

덕트 및 원탄 선별망 유동 편향에 관한 연구

임세명¹ · 박현범^{2,†}¹군산대학교 고등기술융합연구원²군산대학교 기계공학부

Study on Flow Deflection of Duct and Raw Coal Separation Screen

Semyeong Lim¹, Hyunbum Park^{2,†}¹Kunsan National University Advanced Technology Institute for Convergence²School of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

In this study, computational fluid dynamics was used to analyze the flow bias generated as air supplied by a fan passes through ducts, piping, and a coal separation screen. The flow bias of the air flow is mostly caused by the spatial characteristics of the fan volute and duct, and the internal baffle and the coal separation screen at the outlet cause strong pressure losses that dampen the flow bias. ANSYS CFX was used for computational fluid dynamics, and since the baffle and the coal separation screen are shaped like perforated plates with many small holes uniformly distributed, actual modeling for analysis was not possible. Therefore, the Porous Loss Model was applied. The evaluation of the flow bias was analyzed based on the velocity distribution of the Porous Loss Model at the outlet surface of the coal separation screen obtained from the computational fluid dynamics results.

초 록

본 연구에서는 전산유동해석을 통해 송풍기에서 공급되는 공기가 덕트 배관과 원탄 선별망을 통과하며 발생하는 유동 편향을 분석하였다. 공기 유동의 유동 편향은 송풍기 볼류트 형상과 유로의 형상 특성으로부터 대부분 발생하며, 유로 내부의 정류망이나 출구의 원탄 선별망은 강력한 압력 손실을 발생시켜 유동 편향을 감쇠하는 효과를 초래한다. 전산유동해석은 ANSYS CFX 2022 R2를 사용하였으며, 정류망과 원탄 선별망은 작은 구멍 다수가 일정하게 분포되어있는 타공판 형상이기 때문에 실제 모델링을 통한 해석은 불가능하다. 따라서 Porous Loss Model을 적용하였다. 유동 편향의 평가는 전산유동해석 결과의 원탄 선별망 Porous Loss Model의 출구 면에 대한 속도 분포를 대상으로 분석하였다.

Key Words : Raw Coal Separation Screen(원탄 선별망), Flow Deflection(유동 편향), Computational Fluid Dynamics(전산유동해석), Porous Loss Model(다공 손실 모델), Duct Flow(사각관 유동)

1. 서 론

석탄은 에너지를 생산하기 위한 주요 원료 중 하나로 국내에서도 생산되는 연소 시 연기가 발생하지 않는 무연탄과 연기가 발생하는 유연탄으로 구분된다. 무연탄은 가정/상업용, 산업용, 발전용 등 1990년대를

기점으로 꾸준히 사용이 감소되어 왔으나 그대로 거의 사용량이 급감한 가정/상업용에 비해 산업용이나 발전용으로는 2000년대 이후 일정 이상 사용되고 있다. 유연탄의 경우 1990년대 이후 수입량이 꾸준히 증가하였으며 발전 분야와 철강, 시멘트 분야 등 산업 분야에서 계속하여 사용량 역시 증가하였다.

특히 발전 분야에서는 석탄, 석유, LNG, 원자력 등 에너지원별 발전 비율에서 2020년 기준 석탄 화력 발전이 44%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다[1].

Received: Apr. 25, 2023 Revised: Jul. 20, 2023 Accepted: Jul. 20, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-63-469-4729, E-mail: swordship@kunsan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

이렇듯 중요한 에너지원인 석탄은 처음 탄광에서 채탄된 상태에서는 여러 크기의 석탄이 혼재되어 있는데 이 상태를 원탄이라고 지칭한다. 이러한 원탄은 여러 가지 공정을 통해 크기에 따라 분류하여 사용된다. 이때 기본적으로 공기 유동을 통해 크기에 따라 선별하는데 선별망에서의 공기 속도의 분포가 매우 중요하다 [2].

본 연구에서는 원탄을 선별하는 공정에서 원탄 선별망을 통과하는 공기 흐름에 대해 전산유동해석을 통해 유량의 불균일성을 평가하였다. 원탄 선별망을 통과하는 공기 흐름이 불균일할수록 선별된 석탄의 크기의 균일성이 감소하기 때문에 공기의 유속 불균일성이 작은 것이 바람직하다. 이러한 공기 유속의 불균일성은 유로 형상에 기인하며 선별망의 큰 압력 손실 구간에 의해 크게 감소하게 된다.

