

STAR-CCM+를 활용한 DEFCON-S 실험의 파편층 형성 시뮬레이션

엄정현* · 나인식* · 탁기영* · 정해용*†

STAR-CCM+ Simulation of Debris Bed Formation in the DEFCON-S Experiment

Jeonghyeon Eom*, Insik Ra*, Giyoung Tak*, Haeyong Jeong*†

Key Words : Debris bed(노심용융물파편층), DEFCON-S, Computational Fluid Dynamics(CFD)(전산유체역학), STAR-CCM+, Discrete Element Method(DEM)(이산요소방법)

ABSTRACT

In a severe accident in a light-water reactor, molten corium can be formed and discharged into the reactor cavity. Assuming complete fragmentation of the ex-vessel corium by FCI, the DEFCON-S experiment, which was conducted to evaluate the formation and coolability of the debris bed using particles, was simulated by CFD. In this study, a mesh sensitivity analysis was performed beforehand to select the mesh size for the CFD simulation of the DEFCON-S experiment. For CFD analysis involving DEM models, it is necessary to select a mesh that adequately resolves both the fluid domain and the DEM particles. In addition, to validate the selected mesh size and simulate the DEFCON-S experiment, the analysis was performed under the same conditions as the experiment, and the analysis results were compared and evaluated with the actual experimental results. The deviation between the simulation and experimental results for the diameter and height of the particle bed in CFD is 4.6% and 3.8%. The shape and size of the generated particle bed closely match the experimental results as well.

1. 서 론

원자력발전소의 중대사고 발생 시 원자로 용기가 파손되면 노심용융물이 노외로 방출된다. 사전충수 전략의 경우 방출된 고온의 노심용융물은 원자로 하부 공동의 냉각수와 노심용융물-냉각수 상호작용(Fuel-Coolant Interaction, FCI) 하며 공동 하부에 침적된다. 형성된 노심용융물 파편층은 지속적으로 붕괴열을 방출하므로 공동 내 냉각수에 의한 적절한 냉각은 필수적이다. 파편층 냉각에 실패하면 원자로 공동 바닥의 콘크리트와 반응하는 노심용융물-콘크리트 상호작용(Molten Corium Concrete Interaction, MCCI)이 발생한다. 이러한 현상으로 인하여 격납건물 외부로의 방사능 물질이 누출될 수 있다. 노심용융물 파편층 특성은 선행하는 FCI 현상에 따라 결정되며, 완전히 파편화된 입자의 형태로 파편

층을 형성하거나 용융물 상태의 케이크 형태인 파편층을 형성한다. 한국원자력연구원은 노심용융물의 완전한 파편화를 가정하고, 상사 입자를 사용하여 파편층의 형성 및 냉각성을 평가하기 위한 DEFCON-S 실험을 수행하였다^[1].

본 연구에서는 CFD 코드인 STAR-CCM+에 포함된 Discrete Element Method(DEM) 기법을 사용하여 DEFCON-S 실험을 모사하였다. CFD-DEM 기법은 복잡한 입자-입자 및 입자-유체 상호 작용의 모델링 능력뿐만 아니라 유체 속도 및 입자의 국부적인 변동을 포착할 수 있는 장점이 있다. 입자와 분말 연구에서 CFD-DEM 기법을 활용하여 입자 형상이 비뉴턴 유체의 유동에 미치는 영향을 조사하고^[2] 회전 드럼에서 응집성 분말의 혼합 성능을 분석 바가 있다^[3]. 냉각수에서 고체 입자의 침전을 조사한 결과 노외 노심용융물 파편층을 냉각하는 데 불확실성을 줄일 수 있는 좋은 방법이 될 수

* 세종대학교 양자원자력공학과(Sejong University, Department of Quantum and Nuclear Engineering)

† 교신저자, E-mail : hyjeong@sejong.ac.kr

있음을 제시하였다^[4]. CFD 코드를 활용하여 DEFCON-S 실험 모사하고 검증함으로써 노심용융물의 완전한 파편화를 가정한 CFD 모델은 노심용융물 파편층 형성 과정과 파편층의 형상 등의 불확실성을 줄이는데 기여할 수 있을 것이다. CFD-DEM 기법의 핵심 과제 중 하나는 입자의 거동과 유체 상호작용의 적절한 분석을 위한 mesh 구성이다^[5]. Mesh의 크기는 DEM 입자보다 커야 하며, 유체를 적절하게 해석할 만큼 작아야 한다. 이러한 요인으로 인해 CFD-DEM 기법을 적용한 분석은 mesh 적합성 판단이 수반되어야 한다.

