

## 다공성 매질 모델 기반 출구유량 감소 모사 기법을 이용한 산업기계용 엔진룸 열유동해석

# Thermal Flow Analysis of an Engine Room using a Porous Media Model for Imitating Flow Rate Reduction at Outlet of Industrial Machines

최요한<sup>1</sup> · 유일훈<sup>2</sup> · 이철희<sup>1\*</sup>

Yo Han Choi, Il Hoon Yoo and Chul-Hee Lee

Received: 10 Jan. 2022, Accepted: 10 Feb. 2022

**Key Words** : Industrial Machine(산업기계), Engine Room(엔진룸), CFD(전산유체역학), Porous Media(다공성매질), Regression Analysis(회귀분석)

**Abstract:** Considering the characteristics of industrial machines that lack vehicle-induced wind, forced convection by a cooling fan is mostly required. Therefore, numerical analysis of an engine room is usually performed to examine the cooling performance in the room. However, most engine rooms consist of a number of parts and components at specific positions, leading to high costs for numerical modeling and simulation. In this paper, a new methodology for three-dimensional computer-assisted design simplification was proposed, especially for the pile of components and parts at the engine room outlet. A porous media model and regression analysis were used to derive a meta-model for imitating the flow rate reduction at the outlet by the pile. The results showed that the fitted model was reasonable considering the coefficient of determination. The final numerical model of the engine room was then used to simulate the velocity distribution by changing the mass flow rate at the outlet. The results showed that both velocity distributions were significantly changed in each case and the meta-model was valid in imitating the flow rate reduction by some piles of components and parts.

## 1. 서 론

지게차, 굴착기, 휠로더 등은 건설기계 분야의 대표적인 산업기계로서 주로 화물을 적재 및 하역하고 운반하는 역할을 하여 유관 기술 연구가 꾸준히 이루어지고 있다<sup>1-3</sup>. 특히, 저속 또는 정지상태에서 작업을 수행하는 산업기계의 특성상 주행풍에 의한 자

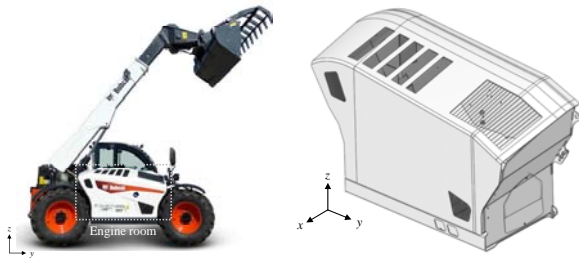
연대류보다 냉각팬(Cooling fan)에 의한 강제대류에 의해 엔진룸 냉각이 주로 이루어진다. 따라서 효율적인 냉각을 위해 엔진룸을 구성하는 부품들의 배치를 수정하고 최적화하게 되는데, 여기에 전산유체역학(CFD) 기반의 열유동해석이 활용될 수 있다. 관련하여 Lee 등<sup>4</sup>은 네 가지의 서로 다른 굴착기를 대상으로 열교환기 배치에 따라 열유동해석을 수행하였다. 여기서 각 열교환기는 열평형 시험 결과 및 유량 계측 결과를 토대로 모델링하였다. 또한, 실험계획법(DOE) 기반의 최적화기법을 해석기법에 접목시켜 엔진룸 내부 설계 파라미터를 최적화하였다<sup>5</sup>. 건설기계 분야 이외에도 다양한 분야에서 엔진룸에 대한 연구가 진행되었는데 특히 자동차 엔진룸 열유동해석<sup>6-10</sup>에 대하여 꾸준히 연구가 이루어졌다. 그 중 Oh 등<sup>11</sup>은 자동차의 언더후드 내부의 열유동해석을 수행하

\* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

2 Hyundai Doosan Infracore Corporation, Incheon 22503, Korea  
Copyright © 2022, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



(a) Industrial machine (b) Engine room

Fig. 1 Industrial machine and engine room

였고 엔진 및 배기 시스템의 복사 열전달, 냉각 팬의 회전효과를 고려한 모델링에 대하여 기술하였다. 자동차 분야 이외에도 Noh 등<sup>12)</sup>은 자주포용 보조동력장치, Lee 등<sup>13)</sup>은 궤도차량용 보조동력장치의 엔진룸 열유동해석을 수행하며 군수품 분야에서도 전산유체역학을 통해 엔진룸 내부 유동장 특성을 분석하였다.

