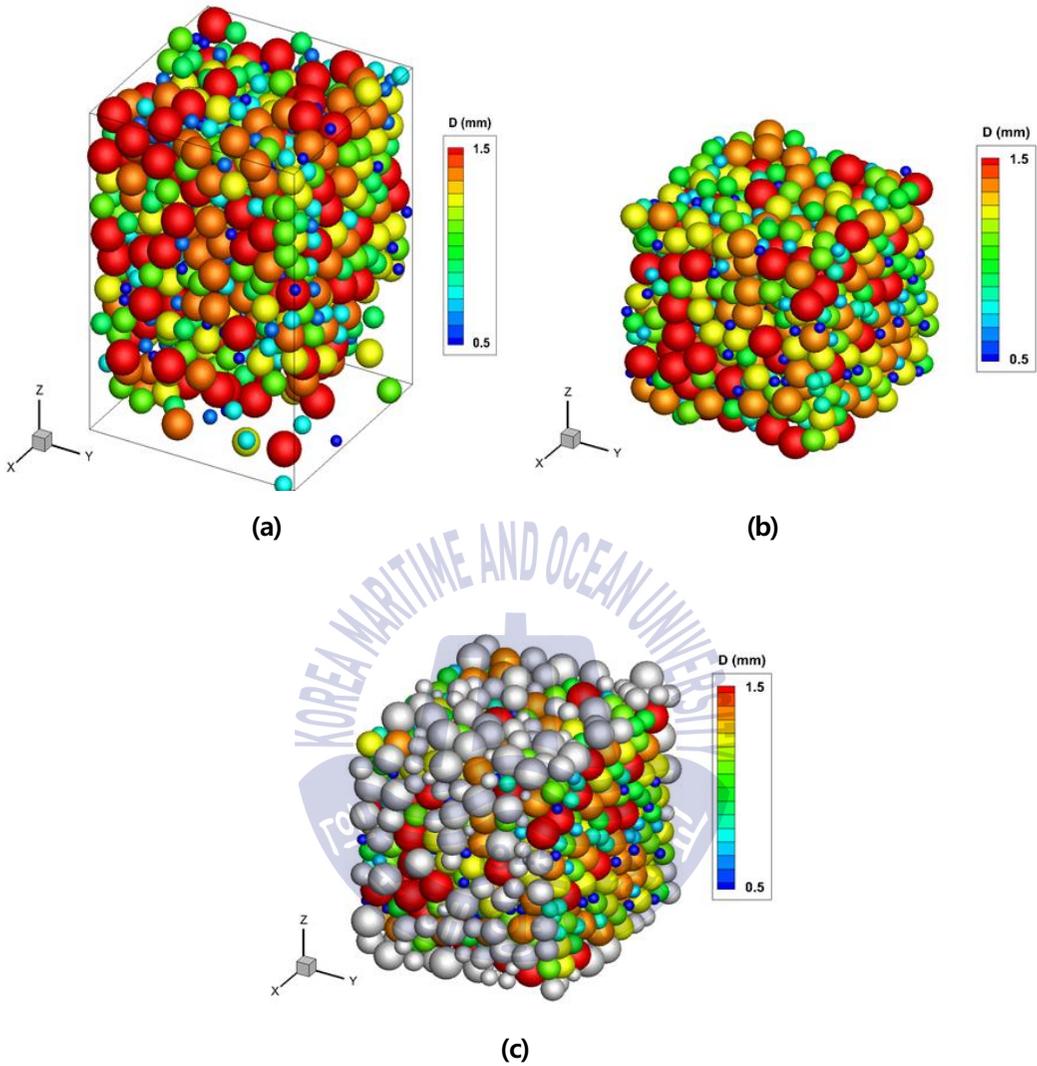
$$V_f = \frac{V_p}{V} \quad (14)$$

본 연구에서 높은 부피분율에 해당하는 60~68%에 상태의 충전층에서 접근하였으며, 이들은 2% 간격을 통하여 60, 62, 64, 66, 68%에 해당하는 부피분율

을 가지고 있으며, 모든 케이스에 대해서 동일하게 적용하였다.

### 2.3.1 주기경계조건과 부피분율 제어

주기경계조건(periodic boundary condition)은 유한영역의 해석을 무한영역으로 확대하여 접근한 것으로 본 연구에서는 충전층에 대하여 주기경계조건을 부여함으로써 무한영역을 간접적으로 접근한다. 또한 주기경계조건을 부여함으로써 전산유체역학 해석에 있어 벽면효과가 배제되게 되는데, 본 연구에서 입자 크기를 다양하게 접근한 충전층에서 압력강하에 대한 접근을 위함이다. 2.3.1절에서는 주기경계조건을 고려하며, 요구되는 부피분율의 충전층 모델의 얻는 과정을 설명하고자 한다. Fig. 4는 입자크기 수준  $\gamma = 0.5$  이며, 균일분포 수준 8의 부피분율 제어를 하는 과정을 보여주는데, 여기에서 그림 (a)에서는 충분한 검사체적에서 1,000개의 입자 배치를 시킨다. 그리고 그림 (b) 와 원하는 부피분율의 모델이 얻어 질 때 까지 z 방향의 크기를 줄인다. 마지막으로 그림 (c)에서는 입구 경계조건(inlet)와 출구 경계조건(outlet)의 조건이 주어지는 z-x 면을 제외한 면에 대해서 주기경계조건을 부여하여 추가적인 입자들을 배치한다. 아래 Fig. 4에서 하얀색 입자들은 주기경계조건에 의해 배치되어진 입자들이다. 이와 같은 과정을 통하여 본 연구에서는 상용프로그램에서 부여하기 힘든 입자 크기의 조건을 정규분포 및 균일분포에 따른 입자를 부여할 수 있으며, 더 나아가 부피분율 검사체적의 크기를 줄여나가며 원하는 부피분율 또한 얻을 수 있었다. 마지막으로 무한영역을 모사하는 주기경계조건을 부여 함으로써 여러 산업분야에서 충전층으로 의미로 사용 가능하다. 여기에서 범례는 입자지름 크기를 의미한다.



**Fig. 4** Volume fraction control using the DEM simulation

위와 같이 이산요소법을 이용한 충전층의 검사체적에 대해서 크기를 조절하는 방식을 통하여 다양한 조건의 관점의 모델을 얻는 과정을 하였으며, 이후 전산유체역학에서도 경계조건에서 주기경계조건을 부여함에 이후 전산유체역학에서 격자구조에 있어, 주기경계면에 대한 격자 매칭이 이루어지게 된다. 결국 전산유체역학 해석에 있어 신뢰성을 높이는 작업이다.

### 2.3.2 유체 격자망 생성을 위한 겹침 수정

위 2.3.1절을 통하여 우리는 원하는 부피분율의 충전층 모델링을 얻어내었다. 전산유체역학 해석진행에 앞서 입자와 입자사이에 격자망의 생성은 어려움이 발생한다. 하지만, 이를 극복하기 위해서 다른 충전층 연구를 살펴보면 Jian (2016)은 입자와 입자사이에 실린더를 넣어서 해결하였으며, 또 다른 연구에서는 작은 부피분율의 모델을 통하여 입자와 입자사이에 겹침을 피하는 방법도 있었다. 본 연구에서는 높은 부피분율의 충전층을 모델링을 하였기에 겹침에 대한 개선이 필요하였다. 또한, 유체흐름의 영향은 입자의 벽면에서 결과에 대한 영향이 지배적이기 때문에 격자의 크기 또한 고려해야되는 어려움이 있었다.

본 연구에서는 겹침에 대한 한계점을 극복하기 위해서 Fig. 5와 같이 과도하게 작은 겹침이 발생한 입자의 크기를 확대하였다. 이때 입자의 크기를 너무 크게 조정하면 당초 모델링된 충전층의 형태를 훼손하게 되므로, 전체적인 부피분율이 거의 변하지 않도록 미세하게 조정하였다. Fig. 6은 위와 같은 과정들은 통하여 얻은 모델들이 실제 원하는 부피분율과의 오차를 나타낸 것이다. 그 그래프에서 범례는 입자크기 수준  $\gamma$ , 가로축은 부피분율을 의미한다. 세로축은 구하고자 하는 부피분율과 겹침에 의해 수정이 이루어져 구해진 부피분율의 모델과의 오차율을 의미한다. 여기에서 (a)는 정규분포에 대한 부피분율 오차를 보여주며, (b)~(f)는 균일분포에 대한 부피분율의 오차를 보여주며, 분포 수준 2, 4, 8, 16, 1,000의 모델에 대해서 비교한 그래프이다.

앞서 가로축은 오차율(error factor)를 뜻하며 이는 (11)와 같이 표현되며, 여기에서  $V_f$  원래 부피분율과  $V_m$  겹침에 의해 수정된 부피분율 사이에 대해서 원래 부피분율에 대한 오차를 의미한다.

$$Error\ factor = \left( \frac{V_f - V_m}{V_f} \right) \times 100 \quad (15)$$

아래 Fig. 6에서 가로축은 부피분율을 의미하며 세로축은 Error factor를 의미

한다. 모든 케이스에 대해서 60, 62%의 부피분율을 가지는 경우에는 입자크기 수준  $\gamma$ 의 상관없이 기준 부피분율에 비해 약 0.7%으로 비교적 크게 나오는 경향이 있었으며, 64%의 부피분율을 가지는 경우에는 입자크기 수준  $\gamma = 0.5$ 인 경우를 제외하고 오차는 거의 없었다. 부피분율 66%를 가지는 경우에는 모든 케이스가 오차가 거의 없었으며, 68%의 부피분율을 가지는 경우에는 오차율이 음수값을 가지지만 매우 작은 수치를 나타냈다.

전체적으로 오차율의 크기가 1% 미만으로 수치로서 겹침에 대하여 수정된 모델링은 조금의 오차를 가지지만 유체유동 특성을 파악하는 과정에서의 영향은 미비하게 나타났다.