2. CFD(STAR-CCM+) 모델링 및 분석

본 연구에서는 비가열 조건의 DEFCON-S 실험을 상용 CFD 코드로 모사하기 위해 mesh 크기 선정을 위한 mesh 민감도 분석을 선행 수행하였다. 또한, 선정한 mesh 크기 및 CFD 모델의 검증을 위해 실제 실험 조건에서 모사를 수행하고, 분석 결과를 실험 결과와 비교 평가하였다.

2.1 Mesh 크기 적합성 판단을 위한 분석

일반적으로 유체 해석에 있어서 mesh의 크기가 작아질수록 분석의 정확성과 일관성이 상승하고 수렴한다. 하지만 DEM 모델의 경우 가능한 coarse 한 mesh를 구성하여야 같은 효과를 볼 수 있다. Mesh 크기가 DEM 입자보다 작을 경우 높은 입자의 공간 분율로 인해 solver의 instability에 문제가 발생하기 때문이다^[5]. 따라서 DEM 모델을 포함하는 CFD 분석의 경우 유체 공간과 DEM 입자 모두 적절히 수렴 해석하는 mesh를 선정해야 한다. 본 절에서는 DEFCON-S 실험 모사를 위한 mesh 선정을 위해 mesh 민감도 분석을 수행하고 적절한 mesh 크기를 선정하였다.

2.1.1 CFD 모델 선정

본 연구에서는 DEFCON-S 실험에서 사용된 스테인리스 스틸 구를 모사하기 위해 STAR-CCM+에서 제공하는

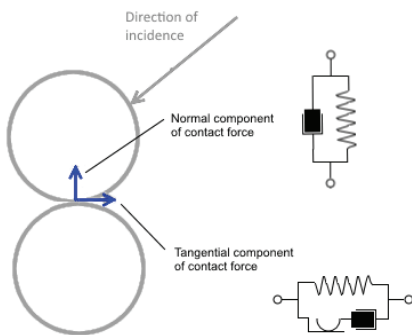


Fig. 1 Contact force model of DEM in STAR-CCM+^[5]

Discrete Element Method (DEM)을 사용하였다^[5]. DEM 모델은 작은 입자 물체의 움직임과 상호작용, 접촉 및 충돌을 모사할 수 있는 Lagrangian 접근법의 확장이다. DEM 모델에서 입자 간의 접촉력은 운동 방정식에 관여하며, Fig. 1과 같이 Spring-dashpot 모델의 변형이다. Spring은 입자를 밀어내는 반발력이며, Dashpot은 점성 감쇠를 의미한다.

DEM 입자 간의 상호작용을 반영하기 위해 Hertz-Mindlin 접촉 모델을 적용하였다^[5]. 이 모델을 통해 입자와 입자, 입자와 벽 간의 상호작용을 계산한다. 또한, 유체와의 상호작용을 위해 Two-way coupling이 사용된다. 해석영역에는 물과 공기 두 가지 유체 상이 존재하며, Eulerian Multiphase 인 물과 증기의 경계면 해석을 위해 Volume Of Fluid(VOF) Model을 사용하였다. 각 유체 간의 경계 추적을 보완하기 위해 Slip velocity 모델을 추가하였다. 서로 다른 속도를 가지는 유체의 효과를 반영하고 보완된 경계면을 모사할 수 있다. 유체의 난류 모델로는 RANS 난류 모델인 Realizable $k-\epsilon$ Two-Layer를 적용하였다.