상기 연구들을 포함하여 제한된 시간과 자원 하에서 효율적인 엔진룸 열유동해석을 위해서는 전처리(Pre-processing) 단계에서 형상 단순화 작업이 선행되어야 한다. 하지만, 엔진룸 내 모든 구성품에 대하여 단순화 작업을 수행하고 모델링하는 것은 쉽지 않으며, 엔진룸 내 특정 위치에 부분적으로 존재하는 부품의 경우 적절한 고려범위를 결정하는 것 또한 이슈 중 하나이다.

본 연구에서는 산업기계용 엔진룸 출구를 관통하는 복잡한 부품 더미에 의해 발생하는 유량감소 현상을 다공성매질(Porous media) 기법 및 회귀분석을 통해 모사하고, 출구 개방 정도에 따른 엔진룸 내부 속도장 해석을 목표로 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 엔진룸 레이아웃 및 CFD 모델링에 대하여 기술한다. 여기에는 열교환기 및 냉각팬 모델링과 부품 더미를 회귀모델로 간소화하는 과정이 포함된다. 최종적으로는 구축한 엔진룸 모델을 기반으로 출구 개방정도를 변화시켜가며 사례연구(Case study)를 수행한다. 3장에서는 연구 결과를 토대로 결론을 내린다.

## 2. 수치해석 모델링

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 Fig. 1의 산업기계용 엔진룸 열유동 해석을 유한체적법(Finite Volume Method) 기반의 CFD를 통해 평가하고자 하였고, 여기에 상용 소프트웨어인 FLUENT를 사용하였다. 수치해석에 사용된 지배방정식인 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지

방정식은 식 (1)-(3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i T) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(-k \frac{\partial T}{\partial x_i} + \rho C_p \overline{u_i T}) \tag{3}$$

여기서 하첨자  $i, j$ 는 텐서 표기( $i, j = 1, 2, 3$ )를 나타내며,  $\tau, \rho, u, \mu, k, p, T$  및  $C_p$ 는 각각 전단응력, 밀도, 속도, 점성계수, 열전도도, 압력, 온도 및 정압비열을 나타낸다.

### 2.2 엔진룸 모델링

Table 1은 해석에 사용한 조건을 나타낸다. 난류 모델은 Realizable k- $\epsilon$  난류 모델을 사용하였으며, 경계층(Boundary layer)은 Scalable wall function으로 처리하였다. Realizable k- $\epsilon$  난류 모델은 회전, 역압력구배, 유동 박리 및 재순환 등을 포함하는 난류 유동에 대해 Standard k- $\epsilon$  난류 모델보다 향상된 예측 결과를 보여주며 이는 엔진룸의 복잡한 유동장 형태를 고려하였을 때 적절한 난류 모델이다. 유체는 비압축성 유체(Incompressible fluid)를 사용하였다. 일반적으로 기체는 압축성 유체(Compressible fluid)이기는 하나, 마하수 0.3 이하의 저속 조건의 경우 밀도 변화가 미비하기 때문에 비압축성 유체로 가정하여 해석을 풀이할 수 있다. 입구 및 출구는 각각 속도 및 압력조건을 부여하고, 두 개구 모두 대기온도 및 수력직경을 입력하였다.