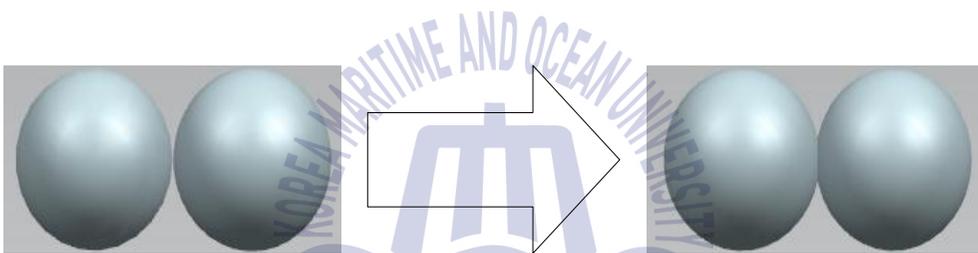
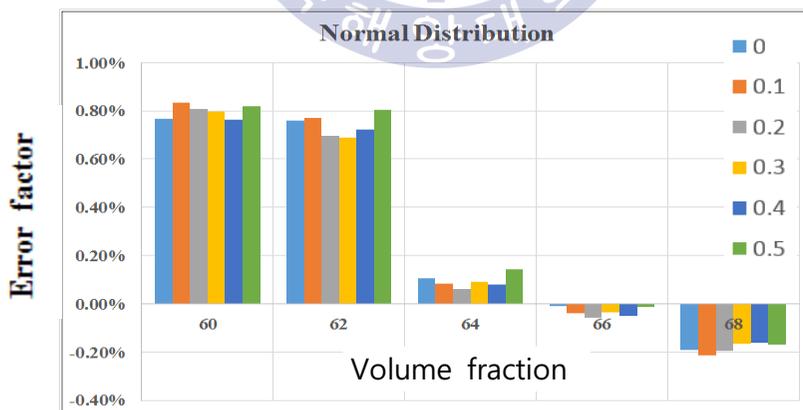
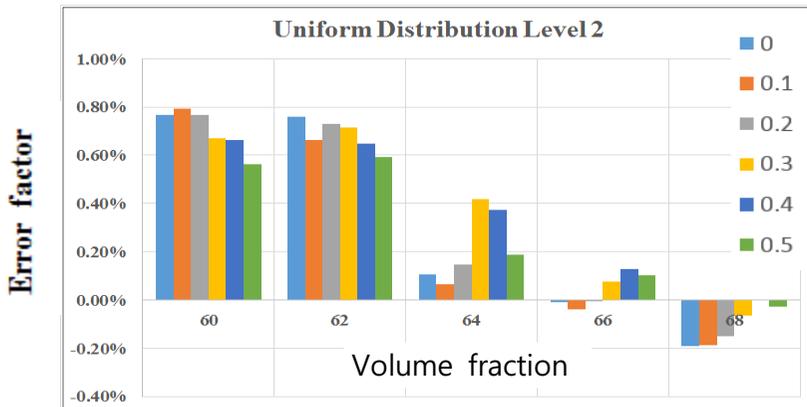


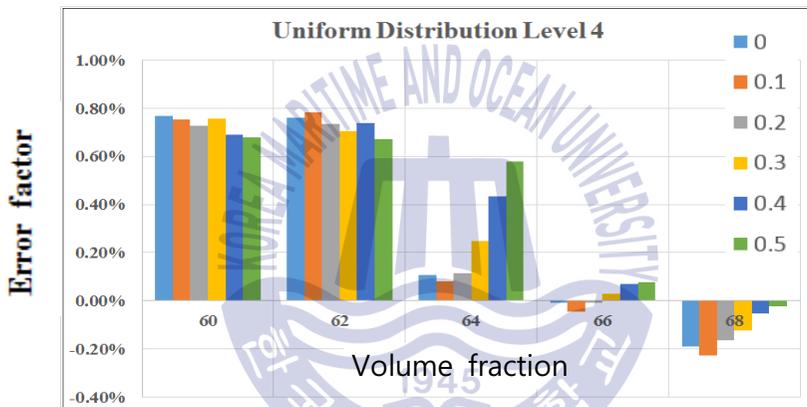
Fig. 5 Modification of particle overlap in the CFD model



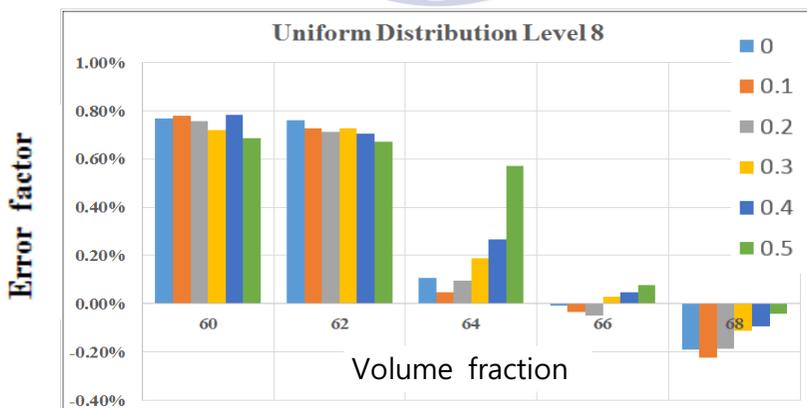
(a) Normal distribution



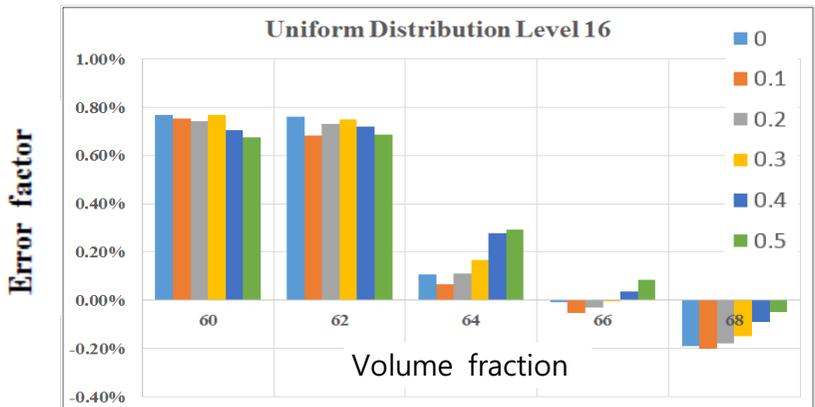
(b) Uniform distribution level 2



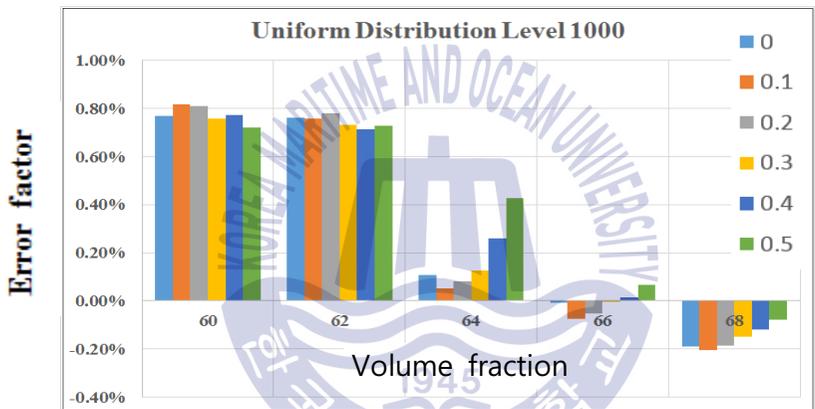
© Uniform distribution level 4



(d) Uniform distribution level 8



(e) Uniform distribution level 16



(f) Uniform distribution level 1,000

**Fig. 6** Error in controled volume fraction

### 제 3 장 전산유체역학을 통한 해석

앞서 제 2 장을 통하여 많은 수로 이루어진 충전층을 이산요소법을 활용하여 접근하였다. 여기에서 고체 입자 크기 분포에 따른 다양한 부피분율의 충전층 모델을 얻는 과정을 진행하였다. 또한, 주기경계조건을 통하여 벽면 효과를 배제하며, 충전층에 의한 유동 특성을 파악이 가능하게 되었으며, 이후 전산유체역학 해석을 진행하기 이전 격자구성을 위하여 입자와 입자 사이에 겹침에 대한 수정 작업을 진행하였다.

제 3 장에서는 위와 같은 과정을 통하여 얻은 충전층 모델을 전산유체역학을 하여 해석하고자 한다. 3.1절에서는 격자 생성과정에서 격자 타입과 크기에 대한 내용 다루었으며, 3.2절에는 전산유체역학 해석을 위한 조건들에 대해서 설명에 대한 내용으로 다루었다. 3.3절에서는 해석결과에 따른 속도 및 압력에 대하여 살펴보았다. 3.4절에서는 해석을 통하여 얻은 결과 값에서 압력강하를 통하여 이를 분석을 하여 유체유동 특성을 파악하는 내용을 다루었다. 3.4절에서는 본 연구에서 접근한 충전층 모델에 대한 검증에 대한 내용으로 적합성평가를 하는 과정으로 구성하였다.

### 3.1 격자 생성

본 연구에서는 전산유체해석을 위하여 상용프로그램 Star-CCM+를 활용하였다. 위 제 2 장을 통하여 이산요소법을 통하여 얻은 3차원 모델링을 격자를 구성하는데 여기에서 다면체 요소를 사용하였으며, 벽면에 대한 프리즘 격자에 대해서는 3층으로 부여 주었다. 이전에 이산요소법을 통한 충전층 모델링을 구성하는 과정에서 주기경계조건을 고려하여 3차원 모델링을 얻었기에 전산유체 역학에서 주기경계조건면들에 대해서 격자는 매칭을 가져왔으며, 이는 해석에 대해서 신뢰도를 높여주는 장점을 가져왔다.

아래에서 Fig. 7 에서는 격자 구성을 보여주며, Fig. 8 를 통하여 격자 구성에서 주기경계조건을 부여한 것을 확인 가능하다. 여기에서 (a)는 y-z 면에 대하여 주기경계조건을 (b)는 x-y 면에 대하여 주기경계조건을 부여하여 격자를 구성한 것이 확인 가능하다. 이 과정을 통하여 얻은 모델을 통하여 유한 영역의 3차원 모델을 주기경계조건을 통하여 무한 영역을 모사하여 해석 한 것을 의미한다. 아래 Fig. 7, 8 은 균일분포 수준 2, 입자크기 수준  $\gamma = 0.2$  , 부피분율 62%의 모델의 격자망이다.

