

소음 저감용 배플 개수 변화에 따른 배기 스택 시스템 내부 유동 특성에 관한 고정밀도 LBM 해석

정도윤¹, 박규태¹, 홍창진², 한종섭², 양희수³, 김종범³, 문근환³, 이학진^{1*}

¹경상국립대학교 기계항공우주공학부, ²충남대학교 항공우주공학과, ³한양이엔지(주) 우주방산사업부

HIGH-FIDELITY LBM ANALYSIS OF INTERNAL FLOW STRUCTURES IN AN EXHAUST STACK SYSTEM WITH VARYING NUMBERS OF ACOUSTIC BAFFLES

D. Jeong¹, K.T. Park¹, C.J. Hong², J.S. Han², H.S. Yang³, J.B. Kim³, K.H. Moon³ and H. Lee^{1*}

¹School of Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

²Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University

³Aerospace & Defense Business Division of HANYANG ENG CO., LTD.

*Corresponding author, E-mail: hlee@gnu.ac.kr

Keywords:

배기 스택 시스템(Exhaust stack system),
소음 저감용 배플(Acoustic baffle),
유동 간섭(Flow interaction),
전산유체역학
(Computational fluid dynamics),
격자 볼츠만 법(Lattice-Boltzmann method)

ABSTRACT

This study investigates the internal flow characteristics of an industrial exhaust stack as a preliminary step toward mitigating noise emissions from power generation and manufacturing facilities in urban environments. While previous research on silencer design has explored various flow-modifying devices, including baffles, vanes, and honeycomb structures, this work focuses on the aerodynamic effects of baffle number within the stack. Two configurations with different baffle counts, denoted B9 and B17, were examined to evaluate their influence on internal flow development, outlet flow propagation, and external dispersion behavior. In this study, very large eddy simulations (VLES) based on the lattice Boltzmann method (LBM) were conducted to resolve unsteady flow structures. In the B9 case, the reduced baffle density allowed for continuous flow development with minimal resistance, resulting in enhanced vertical momentum and strong upward propagation at the outlet. In contrast, the B17 configuration exhibited significant flow deceleration, restricted flow channels, and prominent recirculation zones between adjacent baffles. As a result, exhaust jet flow beyond 7 meters from the outlet was only observed in the B9 configuration. These findings demonstrate that the number of internal baffles critically influences the momentum transfer and far-field dispersion characteristics of exhaust stack flows, offering valuable insights for the aerodynamic optimization of noise control devices.

Received | 28 January, 2026

Revised | 3 August, 2026

Accepted | 11 September, 2026



OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

산업 플랜트, 발전소 및 대형 기계 설비에서 배출되는 고온 고속 배기가스는 비정상 제트 유동을 동반하며, 배기 스택 내부에서는 복잡한 난류 유동 구조를 형성한다[1,2]. 이러한 내부 제트 유동은 높은 난류 강도에 의해 Kelvin-Helmholtz 불안정성, 전단층 말림(Shear-layer Roll-up), 재순환 영역이 동시에 발생하며, 강한 비정상 유동이 발달한다[3]. 특히 배기 스택과 같이 내부 공간이 제한된 환경에서는 제트 확산과 와류 구조가 벽면 및 내부 구조물과 상호작용하여 더욱 복잡한 형태로 발달되고, 이는 압력 분포와 난류 에너지 전달에도 직접적인 영향을 준다[4,5]. 특히, 배플, 베인, 격자 등과 같은 내부 구조물들은 유동의 흐름을 방해할 뿐만 아니라 와류의 형성 및 소산 과정에 직접적인 영향을 미쳐 스택 내부 유동의 난류 에너지와 운동량 전달 경로를 변화시킨다[6]. 이 과정에서 난류 강도, 재순환 위치, 압력 손실, Swirl Intensity 등 주요 유동 특성은 구조물의 배치와 형상에 따라 크게 달라질 수 있다[7-9]. 따라서 배기 스택 내부의 비정상 제트/난류 유동은 구조물의 존재뿐만 아니라 그 개수와 배열 방식에 따라 서로 다른 발달 패턴과 전파특성을 보일 가능성이 높다. 특히 배플 개수의 증감은 제트가 구조물과 충돌하고 분산되는 위치를 변화시켜 내부 비정상 구조의 전파 방식에 직접적인 영향을 준다[10-12]. 배플 수가 적은 경우에는 충돌과 재순환이 국부적으로 집중되어 난류 에너지가 특정 영역에 모이거나 체류 영역이 형성될 수 있다. 반면 배플 수가 증가하면 제트 유동이 여러 경로로 분산되면서 층에 따라 유동의 정렬 방식에 있어 상이한 경향을 보이며, 이러한 차이는 내부 유동 발달뿐 아니라 출구 조건에서의 속도 성분 분포와 외부 유동장의 전파 방향을 결정하는 핵심 요소로 작용한다.

제트 및 난류 유동의 기본 특성은 다양한 연구를 통해 폭넓게 규명되어 왔다. Pickering et al.[13]은 고해상도 실험 계측과 유동 가시화 기법을 이용하여 자유 제트 유동을 대상으로 Kelvin-Helmholtz 와류와 비정상 구조의 형성을 분석하였으며, 이러한 불안정성이 제트 확산과 난류 발달을 지배하는 주요 메커니즘임을 제시하였다. Cavalieri et al.[14]은 시간 분해 속도장 계측과 스펙트럼 기반 해석 기법을 통해 자유 난류 제트의 속도장을 분석하여, Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의해 증폭된 비정상 파동 구조가 공간적으로 국소적인 Wave Packet 형태로 발달함을 보였다. 이어서 Baydar et al.[15]은 압력 및 속도 계측을 포함한 실험적 접근을 통해 공간 제약 조건이 있는 Confined 제트 유동을 실험적으로 분석하여, 재순환 영역의 형성 위치와 난류 강도 분포가 제약 조건에 따라 크게 변화함을 보고하였다. Abdel et al.[16]은 실험 및 유한체적법(Finite Volume Method, FVM) 기반 수치해석을 병행하여, Confined 환경에서 트윈 제트 간 충돌과 비정상 압력장이 유동 전파특성을 어떻게 변화시키는지 규명하였다. 또한 Chang et al.[17]은 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 기반 수치해석을 통해 복잡한 내부 형상을 갖는 구속 제트 유동을 수치적으로 해석하여, 내부 형상 변화가 전단층 발달과 재순환 구조 형성에 중요한 역할을 한다는 점을 제시하였다. 이와 함께 내부 구조물을 이용한 유동 제어 연구도 활발히 이루어져 왔다. 배플, 베인, 허니컴, 다공판과 같은 구조물은 난류 에너지 분산, 평균 유속 균일화, Wake 정렬, 재순환 영역 감소를 위해 다양한 유동 시스템에 적용되어 왔으며, 이러한 구조물은 제트 유동의 방향성과 운동량 분포를 조절하는 데 효과적인 것으로 보고되었다. Li et al.[18]은 RANS 기반의 $k-\varepsilon$ 난류 모델을 적용한 수치해석을 통해, 내부 삼각형 배플을 적용한 해석을 통해 배플 유도와 와류가 난류 강도와 혼합 특성을 변화시키는 메커니즘을 제시하였으며, 반복 배열 구조물은 대규모 와류를 분해하여 난류 에너지를 작은 스케일로 분산시키는 효과를 갖는 것으로 알려져 있다. Sriromreun et al.[6]은 열유동 실험과 RANS 기반 수치해석을 병행하여, Z형 배플이 장착된 채널 유동을 대상으로 실험 및 수치해석을 수행하여, 배플 형상과 배열에 따라 강한 재순환 영역과 종 방향 와류 구조가 형성되며, 이로 인해 난류 강도와 유동 혼합 특성이 크게 변화함을 보였다. Uddin et al.[19]은 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 이용한 고해상도 수치해석을 통해, 슬롯 제트 출구 내부에 원통형 삽입체를 설치한 조건에서 대규모 와류 생성 위치와 난류 운동에너지 분포가 삽입체 후류 영역으로 이동함을 확인하였다.