계산에는 2차 상류 차분 기법(2nd upwind scheme)과 Green-Gauss node based 및 Coupled 기법을 사용하였다. 여기서 Green-Gauss node based 기법은 격자표면 중심값을 각 요소의 노드를 사용하여 계산하기

Table 1 Analysis conditions

Analysis conditions	
Turbulence model	Realizable k- $\epsilon$
Boundary layer	Scalable wall function
Material	Air (Incompressible gas)
Inlet	3.65[kg/s], 15[°C]
Outlets	101,625[Pa], 15[°C]
Radiator	Porous media & Energy source
Cooling fan	3D Fan zone

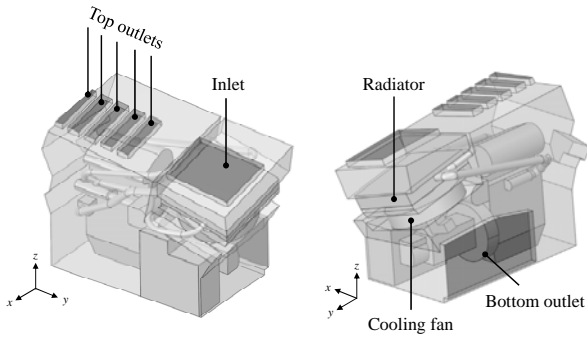


Fig. 2 CFD model of the engine room

때문에 Skewness error에 대한 우려가 없으며, 이는 엔진룸의 복잡한 형상에 따른 국소적인 격자품질 저하로 인한 발산(Divergence)을 회피할 수 있도록 하여 안정적인 수렴성을 가져올 수 있다.

엔진룸 CFD 모델 구축을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS Spaceclaim을 사용하여 엔진룸 3D CAD 형상 단순화를 수행하였다. Fig. 2는 본 연구에서 구축한 엔진룸 CFD 모델을 나타낸다. 엔진은 발열부 및 형상 크기를 고려하여 실린더 헤드, 실린더 블록, 오일 팬, 플라이휠(Flywheel), 디젤 산화 촉매기(DOC), 선택적 환원촉매(SCR), 터보차저의 3D CAD 형상을 반영하고 온도 및 열유속(Heat Flux)을 인가하였다. 또한, 유동 경향성에 영향을 줄 수 있는 요소수 탱크(Urea Tank), 유압펌프, 기타 냉각수 라인에 대한 3D CAD 형상을 구축하였다.

Fig. 3과 4는 엔진룸에 포함된 라디에이터(Radiator)의 성능곡선과 산업기계의 작업 동작 중 하나인 버킷모드(Bucket mode)에서의 엔진 동력을 토크/RPM 시험데이터를 기반으로 도출한 것이다. 본 연구에서 라디에이터는 상기 시험데이터를 기반으로 다공성매