2.1.2 모델링 방법론

Fig. 2는 DEFCON-S 실험장치를 도식으로 나타내었다. 실험장치는 냉각수가 채워진 수조, 입자를 가열하는 도가니, 수조와 도가니를 연결해주는 노즐로 구성되어 있다. 본 분석은 비가열 조건에서 수행된 DEFCON-S 실험을 모사한다.

CFD 해석 공간에서 기하학적 형상은 Fig. 3과 같다. 수조의 크기는 실험과 동일하며, 도가니의 입자를 모두 수조로 하강시키기 위하여 도가니 하부에 경사도를 추가하였다. 입자는 지름 20 mm의 노즐을 통과하며, 자유낙하 거리를 실험과 동일하게 구성하였다.

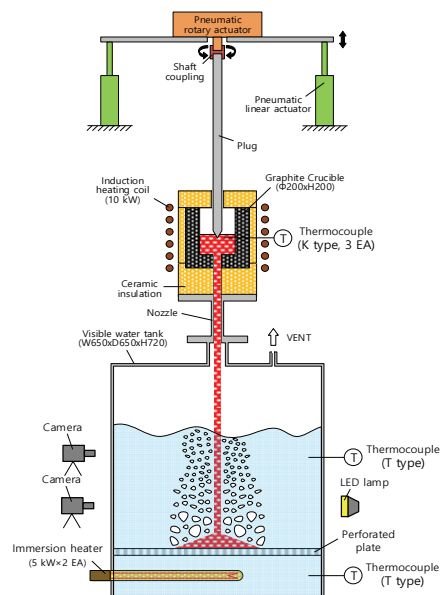


Fig. 2 Schematic design of the DEFCON-S facility^[1]

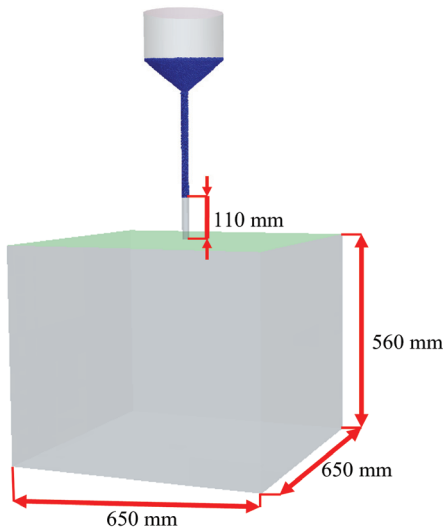


Fig. 3 Geometry of simulation

Table 1 Simulation condition

Component	Value
Time	Implicit unsteady
Time step(s)	0.0005
Inner iteration	10
Number of CPU	96
DEM material(Sphere)	UNSS30200
DEM Circularity	1
DEM Diameter(mm)	3
DEM Mass(kg)	0.5
Water	IAPWS-IF97
Water level(mm)	300
System pressure(MPa)	0.10428

시뮬레이션 조건을 Table 1에 나타내었다. 비정상상태 해석 조건으로 time step은 0.0005 초, inner iteration은 10으로 설정하였다. 실험 조건과 동일하게 입자는 스테인리스 스틸이며, 입자의 직경은 3 mm이고 냉각수의 높이는 300 mm이다. 본 분석은 실험 모사를 위한 적절한 mesh 크기 선정을 위한 분석으로써, 계산비용 제한으로 실제 실험(5 kg)과 달리 0.5 kg의 입자를 주입하였다. 분석은 solution time으로 3 초 동안 수행되며, 해당 시간 동안 모든 입자는 수조 바닥에 분포한다.

