

Expanded bed에서 레이놀즈수와 직경입자비에 따른 압력강하 특성에 관한 수치적 연구

배 세 옥,¹ 성 형 건,² 노 태 성^{*3}

NUMERICAL ANALYSIS ON PRESSURE DROP IN EXPANDED BED ACCORDING TO TUBE-TO-PARTICLE RATIOS AND REYNOLDS NUMBERS

S.W. Bae,¹ H.G. Sung² and T.S. Roh^{*2}

Characteristics of the pressure drop in an expanded bed have been compared to those in a packed bed for numerical study of the interphase drag in gas-particle flows. A numerical analysis of the pressure drop by the particle drag has been conducted according to the tube-to-particle diameter ratios and Reynolds numbers for comparison. As the tube-to-particle diameter ratios increase at the same Reynolds number, the pressure drop tends to converge. It has been confirmed that characteristics of the pressure drop in the expanded bed are similar to those in the packed bed.

Key Words : Ergun 식(Ergun's Equation), 압력강하(Pressure Drop), 직경입자비(Tube-to-Particle Diameter Ratio), 전산유체역학(CFD)

Nomenclature

D = Tube Diameter

d_p = Particle Diameter

Re = Reynolds Number

λ = Tube-to-Particle-Diameter Ratio (D/d_p)

ϵ = Porosity

1. 서 론

이상(Two Phase)유동은 유체의 흐름이 하나의 상이 아닌 두 개의 상, 즉 기체와 고체, 고체와 액체, 액체와 기체로 동시에 나타나는 현상을 말한다. 이런 이상유동 현상은 일상생

활에서 뿐만 아니라 현대 산업의 많은 부분에서 나타나고 있다. 특히, 고체와 유체(기체 또는 액체)의 이상유동의 수치적 연구는 석탄가스화 분야와 화포 분야에서 많이 수행되어 왔다. 고체와 유체의 이상유동에 관한 수치적 연구는 크게 Two Fluid Model(TFM)과 Discreted Particle Model(DPM)을 사용하여 수행되어 왔다. 이 모델들은 각 상을 지배방정식이 사용하는 좌표계에 따라 TFM은 Eulerian-Eulerian 접근법으로, DPM은 Eulerian-Lagrangian 접근법으로 구분된다. 이 두 기법에서 각 상의 지배방정식을 연계하는데 필요한 구성방정식으로 Ergun 식[1]이 대표적으로 사용되고 있다. 도관에 구형 입자들을 채워놓고 유체를 흘려 입출구의 압력 손실 측정을 통해 개발된 Ergun 식에 대해 레이놀즈수에 따른 압력 손실의 정확성 관한 연구가 수치적으로 이루어지고 있다. Reddy 등은 난류 영역에서 Ergun 식의 압력 손실에 대한 오차가 크게 증대되고 있는 것을 확인되었다[2]. 그러나 Ergun 식 개발된 이후 압력 강하에 대한 정확성을 향상시키기 위해 Tsuji 항력 모델[3], Syamlal O.Brien 항력 모델, Wen and Yu 항력 모델[4] 등이 개발되어 압력 손실 계산에 사용되고 있으며 이에 대한 압력 손실 예측 정확성에 대한 연구는 수행되지 않았다.

한편, Einfeld[5]는 기존 연구되었던 이상유동의 실험결과를

접수일: 2010년 12월 31일, 수정일: 2011년 6월 21일,
게재확정일: 2011년 6월 22일.