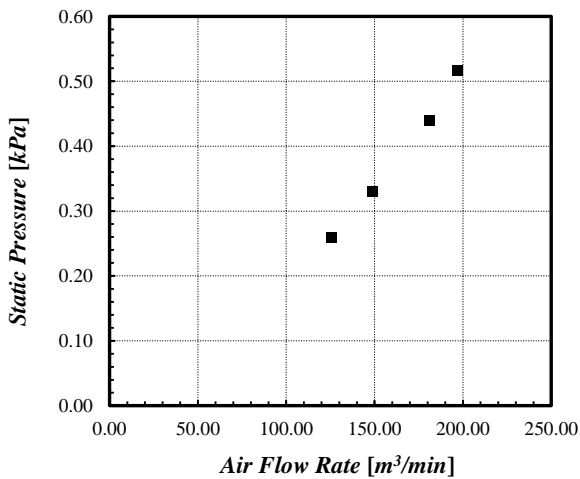


Fig. 3 Radiator performance curve

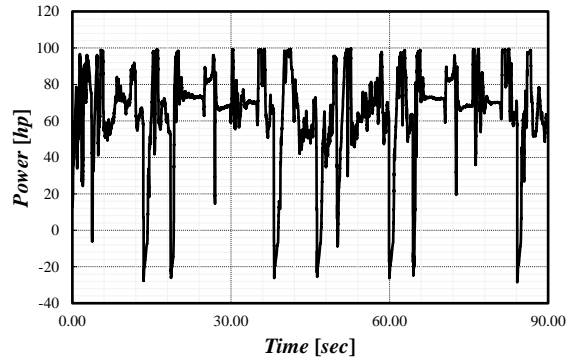


Fig. 4 Engine power measurement results

질 기법과 에너지 소스(Energy source)를 적용하여 모델링하였다. 먼저, 다공성매질 기법은 표준 유동방정식에서 모멘텀 소스 항(Momentum source term)으로 정의되고 아래의 식으로 표현된다.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ ,  $v$  및  $C_2$ 는 각각 투과성, 속도, 및 관성 저항을 나타낸다. 다음으로, 라디에이터 방열량을 에너지 소스로 적용하기 위해 버킷모드에서의 최대 마력인 약 100[hp]를 기반으로 엔진 카탈로그 및 라디에이터 제원을 반영하여 에너지 소스 항에 1,345,000[W/m³]를 인가하였다.

냉각팬 모델링은 FLUENT에서 제공하는 3D Fan zone 모델을 사용하여 수행하였다. 3D Fan zone 모델은 단순화된 3D CAD모델에 사용자가 입력한 RPM, 허브(Hub), 팁(Tip), 성능곡선 등을 기반으로 Fan을 모사하며 기존 다중관성계(Multiple Reference Frame;

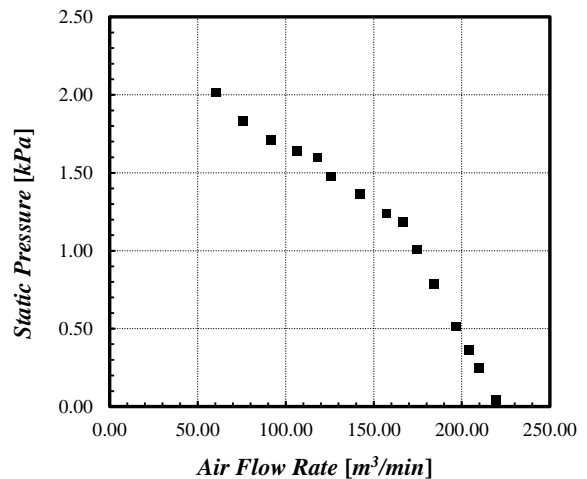


Fig. 5 Cooling fan performance curve

MRF) 기법 대비 격자 품질 및 cost 면에서 이점이 있다. 여기서 성능곡선은 Fig. 5의 3380[RPM]에서의 시험데이터를 사용하였다.

$$S_a = TRIANGLEP(Q)/h \tag{5}$$

$$S_t = \begin{cases} \frac{2W_{fan}r}{c_1|\Omega_{operating}|} & \text{for } R_h < r \leq R_{ip} \\ \frac{2W_{fan}R_{ip}^2}{c_1r|\Omega_{operating}|} & \text{for } R_{ip} < r < R_t \end{cases} \tag{6}$$

$$S_r = \frac{\rho V_\phi^2}{r} \tag{7}$$

여기서  $S_a$ ,  $S_t$  및  $S_r$ 는 각각 axial, tangential 및 radial 방향에서의 모멘텀 소스 항을 나타내고,  $\Omega_{operating}$ ,  $\Delta P(Q)$ ,  $h$ ,  $W_{fan}$ ,  $r$ ,  $R_h$ ,  $R_{ip}$ ,  $R_t$  및  $V_\phi$ 는 각각 회전속도, Fan 통과 시 상승압력, Fan 형상 두께, 동력, 축으로부터 특정 위치까지의 거리, 허브 반지름, 변곡점까지의 거리, 팁 반지름 및 특정 위치에서의 tangential 방향으로의 속도를 나타낸다.