하지만, 기존 연구들은 대부분 단일 구조물 또는 제한된 배치 조건을 대상으로 수행되어, 구조물의 개수 변화가 비정상

제트/난류 유동의 발달과 전파특성에 미치는 영향을 정량적으로 비교한 사례는 많지 않다. 또한 기존 연구는 구조물이 난류 강도를 단순히 감쇠시키는 효과에 주로 초점을 두고 있어, 구조물과 제트 유동의 상호작용에 의해 내부 비정상 구조가 어떻게 재구성되는지, 그리고 이러한 변화가 출구 조건 및 외부 유동 전파특성까지 어떻게 연결되는지에 대한 물리적 해석은 충분히 이루어지지 않았다. 따라서, 복잡한 내부 형상을 가진 배기 스택과 같은 시스템에서는 구조물 개수 변화가 난류 에너지 분포와 운동량 전달 경로를 어떻게 변화시키는지에 대한 고해상도 분석이 특히 필요하다. 본 연구는 이러한 연구 공백을 보완하기 위해 Lattice Boltzmann Method(LBM) 기반 고정밀 전산해석을 수행하여, 배기 스택 내부에서 배플 개수 변화가 비정상 난류 유동의 발달과 전파특성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하고자 한다. 이를 통해 내부 유동 구조의 재구성 메커니즘을 정량적으로 제시하고, 출구 조건 및 외부 유동 전파특성과의 연관성을 분석함으로써 향후 배기 스택 내부 구조 최적화 및 소음 저감 설계에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 전산해석 기법

2.1 LBM 전산해석 기법

본 연구에서는 배기 스택 내부에서 배플에 의해 형성되는 비정상 난류 특성을 해석하기 위하여 LBM 기반 상용 전산해석 소프트웨어인 PowerFLOW를 사용하였다. LBM은 입자의 충돌을 다루는 미시적인 모델(Molecular Level)과 유체를 연속체로 가정하는 거시적인 모델(Macroscopic Level)의 중간 단계인 메조스코픽(Mesososcopic) 수준의 전산해석 기법으로, 유체 내 입자들의 확률 분포 함수를 격자 공간에서 충돌과 이동 과정을 통해 계산한다[20,21]. 본 연구에서는 LBM의 D3Q19 모델을 적용하여[22], 입자들이 3차원 격자 내에서 19개의 방향으로 이동할 수 있도록 하였다. 특히, LBM은 격자 점에서 충돌-이동 절차를 반복하며 국소적으로 입자 분포함수를 갱신하는 방식을 취하며, 이로 인해 전역 연산에 의존하지 않는다는 특징이 있다. 이를 통해 대류항 안정화 과정에서 발생하는 인공 점성(Artificial Viscosity)이 상대적으로 작고, LBM은 분포함수가 이산 속도를 따라 격자점 내에서 이동하는 형태로 대류 전달이 이루어지므로, 수치적 분산(Numerical Dispersion) 관점에서, 이산화된 시간 내에서 위상 오차 누적이 상대적으로 작게 나타난다[23]. 이러한 특징으로 비정상 유동에서 유동 간 간섭 패턴을 보다 안정적으로 재현할 수 있다. 또한, 지배 방정식은 대수 방정식 형태로 이산화되어 별도의 행렬 계산이 요구되지 않고, 이로 인해 병렬화가 가능하므로 대규모 격자 해석에서 계산 효율성이 높다[23-25].

2.2 LBM-VLES 해석 기법

본 연구에서는 LBM-Very Large Eddy Simulation(LBM-VLES) 해석 기법을 사용하여 난류 유동을 고려하였다. LBM-VLES는 LBM의 계산 효율성을 기반으로, 완화 시간을 난류 스케일에 맞추어 조절함으로써 난류 효과를 반영한다. 이를 위해 Renormalization Group(RNG) 기반의 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 난류 점성 ν_t 를 계산하며, 식(1)과 같이, 난류 운동에너지 k 와 난류 소산율 ϵ 을 반영한 유효 완화 시간 τ_{eff} 을 통해 난류 특성을 LBM 해석에 반영할 수 있다[23].

$$\tau_{eff} = \frac{3\nu_{eff}}{c_s^2} + \frac{1}{2} \left(\nu_{eff} = \nu + \nu_t, \nu_t = c_\mu \cdot \frac{k^2}{\epsilon} \right) \quad (1)$$

이를 통해 대규모 와류 구조는 직접적으로 해석하고 소규모 난류 성분은 모델링함으로써 계산 비용과 정확성 간의 균형

을 확보한다. 특히 LBM-VLES는 LES에 비해 상대적으로 적은 격자수와 계산 자원으로도 와류 상호작용 및 비정상 유동 특성을 효과적으로 재현할 수 있다. 또한, 유동 전파 및 혼합 과정에 지배적인 비정상 거동을 효율적으로 포착 가능하다는 특징이 있다. 이를 통해 복잡한 배기 스택 내부 및 외부 영역에서의 유동 특성을 분석하는 해석에 적합하다[21,22,26].