1. 정회원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

2. 정회원, 인하대학교 대학원 항공우주공학과

3. 정회원, 인하대학교 항공우주공학과

* Corresponding author, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

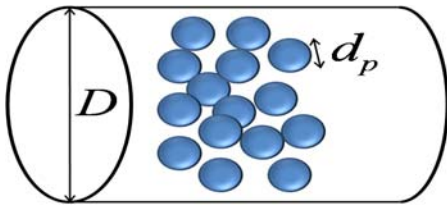


Fig. 1 Tube diameter and Particle diameter

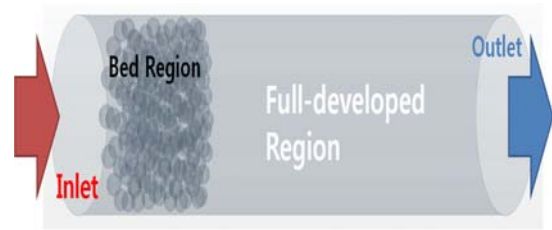


Fig. 2 CFD model of $\lambda=9.08$ case

바탕으로 Packed bed에서의 직경입자비($\lambda = D/d_p$)에 따른 압력강하(Pressure drop)에 관한 특성을 분석하였다. 직경입자비는 Fig.1과 같이 실험에 사용되는 Tube의 직경(D)을 평균 입자 직경(d_p)으로 나눈 값으로 직경입자비가 증가할수록 압력강하가 일정한 값으로 수렴하는 특성이 나타났다. 또한, 레이놀즈수가 증가할수록 압력강하가 수렴하는 직경입자비가 줄어드는 것을 확인하였다. 이러한 특성은 전산해석을 통한 이상유동에서 고체 입자로 인한 압력손실 예측 연구에 필요 것으로 적은 입자수로 정확한 압력 손실을 예측할 수 있도록 한다. 레이놀즈수에 따른 해석에서 상대적으로 작은 직경입자비에서 압력강하가 일정해 진다면 Fig. 1과 같이 도관에 입자를 채워 놓은 형상 모델링에서 입자 수를 감소시킬 수 있으며 이로 인해 격자수를 감소시키거나 조밀한 격자를 생성할 수 있어 계산의 효율성을 가질 수 있다 그러나 Einfeld는 기공률(ϵ)이 0.4인 Packed bed에서 레이놀즈수가 10, 100, 1000인 저 레이놀즈수 영역의 결과로 유체력에 의해 입자의 간격이 넓어진 상태인 Expanded bed에서도 이 특성이 유효한지에 대한 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서 Expanded

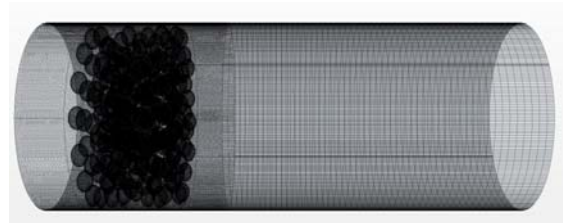


Fig. 3 Meshing result of $\lambda=9.08$ model

Bed를 만드는 유동 영역인 고 레이놀즈수에서 직경입자비 변화에 따른 압력손실의 수렴 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델 및 조건

본 연구에서는 직경입자비에 따른 압력강하 특성을 알아보기 위하여 직경입자비 2.62, 4.78, 7.10, 9.08의 4가지 조건에서 해석하였고 세부 해석 조건은 Table 1과 같다. 압력강하의 수렴 여부를 확인하기 위한 기준 직경입자비로 13.00을 선택하였다. 각각의 해석 조건에 대한 형상 모델은 Fig. 2에 보듯이 중앙에서 압력강하를 만들어 내는 입자들이 밀집하여 있는 Bed 구간(0.065m), 입구에서 Bed 앞까지의 입려구간(0.03m), Bed에서 출구까지의 확산구간(0.23m)의 3개의 구간으로 나누어 주었다. Bed구간은 총 6개의 layer로 구성하였으며, 기공률 0.73이 되도록 직경입자비에 맞추어 입자를 Bed 구간에 무작위로 배치하였다. 확산구간은 Bed를 지나면서 복잡해진 유동에 대한 수렴구간으로 두었다 Fig. 3은 직경입자비가 9.08일 때의 격자생성결과이며, Polyhedral 격자와 벽과 입자의 경계에는 난류해석을 위해 Prism layer 격자를 사용하였다.

전산해석에 사용된 유체는 공기로 하였고 입구에서 유입되는 유동은 입구 전체 평면에서 균일한 속도를 가지는 flat velocity 가정을 사용하였다. 해석 초기조건은 Table 2와 같다. Expanded Bed는 유동의 흐름에 의해 입자의 간격이 넓어진 상태를 의미하므로 Packed Bed에서 보다 높은 레이놀즈수의

Table 1 Geometrical details of models

Particle diameter [m]		0.01	
Layer [-]		6	
Porosity [-]		0.73	
Total cylinder length [m]		0.325	
Inlet bed length [m]		0.03	
Bed length [m]		0.065	
Bed outlet length [m]		0.23	
Tube to Particle Diameter Ratio (λ)	Cylinder diameter [m]	Number of particle [-]	Number of cell [$\times 10^3$]
2.62	0.0262	18	269
4.78	0.0478	60	714
7.10	0.0710	132	1,408
9.08	0.0908	216	2,177
13.00 (Ref.)	0.1300	444	4,299