격자는 엔진룸 내부 복잡성에 따른 계산 비용을 고려하여 다면체 격자 (Polyhedral mesh)로 생성하였다. 본 연구에서는 해석결과의 신뢰성 확보를 위해 격자 의존성 테스트를 진행하였다. 격자 740,454개, 874,692개, 1,206,774개 및 4,532,694개에 대해 결과를 비교하였고, 각 출구에서의 유량 변화가 없는 1,206,774개의 격자를 최종적으로 사용하였다.

### 2.3 다공성 매질 모델을 이용한 출구유량 감소 모사 기법

Fig. 6은 엔진룸 하방출구를 관통하는 변속기 및 기타 라인을 나타낸다(여기서 +x방향을 전방, -x방향을 후방이라 칭한다). 해당 더미가 출구를 부분적으

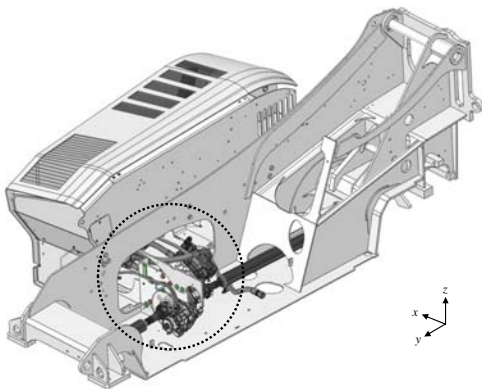


Fig. 6 Pile of components at bottom outlet

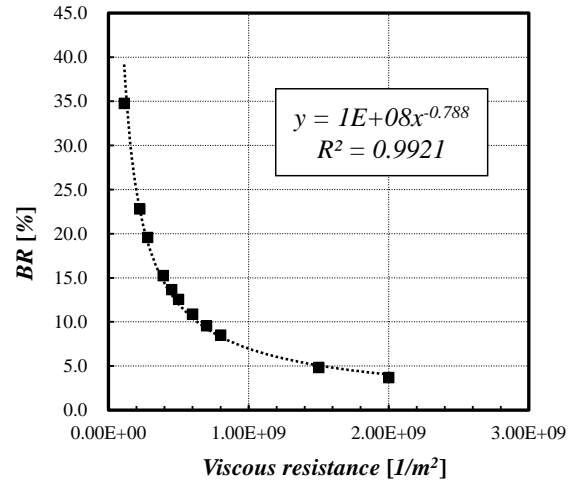


Fig. 7 Regression model for imitating flow rate reduction at an outlet

로 폐쇄함에 따라 완전 개방 대비 유량감소가 일어나고, 이에 따라 더미 형상에 따른 유량감소 모사가 모델링 시 필요하다. 하지만 더미의 3D CAD 형상을 출구를 부분적으로 폐쇄하는 수준만 반영한다는 것은 쉽지 않으며, 이 과정에서 엔지니어의 주관적인 평가가 반영될 수 있는 가능성을 내재한다. 따라서 보다 적절한 모델링 기법을 활용하여 더미에 의한 유량감소 모사를 하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 상기 이슈를 다공성매질 기법과 회귀분석을 통해 해결하고자 하였다. 먼저, 하방출구 도메인을 별도 지정하고 다공성매질 모델로 정의하였다. 이후 다공성매질 모델의 주요 파라미터인 점성 저항계수(Viscous resistance)을 변화시켜가며 해석을 진행하고 출구 유량 데이터를 추출하였다.

추출한 해석 데이터를 Fig. 7과 같이 플롯하고 회귀분석을 통해 두 지표 간에 지수 관계가 있음을 확인하였다. 이후 최소자승법(LSE)을 기반으로 해석 데이터를 지수함수에 피팅하여 결정계수 0.9921의 메타 모델(Meta model)을 구축하였다. 이러한 모델 구축은 다공성매질 모델의 파라미터 수정을 통해 출구 유량 조절이 가능하여 다양한 출구 개방 정도에 대하여 엔진룸 유동장 해석이 가능하다.