2.3 전산해석자 검증

본 검증에서는 Prause et al.[27]의 LES 결과와 Andreopoulos and Rodi[28]의 실험 결과를 이용하여, 본 연구에서 사용한 LBM 전산해석 기법의 비정상 제트 유동 예측 성능을 평가하였다. 해당 검증 문제는 서로 직교하는 제트와 주 유동의 상호작용으로 발생하는 전단층 발달, 와류 형성, 재순환 및 하류 속도분포 변화를 포함하므로, 배기 스택 내부에서 발생하는 제트 간섭 유동에 대한 해석 기법의 적용 가능성을 평가하는 데 활용하였다. 검증 형상은 직사각형 형태의 주 유동 영역과 하부 벽면에 수직으로 설치된 원형 제트 배관으로 구성하였다. 제트 배관의 직경은 $D = 0.05$ m이며, 주 유동 입구면에서 제트 배관 중심까지의 거리는 $2D$, 제트 유입면에서 배관 출구까지의 높이는 $12D$ 로 설정하였다. 해석자 검증에는 약 1억 6천만 개의 격자를 사용하였다. 주 유동 속도와 제트 분사 속도는 각각 $V_{cf} = 13.9$ m/s, $V_j = 27.8$ m/s로 설정하였다.

Fig. 1은 순간 속도 크기 분포와 속도 프로파일의 추출 위치를 나타낸다. 벽면에서 수직으로 분사된 제트는 교차 유동의 영향으로 하류 방향으로 편향되며, 제트와 주 유동 사이에는 강한 속도 구배가 형성된다. 또한 제트 후방에는 저속도 영역이 발달하고, 하류로 진행하면서 주변 유동과의 혼합에 의해 속도분포가 점차 완화된다. 이러한 유동의 발달 과정을 정량적으로 비교하기 위해 제트 중심으로부터 $x/D = 0.25, 0.5, 1.0$ 및 2.0 위치를 각각 (a)–(d) 단면으로 정의하였다.

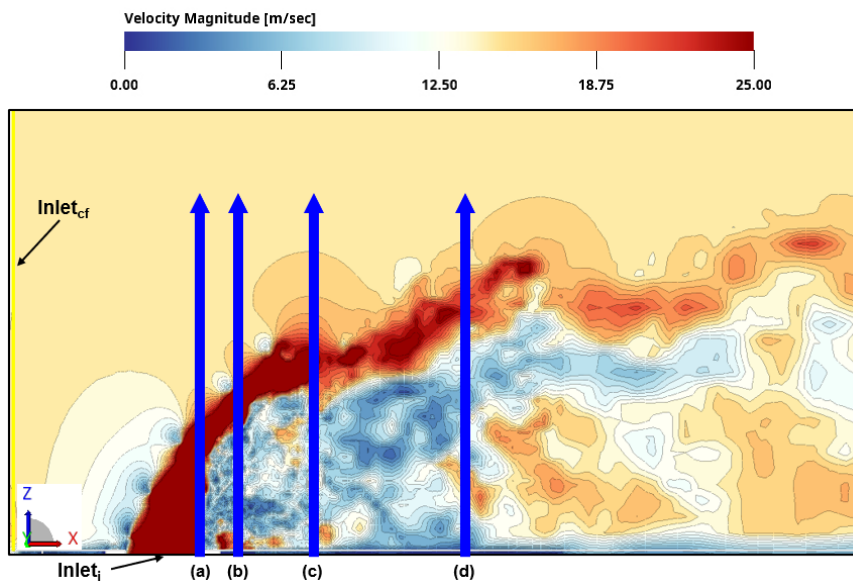


Fig. 1. Instantaneous velocity magnitude field and sampling locations for velocity profile comparison

Fig. 2는 각 단면에서 추출한 시간평균 주 유동 방향 속도분포를 LES 및 실험 결과와 비교한 것이다. 제트 출구에 가까운 $x/D = 0.25$ 와 0.5 에서는 속도 피크의 크기와 높이 방향 위치에서 국부적인 차이가 나타났으나, 속도 피크와 속도결손 영역의 전반적인 분포는 LES 결과와 유사하였다. 본 LBM 해석에서는 제트 입구 단면에 균일한 평균 속도를 적용한 반면, Prause et al.의 LES에서는 별도의 난류 배관 및 평판 해석으로부터 획득한 시간 변동 유동장을 입구에 속도 경계조건으로 매핑하여 적용하였다. 따라서 두 해석에서 적용한 입구 속도 및 난류 분포의 차이가 제트 출구 부근의 국소 속도와 피크 위치에 영향을 미친 것으로 판단된다. 하류로 진행할수록 속도 피크는 높은 z/D 방향으로 이동하였으며, 제트 후방의 속도결

손은 점차 회복되었다. 이러한 하류 발달 특성은 $x/D=1.0$ 과 2.0 에서 LES 및 실험 결과와 전반적으로 일관된 경향을 나타냈다. LES 대비 평균 상대오차는 $x/D=0.25, 0.5, 1.0$ 및 2.0 에서 각각 2.56%, 0.39%, 2.06% 및 1.22%로, 모든 단면에서 3% 이내로 나타났다. 실험자료는 제한된 높이의 일부 측정점에서만 제공되므로 속도분포의 주요 변화 경향을 확인하기 위한 독립적인 비교자료로 활용하였다. 검증 연구를 통해 본 LBM 해석이 JICF의 제트 편향, 속도결손 및 하류 속도분포의 발달을 적절히 예측함을 확인하였다.

