



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.

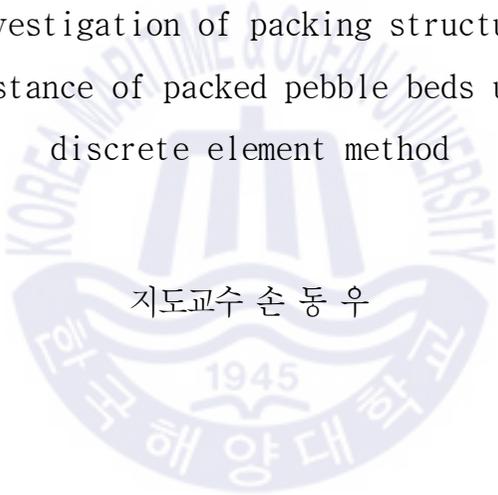
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

이산요소법을 이용한 페블베드의 적층구조 및
유동저항 해석

Numerical investigation of packing structures and flow
resistance of packed pebble beds using
discrete element method



지도교수 손 동 우

2020 년 2 월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

황 선 필

본 논문을 황선필의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 조 종 래 인

위 원 : 고 정 혁 인

위 원 : 손 동 우 인

2019 년 12 월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract (KOREAN)	vi
Abstract (ENGLISH)	viii
List of Figures	iii
1. 서 론	
1.1 연구 배경	1
1.2 연구목적 및 내용	4
2. 해석 이론	
2.1 이산요소법 기본 원리	5
2.2 운동방정식	7
2.3 힘-변위 법칙	8
2.4 Hertz-Mindlin 접촉 모델	11
3. 페블베드 적층 특성	
3.1 주기경계조건 적용에 대한 검증	14
3.2 10 mm×40 mm×25 mm 모델의 페블베드 적층 특성	17
3.2.1 페블의 크기 비율에 따른 적층 특성 분석	18

3.2.2	폐블베드의 운동 주기에 따른 적층 특성 분석	20
3.2.3	폐블베드의 운동 방향에 따른 적층 특성 분석	25
3.3	10 mm×10 mm×20 mm 모델의 폐블베드 적층 특성	28
3.3.1	폐블의 크기 비율에 따른 적층 특성 분석	28
3.3.2	폐블베드의 운동 주기에 따른 적층 특성 분석	31
3.3.3	폐블베드의 체적 비율에 따른 적층 특성 분석	36
4.	폐블베드 열전달 및 유동 특성	
4.1	폐블베드 열전달 특성	38
4.1.1	폐블의 크기 비율에 따른 접촉량 및 열전도도 분석	38
4.1.2	폐블베드의 운동 주기에 따른 열전도도 분석	40
4.2	폐블베드 유동 특성	43
4.2.1	폐블베드의 혼합비에 따른 적층 특성 분석	43
4.2.2	유동해석을 위한 폐블베드의 형상 수정	45
4.2.3	폐블베드의 유동해석 조건 및 방법	47
4.2.4	폐블베드의 압력강하 및 속도 분포 분석	48
4.2.5	폐블베드의 혼합비에 따른 압력강하 분석	50
5.	결 론	
5.1	해석결과 정리	53
5.2	종합적인 결론	54
	참고문헌	55

List of Figure

Fig. 1 Flow chart of DEM principle.

Fig. 2 Ball-ball contact and ball-wall contact.

Fig. 3 Definition of shear overlap.

Fig. 4 Spring-dashpot model for the calculation of normal force F_n and tangential force F_t .

Fig. 5 Description of periodic boundary condition.

Fig. 6 Analysis domains of pebble beds: (a) under the PBC in the x-direction, and (b) under the PBC in the y-direction.

Fig. 7 Packing structures of binary-sized pebble beds and their corresponding local packing fractions in the x- and y-directions: (a) under the PBC in the x-direction, and (b) under the PBC in the y-direction.

Fig. 8 Packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio.

Fig. 9 Packing fractions and local packing fractions in the z-direction according to pebble size ratio.

Fig. 10 Packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations: (a) 0 Hz to 10Hz and (b) 10Hz to 20Hz.

Fig. 11 (a) Packing structures of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations. (b) Local packing fractions of pebble beds in the z-direction.

Fig. 12 Overall packing fraction of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 13 Packing structures of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 14 Packing structures and small pebble's distribution of pebble beds according to vibration direction in 20 Hz.

Fig. 15 Local packing fractions of pebble beds according to vibrations in the y, z-directions.

Fig. 16 Local packing fractions of pebble beds according to vibrations in the x, y, z-directions.

Fig. 17 Analysis domain and pebble structures of pebble beds and according to pebble size ratio.

Fig. 18 Packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio.

Fig. 19 Local packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio.

Fig. 20 Packing structures and fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibration: (a) 0Hz to 10 Hz, (b) 0Hz to 20 Hz, (c) 10 Hz to 20 Hz.

Fig. 21 Local packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 22 Overall packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 23 Overall packing structures of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 24 Packing structures of pebble beds according to volume ratio.

Fig. 25 Overall packing fraction of pebble beds according to volume ratio.

Fig. 26 Contact areas of pebble beds. (a) Mono-sized pebble beds (b) Binary-sized pebble beds.

Fig. 27 Effective thermal conductivity of pebble beds according to pebble size ratio.

Fig. 28 Heat flow contribution rates of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations. (a) MS-1.00 (b) BS-0.75 (c) BS-0.50 (d) BS-0.25.

Fig. 29 Effective thermal conductivity of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 30 (a) Packing structure compositions of pebble beds. (b) Stress-strain relationships of pebble beds under cyclic loadings.

Fig. 31 Low mesh quality caused by overlap and gap and improved mesh quality caused by edge blending.

Fig. 32 Blending of sharp circular edges between the overlapping spherical pebbles for generation proper CFD meshes.

Fig. 33 Construction of a purge gas domain considering the periodicity of pebble configuration.

Fig. 34 Convergence of the pressure drop with an increase in the number of cells.

Fig. 35 Distributions of velocity and pressure over the purge gas domain: (a) A mono-sized pebble beds (b) A binary-sized pebble beds for $N_{ps} = 1600$.

Fig. 36 Pressure drop per unit length according to a mixing ratio of binary-sized pebbles.

이산요소법을 이용한 페블베드의 적층구조 및 유동저항 해석

황 선 필

한국해양대학교 대학원

기계공학과

초 록

핵융합 발전은 미래 에너지를 대체할 가장 핵심적인 발전방식 중 하나이며, 핵융합 발전의 실용화를 위해 많은 연구와 개발이 진행되고 있다. 핵융합 발전은 삼중수소와 중수소의 핵융합 반응을 통해 에너지를 생성시키는 발전방식이다. 고에너지 중성자의 형태로 방출되는 에너지가 핵융합로 내벽을 감싸고 있는 증식재 블랭킷의 리튬층으로 들어가게 되면, 리튬과의 핵융합 반응을 통해 막대한 양의 열에너지와 삼중수소를 생성시킨다. 핵융합 반응으로 생성되는 삼중수소는 다시 핵융합로로 주입되어 연속적인 핵융합 반응을 일으키고, 동시에 발생하는 열에너지는 냉각수를 가열하여 동력을 생산한다.

핵융합로 내벽에 존재하는 블랭킷의 리튬층 적층구조는 핵융합 발전의

열에너지 전달효율과 관련되어 있다. 리튬층의 핵융합 반응으로 생성되는 많은 양의 열에너지는 냉각수로 전달되어 증기로 변환되는 과정에서, 리튬층의 적층구조가 조밀해지게 되면, 입자 간 연결성이 향상되어 열에너지의 전달효율이 높아지게 된다. 열에너지 전달효율이 높아지게 되면 전체 시스템에 대한 에너지의 절대량이 증가하지만, 조밀한 입자 적층구조로 인해 리튬층의 유동저항이 증가하여 핵융합 반응으로 생성되는 삼중수소의 유동이 방해받게 된다. 삼중수소의 유동이 방해받게 되면, 연료의 순환을 통한 연속적인 핵융합 반응이 지속되기 어렵기 때문에 리튬층의 적층구조에 따른 열전달 성능과 유동 특성을 적절히 고려하여 분석해야 한다.

본 연구에서는 이산요소법을 이용하여 블랭킷 리튬층을 페블베드의 형상으로 모사하여, 입자 적층구조에 따른 페블베드의 적층 특성과 그에 따른 열전달 성능을 분석하였다. 또한 구현된 페블베드의 유동해석을 수행하여 적층에 구조에 따른 유동저항을 분석하였고, 열전달 성능과의 상관관계를 고려하여 적합한 적층 모델을 제시하였다.

KEY WORDS: Nuclear fusion reactor 핵융합로; Binary-sized pebble beds 이진 크기 페블베드; Lithium layer packing structure 리튬층 적층구조; Packing fraction 부피 분율; Purge gas 퍼지가스; Pressure drop 압력강하.

Numerical investigation of packing structures and flow resistance of packed pebble beds using discrete element method

Seon-Pil Hwang

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Nuclear fusion power generation is one of the most important for future energy, and a lot of research and development is ongoing to commercialize nuclear fusion power. Nuclear fusion power generation is a method of generating energy by thermonuclear reaction of tritium and deuterium inside a nuclear reactor. The energy released in the form of high-energy neutrons (approximately 14.1MeV) enters the lithium layer of the breeding blanket that surrounds the inner wall of the reactor. Neutrons entering the lithium layers of the blanket produce tritium through thermonuclear reaction, and the

generated tritium is infected back into the fusion reactor, causing continuous nuclear fusion reaction. In addition, the thermal energy generated by the fusion reaction heats the cooling water and generates steam to operate the turbine.

The lithium layer packing structure of the breeding blanket on the inner wall of the reactor is related to the energy transmission efficiency of fusion power generation. The energy generated by the fusion reaction of the lithium layer is transmitted to the cooling water and converted into steam. In this process, the denser the laminated structure of the lithium layer is, the more intimate contact between particles occurs, thereby increasing the transfer efficiency of thermal energy transmitted to the cooling water. However, if the packing fraction is too high, the flow resistance of the lithium layer increases, which interrupts the generation of helium purge gas generated by the thermonuclear reaction. Therefore, the packing and flow characteristics of the lithium layer should be properly considered together.

In this study, we use the discrete element method to simulate the lithium layers of a blanket into the shape of pebble beds and analyze the packing fraction and heat transfer efficiency according to the particle packing structure. In addition, the flow analysis of the pebble beds was performed to analyze the flow resistance according to the structure of the laminate and considering the correlation with heat transfer, a suitable packing model was proposed.

KEY WORDS: Nuclear fusion reactor; Binary-sized pebble beds; Lithium layer packing structure; Packing fraction; Purge gas; Pressure drop.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

화석연료는 산업발전의 중요한 연료지만, 자원의 한정성과 환경오염의 원인이라는 문제점을 안고 있다. 수력, 풍력, 태양열 등의 여러 가지 대체에너지원이 연구·개발이 이루어지고 있지만, 많은 양의 에너지를 안정적으로 공급하기엔 한계가 있다. 원자력은 이와 같은 대체에너지 문제를 해결하기 위한 중요한 에너지원으로 주목받고 있다.

자연계 원소들은 원자핵의 결합에너지가 큰 철과 같이 안정적인 상태가 되려는 성질이 있다. 철보다 질량수가 큰 원자는 쪼개지면서 철에 가까운 원소가 되려 하고, 질량수가 작은 원소는 서로 결합하여 철에 가까운 원소가 되고자 한다. 이때 질량수가 큰 원자가 쪼개져서 안정된 상태의 원소가 되려는 성질을 이용한 것이 핵분열 반응이고(Bohr & Wheeler, 1939), 질량수가 작은 원소가 서로 합쳐져서 안정된 상태가 되려는 성질을 이용한 것이 핵융합 반응이다(Gough & Eastlund, 1971).

핵분열에 사용되는 연료는 크게 두 가지로 구분된다. 우라늄-233(^{233}U), 우라늄-235(^{235}U), 플루토늄-239(^{239}Pu)과 같이 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키는 핵분열성 물질과 Th-232(^{232}Th), U-238(^{238}U), Pu-240(^{240}Pu)과 같이 중성자를 흡수하여 핵분열성 물질로 변환되는 핵연료성 물질이 있다. 높은 질량수를 가지고 있는 핵분열성 원소의 원자핵에 중성자를 충돌시키게 되면 원자핵의 균형이 무너지게 되어 불안정한 상태가 된다. 불안정한 상태가 된 핵분열성 원소는 방사붕괴 즉, 핵분열 반응이 일어나게 되고 막대한 양의 에너지를 방출하게 된다. 핵분열 반응으로 인해, 크립톤-85(^{85}Kr), 제논-135(^{135}Xe), 바륨-141(^{141}Ba)등과 같은 핵분열 생성물이 나오며 2, 3개의 중성자가 함께 방출되는데, 이때 반응물

과 생성물 간 질량 차이가 발생하게 된다. 이를 질량결손(Mass defeat)이라 하는데, 반응 전과 반응 후의 질량 차이가 에너지로 변환되어 방출되는 것이다(Stanley & Whetstone, 1959). 에너지는 핵분열 과정, 핵분열 중성자, 감마선 등의 형태로 방출되어 원자로 내에서 흡수된 후, 열에너지로 변환되거나 연쇄 반응(Chain reaction)을 일으키게 된다. 연쇄 반응이란 핵분열 반응으로 방출된 매우 빠른 속도를 가진 중성자가 감속재(물, 흑연 등)와 충돌하여 에너지를 잃은 후, 속도가 느린 중성자로 변환되어 다시 우라늄과 핵분열 반응을 일으키는 것을 의미한다. 연쇄 반응은 외부에서 중성자를 공급하지 않더라도 연속적인 핵분열 반응을 일으켜 지속적인 발전순환을 만든다(Hong, et al., 2007).

핵융합 반응은 태양 내부에 존재하는 수소 간 결합반응을 대표적인 예로 들 수 있다. 1500도의 초고온·고압 상태를 유지하고 있는 태양 내부에서는 원자에 종속된 전자가 막대한 외부에너지로 인해 자유전자의 형태로 모두 방출되어 양전하를 띠는 원자핵만이 존재하는 플라즈마 상태가 된다(Higginson, et al., 2019; Jager & Herold, 1987). 이때 수소 원자핵 간 전기적 척력을 이겨낼 정도의 강한 충돌을 하게 되면, 수소 원자핵의 결합반응이 일어나게 되는데, 이를 핵융합 반응이라 한다. 이 과정에서 반응 전 수소의 질량결손이 발생하게 되어 질량 차만큼의 에너지가 생성되는데, 이를 핵융합 에너지라 한다. 지구에서 핵융합 반응을 일으키기 위해서는 먼저 태양과 같이 초고온·고압의 환경을 만들 수 있어야 한다. 1억도 이상의 원자로 내부 환경을 조성하여 핵융합 연료인 중수소와 삼중수소를 원자핵만이 존재하는 플라즈마 상태로 만든 뒤, 서로 충돌시키게 되면 원자핵 간 전기적 척력을 이겨내고 핵융합 반응이 일어나게 된다. 핵융합 반응으로 헬륨과 중성자가 생성될 때, 결손되는 질량만큼 에너지로 변환되는데, 많은 양의 에너지는 중성자의 운동에너지 형태로 발생 된다. 중성자의 운동에너지는 원자로 내벽으로 들어가서 열에너지로 변환되고, 열에너지는 증기를 발생시켜 동력을 생산하게 된다.

핵융합 반응의 대표적인 연료는 중수소와 삼중수소이다. 삼중수소는 반감기가 12.4년인 방사성 동위원소이며, 자연계에는 거의 존재하지 않는 물질이다. 삼중수소와 중수소의 핵융합 반응은 다양한 수소 반응 중에서도 비교적 낮은

온도에서 활발하게 일어나기 때문에 중요한 핵융합 연료이다. 핵융합의 연료로 사용되는 중수소는 바닷물로부터 반영구적으로 추출할 수 있지만, 삼중수소는 자연상태에서 거의 존재하지 않기 때문에 바닷물의 리튬을 핵융합로에서 변환하여 인공적으로 얻을 수 있다. 리튬에서 삼중수소를 추출하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 고체형 삼중수소 증식재 블랭킷(Tritium breeding blanket)을 통해 삼중수소를 생산하는 방법에 대해 다루고자 한다. 블랭킷은 핵융합로 내벽을 둘러싸고 있는 구조물로 고에너지 중성자의 운동에너지를 열에너지로 변환시키거나, 중성자 조사로부터 진공 용기 및 초전도 자석 등의 구조물을 보호하는 기능을 하고, 핵융합 연료인 삼중수소의 생성 및 회수의 역할도 수행하는 중요한 구조물이다. 블랭킷에 내부에 구성되어 있는 리튬층(Li_2TiO_3 , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3 등)에 고에너지의 중성자가 들어가게 되면 중성자와 리튬층의 핵융합 반응이 일어나게 된다(Britt & Whetstone, 1959). 핵융합 반응은 열에너지와 핵융합의 연료인 삼중수소를 발생시키게 되는데, 발생된 열에너지는 냉각제로 전달되어 증기를 통해 동력을 생산하게 되고, 삼중수소는 다시 원자로 내부로 주입되어 지속적인 핵분열 반응이 일어나게 된다. 블랭킷의 리튬층과 중성자의 핵융합 반응으로 인해 생성된 열에너지를 효율적으로 냉각재(H_2O , He 등)에 전달하기 위해서는 높은 열전달 효율이 필요하다. 열전달 효율은 리튬층의 입자 적층구조에 따라 달라질 수 있는데, 입자 간 적층구조가 조밀해질수록 입자 간 연결성이 높아지게 되어, 더 효율적인 열전달이 일어나게 된다. 하지만 리튬층의 조밀한 적층구조는 내부의 유동저항을 증가시키게 되어 핵융합 반응으로 생성되는 삼중수소의 유동을 방해하게 된다. 삼중수소의 유동이 방해받게 되면, 연료의 자가생성과 연속적인 핵융합 반응을 저해하게 되어 발전효율이 낮아지게 된다. 그러므로 리튬층의 적층구조에 따른 열전달 효율과 삼중수소의 유동 특성이 갖는 관계성을 적절히 고려하여야 한다.

1.2 연구목적 및 내용

중수소와 삼중수소의 반응으로 생성되는 고에너지의 중성자가 블랭킷의 리튬층으로 들어가게 되면, 중성자와 리튬의 핵융합 반응이 일어나게 된다. 이때 발생하는 열에너지는 냉각수로 전달되어 동력을 생산하고, 생성되는 삼중수소는 원자로 내부에서 순환되어 연속적인 핵융합 반응을 일어나게 한다. 이때 리튬층을 형성하고 있는 입자 적층구조가 조밀해질수록 냉각재로 전달되는 에너지의 전달효율이 높아지게 되어 효율적인 에너지 변환을 일으킬 수 있다. 하지만 리튬층의 조밀한 입자 적층구조는 핵융합 반응으로 생성되는 삼중수소의 유동을 방해하여 지속적인 핵융합 반응을 저해하는 요인으로 작용된다. 그렇기 때문에 리튬층의 적층구조에 따른 열전달 효율과 유동저항을 함께 분석하여 적합한 입자 적층구조를 찾고자 한다.

본 연구에서는 블랭킷 리튬층을 전산 시스템으로 모사하여 입자 적층 특성에 따른 유동저항과 열전달에 대한 분석을 수행하였다. 블랭킷의 리튬층은 많은 수의 입자들이 밀집되어 이루어진 시스템이기 때문에 각각의 입자를 요소로 이산화하여 접촉과 열·기계적 거동을 분석하기엔 물리적인 한계가 있다. 그러므로 이산요소법(Discrete element method, DEM)이용하여 분석을 수행하였다(Cundall & Strack, 1979). 이산요소법은 이산화되어 있는 연속체 시스템을 해석하기 위한 대표적인 해석기법으로, 시스템 내에 존재하는 수많은 입자들을 절점으로 판단하고, 각 입자에 3개의 병진 자유도와 회전 자유도를 부여하여 개별적인 추적과 운동에 대한 수치적인 분석을 가능하게 하여 수많은 리튬 입자로 구성되어있는 블랭킷 리튬층을 분석하는데 적합한 전산 기법이다. 이산요소법을 이용하여 블랭킷 리튬층을 많은 수의 입자(페블)로 이루어진 시스템인 페블베드로 모사하였고, 적층구조에 따른 특성을 분석하였다(Suikkanen, 2014; Zhang, 2017). 또한 구현된 페블베드의 유동 및 열전달 해석을 수행하여 가장 효율적인 적층구조를 찾기 위한 분석을 수행하였다(Chen, et al., 2017; Blake, 1922).