## 3. 출구유량 변화에 따른 내부 유동장 해석

### 3.1 해석 Case 설정

구축한 엔진룸 CFD 모델을 기반으로 하방출구의 개방 정도에 따른 내부 유동장 사례연구를 수행하였다. Table 2는 6가지의 서로 다른 해석 Case를 나타내

Table 2 Analysis case

Case	Viscous Resistance [m <sup>2</sup> ]	BR [%]
A	(wall condition)	0
B	321,878,453	20
C	133,470,046	40
D	79,753,162	60
E	55,344,659	80
F	0	100

며 앞서 기술한 메타모델을 기반으로 설정하였다. 본 연구에서는 보다 직관적인 평가를 위해 입구 질량유량(총 질량유량) 대비 하방출구 질량유량 비율을 아래와 같이 BR(Bottom outlet flow rate Ratio)로 새롭게 정의하였다.

$$BR = \frac{MFR_{BO}}{MFR_{Total}} \quad (8)$$

BR은 0%(완전폐쇄)부터 20% 간격으로 100%(완전 개방)까지 변화시켜가며 해석을 진행하였고, 해석 결과는 속도장에 대하여 표현하였다.

### 3.2 결과 및 고찰

Fig. 8은 Case 별 해석결과를 나타낸 것이다. 각 Case 별로 xy 및 yz 단면에서의 속도분포를 나타냈으

며, 속도의 절댓값에 따라 컨투어(Contour)를 적용하고 속도를 벡터로 나타내었다.

Fig. 8(a)를 통해 하방출구가 완전폐쇄된 Case A에서는 엔진 주변에 유동이 원활하게 형성되고 재순환 영역이 엔진 주위에 형성되지 않아 대류에 의한 냉각이 원활하게 일어남을 확인할 수 있다. 특히, 오일 팬 후방 영역에서 유동장이 쉽게 형성돼, 해당 영역에 추후 추가적인 발열 부품 설치도 가능함을 확인할 수 있다.

Fig. 8(b) 및 (c)를 통해 하방출구를 점진적으로 개방시킴에 따라 재순환영역이 엔진룸 전방 측부터 발생하기 시작함을 알 수 있다. 이는 냉각팬과 인접한 하방출구로 대부분의 공기가 토출되고, 이에 따라 엔진룸 전방까지 공기가 도달하지 못하는 것으로 사료된다.

Fig. 8(d)부터는 엔진룸 전방뿐만 아니라 후방에서도 재순환영역 및 공기정체 구역이 발생함을 알 수 있으며, Fig. 8(e) 및 (f)를 통해 Case E 및 F에서는 엔진 주위에 유동장이 형성되지 않아 대류성능이 불리함을 확인할 수 있다.

상기 결과를 통해 BR=40%부터 엔진 전방에서의 냉각성능이 감소되기 시작하며, BR=80%부터는 엔진 전후방 모두에서 냉각성능이 불리함을 알 수 있다. 이는 후방 출구가 개방됨에 대류에 의한 냉각성능이 저하됨을 시사한다.