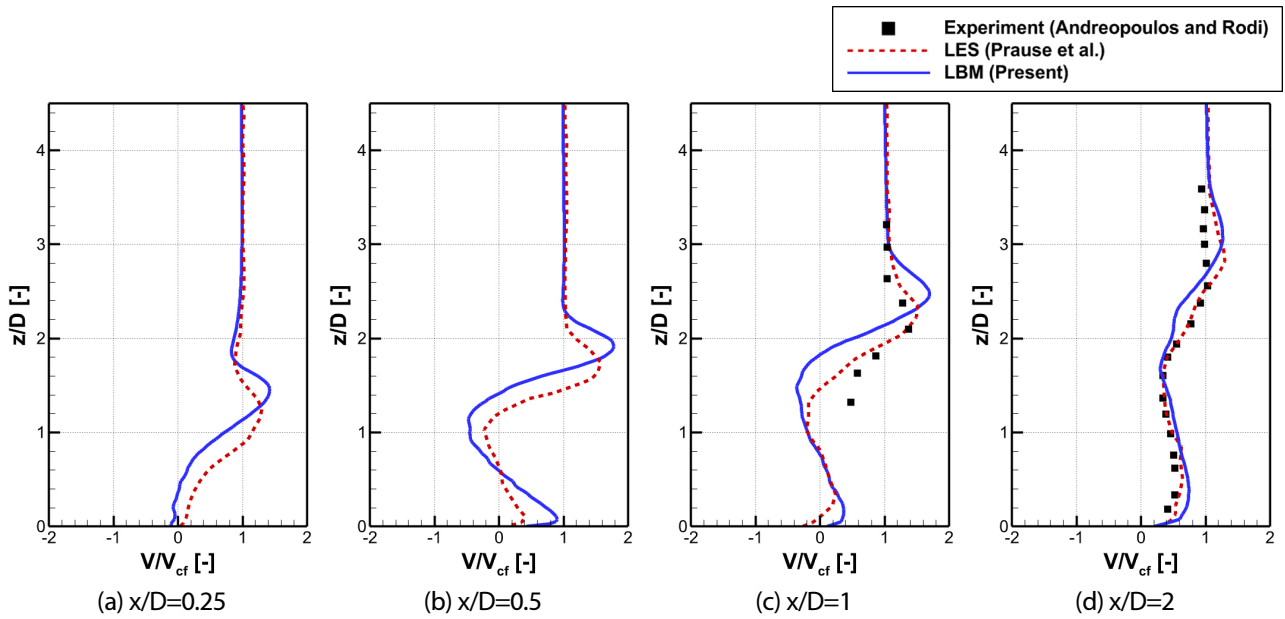


Fig. 2. Comparison of normalized time-averaged streamwise velocity profiles at selected downstream locations

3. 전산해석 모델 및 조건

3.1 전산해석 모델

본 연구에서는 산업용 배기 스택 시스템에서 발생하는 비정상 유동의 전파특성을 고정밀도 전산해석을 통해 면밀히 분석하였다. 스택은 전면의 원형 파이프를 통해 유동이 유입되고, 내부를 통과한 후 상부로 배출되는 구조를 갖는다. Fig. 3에 도시한 것과 같이 본 연구에서 고려한 배기 스택의 단면은 가로 세로 길이가 4.50 m인 정사각형상이며 높이는 8.59 m이다. 스택 내부에는 총 두 단으로 구성된 배플이 설치되어 있으며, 각 단의 위치는 스택 바닥에서 1단 배플까지 4.35 m, 1단과 2단 사이 0.58 m, 2단 배플과 출구 사이 0.70 m로 정의하였다. 배플의 길이는 X 축 방향으로 4.48 m이며, 단면 크기는 높이 1.50 m, 폭 0.25 m로 설정하였다. 본 연구에서는 배플 개수 변화가 내부 난류 구조 및 운동량 전파특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 두 가지 배플 배치 구조를 고려하였다. Fig. 4와 같이 배플 수가 9개인 Case를 B9, 17개인 Case를 B17로 정의하였다. 모든 Case에서 배플의 형상과 설치 위치는 동일하며, 배플 개수만을 변경하였다. 단별 배플의 배치 개수는 B17의 경우 상단 8개, 하단 9개이며, B9의 경우 일부 배플을 제거하여 상단 4개, 하단 5개로 구성하였으며, 제거 후 남은 배플의 경우 Fig. 4 (a)와 같이 번호를 이용하여 제시하였다. B9과 B17에는 동일한 형상과 두께의 배플이 적용되었으나, 배플 개수의 증가에 따라 유효 유로 면적과 폐쇄율도 함께 변화한다. 폐쇄율은 각 단면의 전체 면적에 대한 배플 투영면적의 비로 정의하였다. 상단 중간 단면의 폐쇄율은 B9과 B17에서 각각 22.12%와 44.25%이며, 하단 중간 단면에서는 각각 27.65%와 49.78%이다. 따라서 본 연구에서 관찰된 B9과 B17의 유동 차이는 배플 개수만의 독립적인 영향이 아

니라, 배플 개수 증가에 수반되는 유로 면적 감소와 폐쇄율 증가가 결합된 결과로 해석하였다. 이러한 기하학적 차이는 이후 내부 유동의 감속, 하부 재순환 영역 발달, 비정상 하중 증가 및 상향 운동량 전달 특성 차이를 유발하는 주요 원인으로 작용한다. 배기 스택 내부를 지나는 제트 유동은 직경 $D = 0.25$ m의 원형 단면으로 유입되도록 경계조건을 설정하였다.