Table 2는 mesh 민감도 분석을 위한 각 case 별 분석 조건이다. 4가지 조건의 분석을 수행하였으며, Automated mesh 기법으로 형성되는 mesh 크기의 일관성을 위해 각 case마다 base size와 maximum size는 동일하게 설정하였다. DEM 분석에서 mesh의 크기는 DEM 입자의 크기보다 크게 구성해야 하므로, 모든 case의 minimum size는 4 mm로 설정하였다. 또한, minimum size를 모두 같게 설정함으

Table 2 Mesh control condition

	Base size (mm)	Maximum size (mm)	Minimum size (mm)
Case 1	70	70	4
Case 2	50	50	4
Case 3	30	30	4
Case 4	10	10	4

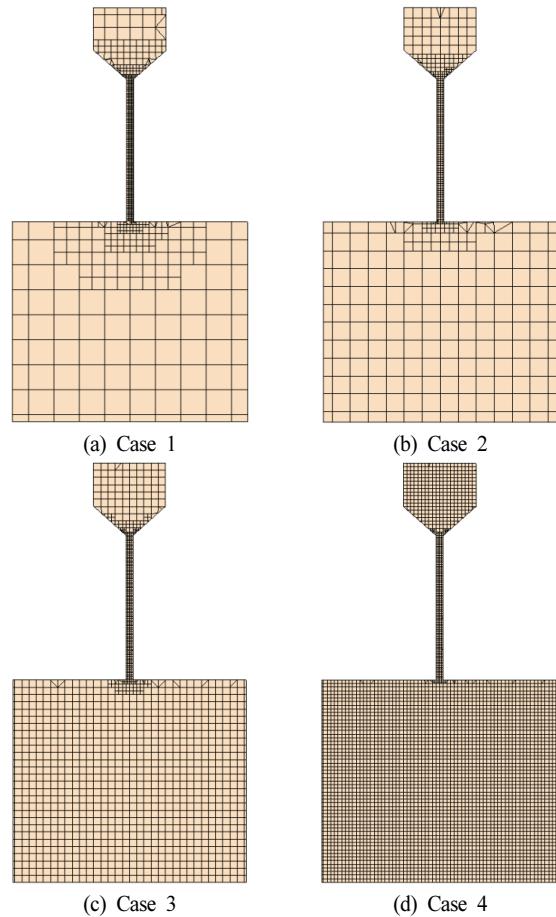


Fig. 4 Mesh configuration for each case

로써 base size에 비해 크기가 작은 노즐 부분(직경 20 mm)을 4 mm 크기의 동일한 mesh를 생성하도록 하였다.

2.1.3 분석 결과

각 case 별 mesh 조건에 따라 생성된 mesh 구성은 Fig. 4와 같다. 노즐 부분의 mesh가 모두 동일하게 형성되었으며, 수조 부분의 mesh는 Table 2 조건에 맞게 형성되었다.

분석 종료 후 수조 바닥에 쌓인 입자 형상을 Fig. 5에 나타내었다. Mesh의 크기가 가장 작은 Case 1의 경우, Table 1에 나타낸 계산 자원으로 8190 초의 실제 계산 시간이 소요되었다. 정성적 결과로써, Case 1과 2는 유사한 크기의 입자 층이 나타난다. 하지만 mesh 크기가 작아지는 case 3과 4의 입자는 상대적으로 더 넓은 위치에 분포한다.

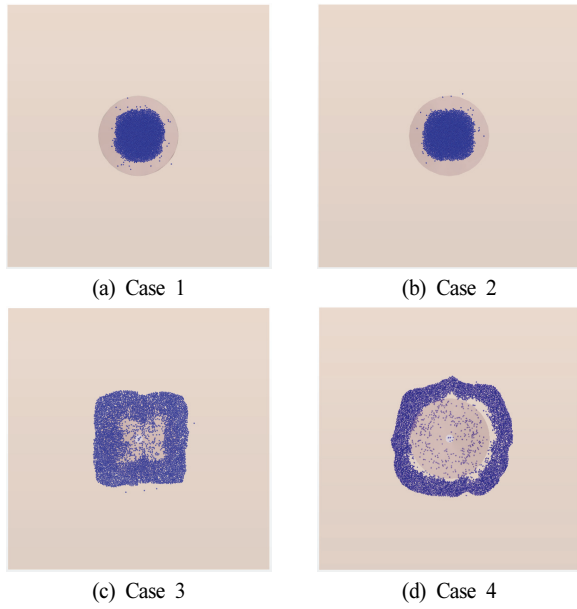


Fig. 5 Particle distribution at the bottom for each case

Table 3 Particle distribution size at the bottom for each case

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Diameter(mm)	149	151	312	347
Height(mm)	20	21	3	3