해석은 ANSYS CFX 2022 R2 를 활용하였으며 해석 범위 안의 타공판 형태의 스크린과 선별망의 경우 전체 모델을 적용하여 해석을 수행하는 것은 불가능하기 때문에 압력 손실 모델을 적용하여 해석을 수행하였다.

2. 해석 대상 및 방법

원탄 선별기의 유동 흐름은 송풍기로부터 발생하며 유량 및 압력은 이러한 송풍기 성능에 의해 결정된다. 기본적으로 관내 유량 또는 유속은 송풍기 성능 곡선과 원탄 선별기의 압력 손실 특성이 일치하는 지점에서 결정되기 때문에 원탄 선별기의 요구되는 성능을 만족하기 위해서는 관로의 압력 손실 특성과 유동 편향을 최소화할 수 있는 충분한 선별망의 압력 손실 발생을 보상할 수 있는 송풍기 선정이 선행되어야 한다.

선별망을 통과하는 공기의 유동 편향은 선별망으로 유입되는 유동의 불균일 정도에 비례하며, 선별망 자체의 압력 손실에 반비례하기 때문에 유로 및 선별망의 정확한 압력 손실 평가는 매우 중요하다.

본 해석의 범위는 송풍기에서 가압된 이후부터 선별망을 통과해 대기로 배출되는 지점까지이며 정확한 압력 손실 평가를 위해서는 선별망의 정확한 모델링이 중요하다.

2.1 타공판 압력 손실 모델 및 선별망 모델링

선별망은 사인 파형과 코사인 파형 형태의 4mm 직경의 가는 철사를 연속하여 붙여 망 형태로 가공한 복잡한 형상으로 실제 형상을 3D 모델링하여 전산 유동 해석을 수행하는 것은 시간과 컴퓨터 자원 상 불가능하다.

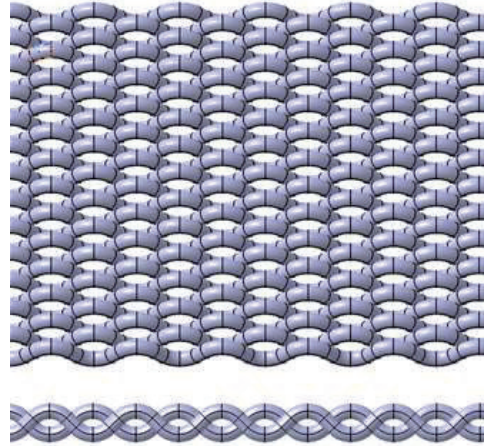


Fig. 1 Separation Screen Shape

유로의 압력 손실 특성은 형상에 따른 압력 손실 계수와 유체의 동압에 의해 결정되며 특히 압력 손실 계수는 레이놀즈 수에 따라 결정된다. 본 해석 대상인 타공판은 일정한 형태의 유로가 반복적으로 구성된 형상이며 유체의 물성 변동이 없는 경우, 압력 손실 특성은 유속의 함수로 나타난다. 따라서 복잡한 타공판 유동에 대해 유속과 압력 손실에 대한 간단한 손실 모델로 나타낼 수 있다[3, 4, 5].

본 해석에서는 선별망 압력 손실 특성을 결정하기 위해 아래와 같은 타공판 등에 적용하는 Porous Loss Model을 적용하였다[6].

$$\frac{-dp}{dx} = \frac{\mu}{K_{perm}} U + K_{loss} \frac{\rho}{2} U^2 \quad (1)$$

$$\frac{-dp}{dx} = C_{R1} U + C_{R2} U^2 \quad (2)$$

dP: Pressure Loss, dx: Differential Distance

μ : Viscosity, ρ : Density, U: Flow Velocity

K_{perm} : Permeability, K_{loss} : Loss Coefficient

C_{R1} , C_{R2} : Linear and Quadratic Resistance Coefficient

Equation 1은 Permeability & Loss coefficient 압력 손실 모델로 유체의 점성과 밀도를 고려해야하는 온도 변화가 있을 때 사용되며, Eq. 2는 Linear & Quadratic resistance coefficient 압력 손실 모델로 점성과 밀도 변화를 무시해도 되는 경우 적용된다. 두 식 모두 좌측 항은 길이에 따른 압력 손실 항이고, 우측 첫 번째 항은 Laminar flow, 두 번째 항은 Turbulent flow의 속도에 대한 특성값이다[7].