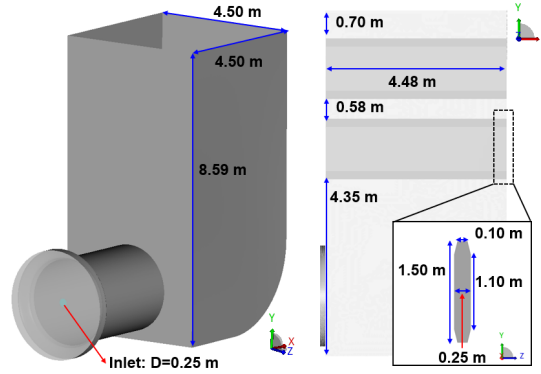


Fig. 3. Geometry of the exhaust stack system and internal baffle configuration

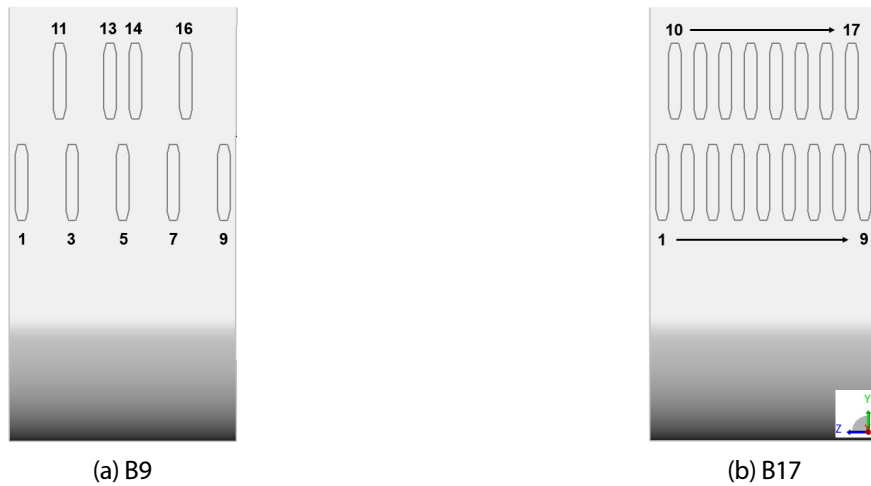


Fig. 4. Baffle arrangements for each exhaust stack system configuration

Fig. 5는 배플 배치 구조에 따른 배기 스택 내부, 외부의 유동장 특성을 분석하기 위한 LBM 계산 영역을 나타내었다. LBM 계산 영역의 크기는 스택 높이 8.59 m(L)을 기준 길이로 설정하여, 형상은 길이 10L, 폭 5L, 높이 12L의 직육면체로 구성하였다. 본 해석의 경우, 배기 스택 내부에서 유동과 구조물 간의 간섭 영향에 대한 정확한 예측이 요구된다. 이에 따라 본 해석에서는 배기 스택 내부에서 유동과 배플 구조물 사이의 간섭을 포착하기 위해 최소 격자 크기 0.01 m를 적용하였다. 이는 배플 길이 4.48 m의 약 0.22%에 해당하며, 이는 배플 폭(width)과 높이(height)를 기준으로 각각 약 25 voxels/width와 150 voxels/height의 공간 해상도를 확보한 수준이다. 배기 스택 내부의 비정상 유동의 충분한 발달을 위해 각 조건에서 6초의 물리 시간 동안 해석을 수행해야 하므로, 배플 배치 조건별 격자 수렴성 시험에는 상당한 계산 비용이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 배기 및 소음기 내부 유동을 대상으로 수행된 선행 PowerFLOW 기반 LBM 연구와 특성 길이를 기준으로 격자 의존성을 검토한 선행 LBM-VLES 연구를 참고하여 격자 수준을 설정하였다. Mann et al.[29]은 소음기 내부의 슬롯형 구멍(Slotted hole) 주변의 유동 및 소음 해석을 위해 15 voxels/diameter를 적용하였으며,

Teruna et al.[20]은 OGV 소음 해석에서 86 voxels/chord를 사용하였다. 서로 다른 형상과 유동 문제에서 정의된 해상도를 직접적인 격자 수렴성의 근거로 사용할 수는 없으나, 이들 결과를 현재 격자 수준을 평가하기 위한 보조 기준으로 참고하였다. 본 연구에서는 각 해석 조건 별로 약 2.64억 개의 격자를 사용하였으며, B9과 B17에 동일한 최소 voxel 크기와 Variable Resolution (VR) 배치 기준을 적용하였다. 따라서 두 형상의 비교에서는 일관된 격자 해상도를 유지하였다. 또한, Fig. 6과 같이, VR 기능을 이용하여 계산 영역을 13개의 해상도 영역으로 구분하고 격자 크기를 단계적으로 조정하였다. 특히, 스택 출구 주변의 외부 유동 발달을 정밀하게 포착하기 위해 해당 영역에는 추가적인 격자 조밀도를 부여하였다. 또한 배플 주변의 복잡한 유동 구조를 정확하게 해석하기 위해 두 개의 동체 표면을 기준으로 오프셋 스케일링(Offset Scaling)된 두 개의 VR을 적용하였으며, 이를 통해 배플 인근의 근접 벽면 영역에 효율적으로 고밀도 격자를 구성하여 세부 유동을 고해상도로 포착하였다. 다만 계산 자원을 고려한 현실적인 이유로 별도의 격자 수렴성 검토는 수행하지 않은 것은 본 연구의 제한사항이다.

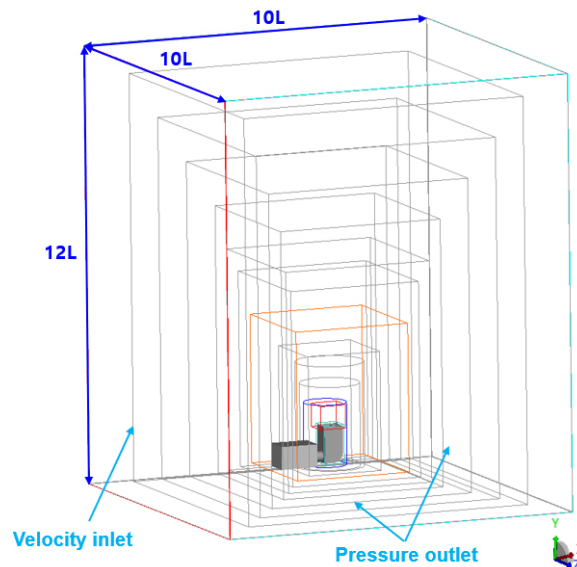


Fig. 5. Computational domain for LBM simulation

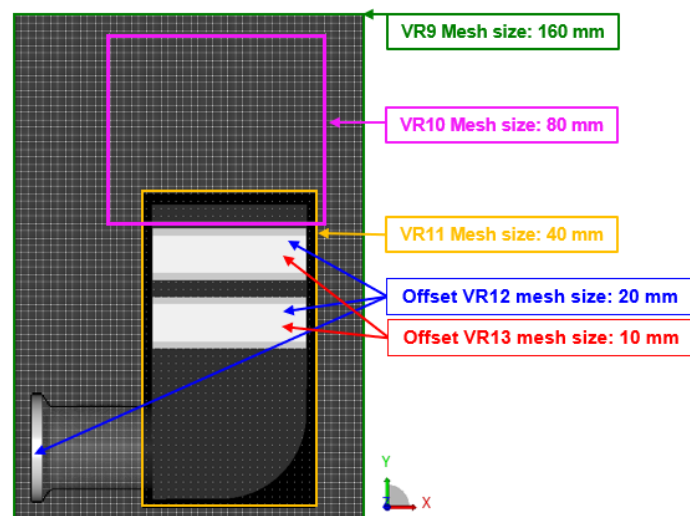


Fig. 6. Computational grid refined using variable resolution approach

3.2 전산해석 조건

본 연구에서 고려한 유동 조건은 Table 1에 정리하였으며, 배기 스택 내부로 유입되는 입구 영역에는 142.29 m/s의 유입 속도를 부여하였고 전체 계산 시간은 6초로 설정하였다. 구조물과 유동의 상호작용 과정에서 형성되는 비정상 와류 구조를 정밀하게 포착하기 위해, LBM 기반의 이산화된 격자 내에서 정의되는 격자 속도(Lattice Velocity)를 기준으로 최소 시간 간격을 적용하였으며, 이에 따라 시간 간격은 1.01×10^{-5} 초로 설정하였다. 이를 통해 스택 내부 및 외부에서 발생하는 유동의 확산 소산 거동을 정확하게 재현할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 제트 유동이 스택 유입 전 양측의 바이패스(Bypass)를 통해 충분히 냉각된 상태로 유입되므로 유동의 온도 변화는 별도로 고려하지 않았다.