STAR-CCM+

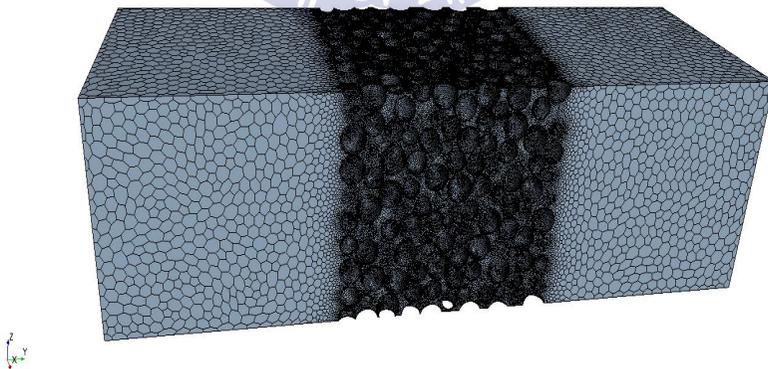


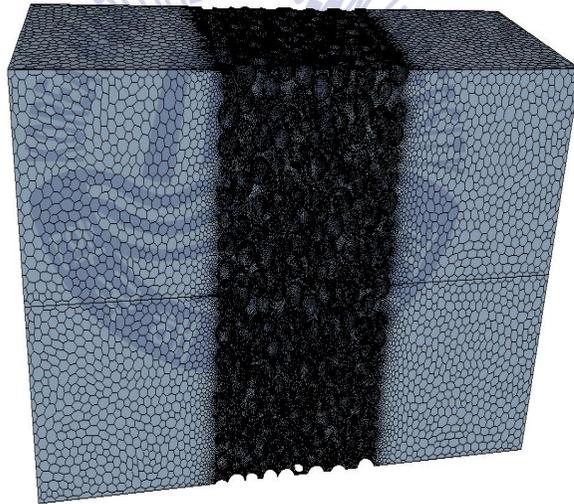
Fig. 7 Mesh configuration for CFD simulation

STAR-CCM+



(a) y-z periodic

STAR-CCM+



(b) x-y periodic

**Fig. 8.** Periodic boundary condition of CFD model

### 3.2 전산유체역학 해석을 위한 조건부여

본 연구에서는 비교적 느린 속도에 해당하는 층류조건에 의한 유체 유동을 파악하고자 하였다. 해석에 진행에 앞서 기체는 Table 2 와 같이 화학적 반응이 나타나지 않은 헬륨(He)을 사용하였다. Fig. 9와 같이 경계조건은 기체가 흐르는 방향을 제외한 x-y, x-z 면에 대해서 주기경계조건을 부여하며, 입구 경계조건(inlet)은  $0.05 \text{ m/s}$  이며, 출구 경계조건(outlet)은  $0 \text{ Pa}$  이다. 마지막으로 정상상태(Steady State) 상태를 가정하였다.

Table 2 Helium property

Material	Property
Density	$0.16352 \text{ kg / m}^3$
Dynamic viscosity	$1.9891 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

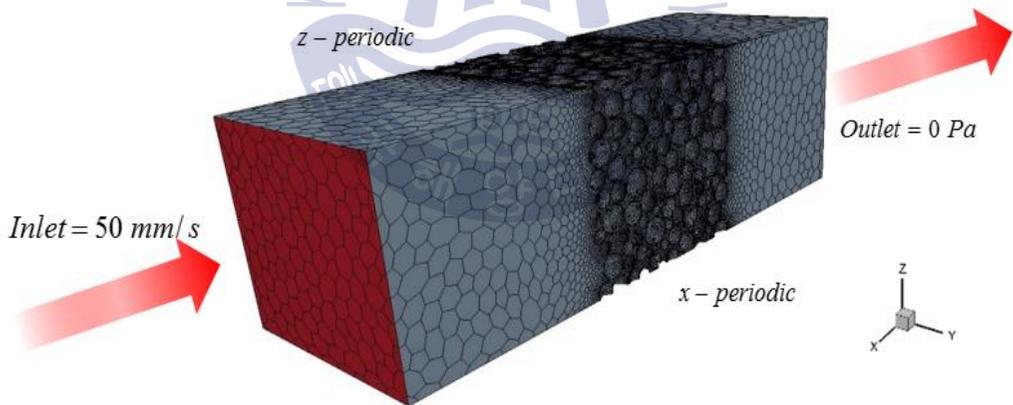
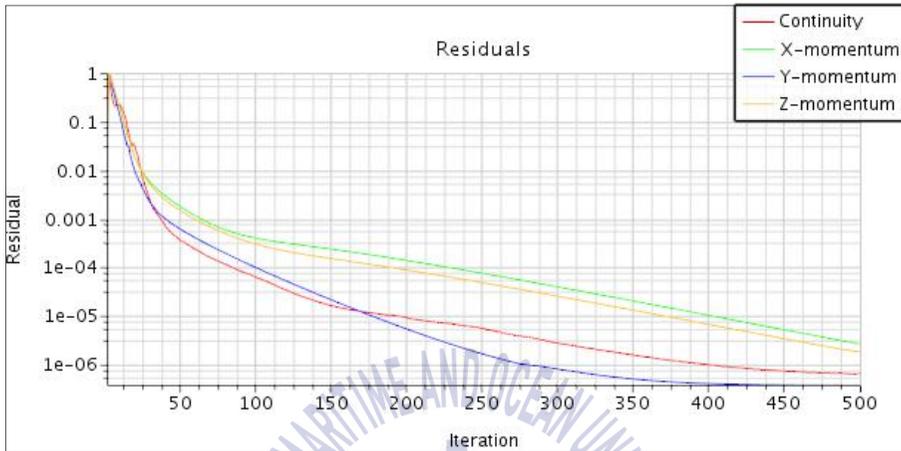


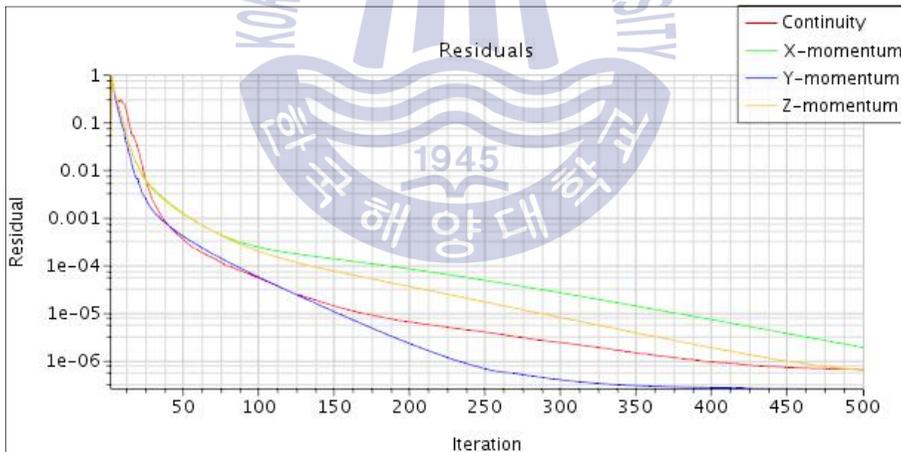
Fig. 9 Boundary condition of packed beds

본 연구에서는 충전층은 입구의 속도를 레이놀즈 수(Reynold's number)에 의한 계산을 통하여 층류(laminar) 모델로 선정하였으며, 기체의 상태는 일정 밀도 조건(constant density)를 주었다. Fig. 10 에서는 연속성(continuity)과 운동량(momentum)에 대해서 잔여치(residual)가  $10^{-5}$  이하로 수렴할 때 까지 해석

을 진행하였으며, (a)는 정규분포 부피 분율 62%, 입자크기 수준  $\gamma = 0.2$  이고, (b)는 균일분포 수준 2, 부피 분율 62%, 입자크기 수준  $\gamma = 0.5$  에서의 수렴한 것을 확인 할 수 있는 그래프이다.



(a) Normal distribution / volume fraction 62% /  $\gamma = 0.2$



(b) Uniform distribution level 2 / volume fraction 62% /  $\gamma = 0.5$

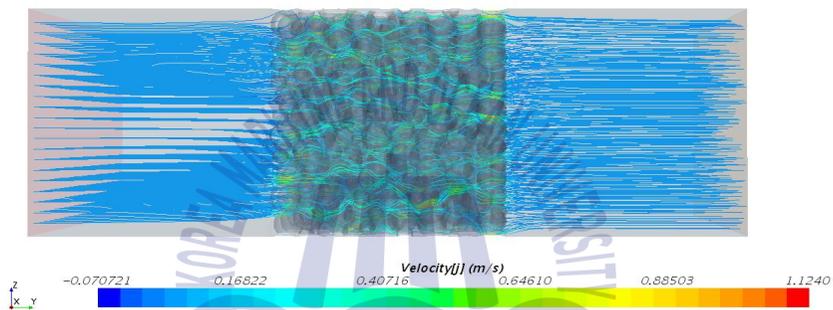
**Fig. 10** Convergence of CFD results

위에서 살펴본 모델뿐만 아니라 모든 모델에 대해서도 똑같이 잔여치의 수렴 여부를 확인하는 작업을 모두 거쳤으며, 위 과정을 통하여 전산유체역학 관점에서 해석에 대해서 값에 신뢰성을 높은 편인 것을 확인 가능하다.

### 3.3 해석결과

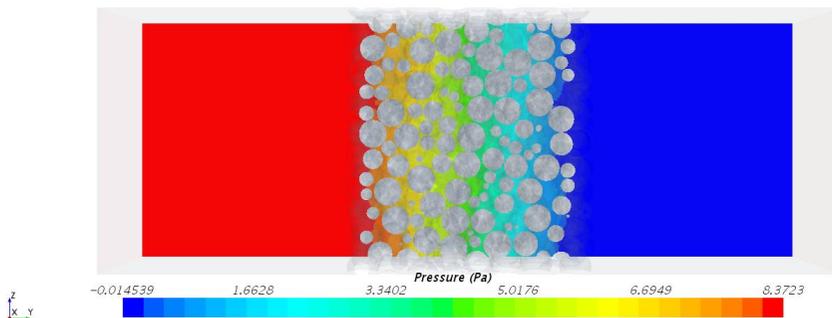
본 연구에서는 전산유체역학 상용프로그램인 Star-CCM+를 통하여 해석을 진행 하였다. Fig. 11에서 (a)는 유체의 흐르는 방향에 대하여 스트림 라인(Stream line)을 보여준다. 여기에서, 유체의 흐름이 충전층의 영향에 따라 유동 저항을 확인 가능하다. (b)에서는 유체의 압력에 대한 그림으로 충전층을 지날 때 압력이 낮아지는 것을 확인 가능하다.