제 2 장 해석 이론 및 방법

이산요소법은 이산화되어 있는 연속체 시스템을 해석하기 위한 대표적인 해석기법으로, 수많은 입자들로 구성된 시스템에 이산적인 접근 방식을 도입하여 입자 각각의 개별적인 거동을 분석하는 방식이다. 시스템 내의 개별 입자의 추적과 운동에 대한 수치적 분석이 가능하며, 각 입자 간 상호작용을 효율적으로 분석할 수 있으므로, 접촉력과 에너지 전이를 모델링 하는데 적합한 방법이다 (Di Renzo & Di Maio, 2004). 이산요소법은 구 형상의 입자를 기본으로 하며, 각각의 입자를 하나의 절점의 형태로 판단하고 있기 때문에 시스템의 열·기계적 거동에 대한 효율적인 분석을 할 수 있는 장점이 있다.

2.1 이산요소법 기본 원리

이산요소법은 각각의 단위 해석 시간마다 동일한 알고리즘을 반복적으로 적용하여 계산하는 방식을 기본으로 한다. 해석 시스템의 단위 해석 시간 (Time-step)에 따른 결과값은 이전 단위 해석 시간의 데이터를 기반으로 하여 결정되며, 각 단위 해석 시간에 적용되는 두 가지의 시간 증분(Iteration) 단계가 존재한다.

1. 접촉력은 입자 간 겹침에 의해 발생
2. 입자의 거동은 현재 단위 해석 시간의 접촉력과 이전 입자의 거동정보를 바탕으로 계산

첫 번째 단계에서는 힘-변위 법칙이 적용된다. 이웃한 입자들 사이의 접촉력은 합력의 변화량에 지배적인 영향을 미친다. 즉, 시스템의 각 단위 해석 시간에서 힘-변위 법칙에 따라 접촉력이 변화하게 되는 것을 의미한다.

두 번째는 뉴턴의 제 2 법칙을 기반으로 하여, 접촉력과 입자 거동의 관계를

분석하기 위한 시간 증분이다. 특정 시스템의 단위 해석 시간에서 일정한 합력을 유지하고 있는 하나의 구 형상의 입자가 존재한다고 가정할 때, 합력을 질량으로 나누어 가속도를 구할 수 있다. 여기에 초기 속도와 위치 정보를 바탕으로 다음 단위 해석 시간에 대한 해석 결과를 구할 수 있다. 수많은 입자들로 구성된 시스템에서도 동일한 방법을 적용하여 각 입자의 단위 해석 시간에서의 접촉력과 변위 등을 계산할 수 있다.

최초의 이산요소 해석기법은 두 입자의 상호작용을 식 (1)과 식 (2)의 방정식으로 표현했다.

$$F = m\ddot{x} \tag{1}$$

$$F = k_n u_n \tag{2}$$

m , \ddot{x} , F , k_n , u_n 는 각각 질량, 가속도, 접촉력, 재료 강성, 두 입자 간 겹침량을 의미한다. 첫 번째 식은 뉴턴의 2 법칙을 의미하고, 두 번째 식은 선형 탄성 모델의 입자 간 접촉을 나타낸다. 위의 두 식은 이산요소법을 구성하는 대표적인 방정식이라 할 수 있으며, Fig. 1과 같이 표현될 수 있다.

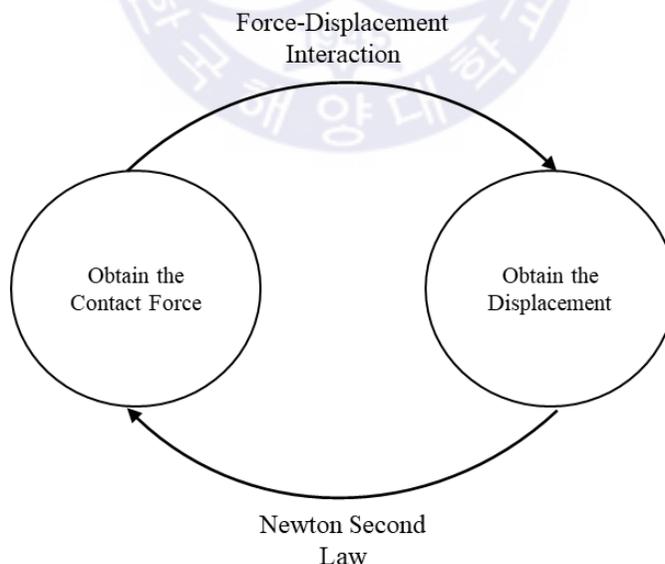


Fig. 1 Flow chart of DEM principle.

2.2 운동방정식

뉴턴의 제 2 법칙에 따른 하나의 입자로 구성된 시스템을 가정할 때, 입자는 중력, 접촉력, 비접촉력에 의한 영향을 받으며, 입자에 대한 거동은 식 (3)과 같이 표현된다(Habas, 1952).

$$\frac{dV}{dt}m_i = \sum^f F_{ij}^c + \sum^f F_{ij}^{nc} + G \quad (3)$$

V , F_{ij}^c , F_{ij}^{nc} , G 는 각각 속도, 입자 i 의 접촉력, 비접촉력, 중력가속도이다.

단위 해석 시간을 고려하게 될 때, 입자의 거동은 5개의 인자로 구성된다. x , \dot{x} , \ddot{x} , ω , $\dot{\omega}$ 는 각각 위치, 속도, 가속도, 각속도, 각가속도이며, 합력과 합모멘트에 의해 입자의 거동이 결정된다.

$$\ddot{x}^t = F^t/m \quad (4)$$

$$\dot{x}^t = \ddot{x}\Delta t + \dot{x}^{t-1} \quad (5)$$

$$x^t = \int_{t-1}^t \dot{x}dt + x^{t-1} \quad (6)$$

F^t 는 단위 해석 시간 t 에서의 합력, m 은 입자의 질량, \ddot{x}^t , \dot{x}^t , x^t 는 각각 단위 해석 시간 t 에서의 입자의 가속도, 속도, 위치를 의미한다. \ddot{x}^{t-1} , \dot{x}^{t-1} , x^{t-1} 는 각각 단위 해석 시간 $t-1$ 에서의 가속도, 속도, 위치이며, Δt 는 단위 해석 시간의 증분을 의미한다. 입자의 합력과 거동 방향은 식 (7)과 같이 특정 모멘트에서 결정된다.

$$M^t = I\dot{\omega}^t \quad (7)$$

M^t , $\dot{\omega}^t$ 는 시간 t 에서의 모멘트와 각가속도이고, I 는 입자의 관성모멘트이다. 입자의 형상이 구이기 때문에 모든 방향에서 동일한 관성모멘트를 가지며, 구의 질량 또한 균일하게 분포되어 있다고 한다면, 식 (7)은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$M^t = \dot{I}\omega = \left(\frac{2}{5}mR^2\right)\dot{\omega}^t \quad (8)$$

식 (8)은 하나의 단위 해석 시간에서 입자 하나의 거동에 대한 방정식이며, 시스템을 구성하고 있는 모든 입자에 적용된다. 입자 거동에 대한 계산이 끝난 후, 힘-변위 법칙을 적용하여 각 입자에 대한 다음 단위 해석 시간을 정의할 수 있다.

2.3 힘-변위 법칙

힘-변위 법칙은 두 입자 간 접촉력과 상대적 거동에 대한 관계성을 나타낸다 (Rathbone, et al., 2015). 상대적 거동은 법선 방향과 접선 방향으로 구분된다. 법선 방향의 접촉 변위는 두 입자의 중심점 사이를 잇는 방향으로 정의되며, 중심점 사이의 거리를 통해 겹침량을 나타낸다. 두 개의 입자가 접촉해있는 모델과 하나의 입자와 벽이 접촉해있는 모델을 가정해보면, Fig. 2와 같이 두 개의 입자가 겹쳐있는 모델의 겹침량은 두 입자의 중심점 사이의 거리와 반지름을 합한 거리의 차로 표현될 수 있다. 입자와 벽 사이의 겹침량은 입자의 반지름에서 입자의 중심에서 벽까지의 최단거리를 뺀 값이며 Fig. 2와 같이 표현된다.

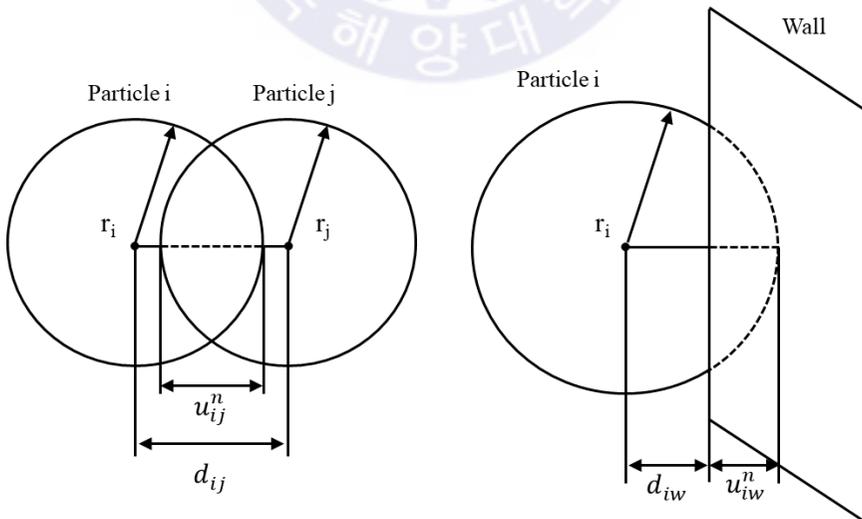


Fig. 2 Ball-ball contact and ball-wall contact.

겹침량에 대한 함수식은 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$u_{ij}^n = r_i + r_j - d_{ij} \quad (9)$$

$$u_{iw}^n = r_i \pm d_{iw} \quad (10)$$

r_i , r_j , u_{ij}^n 는 입자 i 와 j 의 반지름과 겹침량이며, d_{ij} 는 두 입자의 중심점 사이의 거리이다. u_{iw}^n 은 입자와 벽 사이의 겹침량이며, d_{iw} 는 입자의 중심과 벽 사이의 최단거리이다.

접선 방향의 거동을 구성하는 요소는 회전과 변위로 이루어지며 식 (11)과 Fig. 3으로 표현된다. u^t , d_{ab} , θ 는 각각 접선 방향 겹침량과 입자 중심 좌표의 변위, 회전각이다.

$$u^t = d_{ab} + r_i \theta \quad (11)$$

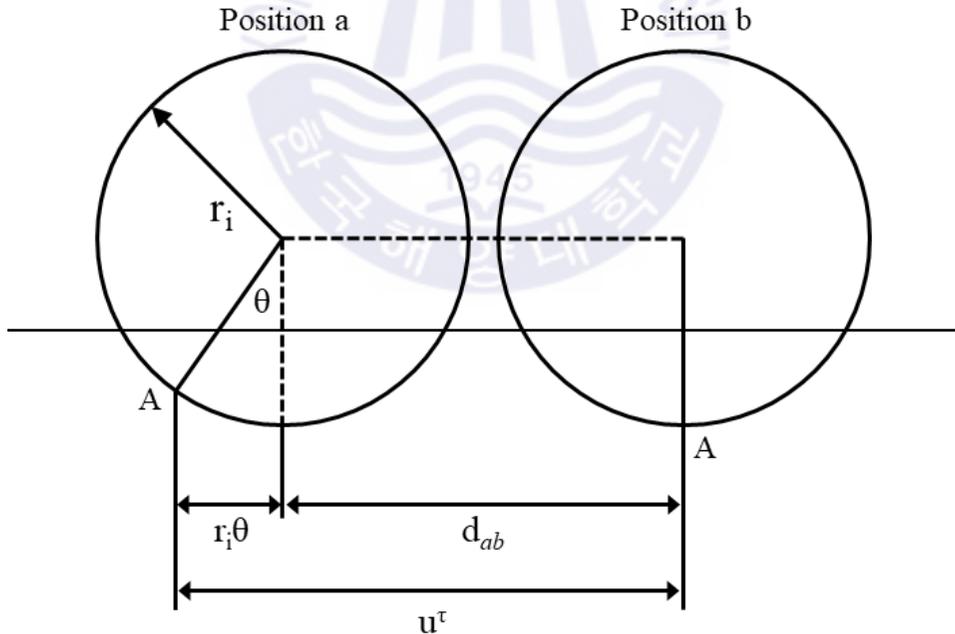


Fig. 3 Definition of shear overlap.

대부분의 해석 모델은 식 (2)와 같은 단순한 접촉 상태의 선형 탄성 모델이 아니므로 도함수가 적용되어 표현되며, 식 (12)와 같이 힘-변위에 대한 관계식으로 정의할 수 있다.

$$F = g(F, \dot{F}, \ddot{F}, u_n, \dot{u}_n, \ddot{u}_n) \quad (12)$$

법선 방향 힘-변위 관계식에 대한 도함수를 제거하기 위해 유한차분법을 적용하게 되면 식 (13), (14), (15), (16), (17), (18)과 같이 정의된다.

$$u_n = \frac{u^{t+1} + u^t}{2} \quad (13)$$

$$\dot{u}_n = \frac{u^{t+1} - u^t}{\Delta t} \quad (14)$$

$$\ddot{u}_n = \frac{\dot{u}^{t+1} - \dot{u}^t}{\Delta t} \quad (15)$$

$$F = \frac{F^{t+1} + F^t}{2} \quad (16)$$

$$\dot{F} = \frac{F^{t+1} - F^t}{\Delta t} \quad (17)$$

$$\ddot{F} = \frac{\dot{F}^{t+1} - \dot{F}^t}{\Delta t} \quad (18)$$

u^t 와 F^t 는 단위 해석 시간 t 에서의 변위와 힘이고, u^{t+1} 와 F^{t+1} 는 단위 해석 시간 $t+1$ 에서의 변위와 힘이다.



2.4 Hertz-Mindlin 접촉 모델

구 형상의 입자를 다룰 때, 선형 탄성 모델은 정확한 해를 계산하기 어렵기 때문에 Hertz 이론을 이용하여 구 입자의 기계적 거동에 대한 접촉을 효과적으로 계산할 수 있다(Hertz, 1881). Fig. 4는 spring-dashport 모델을 이용하여 Hertz-Mindlin 접촉 모델을 근사하여 나타낸 것이다. 입자 간 발생하는 수직력과 전단력의 관계를 스프링과 감쇠 장치를 이용하여 표현한 것이다.

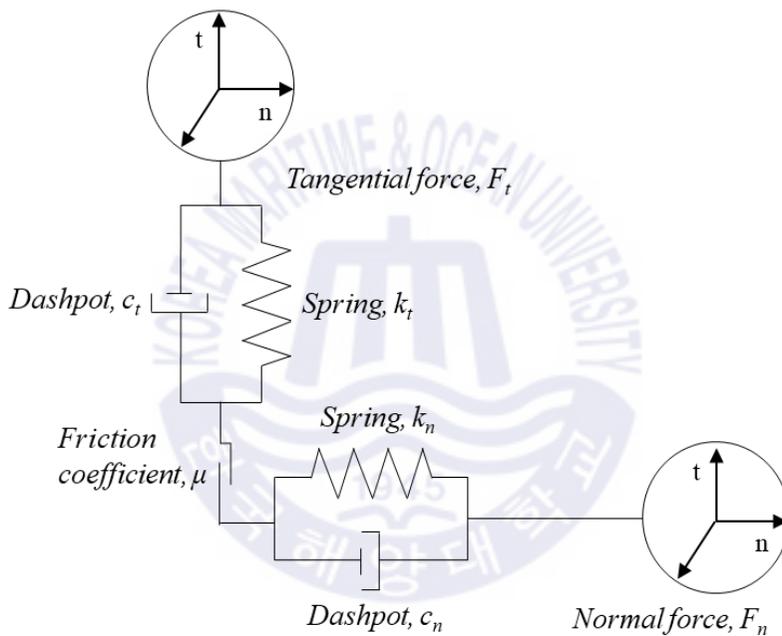


Fig. 4 Spring-dashpot model for the calculation of normal force F_n and tangential force F_t .

Hertz-Mindlin 접촉 모델은 법선 방향의 Hertz 이론과 전단 방향의 Mindlin's no-slip을 바탕으로 하여 계산한다. 반지름 R_i , 종탄성계수 E_i , 푸아송비 ν_i ($i=1, 2$)의 재료 물성을 가지고 있는 두 개의 구 입자가 힘 P 에 준하는 압력을 받고 있을 때, Hertz 이론에 의한 관계식은 식 (19)와 같이 표현된다.

$$P(r) = p_0 \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right)^{1/2} \quad (19)$$

최대 접촉압력 p_0 와 접촉반지름 a 는 식 (20)과 식 (21)과 같이 정의된다.

$$p_0 = \left(\frac{3P}{2\pi a^2} \right) \quad (20)$$

$$a = \left(\frac{3PR^*}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (21)$$

P 에 F_n^E 를 대입하면 법선 방향 접촉력은 식 (21)과 같이 구해진다.

$$F_n^E = -\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} u_n^{0.5} u_n$$

(22)

$$R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (23)$$

$$1/E^* = \frac{1-v_j^2}{E_j} + \frac{1-v_i^2}{E_i} \quad (24)$$

E^* 는 등가 탄성계수이고, R^* 는 접촉하고 있는 두 입자의 등가 반지름이다. 접선 방향의 힘-변위 곡선은 전단력과 법선력이 상호작용한다. 이 과정에서 미끄러짐이 발생하는데, 이는 쿨롱(Coulomb)의 마찰법칙으로 인해 발생 되는 것이다. 미끄러짐이 전체 접촉 영역으로 확장될 때, 마찰에 대한 거동은 식 (24)로 요약된다.

$$F_s \leq \mu F_n \quad (25)$$

Hertz-Mindlin의 완전한 이론을 이산요소법에 대입시키는 것은 매우 복잡하다. 그러므로 허용 가능한 범위의 근사를 통해 이산요소법에 적용시켰고, 전단 방향에 대한 Hertz-Mindlin 접촉 모델 방정식은 식 (25)과 같이 구해진다.

$$F_t = -\frac{2}{3} (8G^* \sqrt{R^*} u_n^{0.5}) u_t \quad (26)$$

G^* 는 두 접촉 모델 간 등가 전단 계수이다.

제 3 장 페블베드의 적층 특성 분석

이산요소법을 이용하여 페블베드의 적층 형상을 구현하였고, 적층 조건에 따른 특성을 분석하였다. 실제 블랭킷 리튬층의 크기 비율과 흡사한 10 mm×40 mm×25 mm 모델과 크기를 축소한 10 mm×10 mm×20 mm 모델을 비교하여 적층 특성을 분석하였다. 또한 이진 크기 페블베드(Binary-sized pebble beds, BS-pebble beds)와 단일 크기 페블베드(Mono-sized pebble beds, MS-pebble beds)로 구분하여 페블의 크기 및 체적 비율에 따른 적층 특성을 분석하였고, 페블베드에 운동을 부여하여 운동 주기와 운동 방향에 따른 적층 특성을 함께 분석하였다. 실제 블랭킷 리튬층을 그대로 모사하여 해석하기 위해서는 매우 많은 수의 페블에 대한 열·기계적 계산이 필요하여 물리적인 측면에서 계산 부담이 너무 크기 때문에 주기경계조건(Periodic boundary condition, PBC)을 부여하여 해석을 수행하였다. 페블의 물성은 실제 핵융합 연료로 사용되고 있는 Li_2TiO_3 의 물성을 사용하였고, **Table 1**과 같이 나타내었다.