원탄 선별망의 유동 흐름에서는 열전달이 무시되므로 Eq. 2 Linear & Quadratic resistance coefficient 압력 손실 모델을 적용하였다. 여기에서 국부적인 층류에 의한 압력 손실은 무시할 수 있으며 난류 손실 특성 상수인 C_{R2} 를 평가하기 위해서는 성능 시험을 하는 것이 가장 정확하나 성능 시험 평가를 위해서는 많은 시간과 자원이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 원탄 선별망 전체가 아닌 5% 정도 길이의 국부적인 샘플 모델에 대한 유동 해석을 선행하여 압력 손실 모델 특성 상수를 결정하였다. 선별망의 형상에 대한 압력 손실 특성만을 구하기 위하여 샘플 모델 해석의 벽면은 Slip wall 조건으로 설정하여 경계층의 효과는 무시하였다.

하지만 이러한 샘플 모델이라 해도 곡면 형태를 갖는 실제 모델링에 대한 미소 틈새 유로에 대한 격자 구성은 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 실제 원탄 선별망 형태의 압력 손실 특성과 동일한 특성을 갖도록 모델 수정을 수행하였다.

유체 흐름은 기본적으로 압력 손실이 가장 적게 일어나는 경로로 일어나며, 따라서 원탄 선별망을 통과하는 공기 흐름 역시 미소 틈새 유로의 가장 넓은 면적이 되는 각도로 통과하게 된다.

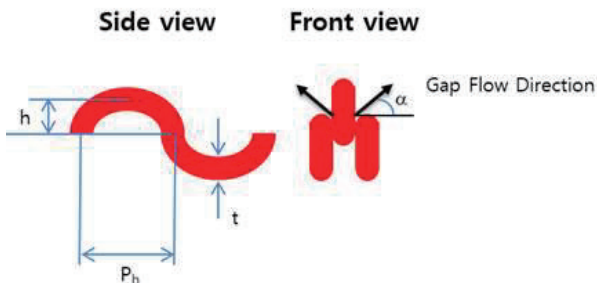


Fig. 2 Separation Screen Cycle & Gap Flow Direction

원탄 선별망의 미소 틈새 유로의 가장 넓은 면적이 되는 기하학적 각도는 45° 이며 이러한 기하학적 특성 면적을 통과하는 유동의 압력 손실은 Reynold' Number의 함수이다. 따라서 모델 수정은 본래 모델의 미소 틈새 유로를 통과하는 유동과 Reynold' Number가 동일하도록 수정하였다[8, 9].

$$P_{Loss} = f(v, Re) \tag{3}$$

$$Re = \frac{\rho v d_h}{\mu} \tag{4}$$

유체의 물성이 동일하며, 압력 손실이 같아야 하기 때문에 미소 틈새 유로의 유속도 같아야 한다. 따라서 압력 손실 계수를 결정하는 Reynold' Number에서 특성 길이의 직경이 같도록 기존 원기둥 형태의 모델을 8각형 형태로 수정하였다.

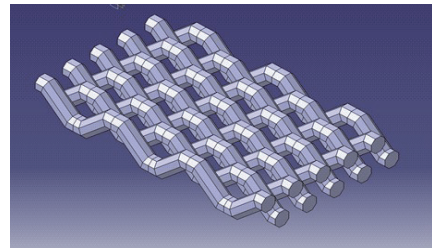


Fig. 3 Modeling of Octagon Sample Screen

이렇게 완성된 모델링에 대해 실제 작동 조건의 Reynold's Number와 동일한 조건으로 유동 해석을 수행하여 Eq. 2의 난류 압력 손실 특성 상수 C_{R2} 를 결정하였다.

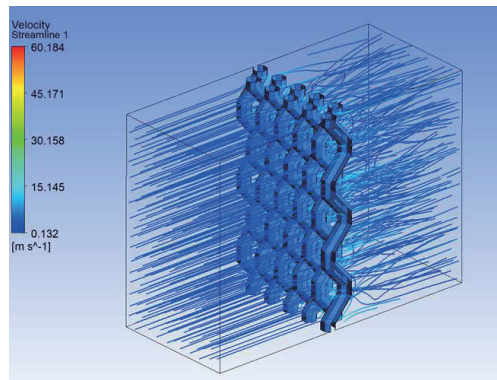


Fig. 4 CFD of Sample Screen

3. 해석 결과 및 분석

3.1 해석 모델 및 격자 구성

원탄 선별기의 유로 구성은 송풍기 출구에서 시작되어 두 갈래로 나뉘며 이는 대칭 형태로 구성된다. 따라서 본 해석 모델은 송풍기 출구에서부터 대칭되는 면을 중심으로 한쪽에 대한 유로 모델링 및 해석을 수행하였다.