STAR-CCM+



(a) Stream line velocity j

STAR-CCM+

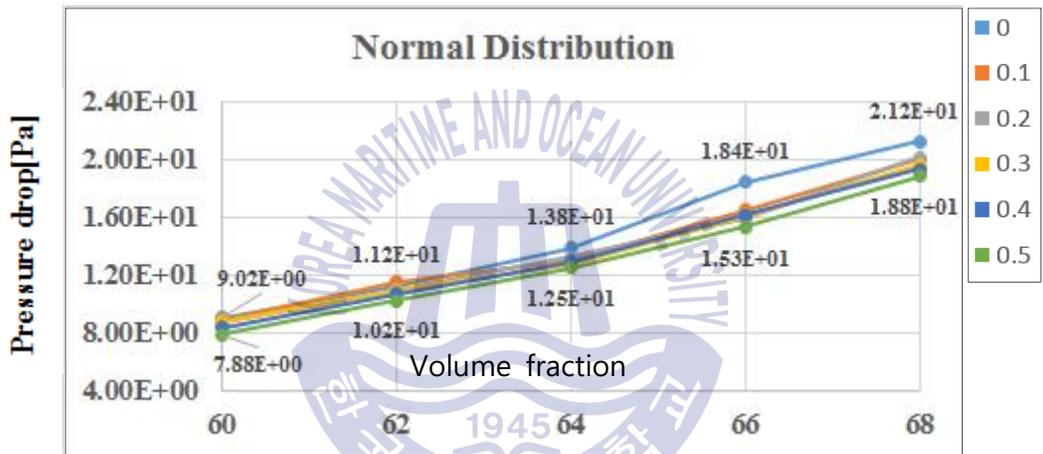


(b) Contour pressure

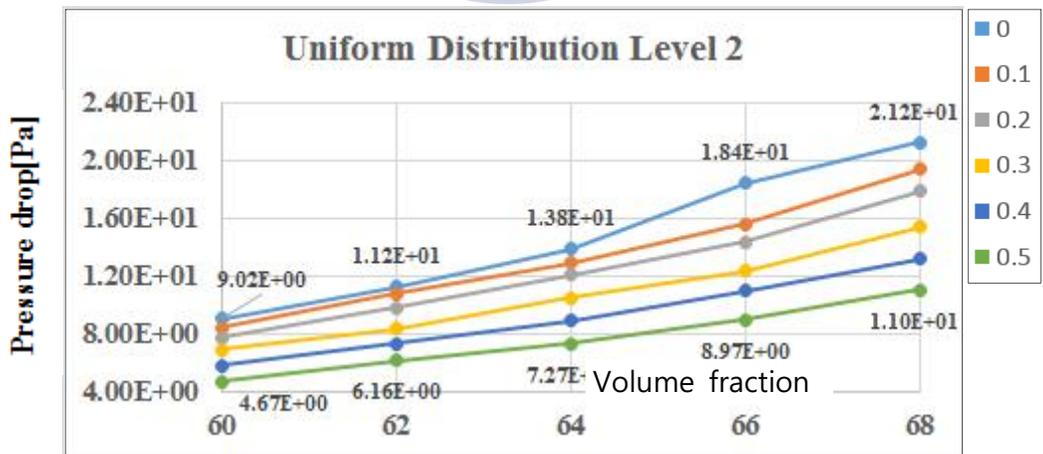
Fig. 11 Result of velocity and pressure using CFD simulation

### 3.4 해석결과에 따른 압력강하 분석

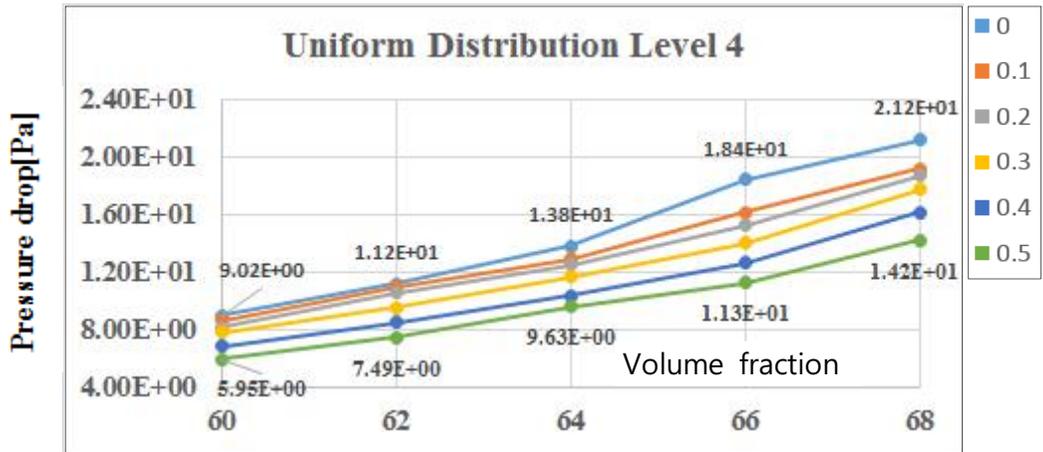
전산유체역학 통한 해석을 결과를 바탕으로 압력강하를 가지고 비교 분석을 진행하였다. Fig. 12 을 통하여 결과 값을 비교 할 수 있다. 아래에서 (a)는 정규분포, (b)~(e)는 균일분포의 수준 2, 4, 8, 16, 1,000에 대해서 각각 압력강하를 비교하였다. 각 분포에 대해서 입자크기 수준  $\gamma$ 를 달리 하였을 때, 부피분율에 따른 압력강하를 나타낸 그래프이다. 여기에서 세로축은 압력강하, 가로축은 부피분율을 의미한다.



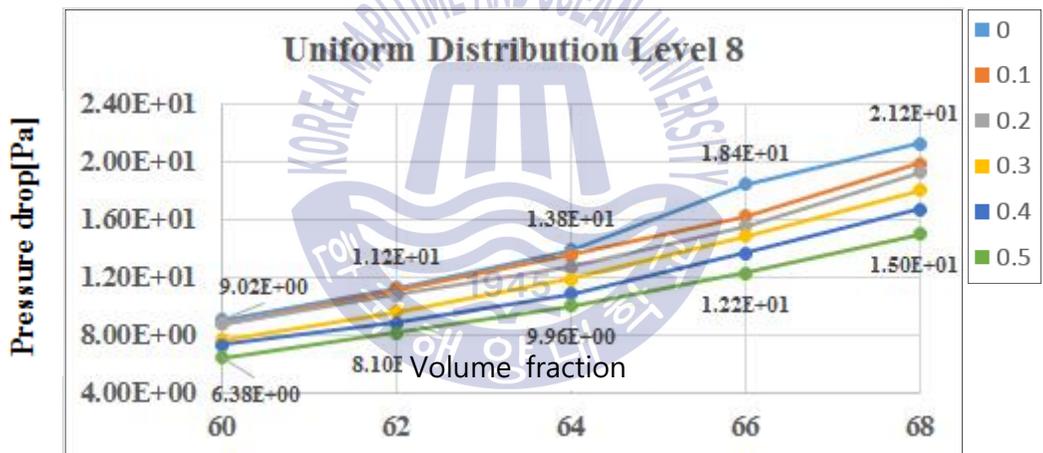
(a) Normal distribution



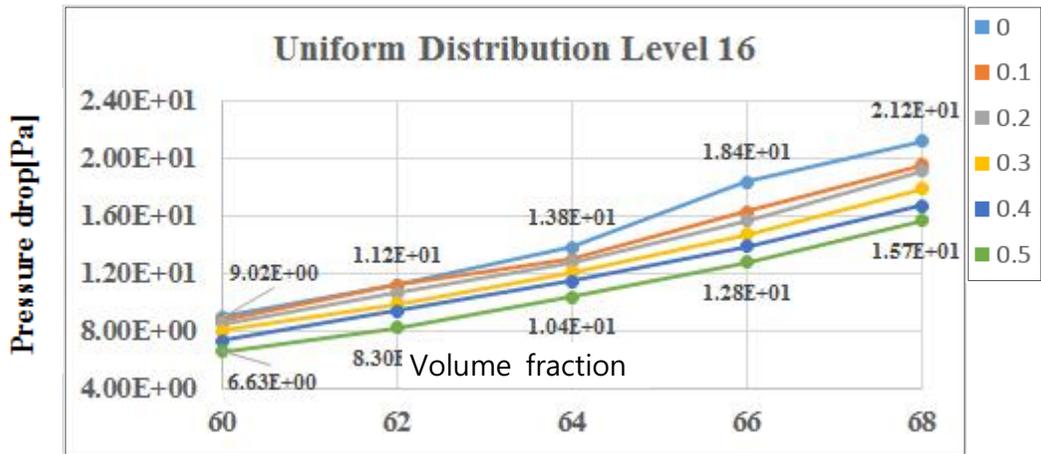
(b) Uniform distribution level 2



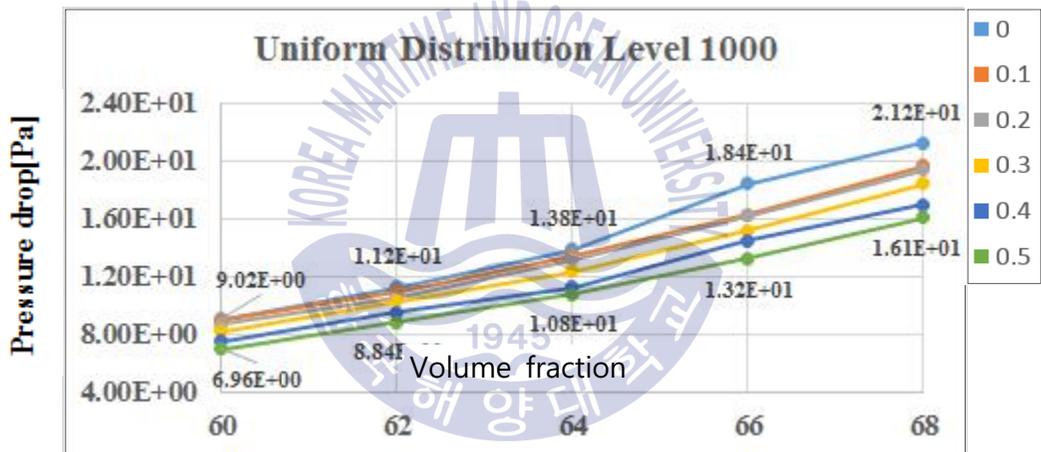
(c) Uniform distribution level 4



(d) Uniform distribution level 8



(e) Uniform distribution level 16



(f) Uniform distribution level 1,000

**Fig. 12** Result of pressure drop using CFD simulation

여기에서, 공통 적으로 부피분율이 증가함에 따라 압력강하는 증가하는 형태를 보여준다. 그래프 (a)인 정규 분포는 생산 산업 분야에서 구형 형태에 대한 오차율에 따른 압력강하 효율의 영향에 대해서 살펴볼 수 있는데, 표준 편차수준  $\gamma = 0.5$ 를 제외한 모든 분포에서 동일한 부피분율에 대해서 압력강하의 차이는 작게 나타났다.