Table 1. Simulation conditions for flow propagation characteristics analysis

Freestream Mach number[-]	0
Inlet velocity[m/s]	142.29
Pressure[Pa]	101,325
Temperature[K]	288.15
Reynolds number[-]	2,440,597
Physical time[sec]	6
Time step[sec]	1.01×10^{-5}

본 해석은 비정상 LBM-VLES이므로, 계산 결과의 안정화 여부는 정상상태 해석과 같은 잔류치의 단조 감소보다 대표적인 적분 하중의 통계적 거동을 기준으로 평가하였다. 이를 위해 유입 제트와 직접 충돌하는 1단 중앙 배플과, 하류에서 재분배된 유동의 영향을 받는 2단 중앙 배플의 수직력 시간 이력을 분석하였다. 배플 수직력은 표면 전체에 작용하는 압력 및 전단력의 적분값으로, 제트 충돌과 배플 주변의 비정상 유동에 따른 하중 응답을 나타낸다. Fig. 7에서 계산 초기에는 제트가 배기 스택 내부로 전파되고 배플 주변 유동이 발달하면서 큰 과도 하중이 발생하였다. 이후 약 3초부터 순간 하중은 지속적으로 변동하였으나, 이후 평균값에서는 뚜렷한 증가 또는 감소가 나타나지 않았다. 3초 이후 데이터에 대해 1초 구간 단위로 평균 수직력을 비교했을 때, 1단 배플의 평균 수직력은 각각 -5.24, -5.30 및 -5.05 N이었으며, 2단 배플에서는 각각 -3.92, -3.26 및 -3.81 N이었다. 이에 초기 과도응답의 영향을 배제하고, 본 연구에서는 최종 5~6초 구간의 데이터를 시간 평균 유동장 분석에 사용하였다. 해당 구간에서 1단과 2단 배플의 평균 수직력은 각각 -5.05 N과 -3.81 N이었으며, 평균값을 제거한 하중 변동의 RMS는 각각 2.29 N과 1.43 N으로 나타났다. 1단 배플의 더 큰 하중 변동은 유입 제트가 해당 배플에 직접 충돌하기 때문이며, 2단 배플에서는 1단 배플을 통과하며 분산된 유동이 유입되어 비정상 하중이 감소하였다.

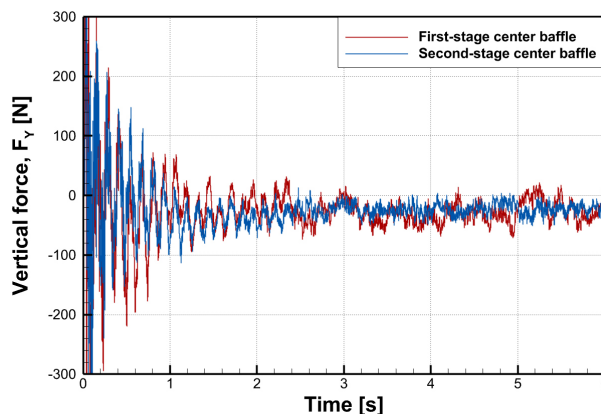


Fig. 7. Time histories of the vertical forces acting on the first- and second-stage center baffles of the B9 configuration

4. 전산해석 결과

4.1 배기 스택 내부 유동 특성 분석

배기 스택 시스템을 구성하는 배플의 개수와 배치에 따른 내부 유동의 특성을 고찰하기 위해 Fig. 8과 같이 배기 스택 수직 높이에서 속도장을 비교 분석하였다. 스택 내부 배플은 두 단으로 구성되어 있으므로, 비교 분석한 속도장 네 곳의 위치는 $Y = -4.5$ m (1단 배플 하부), $Y = -3.5$ m (1단 배플 통과 영역), $Y = -2.5$ m (1단과 2단 배플 사이 영역), $Y = -1.5$ m (2단 배플 통과 영역) 이다. 이때 $Y = -4.5$ m는 1단 배플에 도달하기 이전의 상향 유동 특성을 파악하기 위한 지점이며, $Y = -3.5$ m는 1단 배플을 통과하면서 형성되는 가속 및 재분배 과정을 평가하기 위한 위치이다. 또한 $Y = -2.5$ m는 1단과 2단 사이에서 유동이 재정렬되는 과정에 해당하며, $Y = -1.5$ m는 2단 배플 통과 직후의 상향 가속 영역을 분석하기 위한 지점이다.