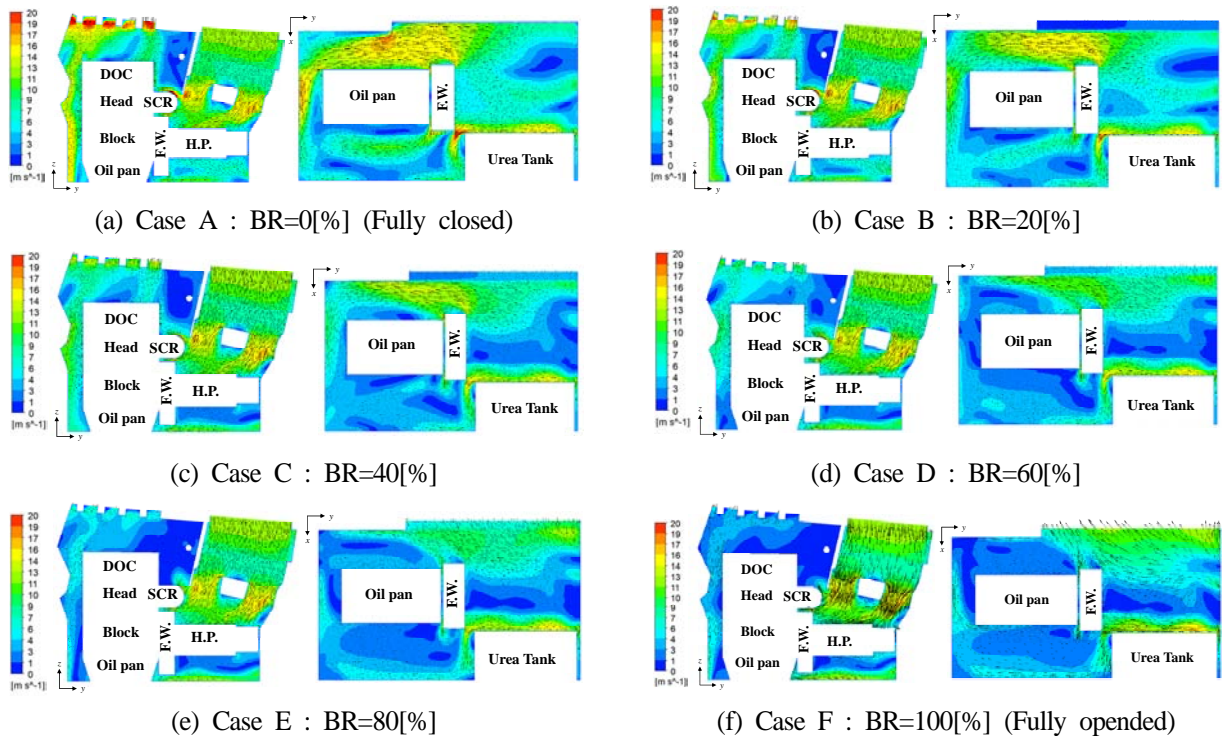


Fig. 8 Case study results for each case



#### 4. 결론

본 연구는 산업기계용 엔진룸 하방출구 개방 정도에 따른 내부 유동장 해석을 위해 CFD 모델을 구축하고, 엔진룸 하방출구 측에 존재하는 변속기 형상을 다공성매질 기법 기반의 회귀모델로 간소화하였다. 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 엔진룸 주요 구성품인 라디에이터 및 냉각팬 모델링을 수행하였다. 라디에이터는 성능곡선 기반의 다공성 매질 기법 및 엔진 시험데이터 기반의 에너지 소스 기법을 적용하였고, 냉각팬은 성능곡선 기반의 3D Fan zone 기법을 적용하였다. 그 밖의 엔진, 유압펌프 등은 벽으로 처리하고 온도 및 열유속을 주어 발열 상황을 모사하였다.

(2) 엔진룸 하방출구 측에 존재하는 복잡한 변속기 형상을 회귀모델로 간소화하였다. 하방출구 도메인을 별도로 다공성 매질 모델로 정의하고 점성저항계수 변화에 따른 출구 유량 데이터를 구축하였다. 최종적으로는 해석 데이터를 기반으로 메타모델을 구축하여 엔진룸 해석모델에 적용하였다.