그래프 (b)~(f)에서는 균일분포에서 균일분포 수준 2, 4, 8, 16, 1000에 대해서

압력강하를 살펴보면 입자크기 수준  $\gamma$ 가 증가 함에 따라 압력강하의 차이는 크게 나타나는 것을 보여준다. 분포 크기 영향 영향이 증가하는 것을 알 수 있다. 동일한 부피분율에 대해서 분포 범위가 작을수록, 즉, 고체입자 크기가 균일하게 구성 될수록 유동 저항이 증가하는 것을 보여준다. 다양한 크기를 가지는 충전층에 대해서 동일한 분포 범위에서는 유동저항이 증가하며, 크기 분포에 대한 영향은 감소하는 것을 확인 가능하다. 다양한 충전층에 대한 압력강하는 표면 효과를 의미하게 되는데, 이것은 Sauter mean diameter에 대한 이론에 의한 것으로 이후 4.1절을 통하여 더 상세히 설명하고자 한다.

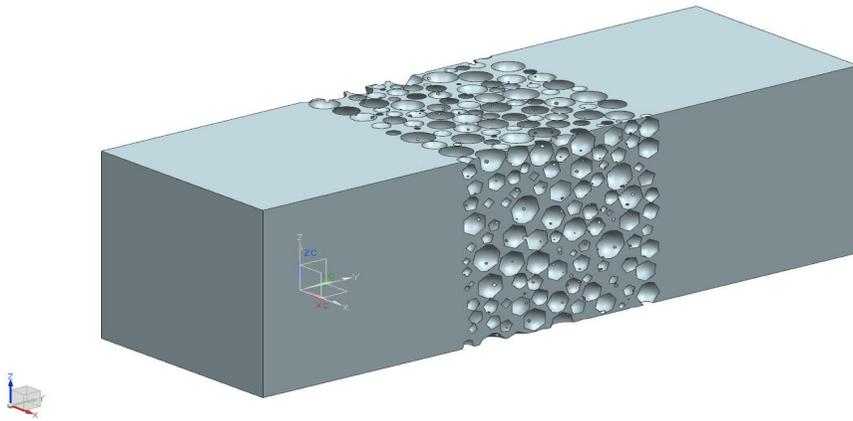
### 3.5 모델링 유효성 평가

제 3 장을 통하여 충전층을 통한 유체유동 저항특성에 대한 접근을 하였다. 여기에서 충전층 모델에서 흐름에 대한 도메인 길이의 적합성을 확인할 필요가 있었으며, 주기경계조건을 부여한 충전층이 무한영역을 모사하는 과정에서 적합하였는지에 대한 적합성 또한 필요로 한다. 이들을 검증을 통하여 모델의 유효성을 평가하고자 한다.

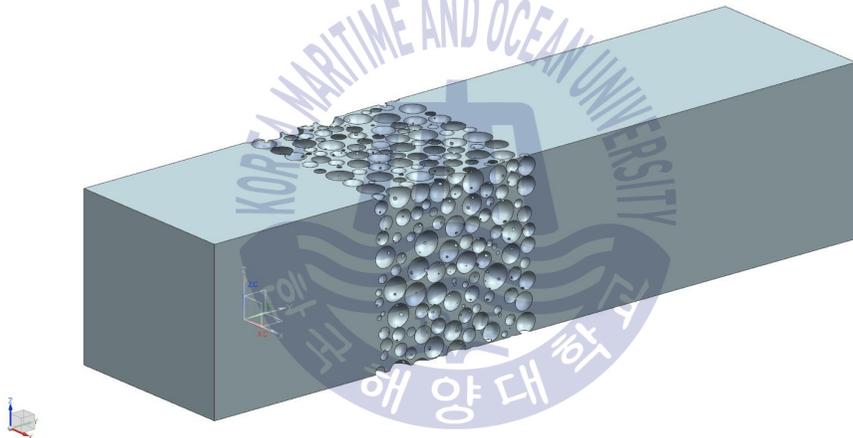
#### 3.5.1 도메인 길이에 대한 유효성 평가

본 연구에서 진행한 충전층 모델에 대하여 유체의 도메인 선정이 유효성이 있는지 평가를 해야한다. 충전층에서 유체 도메인을 유체의 흐르는 방향에 대해서 충전층의 길이에 해당하는  $\Delta L$  만큼 부여하여 해석을 진행하였다. 유효성 평가를 위하여 기준 모델에 비하여 도메인의 길이를 부여하여 적합성을 비교하는 작업을 진행하였다.

아래 Fig. 13 에서 (a)는 기준 3차원 모델링이며, (b)는 도메인의 길이를 2배를 키운 모델링이다. 이와 같은 과정을 통하여 얻은 모델을 통하여, 본 연구에서는 도메인의 길이에 대한 적합성을 평가하기 위하여 전산유체역학 해석을 진행하였으며, 5가지 모델에 대하여 모두 똑같은 작업을 진행하였는데, 압력강하 값이 모두 케이스에 대해서 동일하게 형성되었는 것을 확인하며, 도메인 길이에 대해서 적합함을 검증하였다.



(a) Normal model



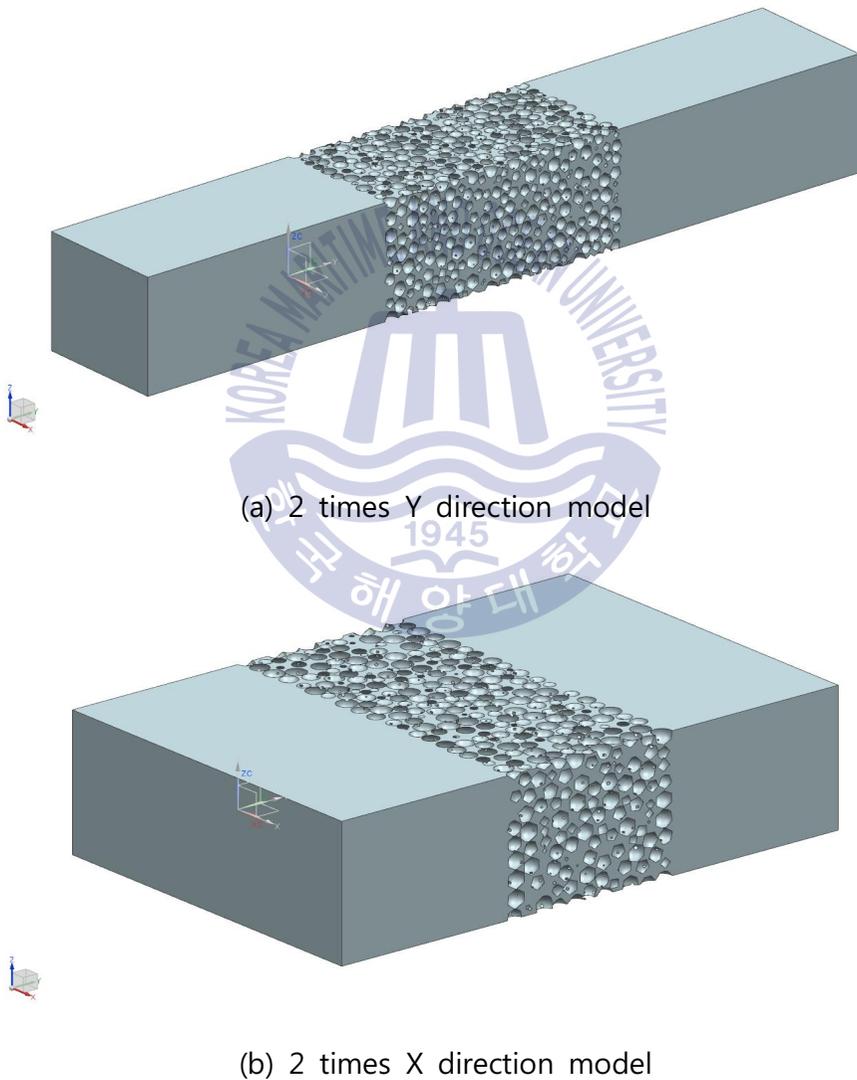
(b) Modify model

**Fig. 13** Evaluation of Domain length

### 3.5.2 주기경계조건을 통한 무한영역 모사 적합성 평가

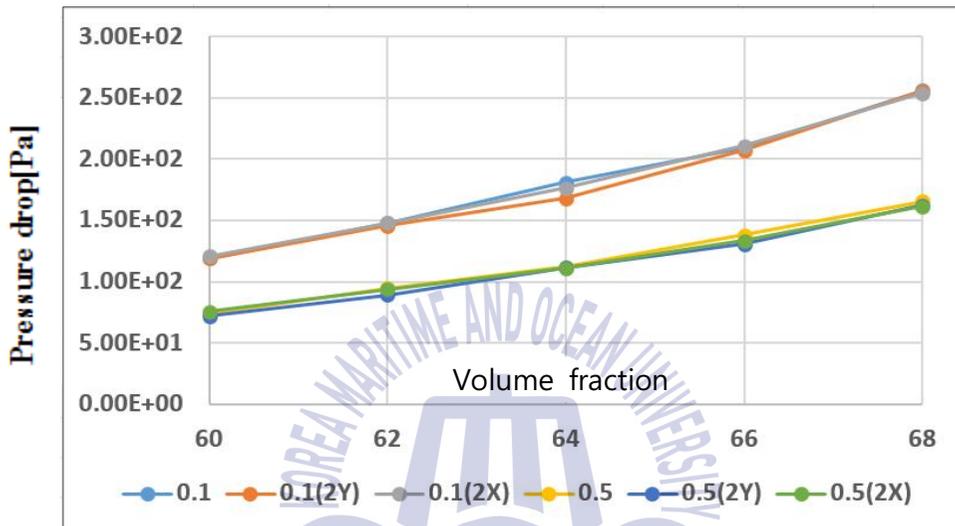
주기경계조건을 부여함으로써 유한영역이 아닌 무한영역의 충전층에 대한 소개를 하였다. 본 연구에서는 기존 충전층 모델의 무한영역 모사의 적합성 평가할 필요가 있다. 적합성 평가를 위하여 아래 Fig. 14 와 같이 기존 (a) 모델에

비하여 (b), (c) 모델은 2,000개의 고체 입자를 부여 하였으며, (b) 모델에서는 유체의 흐름 방향에 대해서 2배를 부여하여  $2\Delta L$ 의 박스에 대해서 적층 한 것이며, (c) 모델에서는  $\Delta L$ 에 대하여 x방향의 길이를 2배로 주어주며, 2배의 고체입자를 적층함으로써, 이것은 주기경계조건면에 대해서 2배를 부여 한 것을 의미한다.