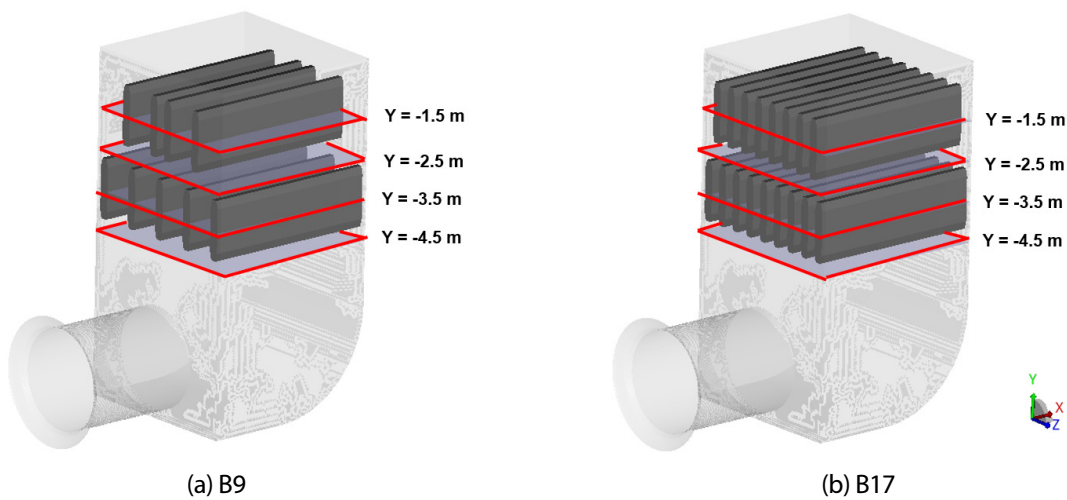


Fig. 8. Vertical segmentation of the internal regions within the exhaust stack

Fig. 9는 B9 구조에서 각 높이 구간의 속도 크기 분포를 나타냈으며 각 그림의 좌측은 스택 전면을, 우측은 후면을 의미한다. 먼저 $Y = -4.5$ m에서는 유동이 특정 국부 영역에 집중되지 않고 비교적 넓은 범위로 분산된 형태를 보인다. 이는 유입부에서 강한 정체나 지배적인 재순환이 발생하지 않고, 1단 배플 방향으로 유동이 원활히 전파될 수 있는 초기 조건이 형성되었음을 보여준다. $Y = -3.5$ m에서는 고속 영역이 1단 배플을 따라 상부로 이동하며, 하부에서 유입된 유동 에너지가 큰 감쇠 없이 상향 전달되는 경향이 확인된다. 이 구간에서는 배플의 영향으로 유동이 한쪽 면으로 크게 치우치지 않고, 상대적으로 균일한 분포를 유지한다. 이후 $Y = -2.5$ m에서는 1단 배플을 통과한 유동은 1단 배플과 2단 배플 사이의 좁은 구간에서 일시적으로 감속, 재분포된다. 이때 상단 배플의 영향으로 유로가 제한되면서 속도 크기가 부분적으로 감소하지만, 뚜렷한 정체 영역이나 강한 재순환은 관찰되지 않으며, 유동은 여전히 비교적 균일하게 유지되며, 다음 배플을 향해 상향 진행할 수 있는 구조를 보인다. 마지막으로 $Y = -1.5$ m에서는 단간에서 재정렬된 유동이 2단 배플을 통과하면서 좁아진 유로로 인해 다시 가속된다. 이 구간에서는 속도 크기가 이전 영역과 비교해 유지되거나 소폭 증가하며, 고속 영역이 출구 방향으로 명확히 정렬된다. 즉, 단 간에서 발생한 제한적 감속이 전체 유동 에너지 손실로 이어지지 않고, 배플 상 하단에서 상향 운동량이 회복되는 형태가 나타난다. 종합적으로 B9 조건에서는 배플 간 상호작용에도 불구하고 유동이 단계적으로 에너지를 회복하며 배출 방향으로 정렬되는 특성이 확인되었다. 이러한 발달 패턴은 스택 내부를 통과하는 동안 유동 에너지가 크게 손실되지 않으며, 상부 배출 시 강한 상향 운동량이 유지됨을 의미한다.

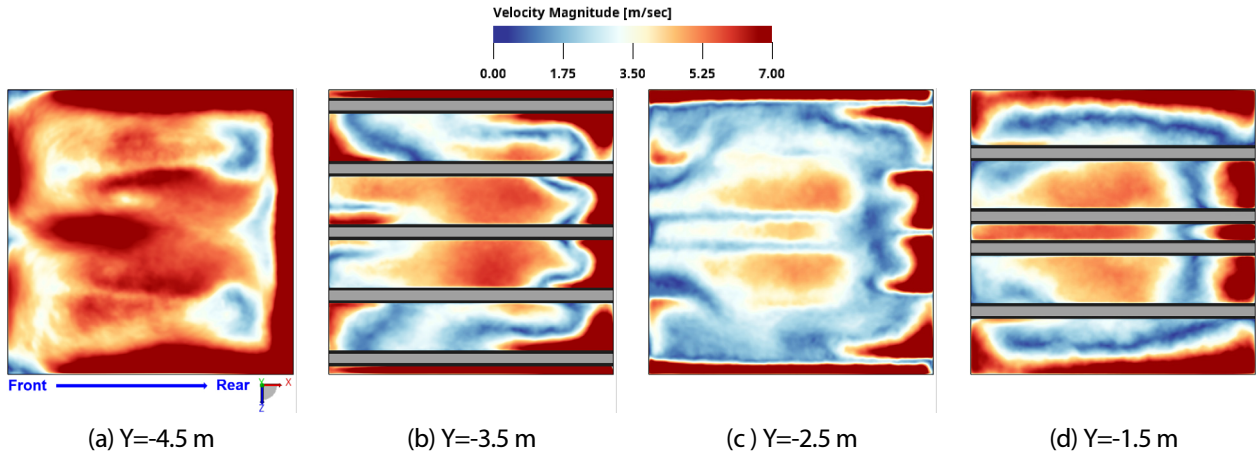


Fig. 9. Comparison of velocity magnitude distribution with respect to internal stack height for B9 (left: front of the stack; right: rear of the stack)

Fig. 10은 앞서 정의한 네 개의 높이 구간에서 B17 형상의 속도 크기 분포를 나타낸 것이다. 하부 영역인 $Y = -4.5$ m에서는 스택 전면에서 국부적으로 고속 영역이 형성되지만, 해당 유동이 상부로 원활히 전달되지 못해 전체 유동 분포가 초기 단계부터 비균일하게 나타난다. 이는 유입 직후부터 전면 후면 간 유동 분배가 균일하지 않음을 보여준다. $Y = -3.5$ m에서는 전면에서 구조물에 의해 유로가 제한되어 유동이 감쇠되며, 후면에서는 벽면을 따라 상향 이동하는 흐름이 상대적으로 선명하게 관찰된다. 이 구간에서는 배플 사이의 협소한 유로에서 국부적으로 속도가 증가하는 지역도 확인된다. 단간 영역인 $Y = -2.5$ m에서는 유동 감쇠가 더욱 뚜렷해지며, 재순환과 정체가 전면에서 강하게 나타난다. 이는 1단의 9개 배플을 통과한 유동이 2단의 8개의 배플에 의해 상향 전파가 제한되면서 단간 공간에서 국소적인 정체 영역이 형성되기 때문으로 판단된다. 이로 인해 상향 운동량이 충분히 전달되지 못하고, 국부적인 순환 유동이 우세하여 에너지 손실이 증가한다. $Y = -1.5$ m에서는 단간 영역에서 재분배된 유동이 2단 배플의 협소한 유로를 통과하며 국부적으로 다시 가속된다. 특히 좌 우측 유로에서 고속 영역이 뚜렷하게 나타나며, 유동이 특정 경로로 집중되는 양상이 강화된다. 이는 이전 구간에서의 감속과 재순환의 영향이 배플 통과 시 국부 가속 형태로 전환되고 있음을 보여준다. 종합적으로 B17 조건에서는 초기부터 형성된 비균일 유동이 상부로 갈수록 더욱 강화되며, 단간 정체와 국부 재순환으로 인해 유동 에너지 손실이 누적된다. 그 결과, 상향 전파보다는 특정 유로로 집중되는 국부 가속 영역이 두드러지게 형성되는 것이 특징이다.

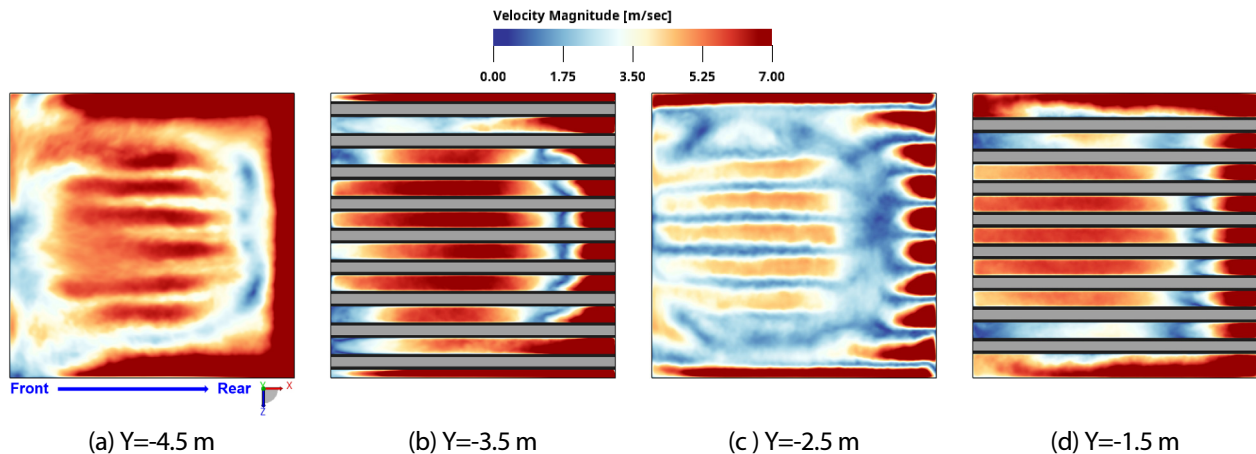


Fig. 10. Comparison of velocity magnitude distribution with respect to internal stack height for B17 (left: front of the stack; right: rear of the stack)