Table 1 Material properties of Li_2TiO_3

Poisson' s Ratio	0.24
Solids Density (kg/m^3)	3,000
Young' s Modulus (GPa)	126
Coefficient of Restitution	0.3
Coefficient of Static Friction	0.1
Coefficient of Rolling Friction	0.0

3.1 주기경계조건 적용에 대한 검증

주기경계조건은 작은 영역의 해석 모델을 무한히 확장하여 큰 모델로 근사하는 해석기법으로, Fig. 5와 같은 기본 원리로 적용된다. 페블베드에 주기경계조건을 부여하게 되면 계산시간에 대한 부담을 크게 줄일 수 있어 효율적인 해석을 수행할 수 있다. 해석 모델에 주기경계조건을 부여하여 적층 특성을 분석하기 전에 주기경계조건에 대한 검증을 수행하였다. 검증은 10 mm×40 mm×25 mm의 해석영역에 지름이 1.00 mm, 0.50 mm인 페블을 적층시켜 주기경계조건 적용에 따른 특성을 분석하여 확인하였다. Fig. 6은 주기경계조건 검증을 수행하기 위한 해석 모델이다. 각 모델의 주기경계조건 적용에 따른 페블베드의 부피분율(Packing fraction, PF)을 비교·분석하여 검증을 수행하였다. 부피분율은 $(V_s+V_l)/V_{box}$ 로 나타내었으며, V_s , V_l , V_{box} 는 각각 지름이 0.50 mm, 1.00 mm인 페블의 체적과 해석영역의 체적이다. 국부적 부피분율(Local packing fraction, LPF)은 페블베드의 단면에 대한 부피분율을 나타내는 것으로, 페블베드의 국부적 부피분율을 연속적으로 나타내어 페블베드 주기경계조건 적용에 따른 모델 간 적층 특성을 비교하였다.

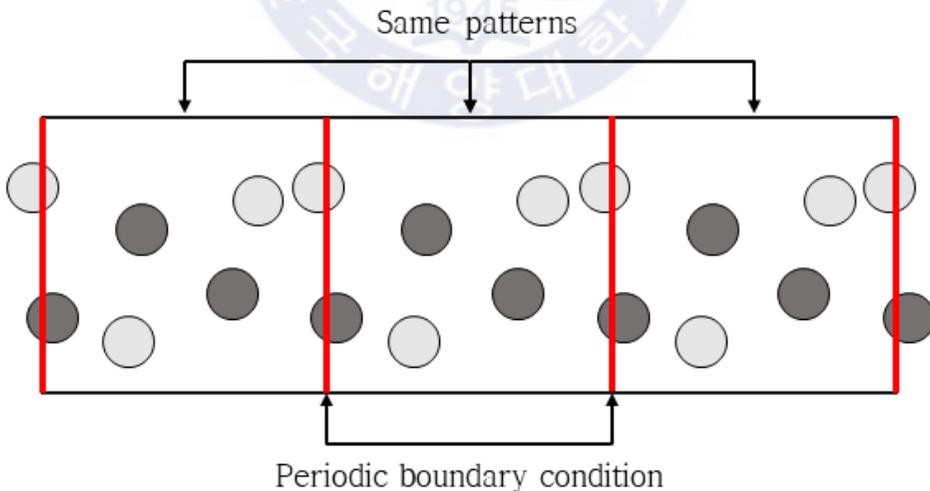
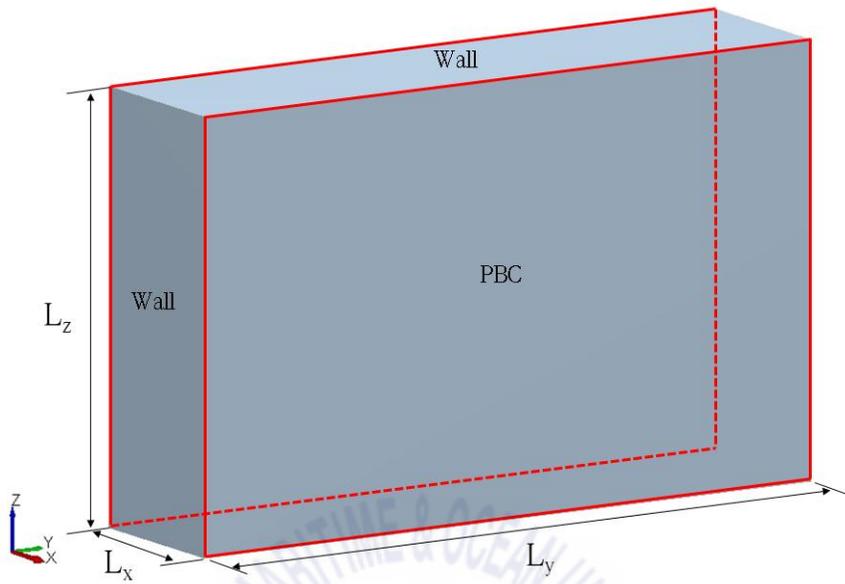
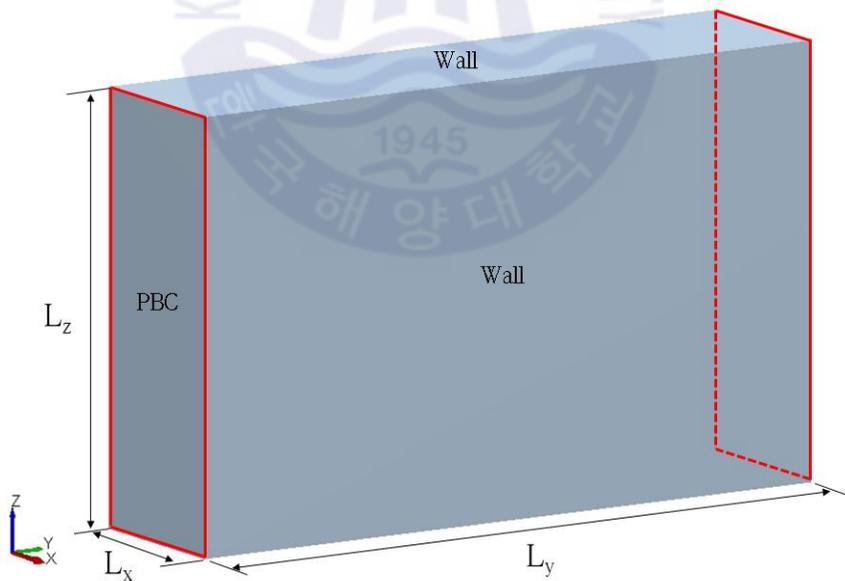


Fig. 5 Description of periodic boundary condition.

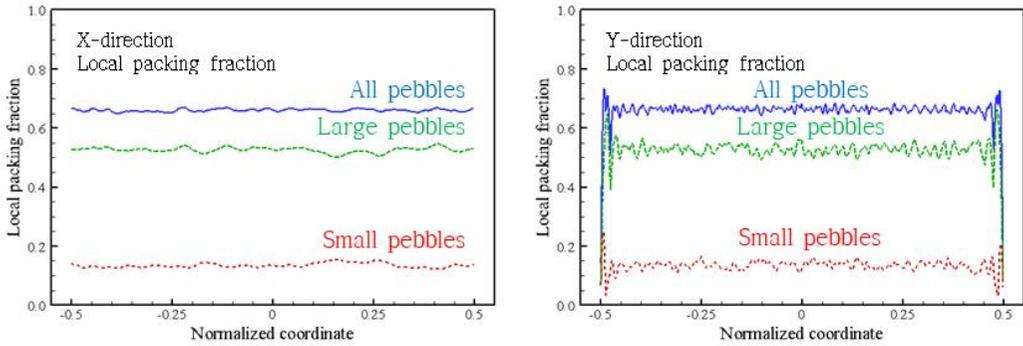


(a)

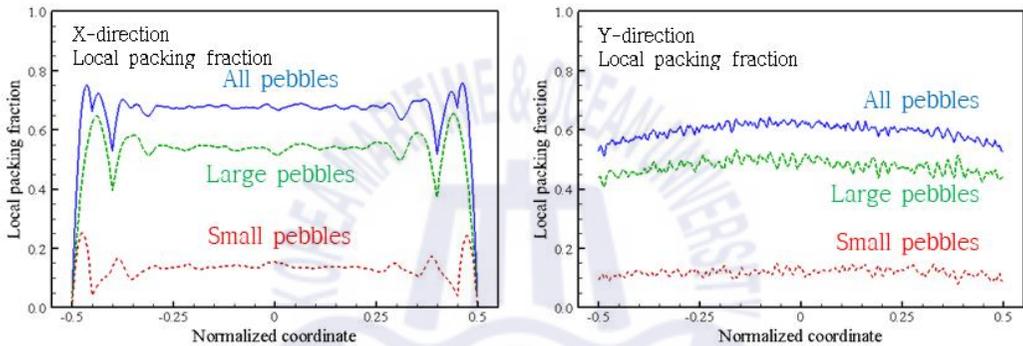


(b)

Fig. 6 Analysis domains of pebble beds: (a) under the PBC in the x-direction, and (b) under the PBC in the y-direction.



(a)



(b)

Fig. 7 Local packing fractions in the x- and y-directions: (a) under the PBC in the x-direction, and (b) under the PBC in the y-direction.

Fig. 7은 x, y-방향의 주기경계조건 적용에 따른 해석 모델의 국부적 부피분율을 나타낸 것이다. **Fig. 7** (a)는 x-방향에 주기경계조건이 적용된 모델의 x, y-방향 국부적 부피분율을 나타낸 것으로, 주기경계조건이 부여되지 않은 y-방향의 벽면에서 마찰로 인해 페블이 집중되는 현상이 발생하여 비교적 높은 부피분율을 보인다(Li, et al., 2016). 주기경계조건이 부여된 x-방향 벽면에서는 벽면효과가 적용되지 않기 때문에 전체적으로 균일한 부피분율을 보인다. **Fig. 7** (b)는 y-방향 주기경계조건이 적용된 모델의 x, y-방향 국부적 부피분율을 나타낸 것이다. **Fig. 7** (a)와 마찬가지로 주기경계조건이 부여된 y-방향에선 균일한 부피분율을 보이고, 주기경계조건이 부여되지 않은 x-방향에선 벽면의 마찰로 인해 벽면에서 높은 부피분율이 집중되는 것을 보인다.

3.2 10 mm×40 mm×25 mm 모델의 페블베드 적층 특성

지름이 1.00 mm인 페블을 기준으로 하여 지름 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm인 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드와 지름 1.00 mm 페블로만 구성된 단일 크기 페블베드를 이용하여 페블의 크기 비율에 따른 적층 특성을 분석하였다. 또한 해석영역에 0 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz의 운동 주기를 부여하여 운동 주기에 따른 적층 특성을 분석하였고, 페블의 크기 비율에 대한 상호작용을 함께 분석하였다. 해석영역의 운동은 $\pm y$ -방향으로 1.00 mm만큼 4초 동안 움직이게 하였고, 페블베드를 구성하고 있는 지름 1.00 mm인 페블의 체적은 80 %, 지름 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm인 페블은 20 %로 고정하였다. 해석영역의 x-방향은 주기경계조건을 부여하였고, y, z-방향 벽면은 벽으로 설정하여 해석을 수행하였다.



3.2.1 페블의 크기 비율에 따른 적층 특성 분석

Fig. 8은 페블의 크기 비율에 따른 부피분율을 나타낸 것이다. 혼합된 페블의 크기가 작을수록 혼합성능이 향상되어 더 높은 부피분율을 나타낸다.

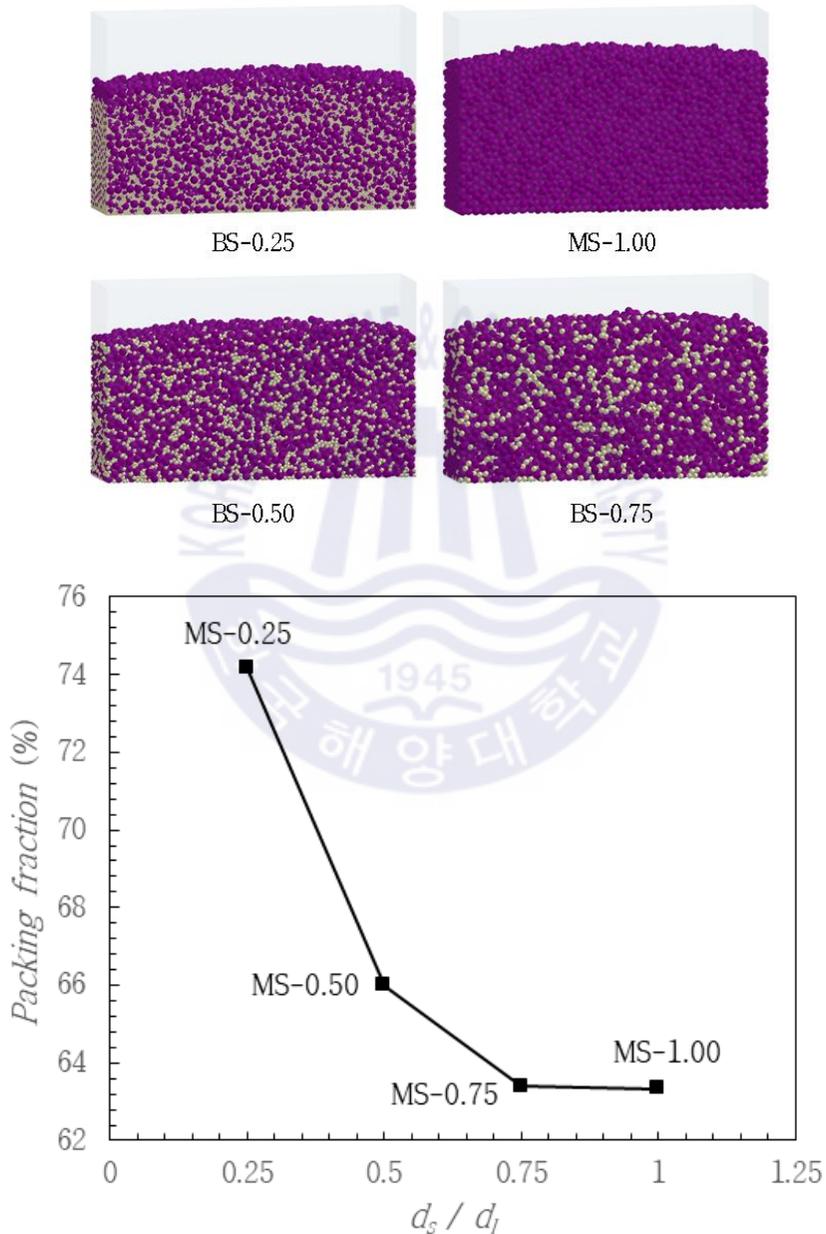


Fig. 8 Packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio.

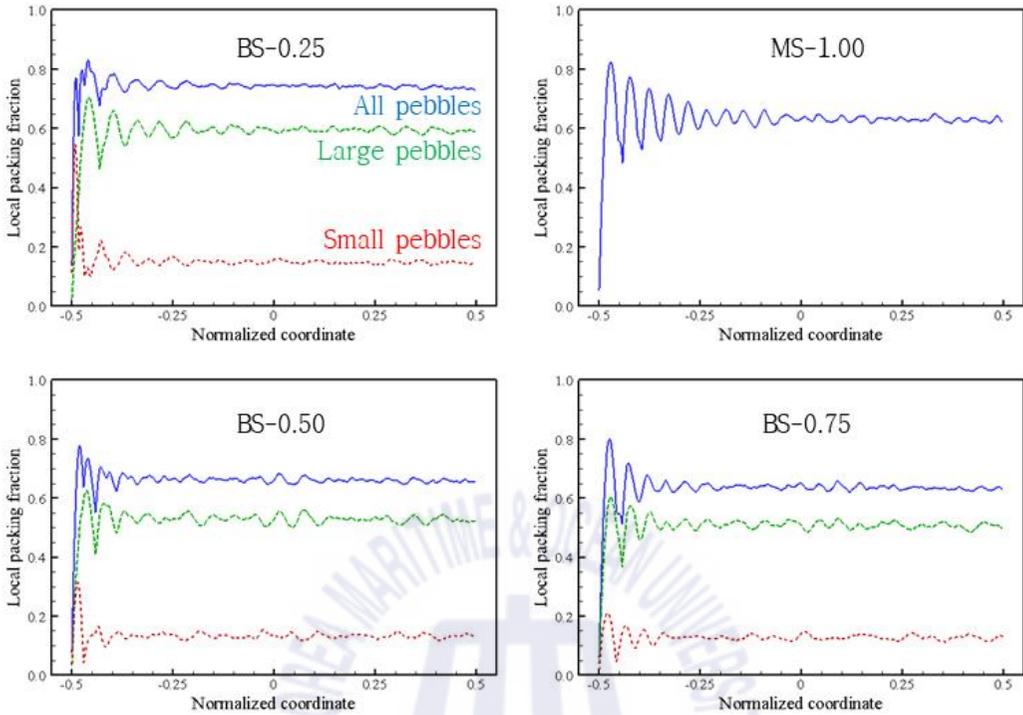
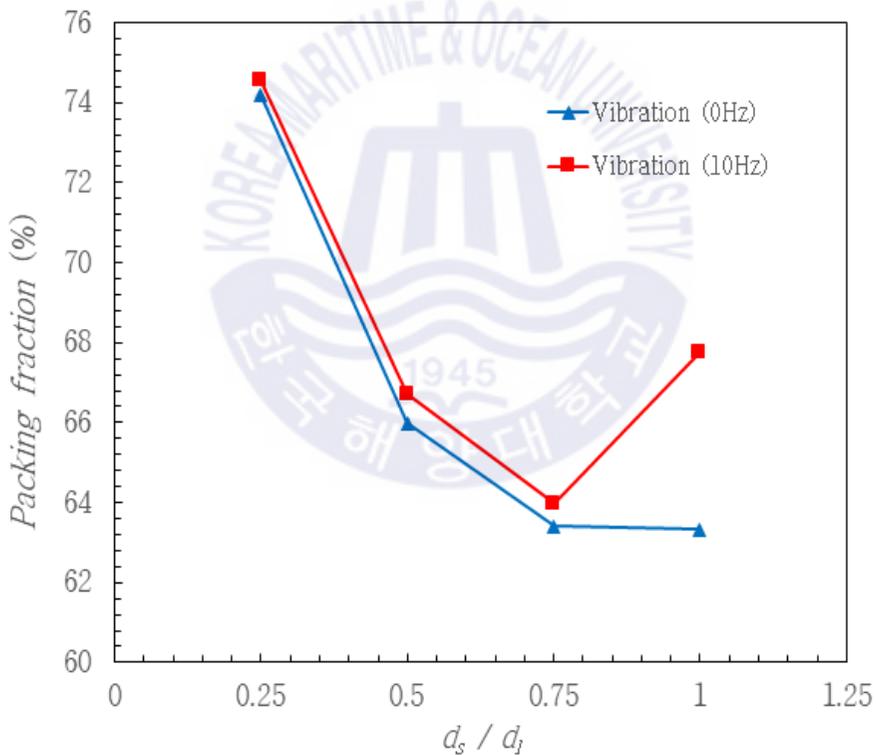


Fig. 9 Packing fractions and local packing fractions in the z-direction according to pebble size ratio.

Fig. 9는 페블의 크기 비율에 따른 z-방향 국부적 부피분율을 나타낸 것이다. 페블베드의 위쪽에 있는 페블이 아래쪽으로 누르는 압축력으로 인해 아래쪽에 적층된 페블에서 높은 부피분율을 보인다. 또한 혼합된 페블의 크기가 작을수록 부피분율이 증가하는 경향을 보이며, 지름이 0.25 mm인 페블이 혼합된 모델에서 가장 높은 부피분율을 나타낸다.

3.2.2 페블베드의 운동 주기에 따른 적층 특성 분석

Fig. 10은 페블의 크기 비율과 페블베드의 운동 주기에 따른 적층 특성을 함께 분석한 것이다. 지름이 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm인 페블이 혼합된 모델은 10 Hz의 운동 주기에서 혼합성능이 향상되어 부피분율이 증가하지만, 20 Hz의 운동 주기에서 페블 간 분리현상으로 인해 부피분율이 감소하는 경향을 보인다. 단일 크기 페블베드는 10 Hz의 운동 주기에서 결정 격자와 같은 규칙적 적층 형상을 나타내면서 높은 부피분율을 보이고, 20 Hz의 운동 주기에서 더 많은 규칙성이 형성되어 부피분율이 증가한다.