**Fig. 14** Packed beds composed of 2,000 particles

위 모델은 균일분포 수준 2, 입자크기 수준  $\gamma = 0.1, 0.5$ 에 대하여 평가 하였으며, 결과는 압력강하를 통한 비교를 진행하였으며, 아래 Fig. 14 와 나타내었다.



**Fig. 15** Evaluation of periodic boundary condition in terms of pressure drop

위 Fig. 15의 가로축은 부피분율 세로축은 압력강하를 의미하는데, 위 그래프를 살펴보면 압력강하의 차이는 고체 입자의 수가 1,000개인 경우와 2,000개의 경우에 대해서 압력강하의 차이는 미비한 것을 보여준다. 이를 통하여 본 연구에서의 충전층은 1,000개 이상의 충전층에 대한 주기경계조건에 대한 것과 같은 결과라고 판단하고, 무한영역 모사에 대하여 검증 및 충전층 자체에서의 유체 유동 특성을 파악을 하였음을 확인 할 수 있다.

## 제 4 장 충전층의 유체유동 저항에 따른 압력강하

앞서 제 2 장에서는 본 연구에서 요구하는 충전층 모델에 대한 변수의 정의를 하고, 이산요소법을 활용하여 충전층을 구성하고 원하는 부피분율을 얻는 작업을 진행하였다. 이 과정을 통하여 3차원 모델링을 얻어 전산유체역학 접근을 위한 격자 구성작업에서 겹침에 대한 수정이 있었으며, 이 과정들을 통하여 제 3 장에서 본 연구에서 요구하는 상태의 경계조건을 부여하며, 해석을 진행하였다. 또한, 수렴도에 대한 신뢰도와 도메인 길이 평가 및 주기경계조건에 대한 무한영역 모사 적합성에 대해서 검증을 진행하였다. 제 4 장에서는 해석을 통하여 얻은 데이터를 활용하여 충전층에 압력강하에 대한 경험적인 식에 대해서 직접 비교하고자 한다. 4.1절에서는 Sauter Mean Diameter(SMD)를 통하여 압력강하식에 대한 등가 지름에 대한 정의와 표면효과에 대해서 설명하는 내용을 다루었다. 이후, 4.2절에서는 충전층에서의 레이놀즈 수에 대한 정의와 수정된 레이놀즈 식에 대한 설명을 하는 과정을 하며, 4.3절에서는 충전층에서의 지배적인 압력강하식인 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식에 대해서 정의하는 내용을 다루었으며, 4.3절에서는 전산유체역학을 통한 계산값과 위 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식과의 비교를 통하여, 본 연구에 대해서 신뢰성을 확인하는 내용을 다루었다.

## 4.1 Sauter Mean Diameter

본 연구에서는 3차원에서 구형의 고체 입자가 쌓여있는 충전층에 대해서 압력강하 연구를 진행하였다. 이 과정에서 고체 입자의 지름에 대한 분포를 달리 하여 접근하는 연구를 하였다. 2차원에서는 원의 지름으로 정의된 분포를 달리 하여도 평균 지름은 쉽게 얻어진다. 하지만 3차원에서는 지름의 효과가 아닌 표면효과가 발생함이 있음을 Sauter (1926)가 제안하였으며, 3차원에서 등가지름으로 정의하며 이는 SMD 명명 되고 있다. 수식(12)에서  $V_p$ 는 구의 부피에 대한 식,  $A_p$ 는 구의 면적에 대한 식이며,  $d_v$ 는 구의 부피에 대한 지름,  $d_a$ 는 구의 면적에 대한 지름을 의미한다. 이 수식은 구의 지름을 부피와 면적을 활용하여 유도 된다. 고체 입자 분포에 따라서 고체 입자의 등가 지름은 다르게 나타나며, 그 수는 1,000개의 수치를 가지고 있다. 이를 등가지름으로 구하기 위해서 식 (13)에서  $d_p$ 는 등가 지름을 의미하며, 많은 수의 고체 입자의 등가지름을 구하는 식이 유도되었다. 이와 같은 등가지름은 다음 절에서 명시되어있는 레이놀즈 수 및 Erugun's 식 Kozeny-Carman 식에서도 명확히 정의 되어야 한다.

$$\frac{V_p}{A_p} = \frac{\frac{4}{3}\pi(d_v/2)^3}{4\pi(d_a/2)^2} \quad (16)$$

$$d_p = 6 \frac{\sum V_p}{\sum A_p} \quad (17)$$

여기에서 충전층에서 표면효과에 대한 영향을 반영한 것으로 SMD에 의해서 이들이 나타나게 되며, 아래 Fig. 16 를 살펴보면 SMD의 값을 균일분포 수준 2에 대해서 나타낸 것이다.

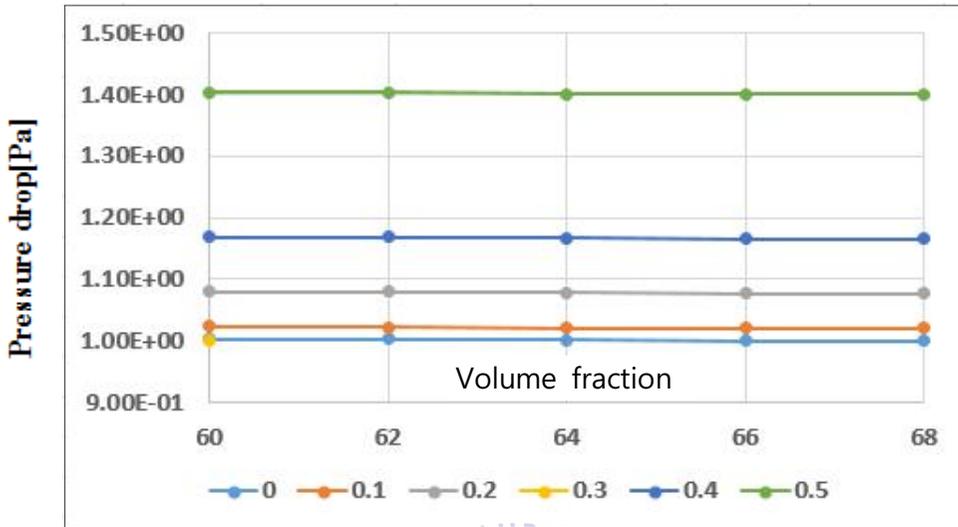


Fig. 16 Sauter Mean Diameter of uniform distribution two levels

그래프를 살펴보면 부피분율에 상관없이 SMD는 입자크기 수준에 따라 변화하는 것을 알 수 있는데, 여기에서 SMD가 증가할수록 압력강하는 감소하는 경향을 앞서 압력강하 그래프를 통하여 이해 할 수 있다. 즉, SMD를 통하여 크기분포 수준  $\gamma = 0.5$  일 때, 지름 1.4 mm의 등가 지름을 가졌다. 특성 길이에 맞춰 동일한 지름 크기인 1.4 mm에 1,000개의 충전층의 압력강하를 비교하는 과정에서 거의 동일한 압력강하를 얻어내었다. 이 과정을 통하여 압력강하는 SMD가 의미하는 등가지름은 작을수록 표면효과를 많이 내는 것을 알 수 있다.

## 4.2 수정된 레이놀즈 수

충전층에서의 레이놀즈 수는 식 (14)와 같이 정의하는데, 여기에서  $Re$ 는 레이놀즈 수,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $v$ 는 유체의 속도,  $d_p$ 는 등가지름을 의미한다. 식 (14)을 통하여 층류, 난류 모델 선정의 지표가 된다. 하지만, 이 식은 부피분율을 고려하지 않은 상태의 식으로서 부피분율을 고려한 수정된 레이놀즈 수가 요구가 된다. 이를 제안한것이 Blake (1922)로서 아래 식 (15)에 명시되어있다. 여기에서  $Re_1$ 은 수정된 레이놀즈 수를 의미하며,  $\varepsilon$ 은 기공률(porosity)로  $(1 - \varepsilon)$

는 부피분율을 의미한다. 식 (16)은 부피분율에 대한 식으로 수정된 레이놀즈 수를 적용시킨 식이며,  $L$ 은 유체가 흐르는 방향의 충전층의 길이를 의미 한다. 아래 식을 통하여 수정된 레이놀즈 수를 통하여 본 연구에서 접근한 충전층에 대해서 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식과의 비교가 가능하게 되었다.

$$Re = \frac{\rho v d_p}{\mu} \quad (18)$$

$$Re_1 = \frac{\rho v d_p}{6\mu(1-\epsilon)} \quad (19)$$

$$V_f = \frac{-\Delta P d_p^2}{\rho V^2 L} \quad (20)$$

### 4.3 압력강하식

충전층에 대한 압력강하식은 Carman (1937), Rose (1945), Morcom (1946), Leva (1949), Ergun (1952), Brauer (2012) 등 많은 식들이 있다. 본 연구에서는 적합한 충전층에서의 유체유동 특성에서 압력강하를 구하는 식으로는 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식으로 선정하였다. 이 식들은 4.2절에서 Blake (1922)가 제안한 수정된 레이놀즈 수에 의해 층류조건에서 압력강하를 비교가 가능하게 되었다.