정량적 결과로서 입자층의 직경과 높이를 Table 3에 나타내었다. 입자층의 직경은 중심으로부터 동심원을 그려 측정하였으며, 높이는 바닥으로부터 가장 높게 위치한 입자의 위치를 측정하였다. Base mesh의 크기가 각각 70 mm, 50 mm인 Case 1과 2는 정량적으로도 상당히 유사한 크기의 입자층을 보여, 입자층 크기 분포의 일관성이 보인다. Case 3과 4는 각각 base mesh 크기가 30 mm, 40 mm로 case 1과 2에 비해 작은 크기의 mesh이지만, 입자층은 점점 더 넓게 퍼짐으로써 발산하는 경향을 보인다. 상기 언급한 바와 같이 일반적으로 mesh 수렴성 분석에서 작은 mesh를 구성할수록 분석의 정확성과 일관성이 상승하는 반면, DEM을 적용한 분석에서는 가능한 coarse 한 mesh를 구성하여야 같은 효과를 볼 수 있다. DEM을 적용한 본 분석에서 Case 1과 2의 입자층 크기 분포를 통해 mesh 수렴성을 판단하였으며, 최적의 mesh 크기로 base size 50 mm를 선정하였다.

2.2 선정된 Mesh 및 CFD 모델 검증

본 절에서는 2.1에서 선정된 mesh 크기(base size 50 mm)의 검증과 CFD 모델 검증을 위해 DEFCON-S 실험 모사를 수행하였다. 비가열 조건에서 수행한 실제 실험과 동일한 조건으로 분석을 수행하고 분석 결과를 실험 결과와 비교 평가하였다. 본 분석은 2.1과 동일한 CFD 모델 및 방법론을

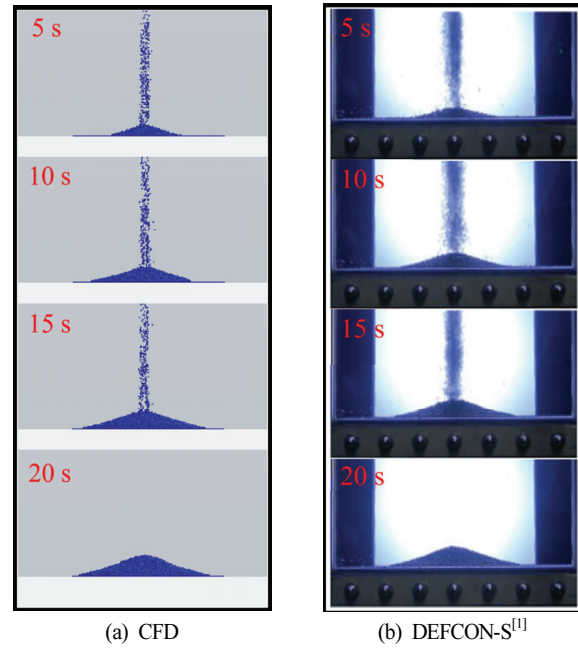


Fig. 6 Delivery process of particles and generation of particle bed

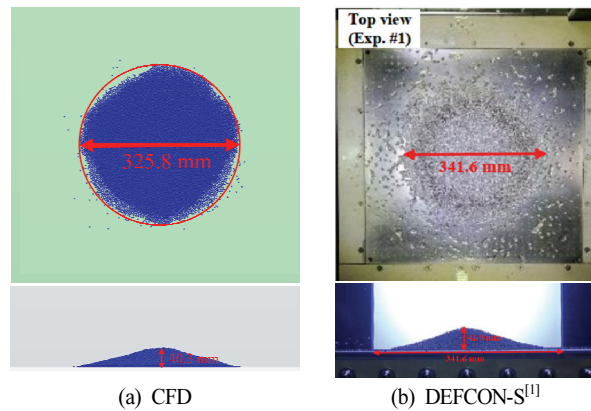


Fig. 7 Shape and size of particle bed of each result

적용한다. 다만 실험과 동일하게 5 kg의 입자를 주입하며, 선정된 mesh 조건(base size 50 mm)에서 분석을 수행한다.