(a)

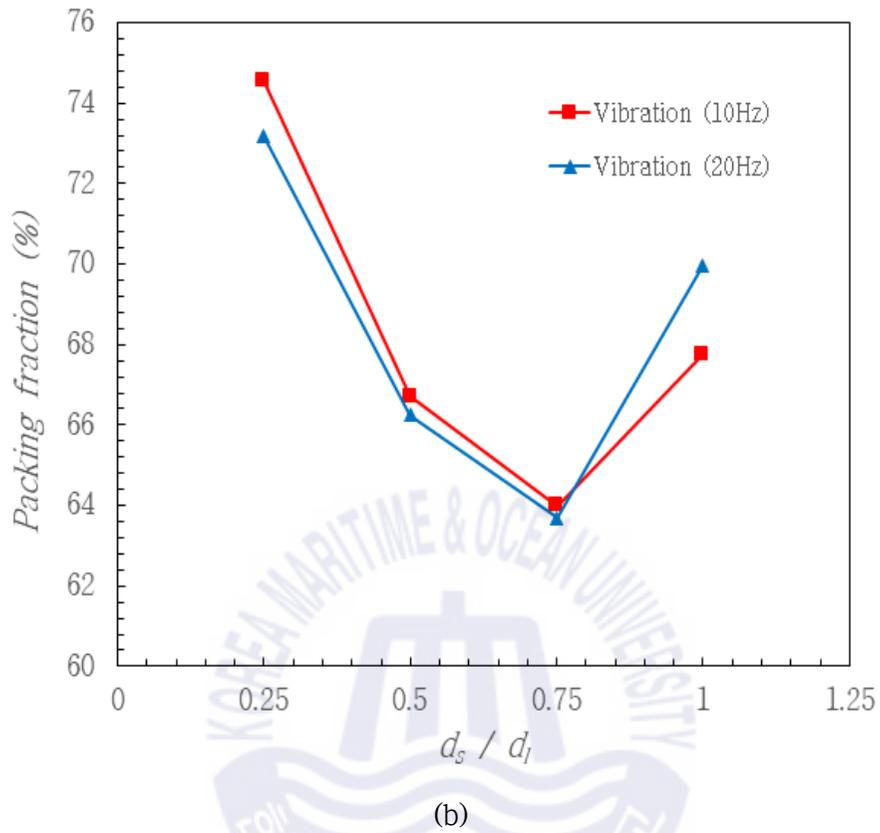
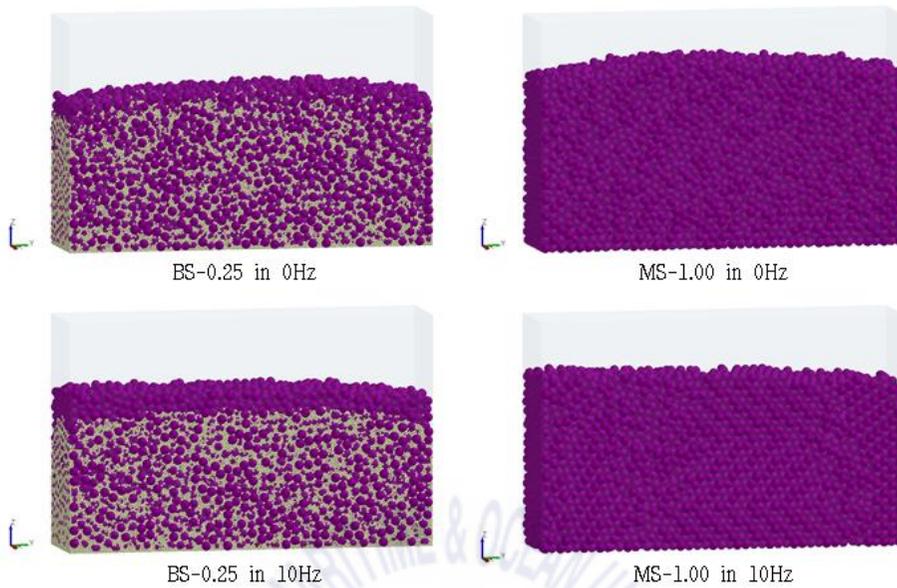
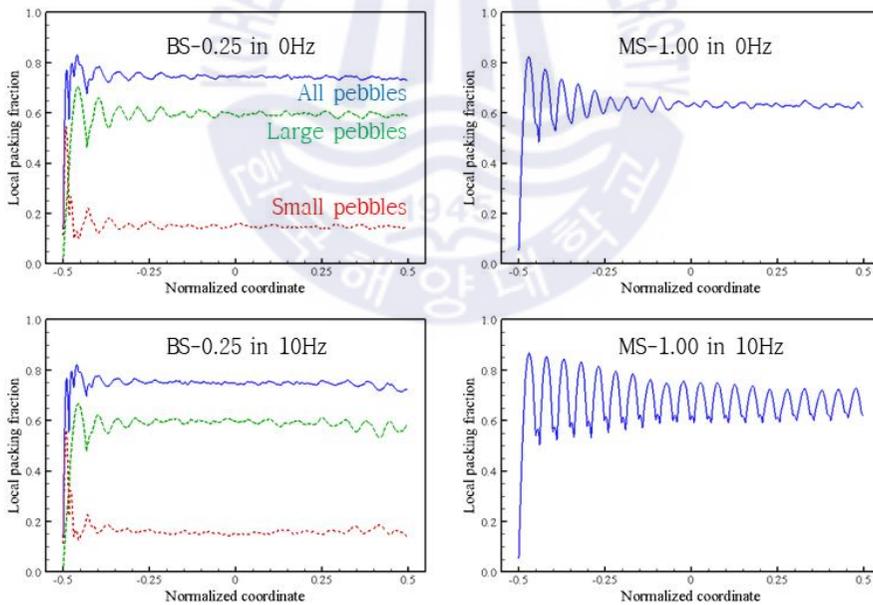


Fig. 10 Packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations: (a) 0 Hz to 10Hz and (b) 10Hz to 20Hz.



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Packing structures of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations. (b) Local packing fractions of pebble beds in the z-direction.

Fig. 11은 10 Hz와 20 Hz의 z-방향 국부적 부피분율을 나타낸 것이다. 지름이 0.25 mm인 페블이 혼합된 모델은 부피분율의 변화가 거의 없으며, 국부적 부피분율 또한 큰 차이를 나타내지 않는다. 단일 크기 페블베드는 규칙적 적층 형상이 형성된 부분에서 부피분율이 증가하는 것을 보인다.

Fig. 12는 페블의 크기와 운동 주기에 따른 전체 모델의 부피분율을 나타낸 것이다. 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드는 10 Hz의 운동 주기에서 혼합성능이 향상되어 부피분율이 증가하지만 20 Hz와 30Hz의 운동 주기에서는 페블 간 분리현상으로 인해 부피분율이 감소하는 경향을 보인다. 단일 크기 페블베드는 10 Hz와 20 Hz의 운동 주기에서 규칙적 적층 형상이 만들어지게 되어 높은 부피분율을 보이지만, 30 Hz의 운동에서 규칙적 적층 형상이 소실되어 부피분율이 감소하는 경향을 보인다.

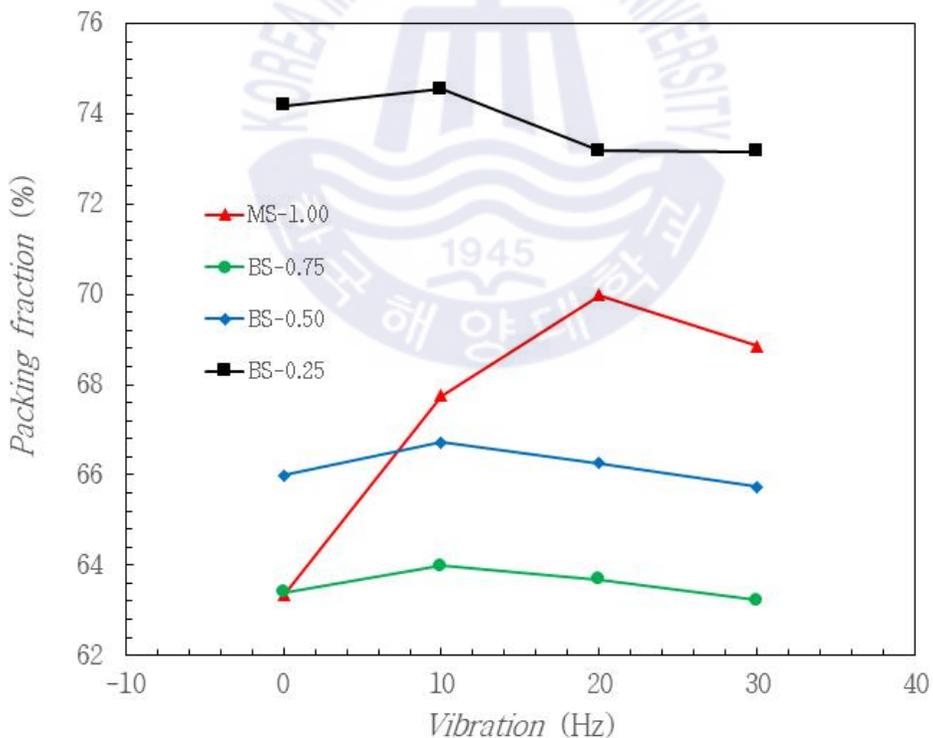


Fig. 12 Overall packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

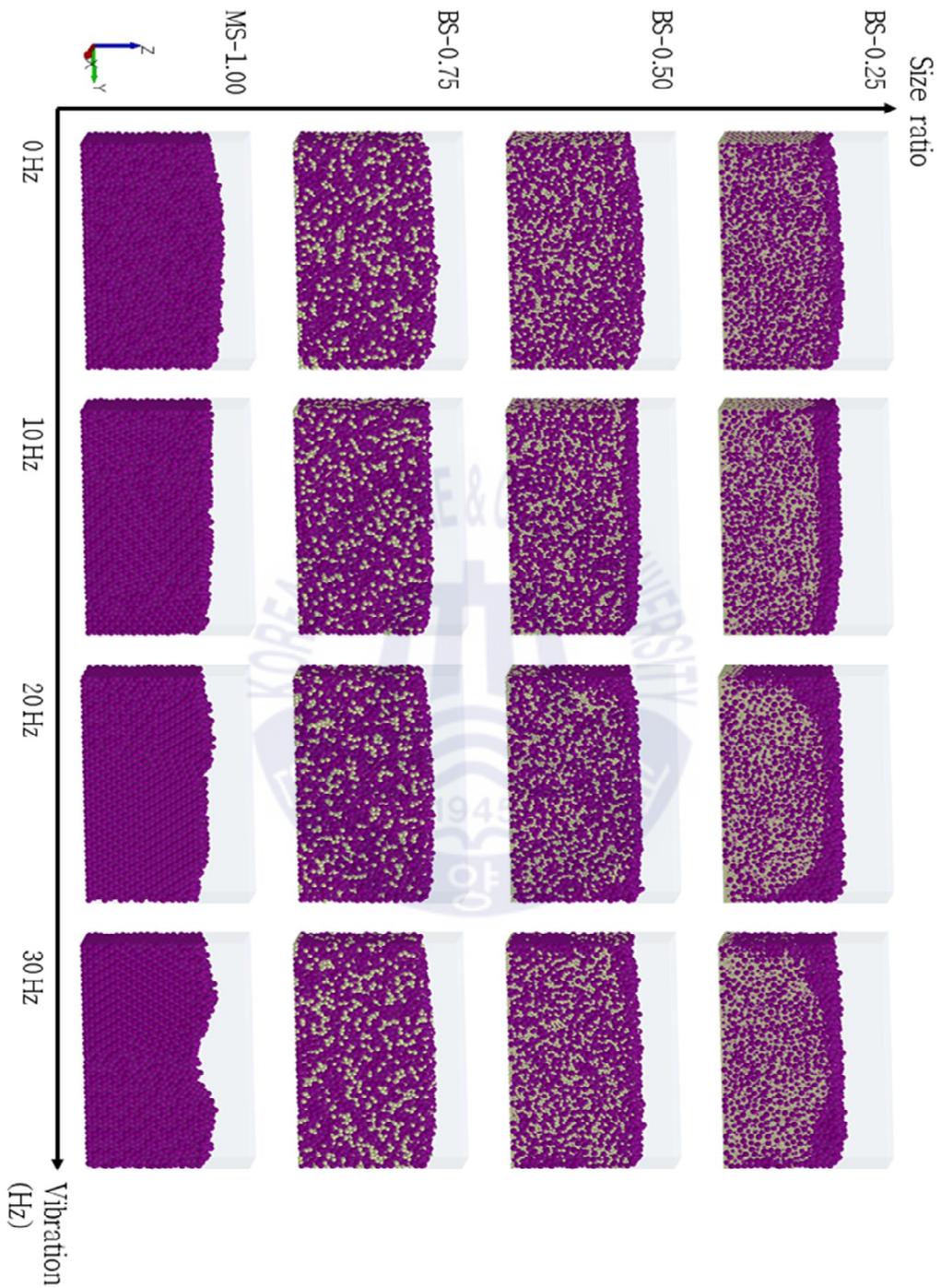


Fig. 13 Packing structures of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

3.2.3 페블베드의 운동 방향에 따른 적층 특성 분석

y, z-방향은 벽으로 설정하고, x-방향에 주기경계조건을 부여하여 10 mm×40 mm×25 mm 모델의 y, z-방향 운동에 따른 적층 특성을 분석하였다. 지름이 0.25 mm, 1.00 mm인 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드를 이용하였고, 20 Hz의 운동 주기에서 분석하였다.

Fig. 14는 y, z-방향 운동에 따른 이진 크기 페블베드의 적층 형상을 나타낸 것이다. y-방향 운동은 작은 페블이 중심으로 집중되어 페블 간 분리현상이 발생하는 반면, z-방향 운동은 전체적으로 균일한 적층 형상을 보인다.

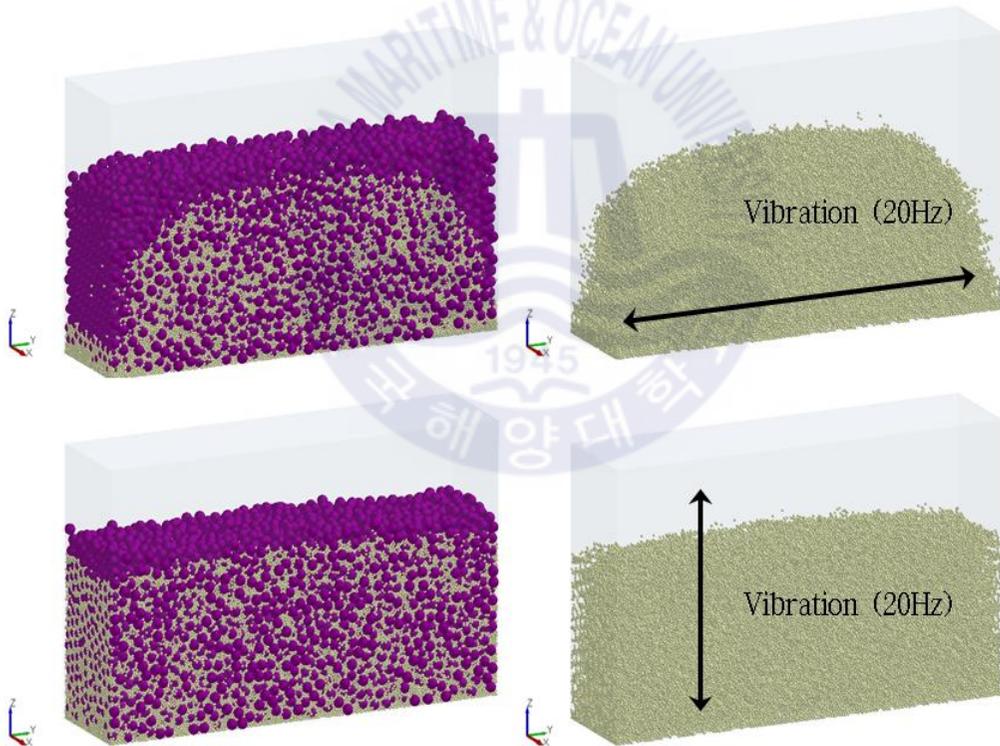


Fig. 14 Packing structures and small pebble's distribution of pebble beds according to vibration direction in 20 Hz.

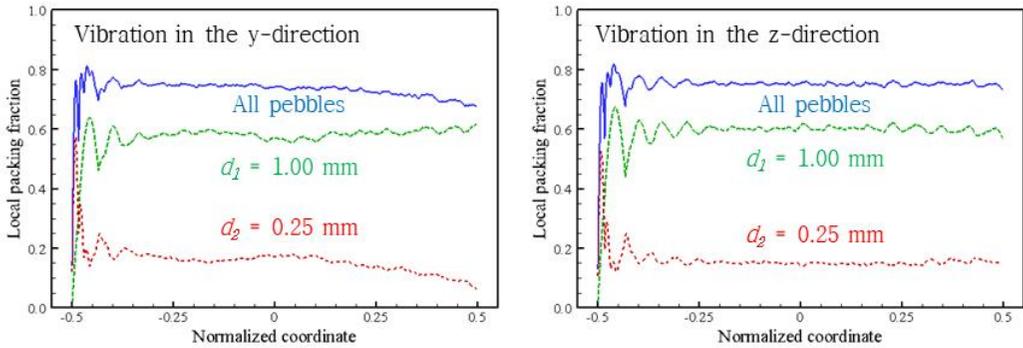


Fig. 15 Local packing fractions of pebble beds in the z-direction according to vibrations in the y, z-directions.

Fig. 15는 y, z-방향 운동에 따른 z-방향 국부적 부피분율을 나타낸 것이다. y-방향으로 운동을 부여한 모델은 페블 간 분리현상으로 인해 페블베드의 높이 방향으로 부피분율이 감소하는 경향을 보이지만, z-방향 운동모델은 균일한 적층 형상과 부피분율을 보이며 비교적 높은 적층 성능을 보인다.

Fig. 16은 운동 방향과 벽면효과의 상관관계를 분석하기 위해 모든 면을 벽으로 설정하여 페블베드의 적층 특성을 분석하였다. 지름이 1.00 mm, 0.50 mm인 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드를 이용하였고, x, y, z-방향을 운동에 따른 국부적 부피분율을 비교하여 분석하였다. x-방향과 y-방향에 운동을 부여한 모델은 페블의 크기 차이에 의한 분리현상이 발생하여 전체적으로 균일한 적층구조를 가진 z-방향 운동모델보다 낮은 부피분율을 보인다.

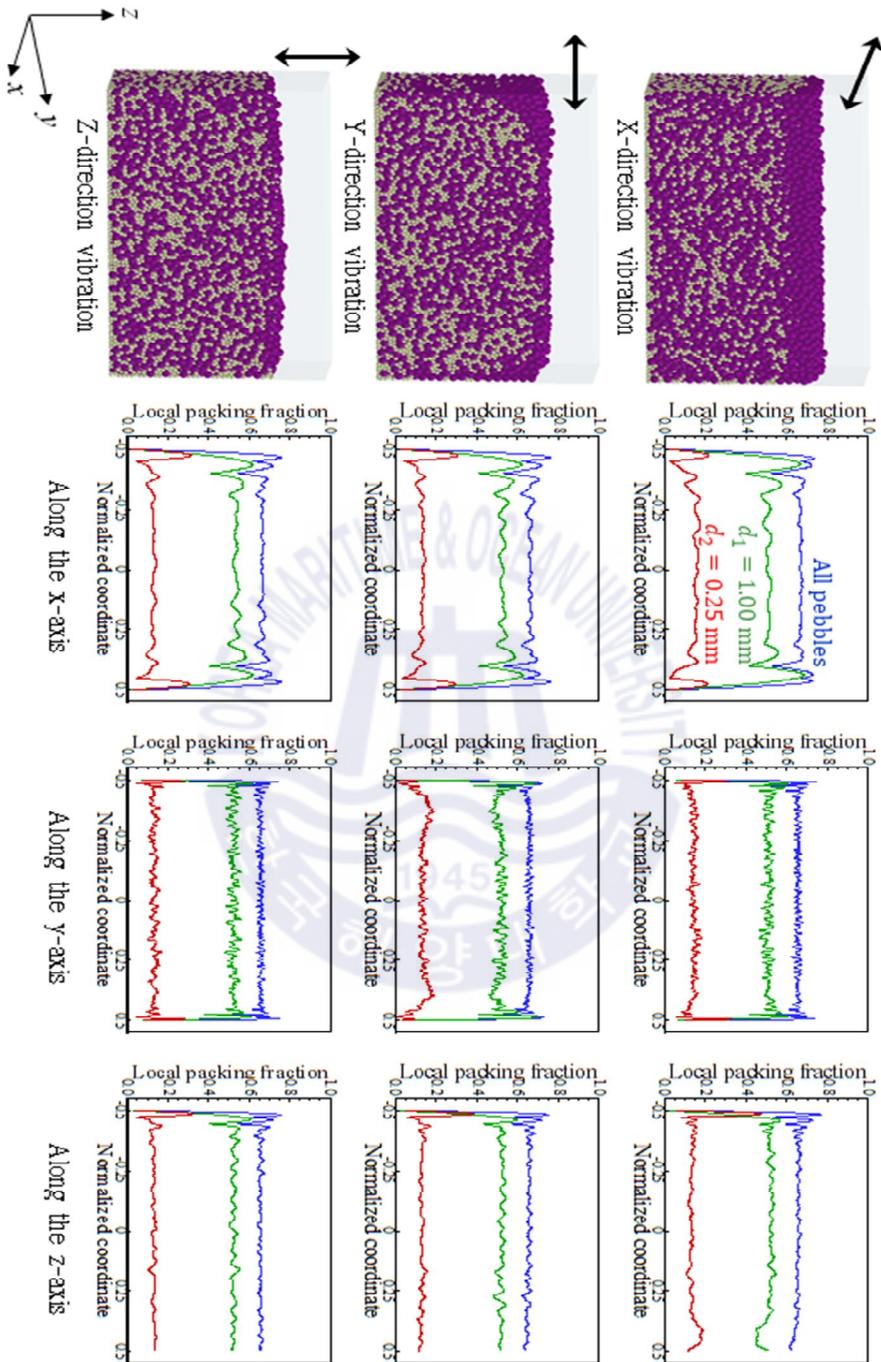


Fig. 16 Local packing fractions of pebble beds according to vibrations in the x, y, z-directions.