#### 4.3.1 Ergun's equation

Ergun's 식은 충전층에 있어 가장 많이 사용되는 경험적 식으로 Ergun (1952)에 의해 식이 도입이 되었으며, (17)식에서 기본적인 형태를 보여준다. 4.2절을 통한 수정된 레이놀즈 식과의 (17)식을 통하여 (18)식으로 표현이 된다. 페블 베드의 층류조건을 만족하는 식으로서 압력강하의 검증에 비교 지표로 선정하였다.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu(1-\epsilon)^2 v}{\epsilon^3 d^2} + \frac{1.75(1-\epsilon)\rho v}{\epsilon^3 d} \quad (21)$$

$$V_f = \left( 150 + 1.75 \left( \frac{Re_1}{1-\varepsilon} \right) \right) \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 Re_1} \quad (22)$$

이전에 Ergun's 식을 살펴보면 본 연구와 같이 충전층의 형태가 박스형태에 주기경계조건을 부여한 것이 아닌 주로 실린더 형태의 충전층에 대한 연구에 대한 가이드로 Ergun's 식이 지배적으로 많이 사용되었다. 또한 Ergun's 식은 Blake (1922)에 의해 수정된 레이놀즈 수가 적용되기 이전에는 층류조건이 아닌 난류조건에서만 사용하는 것을 권장 하였다. 하지만, 본 연구의 충전층 형태에서 Ergun's 식을 통한 접근이 가능한 것을 아래 4.4절을 통하여 확인이 가능하다.

### 4.3.2 Kozeny-Carman equation

Kozeny-Carman 식은 Ergun's 식과 같이 충전층에 대해서 압력강하의 지배적인 식으로서 (17)식을 기본으로 하며, Blake (1922)에 의해 수정된 레이놀즈 수에 따라 (18)식이 유도가 되어진다. 4.2.1절과 마찬가지로 층류조건을 만족하며 압력강하의 검증에 비교 지표로 선정하였다.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180\mu(1-\varepsilon)^2 v}{\varepsilon^3 d^2} \quad (23)$$

$$V_f = \left( 180 + 2.871 \left( \frac{Re_1}{1-\varepsilon} \right)^{0.9} \right) \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 Re_1} \quad (24)$$

## 4.4 압력강하식을 통한 압력강하 비교

전산유체역학을 활용하는 상용프로그램인 Star-CCM+을 통한 해석으로 얻은 압력강하 데이터를 이용하여 위 4.3절에서 소개한 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식에 대해서 비교를 하여 적합성을 평가하는 내용을 다루었다.

#### 4.4.1 동일한 입자크기를 가지는 충전층에서의 압력강하 비교

아래 Fig. 17 은 동일한 입자의 지름의 크기를 가진 충전층의 압력강하를 비교한 그래프로서 세로축은 압력강하, 가로축은 부피분율을 의미한다. 범례는 상용프로그램 Star-CCM+를 의미하며, Ergun's 식, Kozeny-Carman 식에 의한 압력강하이다.

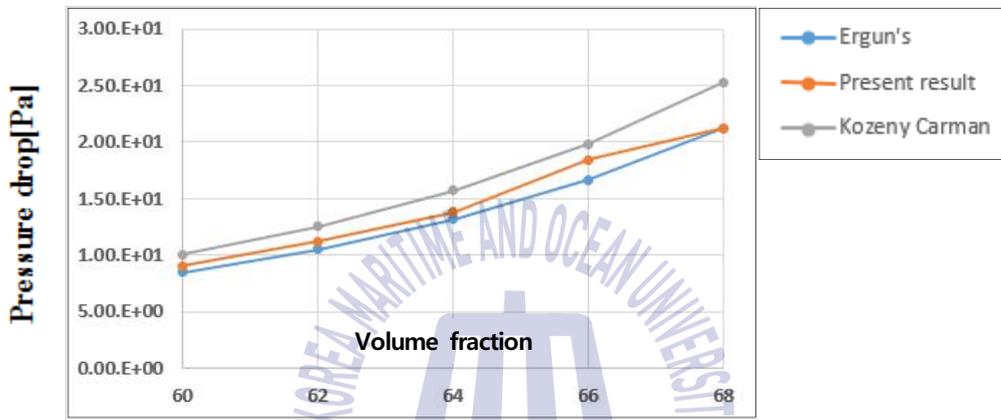
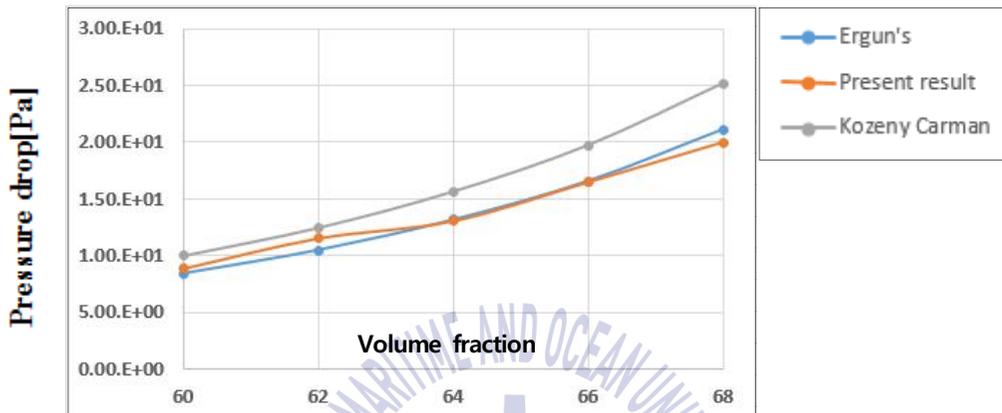


Fig. 17. Pressure drop from CFD simulation, compared to Ergun's equation and Kozeny-Carman equation for the same size diameter of particles

전산유체역학에서 얻은 압력강하 수치는 모두 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식 범위에서 압력강하가 형성되었는 것을 확인 하였다.

#### 4.4.2 정규분포에서의 압력강하 비교

아래 Fig. 18 은 정규분포에 따른 압력강하 분포이다. 표준편차 수준  $\gamma = 0.1$  대하여 검증을 진행하였다. 세로축은 압력강하, 가로축은 부피분율을 의미한다.

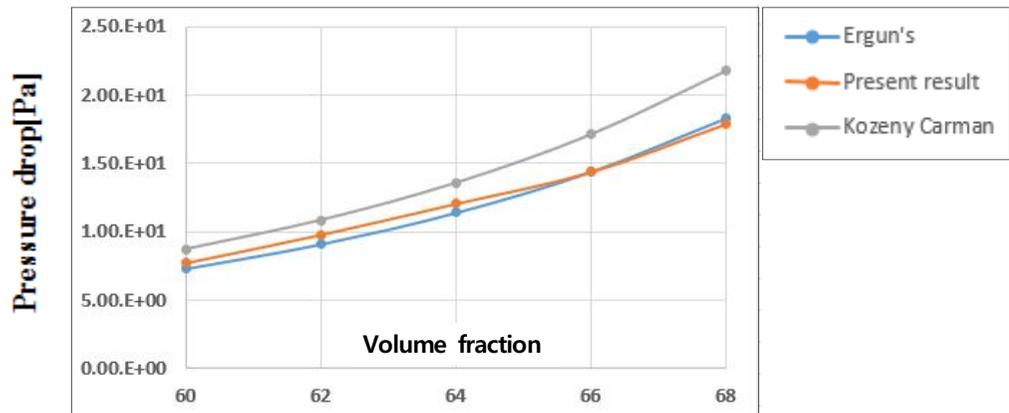


**Fig. 18.** Pressure drop from CFD simulation, compared to Ergun's equation and Kozeny-Carman equation in case of normal distribution of particle size with  $\gamma = 0.1$

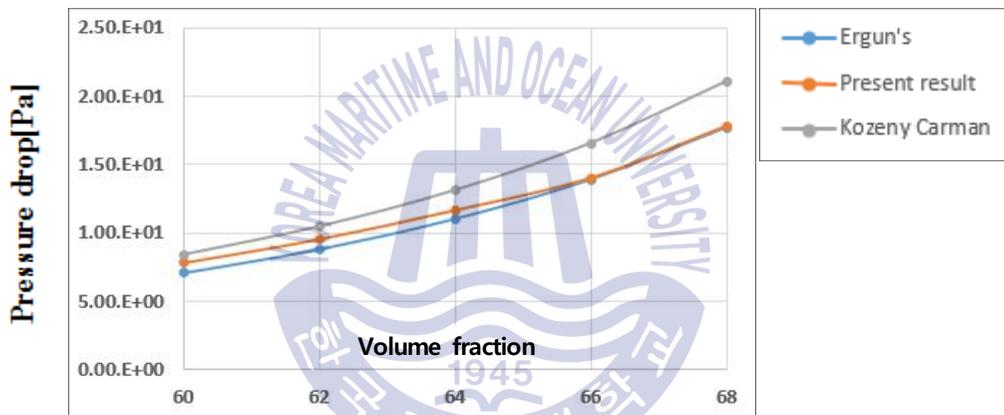
전산유체역학에서 얻은 압력강하 수치는 주로 Ergun's 식에 근접하게 형성되었는 것이 확인 가능하다.

#### 4.4.3 균일분포에서의 압력강하 비교

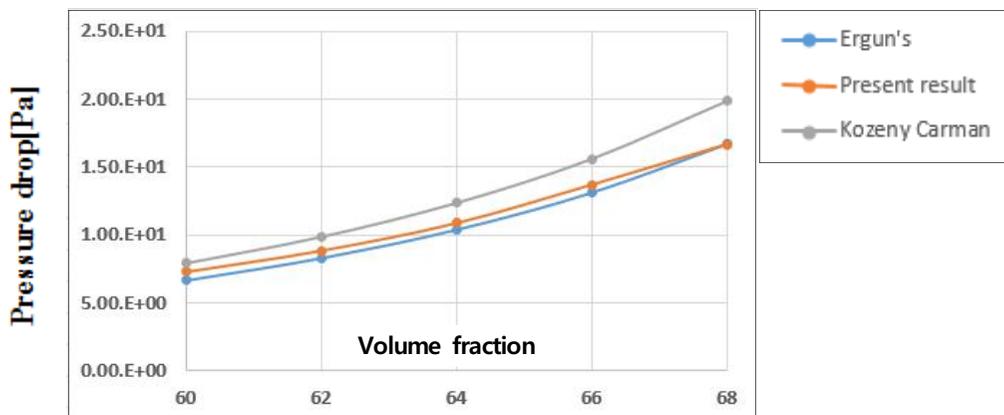
아래 Fig. 19 은 균일분포에 따른 압력강하 분포이다. (a)는 균일분포 수준 2, 크기분포 수준  $\gamma = 0.2$ , (b)는 균일분포 수준 4 크기분포 수준  $\gamma = 0.3$ , (c)는 균일분포 수준 8, 크기분포 수준  $\gamma = 0.4$  (a)는 균일분포 수준 16, 크기분포 수준  $\gamma = 0.5$ , (c)는 균일분포 수준 1000, 크기분포 수준  $\gamma = 0.5$  대해서 검증을 진행하였다. 세로축은 압력강하, 가로축은 부피분율을 의미한다. 이 값은 모두 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식의 범위에서 압력강하가 형성되었는 것을 확인 가능하다.