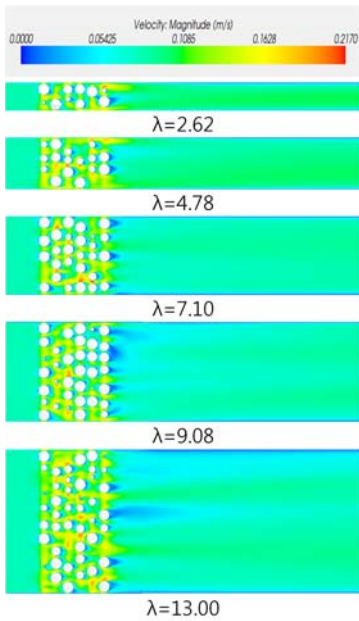


Fig. 4 Velocity profile in Reynolds number 10^3

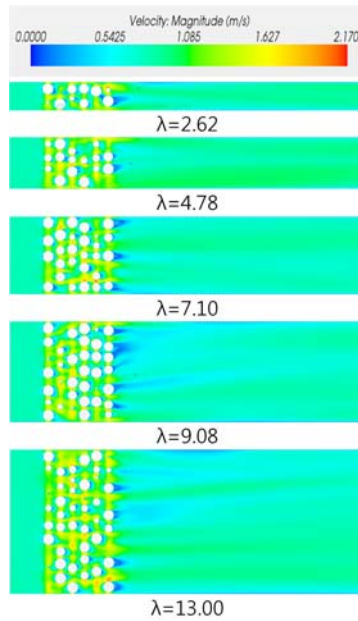


Fig. 5 Velocity profile in Reynolds number 10^4

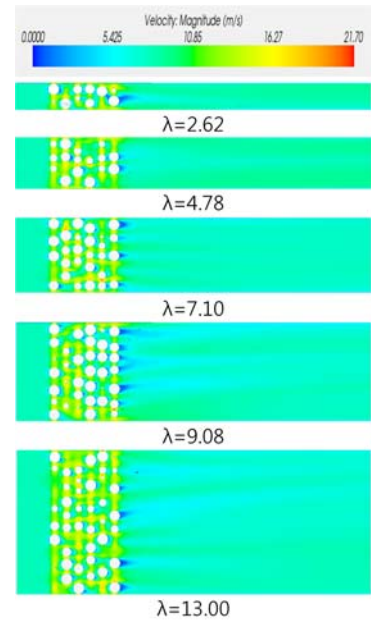


Fig. 6 Velocity profile in Reynolds number 10^5

유동조건에서 해석을 수행하였다

2.2 해석 기법

본 연구에서는 다량의 볼을 가진 내부유동의 압력손실을 전산 해석하기 위해 commercial software “STAR CCM+ V5.06”을 사용하였다. 해석 형상의 Cylinder wall과 Particle surface는 no-slip 조건으로 하였고, 해석 유체의 조건이 유체 속도가 음속보다 매우 낮으므로 비압축성 조건을 적용하여 Constant density를 사용하였다. 수치해석 기법으로는 비압축성 해석에 많이 사용되는 Segregated solver의 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 난류 흐름을 계산하기 위해서 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 지배방정식을 사용하였다. 난류 해석에는 벽 근처의 영역보다는 볼 형의 입자 분포에 따른 복잡한 유동 흐름에 의한 압력강하를 계산하기 위해 $k-\epsilon$ model

Table 2 Initial Condition for CFD analysis

Inlet	Static pressure	20 atm		
	Static temperature	300 K		
	Velocity	Re	Velocity	
		10^3	0.0788 m/s	
10^4		0.7881 m/s		
	10^5	7.881 m/s		
Outlet	Static pressure	20 atm		
	Static temperature	300 K		
Density		23.538 kg/m^3		

을 사용하였고, 다양한 유속 조건에서 해석을 하므로 All y+ wall treatment 기법을 사용하였다

본 연구에 사용된 전산해석 기법은 Reddy 등[5]의 연구와 동일한 기법과 난류모델이 사용되었고 $Re=0.1\sim 10000$ 영역에서 CFD의 결과가 실험결과와 정량적으로 유사하게 계산하는 것을 확인되었고, 레이놀즈수 300에 대해 해석을 수행하여 해석 과정에 대한 신뢰성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

직경입자비가 2.62, 4.78, 7.10, 9.08, 13.00인 5가지 모델링에 대해 유체력에 의해 Expanded Bed가 구현될 수 있는 영역인 Re 가 10^3 , 10^4 , 10^5 의 3가지 유동조건에 대해 전산해석하였고 Fig. 4-6과 같은 속도 분포를 얻었다. 유체가 입자 간격이 좁은 영역을 통과함에 따라 가속되었다가 감속되는 Bed 영역을 통과한 이후에는 유동 속도가 입구 속도보다 감소되는 과정에서 입자의 항력에 의해 전압력이 감소하였다. 압력강하는 입구의 전압력과 출구의 전압력의 차로써 계산하였고 Table 3과 같다. 동일한 직경입자비에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 압력강하가 증가하였고, 동일한 레이놀즈수에서 직경입자비가 증가함에 따라 압력강하 값이 감소하면서 일정한 값으로 수렴하는 결과가 나타났다.