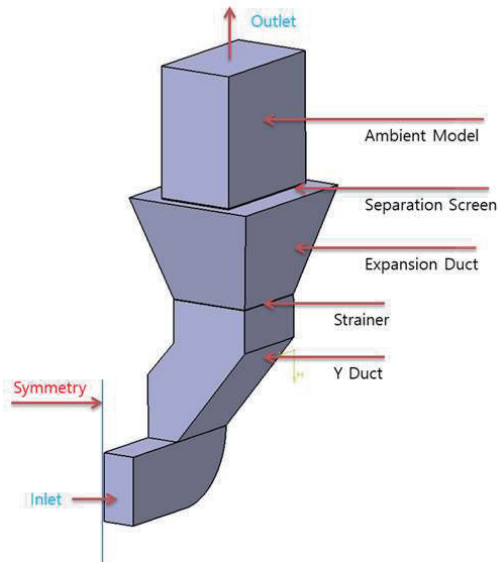


Fig. 5 Flow Passage Model of CFD

Y Duct와 Expansion Duct 사이의 타공판 형태의 정류망(Strainer)도 원탄 선별망과 같이 샘플 모델에 대한 별도의 유동 해석으로 Porous Loss Model을 적용하였으며 원탄 선별망 이후 대기 모델까지 격자를 구성하였다.

격자는 Tetra 기반으로 벽면에는 경계층을 고려한 정렬 격자를 배치하였으며 총 770만 개 elements로 구성하였다.

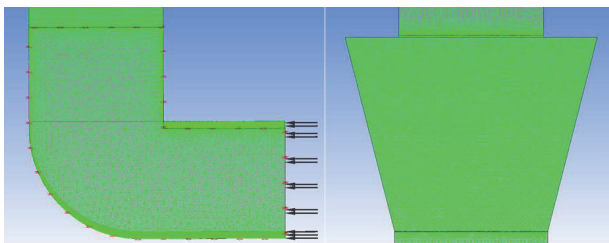


Fig. 6 Mesh for CFD

3.2 경계조건

원탄 선별기 유동 흐름은 대기 공기가 송풍기로 흡입되어 유로를 통과하여 원탄 선별망을 통해 다시 대기로 배출되는 과정이며, 따라서 본 해석의 주요 경계조건을 결정하는 것은 송풍기의 성능이다. 원탄 선별기의 공기 유량은 송풍기의 성능, 즉 유량에 대한 압력 특성과 유로의 압력 특성의 매칭으로 결정된다. 본 전산 유동 해석의 범위에 송풍기는 포함되어 있지 않기 때문에 송풍기 출구 유동 상태를 평가하기 위하여 별도로 송풍기 성능 선도와 효율, 그리고 기하학적 형상을 고려하여 계산을 수행하였으며 이로부터 도출한 주요 경계 조건은 아래 표와 같다.

Table 1 Boundary Conditions

Index	Unit	Value
Working Fluid Model	-	Ideal Air
Inlet Total Temperature	℃	18.47
Inlet Normal Velocity	m/s	20.24
Outlet Static Pressure	bar	1
Heat Transfer Model	-	Isothermal
Turbulent Model	-	SST

3.3 해석 결과 및 분석

원탄 선별망의 유동 편향 정도는 유로 형상 특성으로 인해 증가 경향을 보이며, 또한 전체 유로 압력 손실 대비 정류망과 원탄 선별망의 압력 손실 비율에 따라 감소 경향을 보인다.

따라서 본 해석의 핵심 요소는 유로 형상 특성으로 인한 유속 분포와 전체 압력 손실 대비 정류망과 원탄 선별망의 압력 손실의 평가이다.