(3) 구축한 엔진룸 해석모델을 기반으로 출구 개방 정도에 따른 내부 유동장 변화를 분석하였다. Case는 총 6가지로 설정하였으며, 출구유량을 전체유량 대비 20%p씩 증가시켜가며 사례연구를 진행하였다. 해석 결과를 통해 하방출구가 개방됨에 따라 재순환영역 및 유동정체구역이 발생하며 그 정도가 커짐을 확인하였다. 이러한 유동장 형성은 대류에 의한 냉각성능을 저하시킬 수 있어 엔진의 국소적 발열부분이 해소되지 않을 가능성이 있음을 확인하였다. 따라서 하방출구 측 변속기 및 더미로 인해 존재하는 갭(Gap)을 패드 보강 등을 통해 유량 손실을 최소화하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

(4) 연구내용을 통해 입출구에 존재하는 특정 형상에 따른 유량감소 현상을 다공성매질 모델로 모사하고, 모델의 파라미터 조절을 통해 출구 개방 정도에 따른 사례연구가 가능함을 확인하였다. 추후엔 실험 결과와의 비교를 통해 이러한 모델링 기법을 검증 및 고도화하여, 보다 다양한 형상에 대하여 적용 가능할 것으로 기대할 수 있다.

#### 후 기

이 연구는 (주)현대두산인프라코어의 지원을 받아

수행되었으며, 또한 건설기계 R&D 전문인력양성사업의 지원을 받아 연구가 수행되었음을 밝힙니다.

#### 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

#### References

- 1) H. M. Moon et al., "Active Vibration Control of Three-Stage Mast of Reach Truck," Journal of Drive and Control, Vol.16, No.3, pp.1-7, 2019.
- 2) D. Y. Shin, "A Study on Excavation Path Design of Excavator Considering Motion Limits," Journal of Drive and Control, Vol.18, No.2, pp.20-31, 2021.
- 3) C. H. Jeong and J. S. Lee, "Thermal-Fluid Analysis with Flow Loss Coefficient on the Inlet and Exhaust Duct of Wheel-Loader," Transactions of the KSME C Industrial Technology and Innovation, Vol.5, No.2, pp.97-104, 2017.
- 4) J. S. Lee et al., "Verification of Engine Room Thermal Flow Analysis for Design Evaluation of Excavator Cooling System," Journal of Computational Fluids Engineering, Vol.24, No.2, pp.1-7, 2019.
- 5) J. S. Lee et al., "Verification of Engine Room Thermal Flow Analysis for Design Evaluation of Excavator Cooling System," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.3, No.7, pp.3265-3275, 2019.
- 6) F. G. Rising, "Engine Cooling System Design for Heavy Duty Trucks," SAE770023, 1977.
- 7) N. Katoh, T. Ogawa and T. Kuriyama, "Numerical simulation on the three dimensional flow and heat transfer in the engine compartment," SAE910306, 1991.
- 8) H. Shimonosono, Y. Shibata and K. Fujitani, "Optimization of the Heat Flow Distribution in the Engine Compartment," SAE930883, 1993.
- 9) C. Eric, D. Bruno, M. Stephane, B. Robert and B. Farid, "CFD Based Design for Automotive Engine Cooling Fan System," SAE980427, 1998.

- 10) B. Uhl, F. Brotz, J. Fauser and U. Kruger, "Development of Engine Cooling System by Coupling CFD Simulation and Heat Exchanger Analysis Programs," SAE2001-01-1695, 2001.
- 11) K. T. Oh et al., "Automobile Underhood Thermal and Air Flow Simulation using CFD," Journal of Computational Fluids Engineering, Vol.12, No.1, pp.22-27, 2007.
- 12) S. W. Noh et al., "A Study on the Optimization of Heat Flux in Engine Room of Auxiliary Power Unit for Self-Propelled Artillery," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.20, No.12, pp.629-635, 2019.
- 13) T. E. Lee et al., "A Study on Thermal and Fluid Characteristics inside Engine Room of Auxiliary Power Unit for Tracked Vehicle," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.26, No.12, pp.85-93, 2009.
- 14) Fluent 6.2 User Guide, Fluent Inc.