직경입자비 13.00의 압력강하 값을 기준으로 하여 4가지 직경입자비에 따른 압력강하 값을 나누어 무차원화 하였고

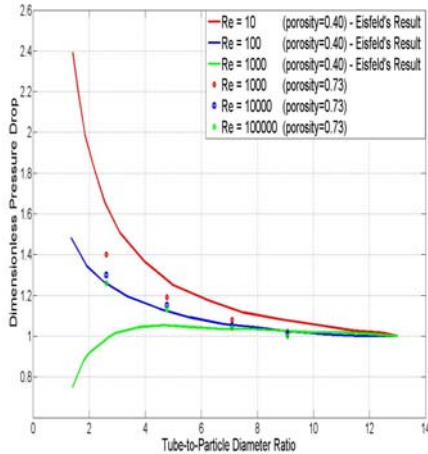


Fig. 7 Dimensionless Pressure Drop compared with Eisfeld's Result

Table 4와 같다. Expanded Bed에서도 무차원 압력강하 값은 동일한 직경입자비에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 점점 1에 수렴하는 경향이 나타났다.

Fig. 7은 직경입자비가 증가함에 따라 레이놀즈수와 기공률이 압력강하의 수렴에 미치는 영향을 분석하기 위해 기공률 0.73인 Expand Bed에서 직경입자비에 따른 압력강하 값을 직경입자비 13의 압력강하 값으로 나눈 무차원 압력강하와 Eisfeld의 기공률 0.4인 Packed Bed에서 결과 비교하였다. Packed Bed에서 직경입자비가 증가함에 따라 압력강하 값이 수렴하는 특성이 나타나고 있으며 특히, 레이놀즈수 1000에서는 직경입자비가 4 이상부터 수렴되었다. Expanded Bed에서는 Packed Bed에서 해석한 레이놀즈수보다 더 큰 수임에도 불구하고 직경입자비가 10부근에서 수렴되는 것으로 나타났으며 Packed Bed의 낮은 레이놀즈수 10, 100에서 압력강하가 수렴되는 경향과 유사한 특성이 나타났다. 즉, 기공률이 큰 경우

Table 3 Pressure drop of each case [Pa]

D/d_p Re	2.62	4.78	7.10	9.08	13.00
10^3	6.40e-1	5.42e-1	4.91e-1	4.66e-1	4.56e-1
10^4	3.44e+1	3.04e+1	2.79e+1	2.67e+1	2.65e+1
10^5	2.30e+3	2.06e+3	1.90e+3	1.83e+3	1.82e+3

Table 4 Dimensionless pressure drop [Pa]

D/d_p Re	2.62	4.78	7.10	9.08
10^3	1.40	1.19	1.08	1.02
10^4	1.30	1.15	1.05	1.01
10^5	1.26	1.13	1.04	1.00

에는 압력강하가 수렴 특성이 레이놀즈수보다 직경입자비에 더 큰 영향을 받는 것으로 보인다. 다양한 기공률 조건에서 고체 입자의 항력에 따른 압력강하 모델의 정확성을 평가하기 위한 전산해석 연구를 수행하는 경우의 해석 모델에서 입자 수는 해석 조건의 레이놀즈수에 따라 고려하는 것보다 직경입자비를 9 이상의 값으로 입자수를 고려하는 것으로 타당한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 Packed Bed에서 나타나는 직경입자비와 레이놀즈수 증가에 따른 압력강하 특성이 Expanded Bed에서도 나타나는지 비교 연구를 수행하였다. 이를 위해 직경입자비가 2.62, 4.78, 7.10, 9.08인 4가지 모델과 고 레이놀즈수 10^3 , 10^4 , 10^5 유동조건에서 전산해석을 통해 압력강하를 계산하였다. 그 결과, Packed Bed에서 나타나는 압력강하 특성이 Expanded Bed에서도 유사한 특성이 나타났다. 이를 통해 다양한 기공률 조건에서 기존에 개발된 압력손실 모델과 전산해석을 통한 압력강하 비교 연구를 수행하기 위해서는 해석 모델의 조건으로 직경입자비를 9 이상에서 해석을 수행해야 되는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원에 의한 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1952, Ergun, S. "Fluid flow through packed columns," *Chemical Engineering Progress*, 48 pp.88-94.
- [2] 2008, Rupesh K. Reddy et al, "CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed and expanded beds," *Chemical engineering research and design*, vol.86, pp.444-453.
- [3] 1993, Tsuji Y., Kawaguchi T. and Tanaka T., "Discrete particle simulation of two dimensional fluidized bed," *Power Tech.*, Vol.77, pp.79-87.
- [4] 1993, M. Syamlal, W. Rogers, and T. J. O'Brien, "MFIX Documentation: Volume 1, Theory Guide," *National Technical Information Service*.
- [5] 2001, Eisfeld, B. and Schnitzlein, K., "The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds," *Chem Eng Sci.*, Vol.56, pp.4321 - 4329.