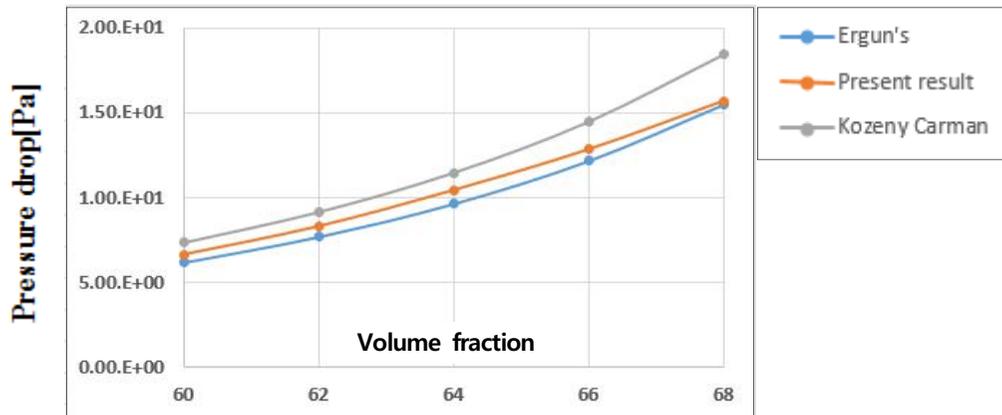
(a) Uniform distribution level 2 /  $\gamma = 0.2$



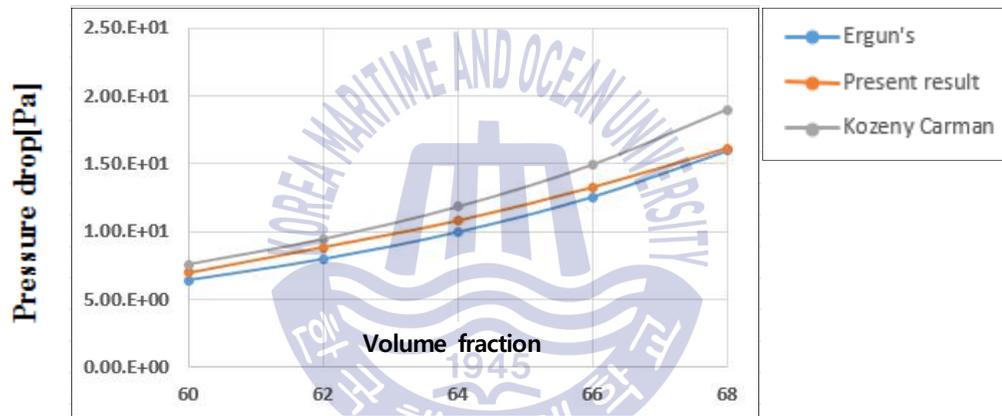
(b) Uniform distribution level 4 /  $\gamma = 0.3$



(c) Uniform distribution level 8 /  $\gamma = 0.4$



(d) Uniform distribution level 16 /  $\gamma = 0.5$



(e) Uniform distribution level 1,000 /  $\gamma = 0.5$

**Fig. 19.** Pressure drop from CFD simulation, compared to Ergun's equation and Kozeny-Carman equation in case of uniform distribution of particle size

위 과정을 통하여 전산유체역학 상용프로그램인 Star-CCM+에서 얻은 압력강하와 경험적인 식으로 많이 사용되는 Ergun's 식과 Kozeny-Carman 식에 의해 얻은 압력강하의 비교를 통하여 본 연구에서의 압력강하 수치는 신뢰도를 높은 것을 확인 가능하다.

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 고체입자 크기분포와 부피분율을 고려한 충전층의 이산요소 모델링과 유체유동 특성 연구를 진행하였다. 고체 입자에 대하여 정규분포와 균일 분포 관점을 통하여 부피분율을 변수 인자로 두어, 이산요소법을 활용하였으며, 이 과정에서 주기경계조건과 부피분율을 조절하는 in-house code를 통하여 원하는 충전층 모델을 얻었다. 전산유체역학 접근을 위한 3차원 모델링에 대한 격자구조 과정에서 겹침에 대한 수정을 하는 작업을 진행하였다. 이 과정들을 통하여 얻은 다양한 충전층을 이용하여 전산유체역학 해석을 진행하였다. 충전층의 유체 유동특성을 압력강하 관점으로 접근하여, 이를 경험적인 식을 통하여 비교 분석하였다.

1. 본 연구에서는 고체 입자 1,000개로 이루어진 충전층에 대하여 접근하였다. 이는 주기경계조건을 통하여 무한영역 모사 및 벽면효과를 배제하여 충전층 자체의 유체 유동 특성을 파악이 가능하였다. 이를 검증하는 과정을 가졌으며, 본 연구를 통하여 충전층을 사용하는 산업 분야 또는 연구 분야에 대해서 가이드가 될 수 이야기 한다.
2. 모든 충전층에서는 부피분율에 증가에 따라서 압력강하는 높아지는 경향을 나타낸다.
3. 다양한 고체 입자 분포를 통하여 충전층의 압력강하를 비교 하였으며, 본 연구를 통하여 고체 입자의 크기차이가 작을수록 즉, 균일하게 구성될수록 압력강하는 증가하는 것을 확인 하였다.

4. 균일 분포 관점을 통하여 다양한 고체 입자를 가진 충전층에서 압력강하를 하였으며, 표면효과에 대한 영향을 살펴 볼 수 있었다. 이는 등가 지름으로 선정된 Sauter Mean Diameter(SMD)를 통하여 확인 가능 하였다.
5. 충전층의 많이 사용되는 경험적 식인 Ergun' s 식과 Kozeny-Carman 식을 통하여 계산값과 비교하는 과정을 하였으며, 2개의 식 사이에 압력강하는 형성되었다. 위 과정을 통하여 본 연구의 유효성 및 검증을 하는 과정을 하였다.



## 참고문헌

- [1] A.R. Morcom, Fluid flow through granular materials, Joint Meeting of the Institution of Chemical Engineers with the Chemical Engineering Group, Apartments of the Geological Society, Society, Burlington House, London, pp.30–43 (1946)
- [2] B. Einfeld and K. Schnitzlein, The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds, *Chem Eng Science*, Vol.56, pp.4321-4329 (2001)
- [3] Cundall, P.A., and Strack, O.D.L, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, pp.47-65 (1979)
- [4] Fu-You Tian, Lian-Feng Huang, Wall effects on the pressure drop in packed beds of irregularly shaped sintered ore particles, *Powder Technology*, Vol.301, pp.1284-1293 (2016)
- [5] H. Brauer, Eigenschaften der Zweiphasen-Strömung bei der Rektifikation in Füllkörpersäulen., In: Bretschneider, H. (Ed.), *Fortschritte der Destilliertechnik*, Forschungsarbeiten aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung Göttingen, Dechema-Monographien, VCH, Weinheim, Vol.37, pp.7–78. (1960), Quoted in: Hassan, Y.A. and Kang, C., Pressure drop in a pebble bed reactor under high Reynolds number, *Nuclear Technology*, Vol.180, pp.159-173 (2012)
- [6] H.E. Rose, On the resistance coefficient—Reynolds number relationship for fluid flow through a bed of granular material, *ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.153 ,pp.154–168 (1945)

- [7] Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y., & Yu, A. B., Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, Vol.62 13, pp.3378-3396, (2007)
- [8] Jian Yang, Jiangquan Wu, Lang Zhou and Qiuwang Wang, Computational study of fluid flow and heat transfer in composite packed beds of spheres with low tube to particle diameter ratio, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.300, pp.85-96 (2016)
- [9] Kim, Y.-M., A granular motion simulation by discrete element method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.22, pp.812-818 (2008)
- [10] Lee, S., and J. Park, Experimental and Simulation Study for angle of repose to measure the friction coefficient of powders, *Proceedings of Korean Soc. Mech. Eng. Autumn Conference*, pp. 2443-2445 (2014)
- [11] M. Leva, Quoted, in: D.W. Green, R.H. Perry (Eds.), *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Eight edition, Chem. Eng., Vol.56, pp.115-117 (1949)
- [12] Nan. G, DEM simulation and analysis of particle mixing and heat conduction in a rotating drum, *Chem, Eng*, Vol.97, pp.255-234 (2013)
- [13] O'Sullivan, C., *Particulate discrete element modelling*, Spon Press, Abingdon, United Kingdom (2011)
- [14] P.C. Carman, Fluid flow through granular beds, *Trans. Inst. Chem. Eng.* Vol. 15, pp.32-48 (1937)
- [15] Rahul.S, Numerical analysis of mixing of particles in drum mixers using DEM, *Advanced Powder Technology*, Vol.27, pp.531-540 (2016)
- [16] Sauter J. Die Grossenbestimmung der in Gemischnebeln von Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Brennstoffteilchen *VDI-Forschungsheft Nr. 279* (1926)

- [17] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog. Vol.48, pp.89–94, (1952)
- [18] S.P. Blake, The resistance of packing to fluid flow, Trans. Am. Inst. Chem. Eng. Vol.14, pp.415 (1922)
- [19] Zhang, H.W., Zhou, Q., Xing, H.L., and Muhlhaus, H., A DEM study on the effective thermal conductivity of granular assemblies, Powder Technology, Vol.205, pp.172-183 (2011)