3.3. 10 mm×10 mm×20 mm 모델의 페블베드 적층 특성

10 mm×10 mm×20 mm 모델을 이용하여 페블의 크기 및 체적 비율과 해석영역에 부여된 운동 주기에 따른 적층 특성을 분석하였다. 지름이 1.00 mm인 페블을 기준으로 하여 지름 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm인 작은 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드와 지름 1.00 mm 페블로만 구성된 단일 크기 페블베드의 적층 특성을 비교하여 분석하였고, 해석영역에 운동이 부여될 때의 상호작용을 함께 보았다. 해석영역의 운동은 z-방향 양쪽으로 1.00 mm만큼 4초 동안 움직이게 하였고, 페블베드를 구성하고 있는 지름 1.00 mm인 페블의 체적은 70 %, 지름 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm인 페블은 30 %로 고정하였다. 해석영역의 x, y-방향에는 주기경계조건을 부여하였고, z-방향은 벽면으로 설정하여 해석을 수행하였다.

3.3.1 페블의 크기 비율에 따른 적층 특성 분석

Fig. 17은 10 mm×10 mm×20 mm 모델과 페블베드의 적층 형상을 나타낸 것이다.

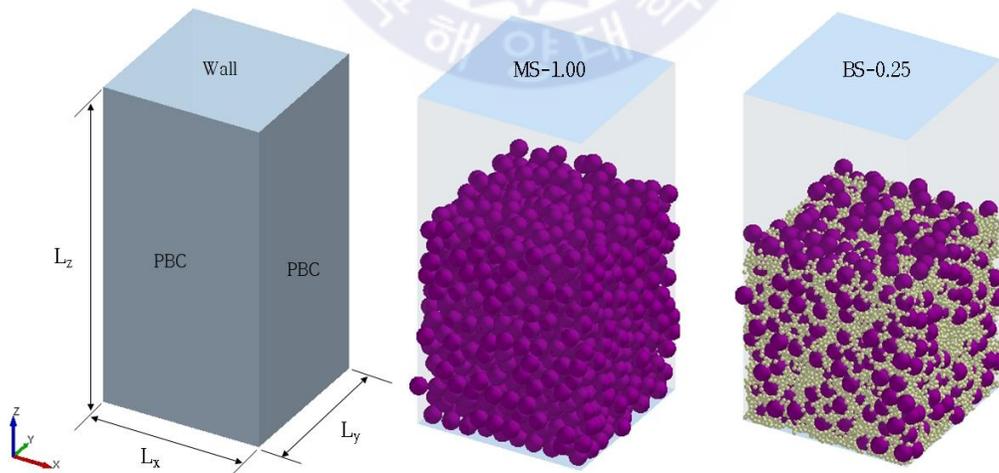


Fig. 17 Analysis domain and pebble structures of pebble beds and according to pebble size ratio.

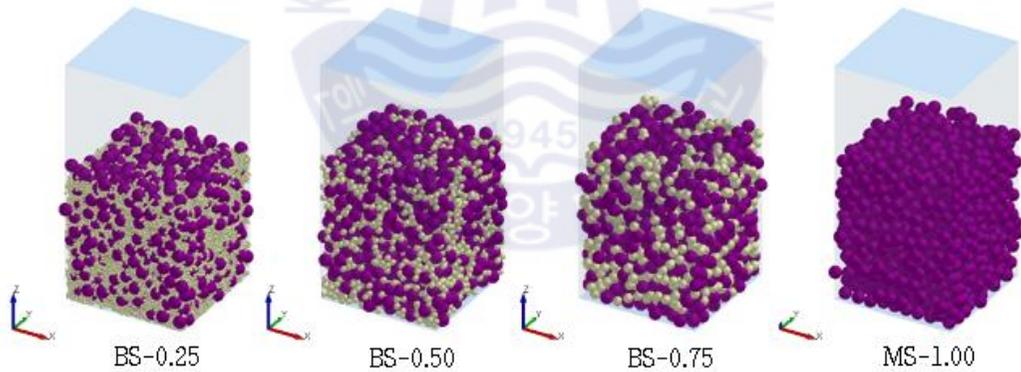
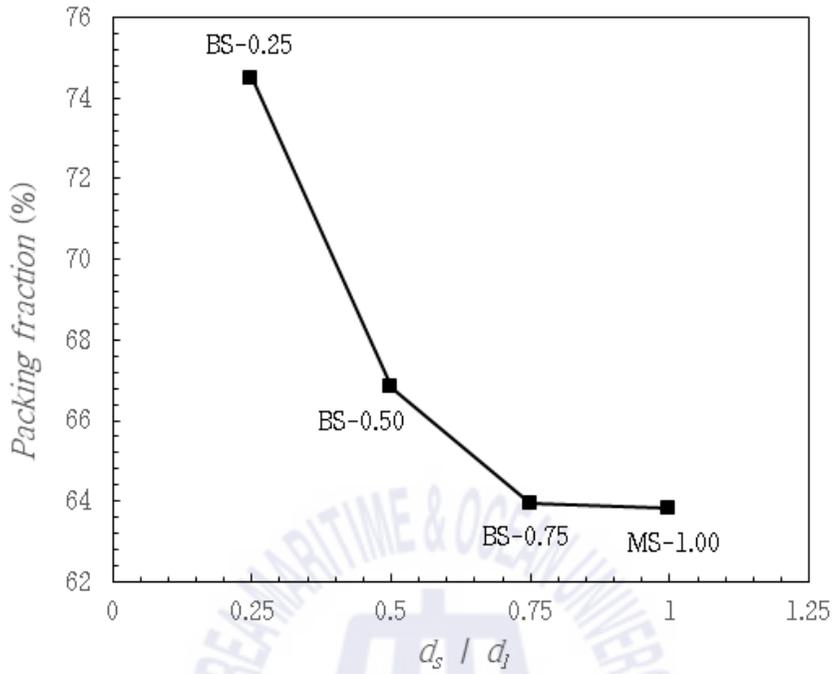


Fig. 18 Packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio.

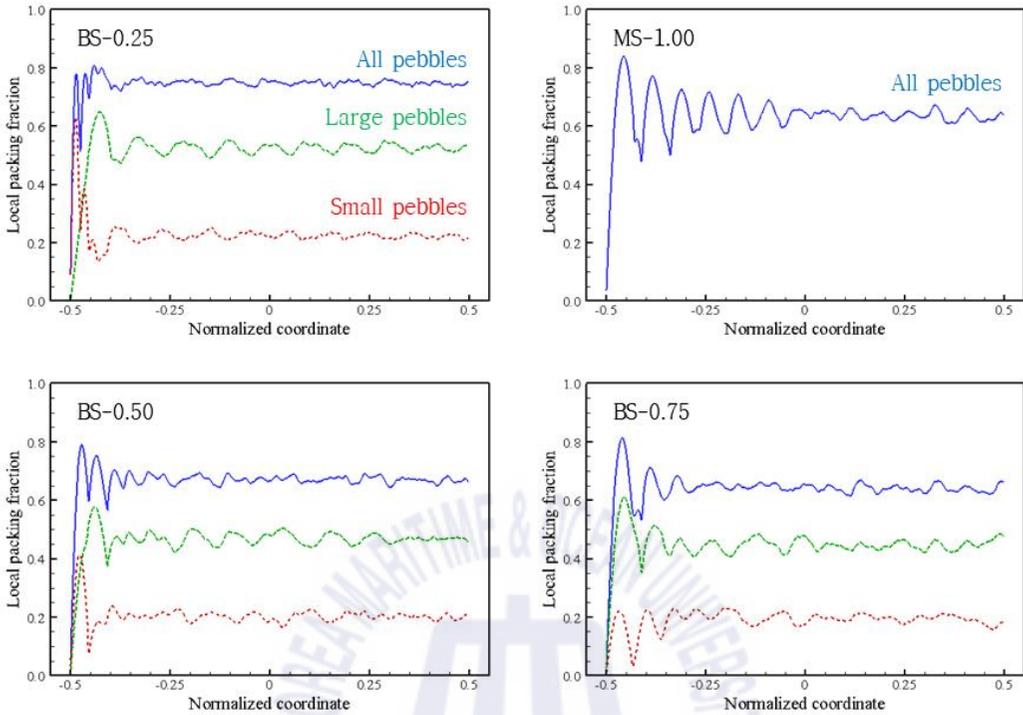
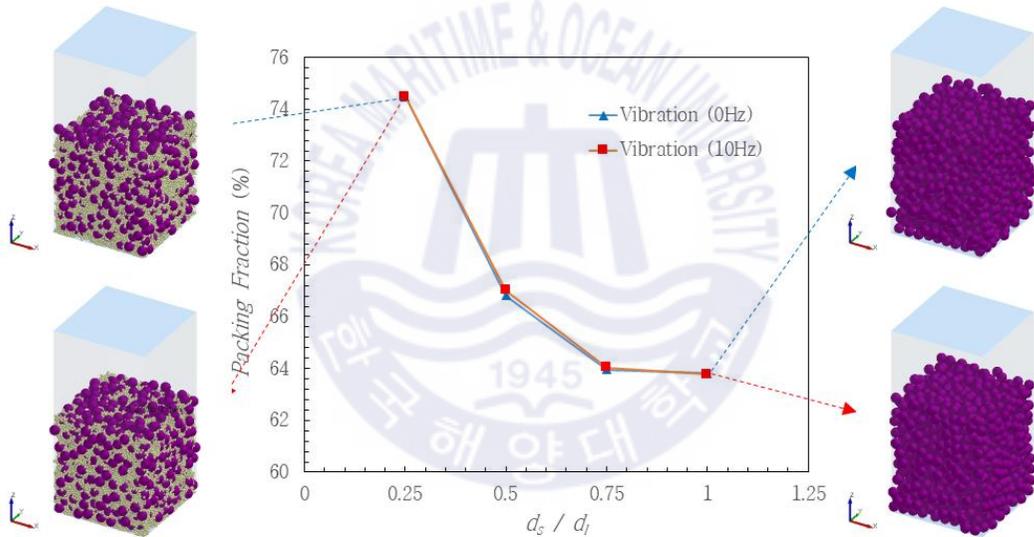


Fig. 19 Local packing fraction of pebble beds according to pebble size ratio

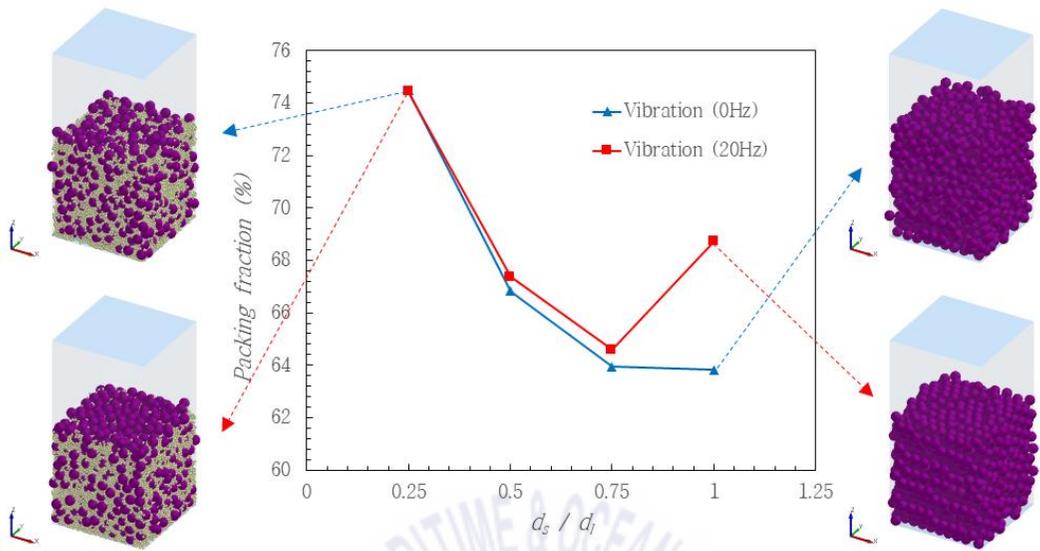
Fig. 18은 페블의 크기 비율에 따른 페블베드의 부피분율을 나타낸 것이다. 이진 크기 페블베드를 구성하는 페블의 크기가 작을수록 부피분율이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 크기가 작은 페블이 혼합될수록 혼합성능이 향상되어 조밀한 적층구조를 형성하게 된다. Fig. 19는 페블의 크기 비율에 따른 z-방향 국부적 부피분율을 나타낸 것으로 위쪽에 있는 페블이 아래로 누르는 압축력으로 인해 페블베드의 아래쪽에서 높은 부피분율을 나타내며, 크기가 작은 페블이 혼합될수록 전체적으로 높은 수준의 부피분율을 나타낸다.

3.3.2 페블베드의 운동 주기에 따른 적층 특성 분석

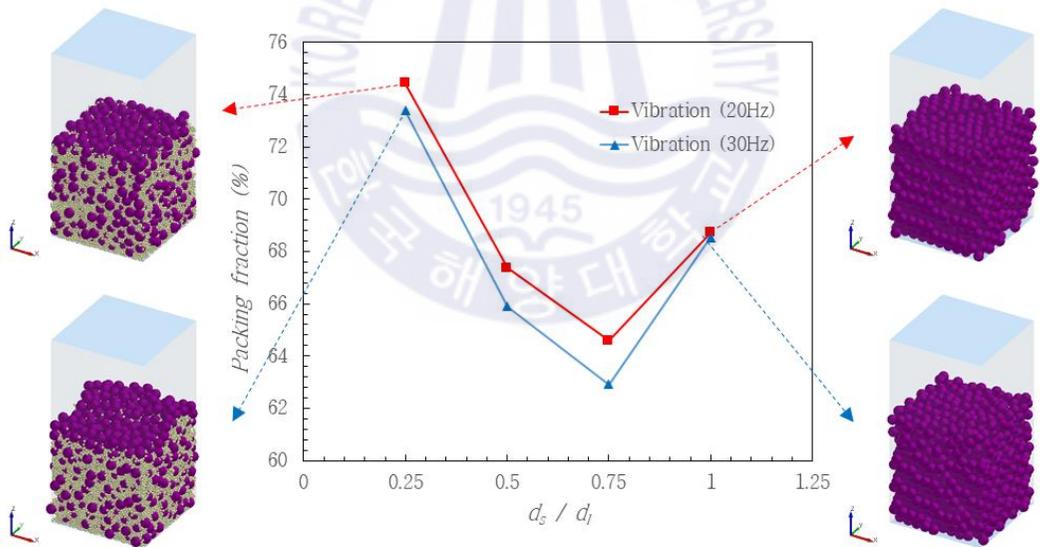
Fig. 20은 페블의 크기 비율과 해석영역의 운동 주기에 따른 부피분율을 나타낸 것이다. 지름이 0.50 mm, 0.75 mm인 페블이 혼합된 페블베드는 10 Hz와 20 Hz에서 부피분율이 조금 증가하지만 30 Hz에서는 감소하는 경향을 보인다. 지름이 0.25 mm인 페블이 혼합된 페블베드는 20 Hz까지 운동에 의한 영향을 크게 받지 않지만, 30 Hz의 운동 주기에선 비교적 큰 감소 폭을 보인다. 단일 크기 페블베드는 20 Hz에서 페블들이 규칙적 적층 형상을 가지면서 높은 부피분율 증가율을 보인다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 20 Packing structures and fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations: (a) 0Hz to 10 Hz, (b) 0Hz to 20 Hz, (c) 10 Hz to 20 Hz.

Fig. 21은 0 Hz와 20 Hz의 운동 주기에서 이진 크기 페블베드와 단일 크기 페블베드의 z-방향 국부적 부피분율을 비교한 것이다. 이진 크기 페블베드는 20 Hz의 운동에서 적층에 대한 영향을 크게 받지 않으며, 30 Hz의 운동 주기에서 페블 간 분리현상으로 인해 부피분율이 감소하는 경향을 보인다. 단일 크기 페블베드는 20 Hz의 운동 주기에서 규칙적 적층 형상이 형성되어 높은 부피분율을 보이며, 페블베드의 규칙적인 적층 형상이 형성되는 위치에서 부피분율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

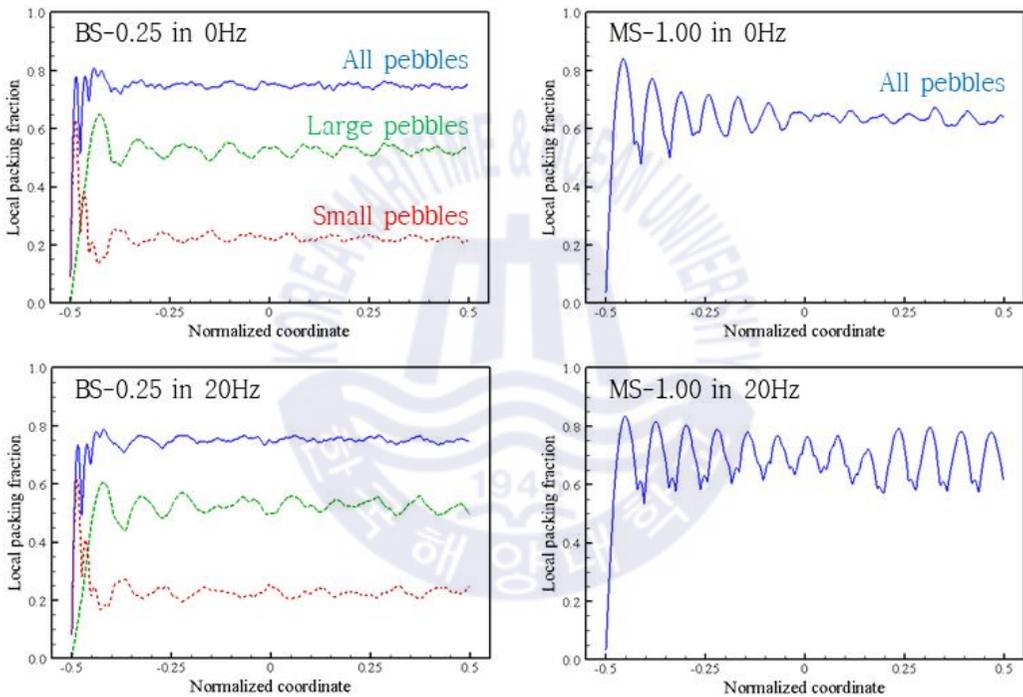


Fig. 21 Local packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

Fig. 22는 페블의 크기와 운동 주기에 따른 전체 모델의 부피분율을 나타낸 것이다. 지름이 0.25 mm인 페블이 혼합된 모델은 10 Hz, 20 Hz의 운동 주기에서 적층 특성의 변화가 크지 않고, 30 Hz의 운동에서 페블의 분리현상이 발생하여 부피분율 감소하는 경향을 보인다. 0.50 mm, 0.75 mm 페블이 혼합된 모델은 10 Hz, 20 Hz의 운동 주기에서 혼합성능이 향상되어 부피분율이 증가하지만, 30 Hz의 운동 주기에서는 페블의 분리현상으로 인해 부피분율이 감소하는 경향을 보인다. 단일 크기 페블베드는 20 Hz의 운동에서 페블 간 규칙적 적층 형상이 만들어지면서 높은 부피분율을 보이고, 30 Hz의 운동에서 규칙적 적층 형상이 소실되어 부피분율이 감소하는 경향을 보인다.