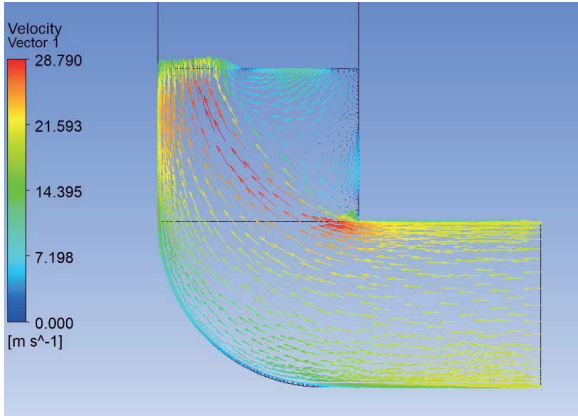


Fig. 7 Velocity Vector at Y Duct Entrance

Figure 7은 원탄 선별기 유로의 시작 부분인 Y duct 입구의 측면 속도 벡터를 나타낸 것으로 해석 결과를 살펴보면, 유동 흐름이 90도로 꺾이며 직각 형태의 안쪽에서 유동 박리에 의한 와류가 발생하고 커브의 바깥쪽의 유효 면적에서만 유속이 빨라지는 것을 확인할 수 있다.

이러한 유로 상 Blockage 발생 및 와류 발생은 유동 편향을 증가시키기 때문에 elbow의 radius를 충분히 크게 설계하거나 Guide Vane을 설치하는 것으로 개선할 수 있다.

상류에서 발생한 유동 편향은 Fig. 8에서와 같이 정류장에서 큰 압력 손실을 겪으며 상당히 감소하게 된다. 그 이후 유로 구성인 diffuser에서 어느 정도 확산된 공기 유동은 최종적으로 원탄 선별망에서 다시 큰 압력 손실을 통해 균등한 유속 분포가 되는 것을 확인할 수 있었다.

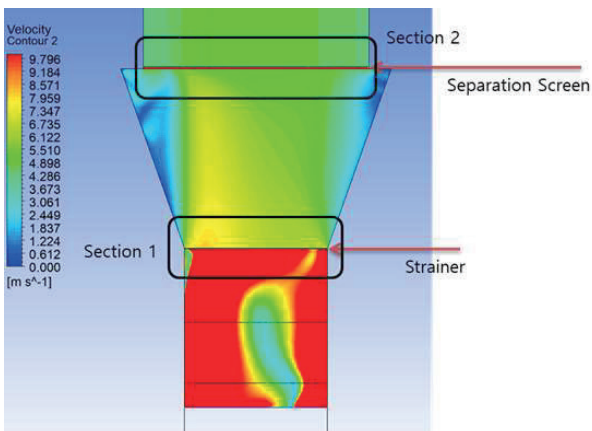


Fig. 8 Velocity Gradient at Y Duct Exit to Ambient

Figure 9는 Porous Loss Model을 적용한 원탄 선별망 출구에서의 속도 분포 결과이며 면 평균 속도는 12.352 m/s로 평가되었다. 원탄 선별망의 원형 모델에서 계산된 평균 속도와는 0.5 % 차이로 확인되었기 때문에 Porous Loss Model 적용 해석에 문제는 없는 것으로 판단되며, Fig. 9 상의 최대 속도는 13 m/s, 최소 속도는 11.7 m/s로 평균 속도 대비 유속 차이는 ± 5.26 %로 확인되었다.

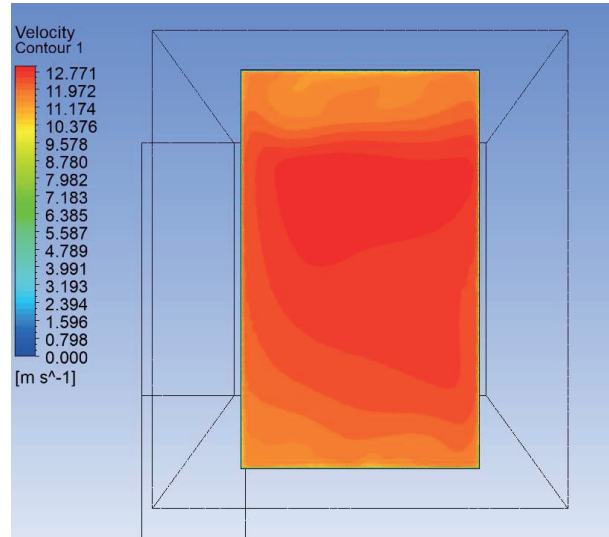


Fig. 9 Velocity Gradient on Coal Separation Screen

원탄 선별망 전체 유로에 대해서 주요 유로 별 압력 손실은 Table 2와 같다.