2.2.1 분석 결과

CFD 분석과 DEFCON-S 실험에서 입자의 이동 및 파편층 형성 과정을 Fig. 6에 나타내었다. 실험에서 입자가 완전히 하강하는데 걸리는 시간은 20 초이며, CFD 분석 또한 20 초에 완전히 하강하였다. 본 분석은 Table 1에 나타난 계산 자원으로 약 42시간의 실제 계산 시간이 소요되었다. Fig. 6(b)은 입자가 입수할 때 생성된 작은 공기 방울들이 함께 포착되었기 때문에 입자가 주입되는 흐름의 폭이 Fig. 6(a)보다 넓어 보인다. 이 결과를 통해 CFD 분석의 입자 하강 과정은 실험과 굉장히 유사하다는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 CFD 분석과 DEFCON-S 실험에서 형성된 입자

층 형상이다. CFD 분석 결과(a) 파편층의 직경은 325.8 mm 이고, 높이는 40.3 mm이다. 실험 결과(b) 파편층의 지름은 341.6 mm이고, 높이는 41.9 mm이다. 실험과 분석 결과의 오차는 직경 4.6 %, 높이 3.8 %로 실험과 매우 일치한다.

3. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) DEFCON-S 실험 모사를 위한 mesh 민감도 분석을 수행하였다. 4가지의 다른 mesh 크기 조건으로 분석을 수행하였다. DEM 분석 특성상 일정 크기 이상의 mesh 조건에서 결과가 수렴하는 것을 확인하였으며, 적절한 mesh 크기 (base size 50 mm)를 선정하였다.

2) 선정한 mesh 크기 조건을 검증하기 위해 DEFCON-S 실험과 동일한 조건으로 분석을 수행하였다. 실제 실험 진행 시간과 CFD 분석상 진행 시간이 동일하며, 최종적으로 생성된 입자층의 형상 및 크기 또한 실험과 일치한다. 본 분석을 통해 선정한 mesh 크기를 검증하였으며, 실제 실험을 적절하게 모사하였다.

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+를 이용하여 비가열 조건의 DEFCON-S 실험 모사 및 검증을 수행하였다. 향후 연구에서 열전달 및 상변화 모델을 추가할 예정이며, 가열 조건의 DEFCON-S 실험을 모사 및 검증하고자 한다. 이러한 CFD 모사를 통해 노심용융물의 완전한 파편화를 가정한 시나리오에서 파편층 형성 및 냉각에 대한 불확실성을 줄이는데 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (과제번호 20193110100090)

References

- (1) Park, K. H., Jeong, S., An, S. M., 2021, Fundamental Experiment to Investigate the Effect of Steam Spike on Ex-vessel Debris Bed Shape, Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting.
- (2) Zhao, Z., Li, H., Cai, H., Liu, Y., & Yang, C., 2022, Rheology of non-Newtonian fluids with various particle shapes: A CFD-DEM study. Chemical Engineering Science, 254, 116930.
- (3) Wang, Y., Tan, R. B., & Zhao, Y., 2019, Mixing performance of cohesive powders in a rotating drum: A CFD-DEM study. Powder Technology, 353, 45-57.
- (4) Hwang, B., Park, H. S., Jung, W. H., Lee, M., & Kim, M. H. (2019). Numerical validation and investigation for the sedimentation of solid particles in liquid pool using the CFD-DEM coupling algorithm. Nuclear Engineering and Design, 355, 110364.
- (5) Simcenter STAR-CCM+ Documentation Version 15.06.