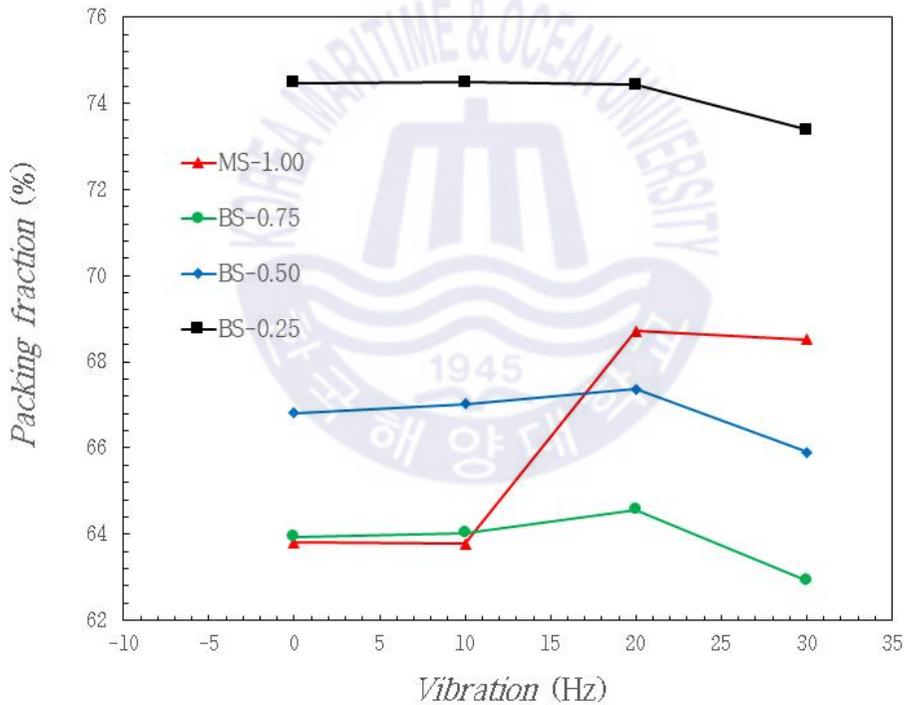


Fig. 22 Overall packing fractions of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

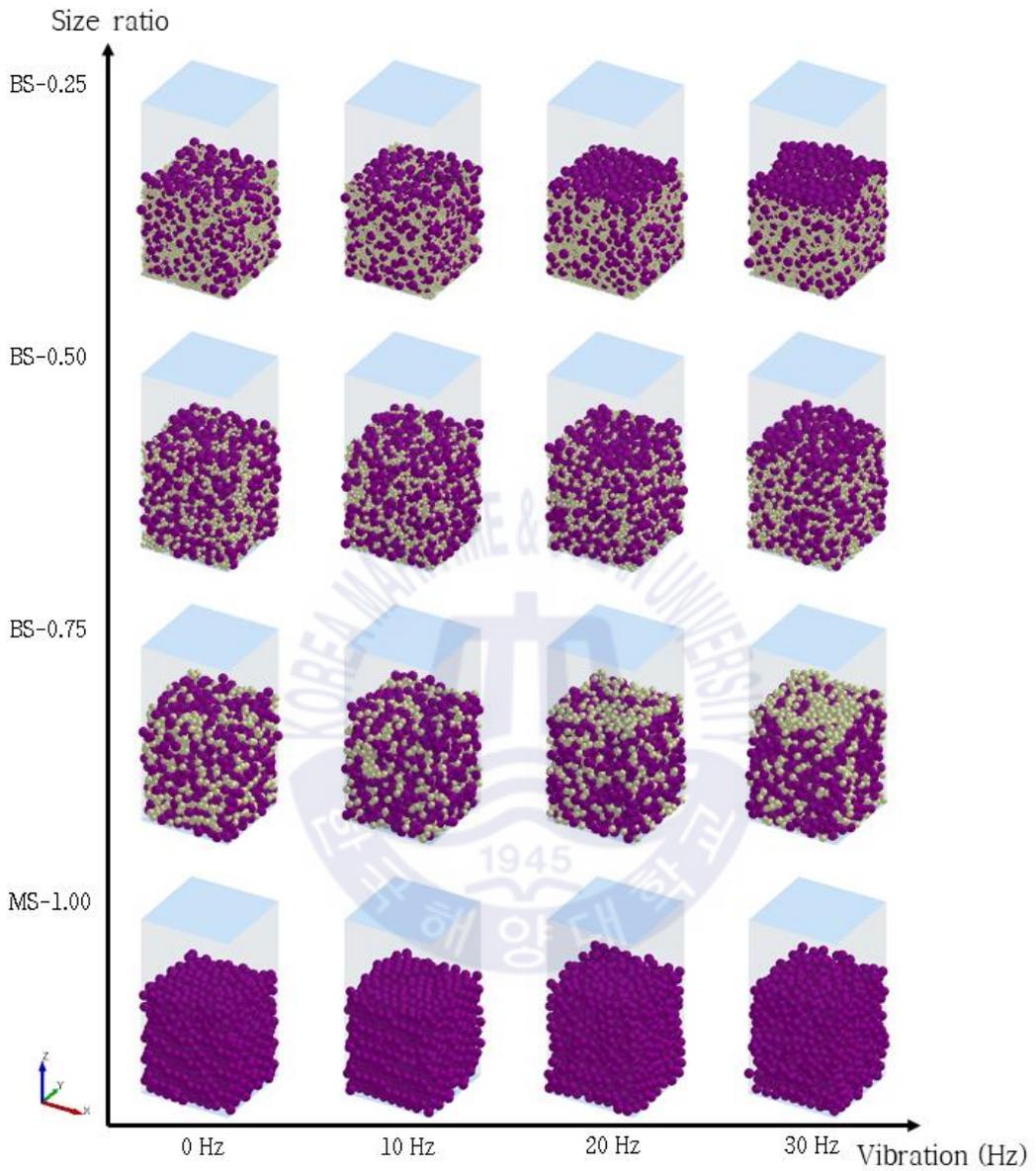


Fig. 23 Overall packing structures of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

3.3.3 페블베드의 체적 비율에 따른 적층 특성 분석

Fig. 24는 페블베드의 체적비에 따른 적층 형상을 나타낸 것이다. V_1 을 지름이 1.00 mm인 페블의 체적이라 하고, V_s 를 지름 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm인 페블의 체적이라 할 때, $V_1 : V_s$ 의 체적비에 따른 적층 특성을 분석하였다.

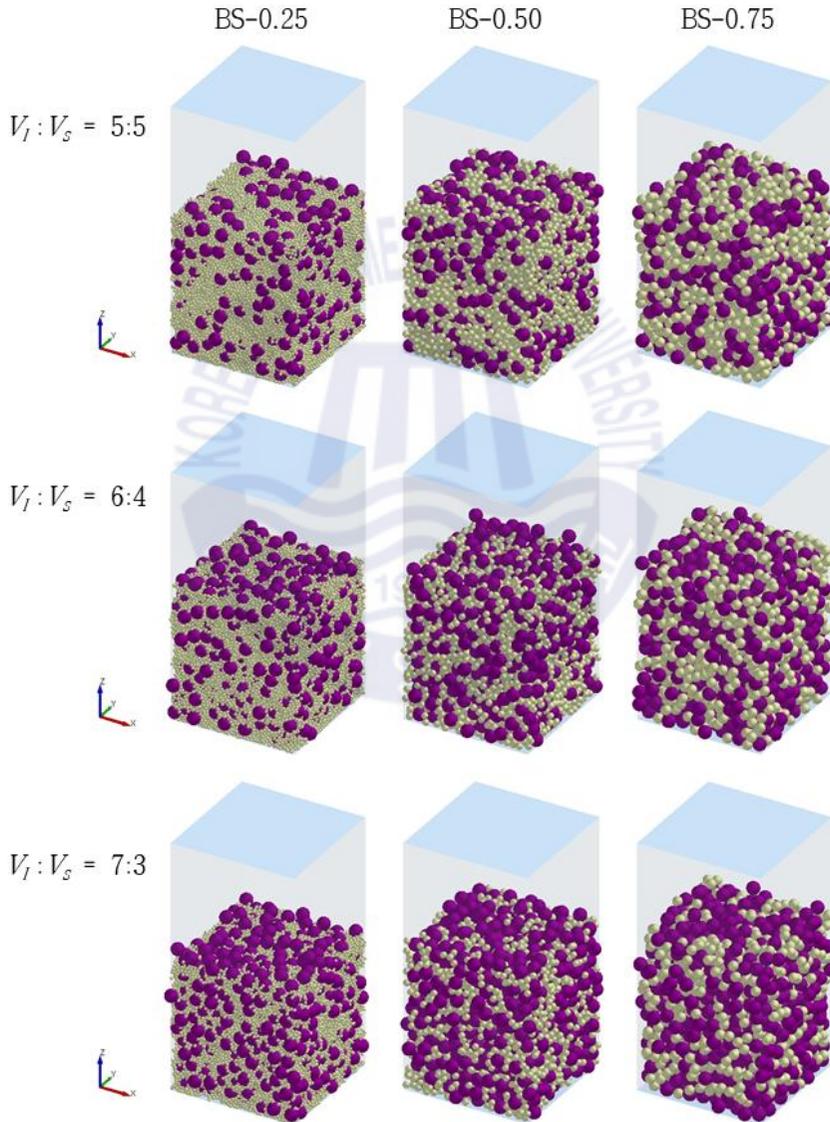


Fig. 24 Packing structures of pebble beds according to volume ratio.

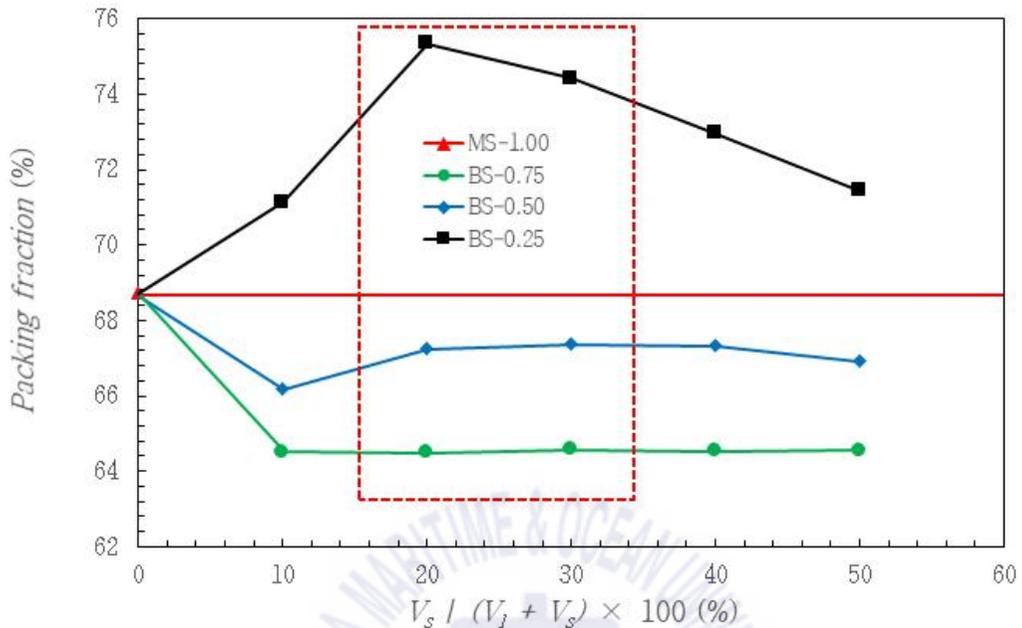


Fig. 25 Overall packing fractions of pebble beds according to volume ratio.

Fig. 25는 20 Hz의 운동 주기에서 페블베드의 체적비에 따른 부피분율을 나타낸 것이다. 지름 0.75 mm인 페블이 혼합된 페블베드는 체적비에 따른 적층 특성의 변화가 크지 않다. 지름 0.50 mm인 페블이 혼합된 페블베드는 0.50 mm 페블의 비율이 20~30% 수준에서 가장 높은 적층 성능을 보인다. 단일 크기 페블베드는 20 Hz의 운동 주기에서 규칙적 적층 형상이 만들어지게 되어 0.50 mm, 0.75 mm 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드보다 높은 부피분율을 보인다. 0.25 mm 페블이 혼합된 모델은 모든 체적비에서 가장 높은 부피분율을 보이며, 20~30%에서 가장 높은 수준을 보인다.

제 4 장 열전달 및 유동 특성 분석

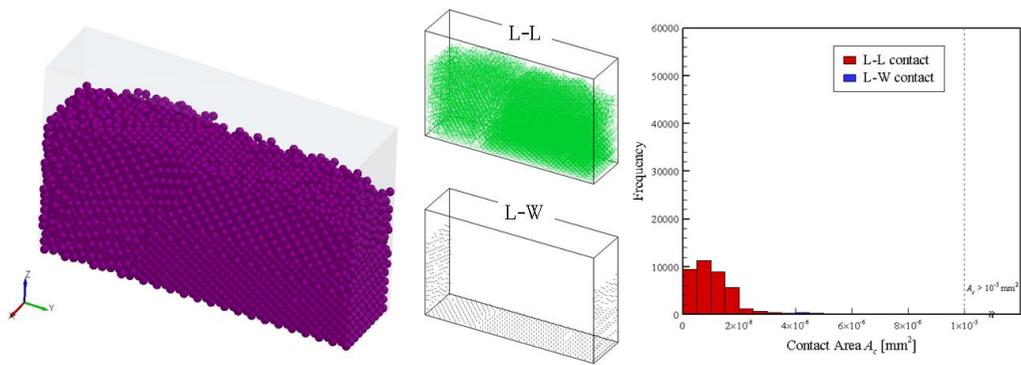
4.1 페블베드 열전달 특성

10 mm × 40 mm × 25 mm 모델을 이용하여 적층 조건에 따른 열전도도를 분석하였다(Vargas & McCarthy, 2007; Wang, et al., 2016; Yagi & Kunii, et al., 1957). 페블베드의 x-방향엔 주기경계조건을 부여하였고, y-방향과 z-방향은 벽으로 설정하였고, y-방향 양쪽 벽에 서로 다른 온도를 부여하였을 때, 벽-페블, 페블-페블 사이의 열 이동량을 계산하여 열전도도를 구하였다(Zhang, et al., 2011; Panchal, et al., 2016, 2018). 열전도도는 식 (26)을 바탕으로 계산하였으며, A는 y-방향 열전도 면적, q는 열에너지, ΔT 는 온도 구배, Δy 는 열이 이동하는 페블베드의 y-방향 길이이다.

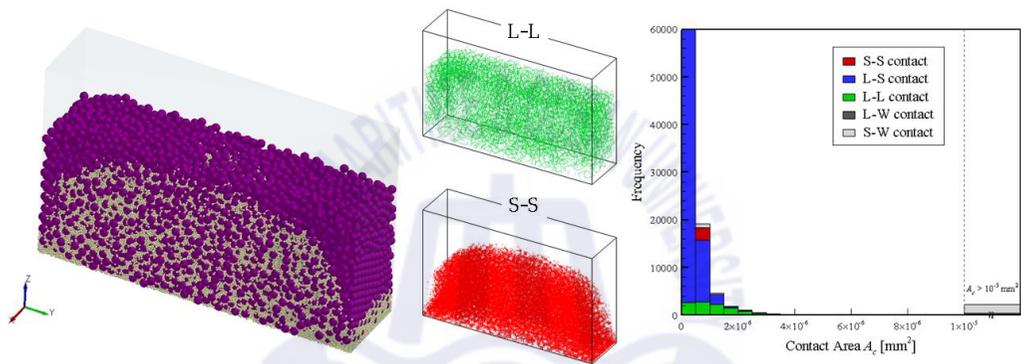
$$k = - \frac{q}{A} \frac{\Delta y}{\Delta T} \quad (26)$$

4.1.1 페블의 크기 비율에 따른 열 기여율 및 열전도도 분석

Fig. 26은 페블베드를 구성하고 있는 페블 간 접촉 면적과 그에 따른 접촉력을 나타낸 것이다. 이진 크기 페블베드는 단일 크기 페블베드보다 페블 간 높은 연결성을 가지고 있어 비교적 많은 접촉 면적과 접촉력을 나타내는데, 접촉 면적과 접촉력이 클수록 상대적으로 높은 열전달 성능을 가진다. Fig. 27을 통해 페블의 크기 비율에 따른 열전도도를 확인해 보면, 혼합된 페블의 크기가 작을수록 페블 간 연결성이 향상되어 열전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 26 Contact areas of pebble beds. (a) Mono-sized pebble beds (b) Binary-sized pebble beds.

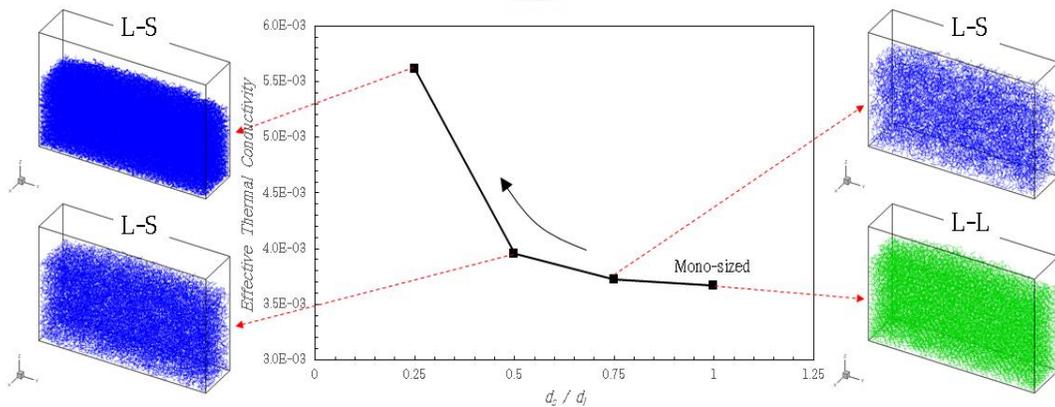
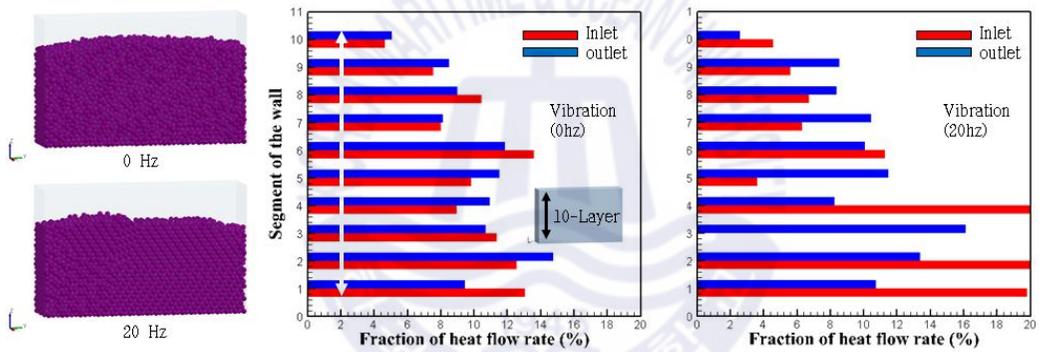


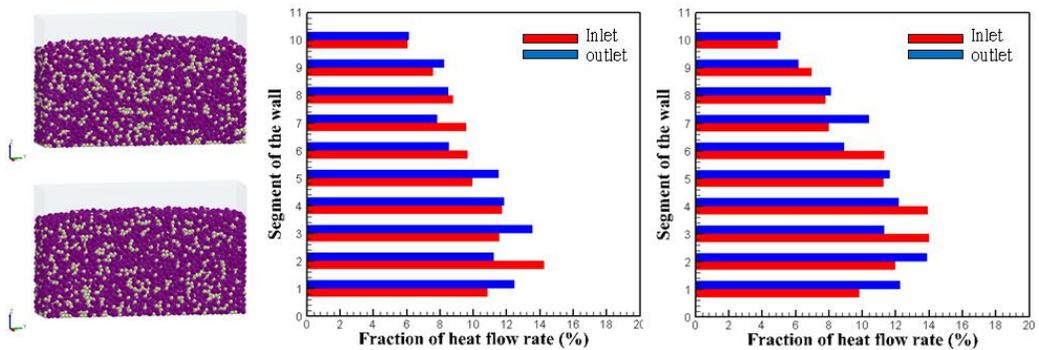
Fig. 27 Effective thermal conductivity of pebble beds according to pebble size ratio.