Table 2 Pressure Loss on Coal Separation System

	Unit	Pressure Loss	Total Loss Ratio
Y duct	%	0.222	12.002
Strainer	%	1.479	79.873
Expansion duct	%	0.003	0.159
Separation Screen	%	0.15	7.966
Total	%	1.883	100

Table 2의 Pressure Loss는 원탄 선별기의 각 구간별 압력 손실과 지점 전압과의 비율이며 Total Loss Ratio는 전체 압력 손실 1883 Pa에 대해 각 구간별 압력 손실이 차지하는 비율이다.

원탄 선별기 유로 전체 압력 손실의 80 % 정도가 정류망에서 발생하며 그 이후 원탄 선별망에서 8 % 정도가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 정류망과 선별망에서 압력 손실 비율이 큰 것은 유동 편향 감소 관점으로 매우 바람직한 현상이다.

4. 결 론

본 연구에서는 원탄을 선별하는 공정 중에서 송풍기의 바람에 대한 항력을 활용하는 원탄 선별기에 대해 전산유동해석을 통한 유동 편향에 대한 연구를 수행하였다.

유동 편향의 저감에 가장 큰 영향을 미치는 타공판 형태의 정류망과 원탄 선별망에 대해서는 직접적인 모델링을 통한 해석은 불가능하기 때문에 Porous Loss Model을 적용하였으며 손실 모델의 손실 계수는 정류망과 원탄 선별망 일부분의 샘플 모델에 대한 전산 유동 해석으로 특정하였다.

해석 결과 정류망과 원탄 선별망에서의 압력 손실이 전체 유로의 압력 손실의 88 % 정도로 매우 큰 것으로 확인하였으며 이로 인해 원탄 선별망에서 대기 중으로 배출되는 유동의 편향 정도는 평균 속도 대비 ± 5.26 %로 평가되었다.

실제 유동에서는 본 해석의 시작 부분인 송풍기 블루트 출구에서 회전에 의한 유동 편향이 있을 것으로 예상되나 본 해석에서는 이를 고려하지 않았으며 이에 대한 영향은 추후 별도로 평가를 수행할 예정이다.

또한 원탄 선별기 유동의 유량과 압력 특성을 결정하는 송풍기의 성능상 본 해석의 경계조건으로 적용한 유량에서 송압 능력은 2550 Pa로 해석 결과의 전체 압력 손실인 1883 Pa보다 26 % 여유가 있는 것으로 확인하였다. 따라서 원탄 선별망의 기공률을 조절하는 것으로 추가적인 유동 편향 정도를 감소시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받

아 수행된 연구임.(2023R1A6C101B042)

References

- [1] Korean Energy Economics Institute, “2021 Yearbook of Energy Statistics,” 2022
- [2] Byung Doo Kwon, Sik Heo, “Variation of the Physical Properties of Coal depending upon the Quality,” *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, vol. 21, no. 1, pp. 97~106, 1988.
- [3] I. S. Kim, J. H. Nam, C. J. Kim, “On Numerical Treatment of Pressure Gradient at the Interface Between a Homogeneous Fluid and a Porous Medium”, *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.4 No.3 pp.28-34 Dec. 1999.
- [4] Il-Sun Jung, Jae-Hyun Park, Jae-Hwan Bae Sangmo Kang, “Porous modeling for the prediction of pressure drop through a perforated strainer”, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 358~367, 2013.
- [5] Taek Keun Kim, Sung Hoon Song, “Prediction of Thermal Performance for Compact Heat Exchangers Using Thermal Porous Medium Approach”, *Transactions of KSAE*, Vol.29 No.2 pp.119-125 Feb. 2021.
- [6] Yo Han Choi, Il Hoon Yoo, Chul-Hee Lee, “Thermal Flow Analysis of an Engine Room using a Porous Media Model for Imitating Flow Rate Reduction at Outlet of Industrial Machines”, *Journal of Drive and Control*, Vol.19 No.1 pp.62-68 Mar. 2022.
- [7] “Ansys CFX-Solver Theory Guide”, Ansys, Inc, 2022
- [8] Bruce R. Munson, Ted H. Okiishi, Wade W. Huebsch, Alric P. Rothmayer, *Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, 2013.
- [9] Frank M. White, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, 2013.