4.1.2 페블베드의 운동 주기에 따른 열전도도 경향 분석

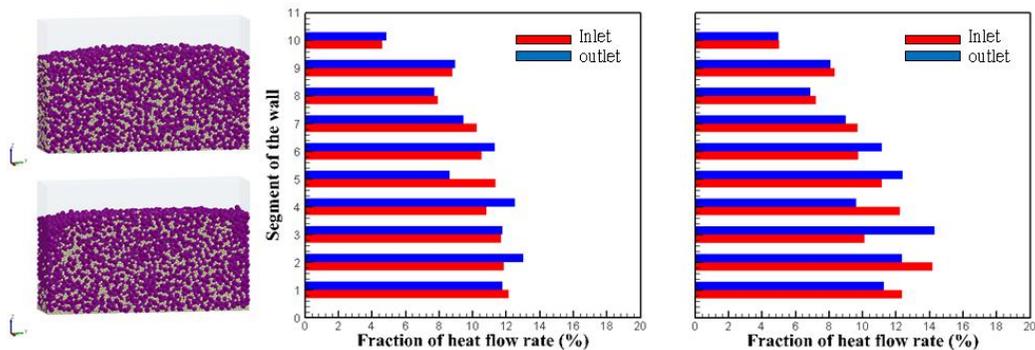
Fig. 28은 0Hz와 20 Hz의 운동 주기에서 단일 크기 페블베드와 이진 크기 페블베드의 높이에 따른 열전도 기여율을 나타낸 것이다. 페블베드를 z-방향으로 10개의 층으로 분할하여 각 층별 열 이동량을 나타내었다. 페블베드의 위쪽에 있는 페블들이 아래쪽에 있는 페블들을 압축하는 힘으로 인해 페블베드의 아랫 부분에서 비교적 높은 열전도 기여율 보이며, 운동이 부여됨에 따라 그 경향이 강화된다. 단일 크기 페블베드는 운동이 부여됨에 따라 규칙적 적층 형상이 형성되면서 높은 열전도도를 보인다.



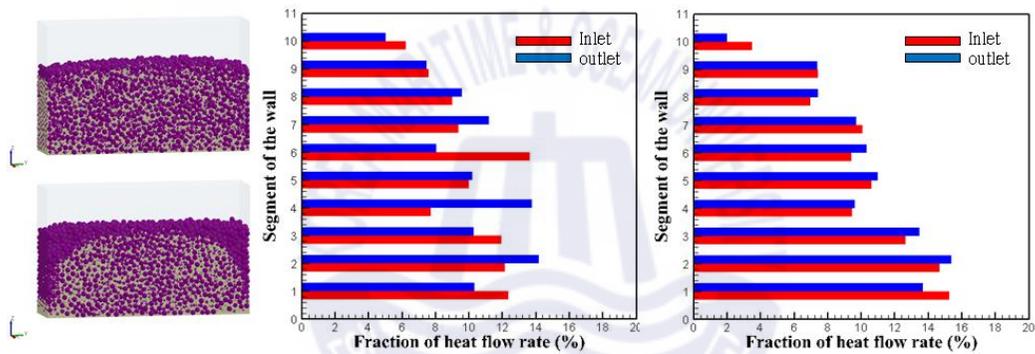
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 28 Heat flow contribution rates of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations (a) MS-1.00 (b) BS-0.75 (c) BS-0.50 (d) BS-0.25 .

Fig. 29는 $10\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 모델의 페블 크기와 운동에 따른 열전도도를 나타낸 것이다(Van antwerpen & Rousseau, 2012; Wang, et al., 2016; Abou-Sena, et al., 2007). 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm 페블이 혼합된 이진 크기 페블베드는 페블의 크기가 작을수록 페블 간 연결성이 향상되어 열전도도가 증가하는 경향을 보인다. 하지만 페블베드에 운동이 부여되면 페블 간 분리현상으로 인해 연결성이 저하되어 열전도도가 감소하는 경향을 보인다. 단일 크기 페블베드는 운동이 부여됨에 따라 페블들이 규칙적 적층 형상이 나타나게 되어 높은 열전도도 증가율을 보이지만, 30 Hz의 운동 주기에는 규칙적 적층 형상이 소실되면서 열전도도가 낮아지게 된다.

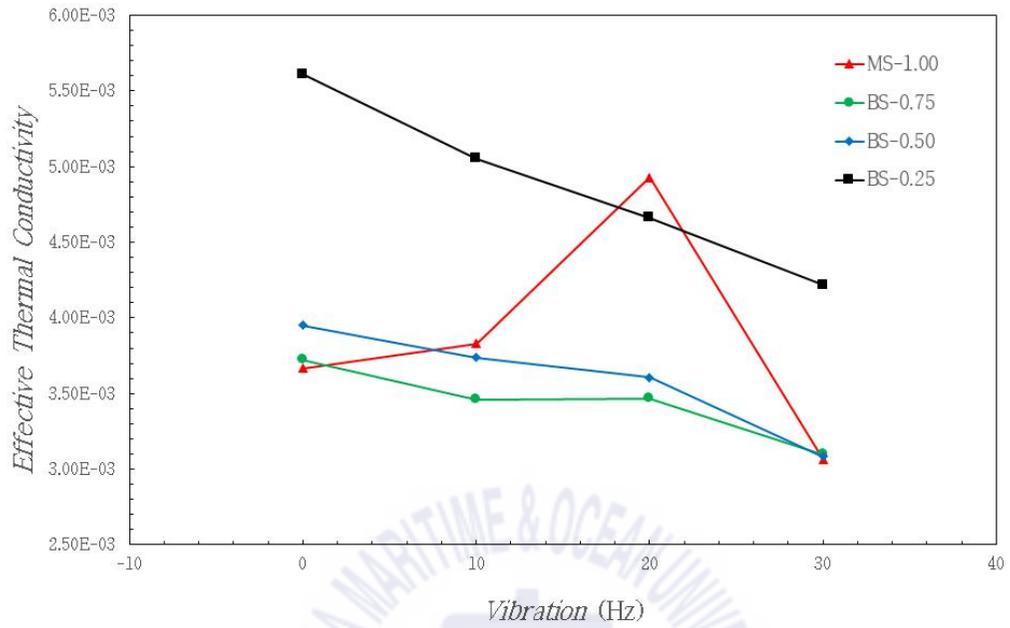
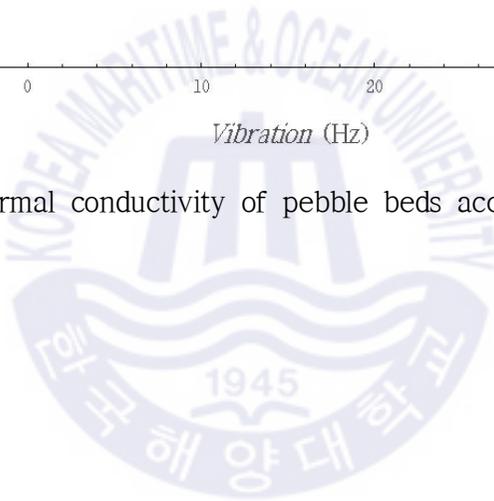


Fig. 29 Effective thermal conductivity of pebble beds according to pebble size ratio and vibrations.

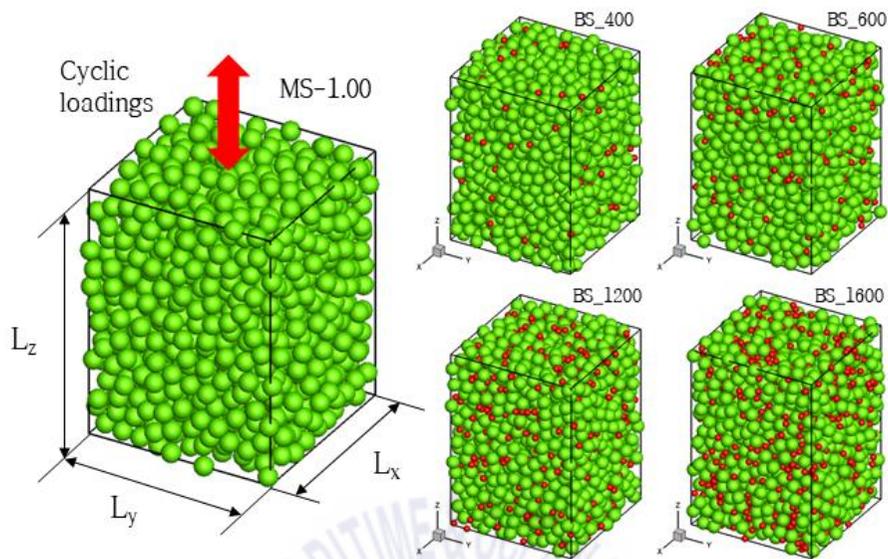


4.2 페블베드 유동 특성

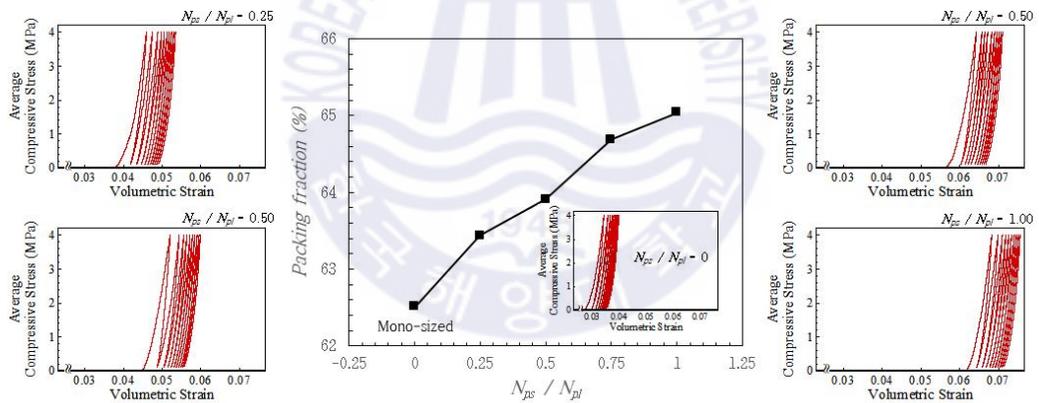
페블베드는 지름이 1.00 mm, 0.50 mm인 페블로 구성하였으며, 지름 1.00 mm인 페블의 개수를 1600개로 고정하였을 때, 지름 0.50 mm인 페블의 개수 증가에 따른 유동 특성을 분석하였다(Sohn, et al., 2019). 지름 0.50 mm인 페블의 개수는 0, 400, 800, 1200, 1600개로 설정하였으며, 전체 페블에 대한 비율 $[V_{ps}/(V_{ps} + V_{pl})]$ 은 0~11%이다. 적층된 페블베드는 중력을 고려하지 않은 상태이며, 모든 방향으로 주기 경계조건을 부여하였다. 페블베드의 초기 부피분율은 60%이고 z-방향의 반복 압축 하중을 부여하여 전체 시스템을 구성하는 페블의 분포를 균일하게 하였다(Gan & Kamlah, 2010). 반복 압축 하중이 부여되는 페블베드는 z-방향의 평균 압축응력이 4 MPa이 되도록 z-방향 길이를 감소시켜 압축하였고, z-방향의 평균 압축응력이 0.1 MPa이 되도록 z-방향 길이를 증가시켜 이완하는 방법을 10회 간 반복하였다(Pupeschi, et al., 2016). 10회의 반복이 끝난 후, 하중을 제거하여 유동 특성을 분석하였다(Zhang, et al., 2016, 2018).

4.2.1 페블베드의 혼합비에 따른 적층 특성 분석

Fig. 30은 페블베드를 구성하고 있는 지름 0.50 mm인 페블의 개수 0, 400, 800, 1200, 1600에 따른 부피분율과 z-방향의 평균 압축응력을 분석한 것이다. 작은 페블의 개수가 많아질수록 높은 부피분율과 평균 압축응력이 증가하는 경향을 보인다. 페블 하나에 작용하는 기본 압축응력은 식 (28)과 같이 정의된다.



(a)



(b)

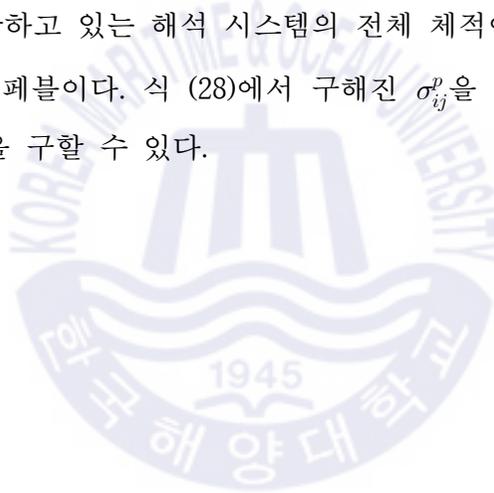
Fig. 30 (a) Packing structure compositions of pebble beds. (b) Stress-strain relationships of pebble beds under cyclic loadings.

$$\sigma_{ij}^p = \frac{1}{V_p} \sum_{c=1}^{N_p^c} r_{ij}^c f_j^c \quad (28)$$

r^c 는 페블 p 의 중심에서 이웃한 페블 중 하나인 N_p^c 와 접촉하고 있는 점 방향 벡터이고, f^c 는 두 이웃한 페블 사이에 작용하는 힘 벡터이다. $i, j \in \{1, 2, 3\}$ 은 좌표계(x, y, z)의 방향이고, V_p 는 페블 p 의 체적이다. 페블 전체에 대한 평균 압축응력은 식 (29)과 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V_{bed}} \sum_{p=1}^{N_p^{bed}} \sigma_{ij}^p V_p \quad (29)$$

V_{bed} 는 페블은 포함하고 있는 해석 시스템의 전체 체적이고, N_p^{bed} 는 페블 p 와 접촉하고 있는 모든 페블이다. 식 (28)에서 구해진 σ_{ij}^p 을 대입하여 페블 전체에 대한 평균 압축응력을 구할 수 있다.



4.2.2 유동해석을 위한 페블베드의 형상 수정

페블베드의 z-방향으로 퍼지가스를 흐르게 하여 유동저항을 분석하기 위해 z-방향에는 주기경계조건을 적용하지 않았고, x, y-방향에 주기경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 또한 x, y-면의 반대편에 있는 페블의 위치와 형상을 그대로 복사하여 퍼지가스 유동장을 형성하였다. 이때 유동해석을 위한 퍼지가스 유동장의 해석영역은 부가적인 형상 수정이 필요하다. 페블과 페블 사이에서 생성되는 매우 좁은 간격은 격자생성 및 해석 수렴을 어렵게 만드는 요인으로 작용된다. 그러므로 1e-4 mm보다 작은 페블 간 간격이 발생하게 되면 접촉 상태로 만들어 형상을 수정하였다. 수정된 퍼지가스 유동장의 체적을 V'_p 라고 할 때, 부피분율은 식 (30)과 같이 다시 정의된다.

$$\phi'_p = \frac{\sum_{p=1}^{N_p^{bed}} V'_p}{V_{bed}} \quad (30)$$

또한 페블 간 겹침이 발생하게 되면 Fig. 31의 왼쪽 사진처럼 침예한 각을 이루는 모서리가 형성되어 격자생성과 해석 수렴을 방해하기 때문에 Fig. 31의 오른쪽 사진과 같이 모서리 부분을 완화하여 형상을 수정하였다. 모서리 부분을 완화하였을 때, 부피분율은 식 (31)과 같이 다시 정의된다.

$$\tilde{\phi}_p = \frac{V_{bed} - \tilde{V}_{gas}}{V_{bed}} \quad (31)$$

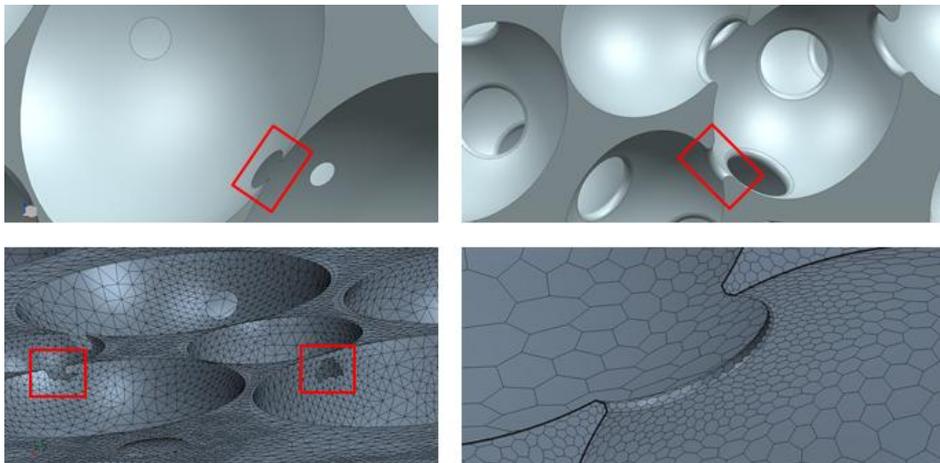


Fig. 31 Low mesh quality caused by overlap and gap and improved mesh quality caused by edge blending.

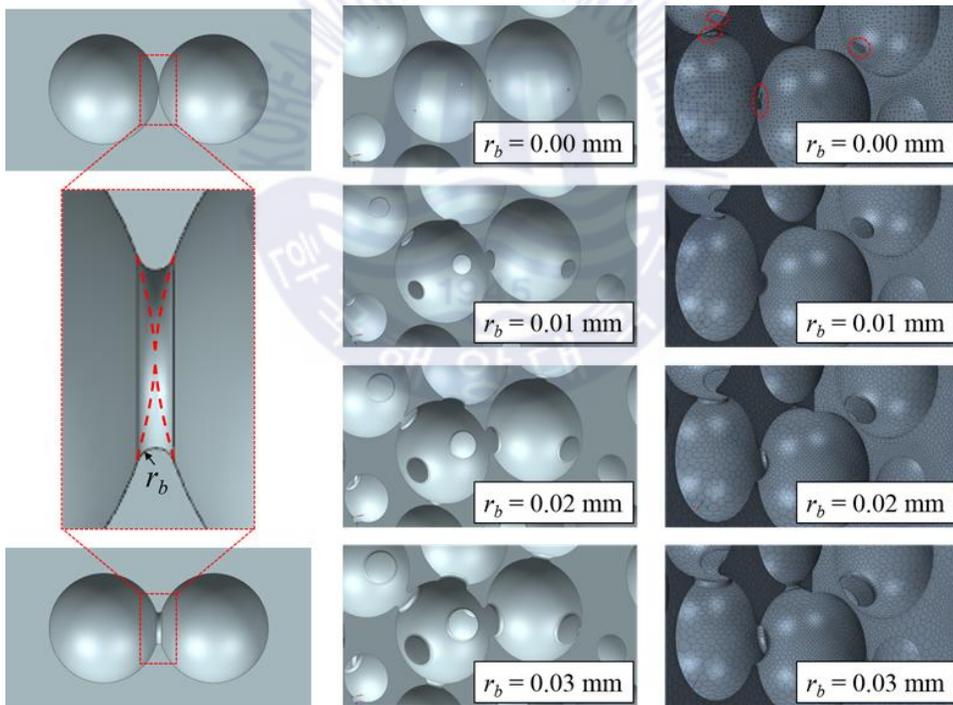


Fig. 32 Blending of sharp circular edges between the overlapping spherical pebbles for generation proper CFD meshes.

4.2.3 펄베드의 유동해석 조건 및 방법

퍼지가스 유동장의 형상 정보에 대한 수정이 끝난 후, Star-CCM+의 다면체 요소를 이용하여 Fig. 33과 같이 격자망을 생성하였다(Dixon, et al., 2013). 유동층의 입구 속도와 출구 압력은 각각 0.05 m/s와 0 Pa로 설정하였고, 퍼지가스는 층류로 설정하였다. 퍼지가스 유동장의 길이는 $\pm z$ -방향으로 L_z 만큼 추가하여 입구와 출구에 의한 영향을 줄여 해석을 수행하였다.

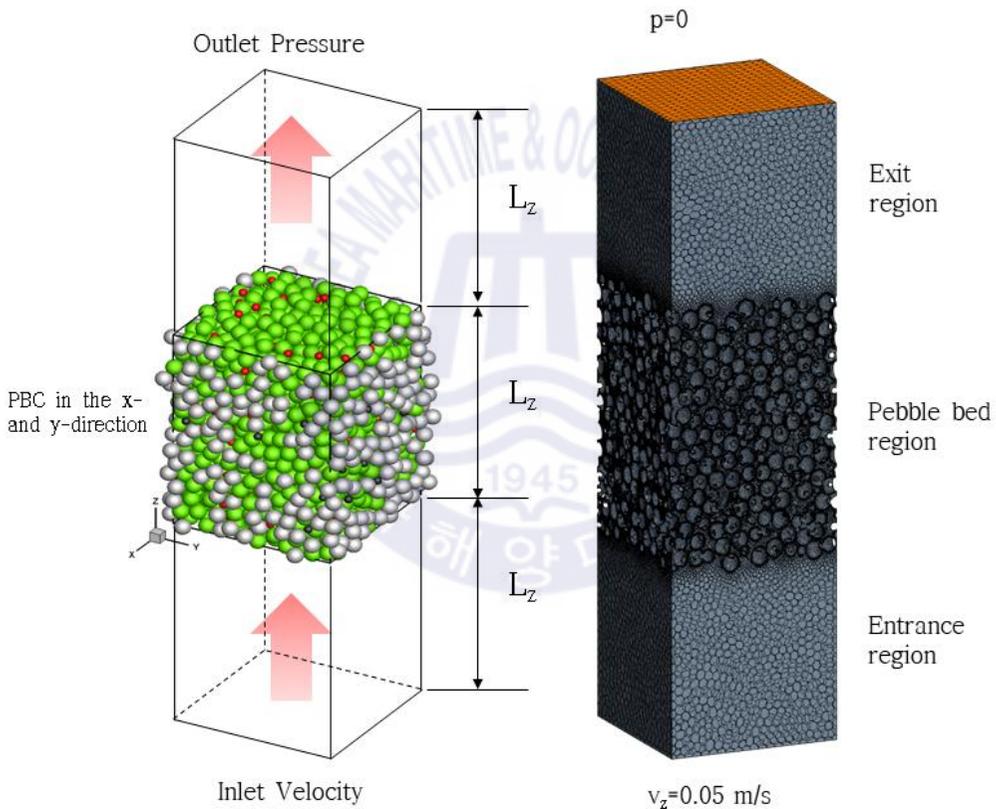


Fig. 33 Construction of a purge gas domain considering the periodicity of pebble configuration.

4.2.4 페블베드의 압력강하 및 속도 분포 분석

수정된 퍼지가스 유동장 형상의 격자망 개수에 따른 압력강하 수렴성을 확인하였다. $N_{ps}=0$ 과 1600의 격자 수에 따른 압력강하($\Delta p/L_z$)를 구하여 수렴 경향을 확인하였고, Fig. 34와 같이 나타내었다(Dai, et al., 2017). $N_{ps} = 0$ 모델은 약 16×10^6 개의 격자 수에서 수렴성을 나타내었고, $N_{ps} = 1600$ 모델은 약 24×10^6 개의 격자 수에서 수렴성을 나타내었다.

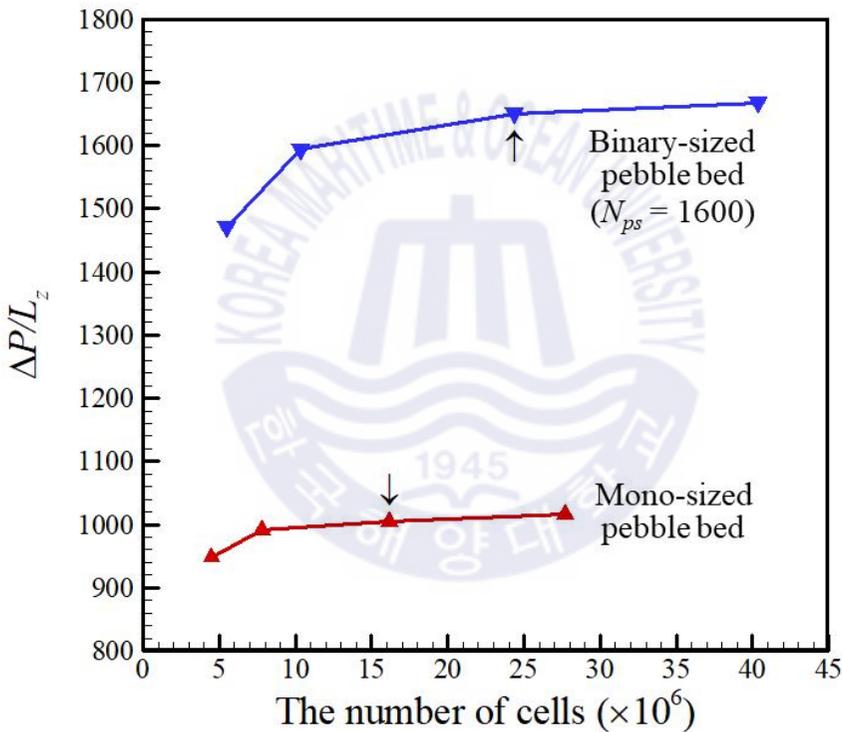


Fig. 34 Convergence of the pressure drop with an increase in the number of cells.

Fig. 34의 격자 수에 따른 수렴성을 참고하여 $N_{ps}=0$ 과 1600 모델에서 퍼지가스 유동장에 대한 xz-평면의 속도와 압력분포도를 Fig. 35와 같이 나타내었다. $N_{ps}=1600$ 은 $N_{ps}=0$ 보다 높은 부피분율을 보이는 만큼 비교적 큰 압력강하를 보여준다. 압력강하와 속도 분포 또한 $N_{ps}=1600$ 가 $N_{ps}=0$ 보다 높은 경향을 보인다.

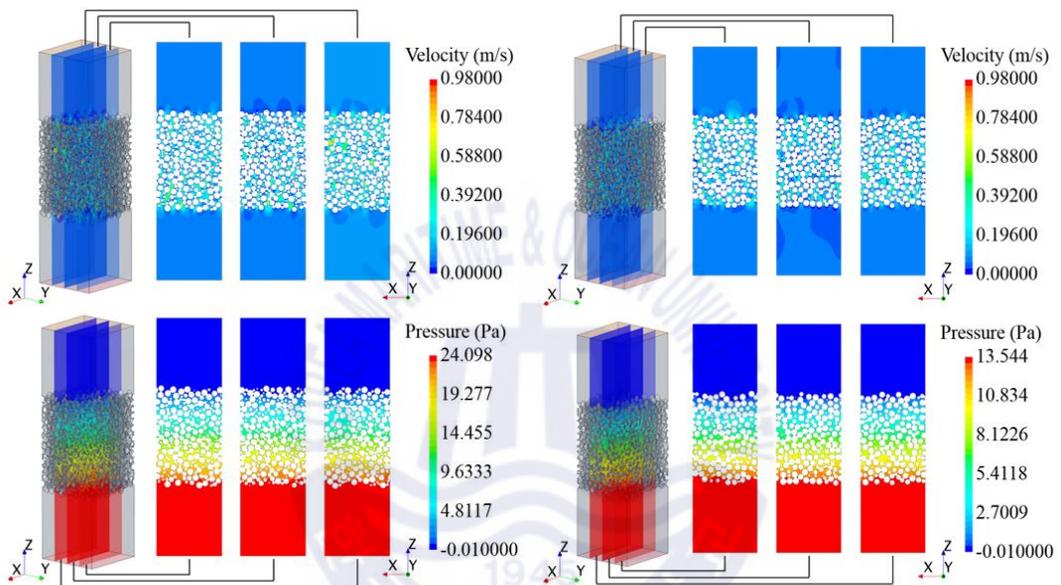


Fig. 35 Distributions of velocity and pressure over the purge gas domain: (a) A mono-sized pebble beds (b) A binary-sized pebble beds for $N_{ps} = 1600$.

4.2.5 페블베드의 혼합비에 따른 압력강하 분석

Fig. 36은 페블베드를 구성하고 있는 지름 0.50 mm인 페블의 개수 비율에 따른 단위 길이당 압력강하를 나타낸 것이다. 크기가 작은 페블은 크기가 큰 페블보다 동일 체적에 대해 더 큰 표면적을 가진다. 즉, 같은 체적으로 두 페블을 적층시켰을 때, 작은 페블로만 이루어진 페블베드가 비교적 더 큰 표면량 가지기 때문에 페블 간 연결성이 향상되어 유동저항이 증가하게 된다. 결과적으로 이진 크기 페블베드($N_{ps}=1600$)는 단일 크기 페블베드보다 약 3.86% 높은 부피분율을 나타내며, 3.86%의 부피분율 차이는 64.26%의 압력강하 증가율을 나타내었다.

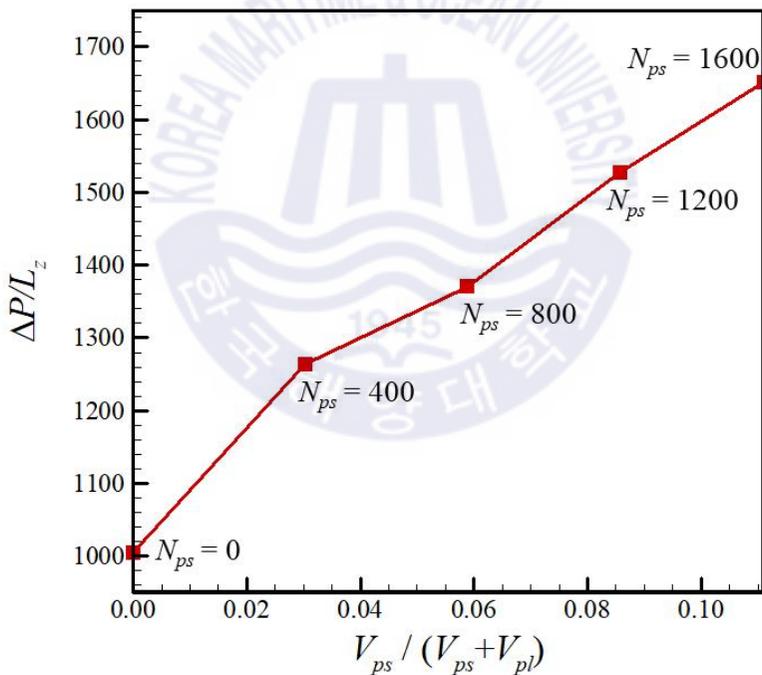


Fig. 36 Pressure drop per unit length according to a mixing ratio of binary-sized pebbles

제 5 장 결 론

본 연구에서는 핵융합로 내벽을 구성하고 있는 블랭킷 리튬층의 핵융합 반응으로 생성되는 열에너지의 전달효율과 삼중수소의 유동 특성에 대해 분석하였다. 핵융합 반응으로 생성되는 열에너지는 냉각재로 전달되어 동력을 생산하게 되는데, 이때 리튬층의 입자 적층구조는 냉각재로 전달되는 에너지의 전달효율에 영향을 미치는 중요한 요인이 된다. 리튬층의 적층구조가 조밀해질수록 입자 간 연결성이 향상되어 효율적인 열전달이 이루어지게 되지만 시스템의 유동저항이 증가하게 되어 핵융합의 연료인 삼중수소의 생성을 방해하게 된다. 그렇기 때문에 리튬층의 적층구조에 따른 열전달과 유동저항의 상관관계를 적절히 고려하여 적합한 적층구조를 찾기 위한 분석을 수행하였다.

5.1 해석결과 요약

운동이 부여되지 않은 상태에서 이진 크기 페블베드는 단일 크기 페블베드보다 비교적 높은 부피분율과 열전도도를 보였고, 이진 크기 페블베드의 작은 페블의 크기가 작을수록 경향이 증가하는 것을 보였다. 이진 크기 페블베드에 운동을 부여하게 되면 부피분율이 증가하게 되지만 일정 수준을 넘어서게 되면 입자 간 분리현상으로 인해 부피분율이 감소하는 경향을 보인다. 열전도도의 경우, 부피분율에 대한 영향보다 페블 간 분리현상으로 인한 연결성 저하에 더 큰 영향을 받게 되어 운동으로 인해 부피분율이 증가함에도 불구하고 열전도도가 감소하는 경향을 보인다.

단일 크기 페블베드는 특정 운동 주기에서 규칙적인 적층 형상을 나타내게 되어 지름이 0.50 mm, 0.75 mm인 페블이 혼합된 페블베드보다 높은 부피분율을 보이고, 페블 간 분리현상이 발생하지 않아 부피분율이 증가함에 따라 열전도도가 함께 증가하는 경향을 보인다. 또한 이진 크기 페블베드는 조밀한 적층구조와 페블 간 분리현상으로 인해 높은 유동저항을 보이는 반면, 단일 크기 페

블베드는 규칙적인 적층구조를 형성하고, 페블 간 분리현상이 발생되지 않기 때문에 비교적 낮은 유동저항을 보인다.

5.2 종합적인 결론

결과적으로 이진 크기 페블베드는 운동이 부여되지 않은 상태에서 단일 크기 페블베드보다 높은 적층 수준과 열전도도를 나타내지만, 운동을 부여한 상태에서는 페블 간 분리현상과 단일 크기 페블베드의 규칙적인 적층 형상으로 인해 비교적 낮은 열전도도와 높은 유동저항을 보이게 된다. 그러므로 단일 크기 페블베드에 적절한 운동을 부여하여 규칙적인 적층 형상을 가진 모델을 구현하는 것이 열전달과 유동저항 측면에서 효과적인 방법이다.



참고문헌

- [1] Abou-Sena, A. Ying A. & Abdou, M., 2007. Experimental measurements of the effective thermal conductivity of a lithium titanate(Li₂TiO₃) pebbles-packed bed. *Journal of Materials Process Technology*, 181(1-3), pp.206~212.
- [2] Blake, F. C., 1922. The resistance of packing to fluid flow. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, 14, pp.415~421.
- [3] Britt, H.C. & Whetstone, J., 1964. Alpha-Particle-Induced Fission of Th²³⁰, Th²³², and U²³³. *The American Physical Society*, 133(3), pp.603.
- [4] Bohr, N. & Wheeler, J., 1939. The mechanism of nuclear fission. *The Mechanism of Nuclear Fission*, 56(5), pp.426.
- [5] Cundall, P.A. & Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), pp.47~65.
- [6] Chen, Y. Chen, L. Liu, S. & Luo, G., 2017. Flow characteristics analysis of purge gas in unitary pebble beds by CFD simulation coupled with DEM geometry model for fusion blanket. *Fusion Engineering and Design*, 114, pp.84~90.
- [7] Di Renzo, A. & Di Maio, F.P., 2004. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, 59, pp.525~541.
- [8] Dai, W. Papeschi, S. Hanaor, D. & Gan, Y., 2017. Influence of gas pressure on the effective thermal conductivity of ceramic breeder pebble beds. *Fusion Engineering and Design*, 118, pp.45~51.

- [9] Dixon, A.G. Nijemeisland, M. & Stitt, E.H., 2013. Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: Contact points study. *Computers and Chemical Engineering*, 48, pp.135~153.
- [10] Gan, Y. & Kamlah, M., 2010. Discrete element modelling of pebble beds: with application to uniaxial compression tests of ceramic breeder pebble beds. *Journal of the mechanics and physics of solid*, 58, pp.129~144.
- [11] Gough, W.C. & Eastlund, B.J., 1971. The Prospects of Fusion Power. *Scientific American*, 224(2), pp.50~67.
- [12] Hertz, H., 1881. The contact of Elastic solids. *J Reine Angew*, 92, pp.156~171.
- [13] Habas, P., 1952. The Classical Equations of Motion of point Particles 1. *The American Physical Society*, 87(2), pp.309.
- [14] Hong, B. et al., 2007. Basic concepts of DEMO and design of a helium-cooled molten lithium blanket for a testing in ITER. *Fusion Engineering and Design*, 82(15), pp.2399~2405.
- [15] Jager, U. & Herold, H., 1987. Fast ion kinetics and fusion reaction mechanism in the plasma focus. *Nuclear Fusion*, 27(3), pp.407.
- [16] Li, Y. et al., 2016. Effect of friction on pebble flow pattern in pebble bed reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 94, pp.32~43.
- [17] Panchal, M. Kang, C. Ying, A. & Chaudhuri, P., 2018. Experiment measurement and numerical modeling of the effective thermal conductivity of lithium meta-titanate pebble bed. *Fusion Engineering and Design*, 127, pp.34~39.
- [18] Panchal, M. Chaudhuri, P. Van Lew, J.T. & Ying, A., 2016. Numerical modelling for the effective thermal conductivity of lithium meta titanate pebble bed with different packing structures. *Fusion Engineering and Design*, 112, pp.303~310.

- [19] Papeschi, S. Knitter, R. Kamlah, M. & Gan, Y., 2016. Numerical and experimental characterization of ceramic pebble beds under cycling mechanical loading. *Fusion Engineering and Design*, 112, pp.162~168.
- [20] Rathbone, D. Marigo, M. Dini, D. & Wachem, B., 2015. An accurate force-displacement law for the modelling of elastic-plastic contacts in discrete element simulations. *Powder Technology*, 282, pp.2~9.
- [21] Stanley, L. & Whetstone, J., 1959. Prompt-Neutron Emission from single Fission Fragments. *The American Physical Society*, 114(2), pp.581.
- [22] Suikkanen, H. Ritvanen, J. Jalali, P. & Kyrki-Rajamaki, R., 2014. Discrete element modelling of pebble packing in pebble bed reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 273, p.24~32.
- [23] Sohn, D. Lee, Y. Ahn, M. Park, Y. & Cho, S., 2019. Numerical prediction of packing behavior and thermal conductivity of pebble beds according to pebble size distributions and friction coefficients. *Fusion Engineering and Design*, 137, pp.182~190.
- [24] Van antwerpen, W. Rousseau, P.G. & Du toit, C.G., 2012. Multi-sphere unit cell model to calculate the effective thermal conductivity in packed pebble beds of mono-sized spheres. *Nuclear Engineering and design*, 247, pp.183~201.
- [25] Wnag, X. Aheng, J. & Chen, H., 2016. A Prediction model for the effective thermal conductivity of mono-sized pebble beds. *Fusion Engineering and Design*, 103, pp.136~151.
- [26] Wang, X. Zheng, J. & Chen, H., 2016. Application of a model to investigate the effective thermal conductivity of randomly packed fusion pebble beds. *Fusion Engineering and Design*, 106, pp.40~50.
- [27] Yagi, S. & Kunii, D., 1957. Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE*, 3(3), pp.373~381.

- [28] Zhang, H.W. Zhou, Q. Xing, H.L. & Muhlhaus, H., 2011. A DEM study on the effective thermal conductivity of granular assemblies. *Powder Technology*, 205(1~3), pp.172~183.
- [29] Zhang, C. Ying, A. Abdou, M.A. & Park, Y.-H., 2016. Ceramic breeder pebble bed packing stability under cyclic loads, *Fusion Engineering and Design*, 109, pp.267~271.
- [30] Zhang, S. Zhao, X. & Yang, Z., 2018. Flow simulations in a pebble bed reactor by a combined DEM-CFD approach. *Nuclear Science and Engineering*. 189(2), pp.135~151.
- [31] Zhang, H. Guo, H. Ye, M. Li, Z. Huang, H., 2017. Investigation on the packing behaviors and mechanics of Li_4SiO_4 pebble beds by discrete element method. *Fusion Engineering and Design*, 125, pp.551~555.