Figs. 9와 10에 제시된 내부 유동을 정량적으로 비교하기 위해, 각 높이에서 배플을 제외한 유체 영역의 면적평균 속도 크기를 산출하였다. $Y=-4.5$ m에서 B9와 B17의 평균 속도 크기는 각각 6.13 m/s와 5.74 m/s로, B9이 B17보다 6.8% 높았다. 반면 $Y=-3.5$ m에서는 B17의 평균값이 6.33 m/s로 B9의 4.98 m/s보다 27.1% 높았다. 이는 B17의 다수 배플 사이에 형성된 제한된 유로를 따라 유동이 집중되면서 일부 영역의 속도가 증가했기 때문이다. $Y=-2.5$ m에서 B9와 B17의 평균 속도 크기는 각각 3.68 m/s와 3.60 m/s로, 두 구조의 차이는 2.2%에 불과하였다. 그러나 속도분포는 서로 달랐으며, B17에서는 저속 영역과 배플 사이의 국부적인 고속 영역이 더욱 뚜렷하게 나타났다. $Y=-1.5$ m에서도 B17의 평균값은 5.01 m/s로 B9의 4.04 m/s보다 24.0% 높았다. 따라서 B17에서 일부 단면의 평균 속도가 높게 나타난 것은 단면 전체의 균일한 유동 증가보다는, 다수의 배플로 형성된 제한 유로를 따른 속도 집중에 기인한 것으로 판단된다.

이러한 평균 속도와 국부 속도분포의 차이를 유발하는 배기 스택 내부의 비정상 유동 구조를 확인하기 위해 Fig. 11에서는 λ_2 criterion을 이용하여 순간 와류 구조를 추출하고, 와도 크기로 색상화하여 B9와 B17의 3차원 와류 분포를 비교하였다. Fig. 11(a)의 B9에서는 유입 유동이 1단 배플과 충돌하면서 생성된 와류구조가 배플 끝단과 단간 영역을 따라 비교적 넓게 분포한다. 배플 사이의 유효 유로가 상대적으로 넓기 때문에, 배플 끝단에서 형성된 전단층과 와류구조가 인접 구조물에 의해 반복적으로 차단되기보다는 단간 공간과 상부 유로로 발달하는 경향을 보인다. 반면 Fig. 11(b)의 B17에서는 증가한 배플 수와 폐쇄율로 인해 와류구조가 각 배플의 끝단, 좁은 유로 및 1단과 2단 사이의 공간에 더욱 조밀하게 분포한다. 좁아진 통로를 통과하는 유동은 국부적으로 가속되며, 배플 끝단에서 큰 속도구배가 형성된다. 또한 상류 배플에서 생성된 전단층과 와류구조가 하류 배플과 반복적으로 간섭하면서, B9보다 작은 공간 규모의 와류구조가 여러 위치에서 형성된다. 따라서 B17의 배플 증가는 단순히 유동을 감속시키는 것이 아니라, 와류 활동을 넓은 단간 영역에서 배플 끝단과 제한된 유로 주변으로 재분배하는 것으로 나타났다. 이러한 순간 와류구조의 차이는 B17에서 관찰된 국부적인 고속 영역과 비균일한 속도분포를 물리적으로 뒷받침한다.

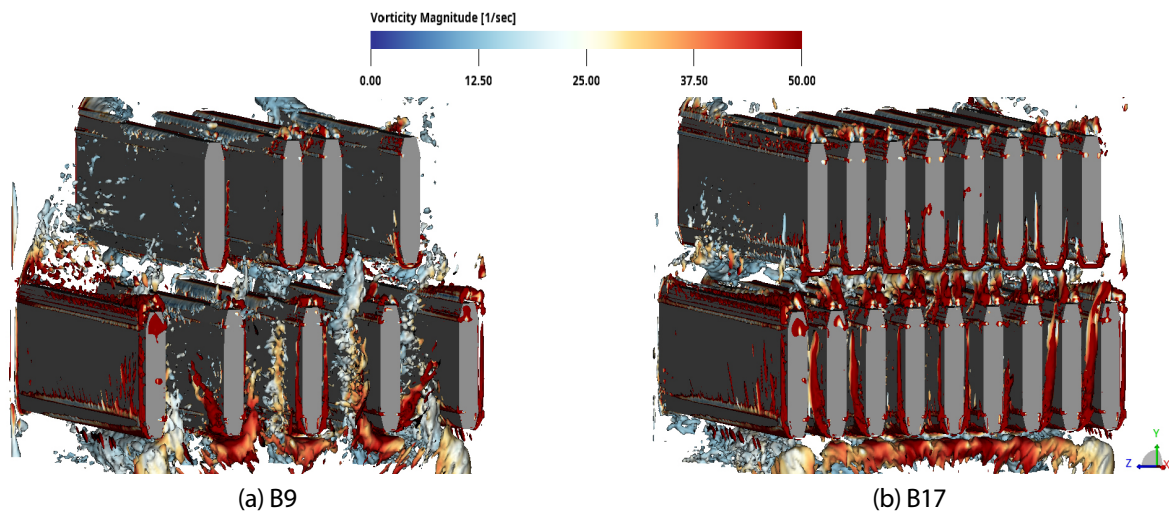


Fig. 11. Comparison of instantaneous vortical structures within the exhaust stack identified using the λ_2 criterion and colored by vorticity magnitude

앞선 절에서는 배기 스택 내부 수직높이에 따른 유동 특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 본 절에서는 스택 내부 유동과 구조물 간 상호작용으로 인해 형성되는 유동 발달 특성을 분석하기 위해, 배기 스택 내부 배플과 스택 후면 벽 구조물에 대해 분석하였다. Fig. 12는 B9와 B17 구조에서 1단 및 2단 배플 하부의 압력 분포를 나타낸 것이며, Fig. 13의 스택 내 후면 벽의 압력 분포와 함께 각 구조의 상향 전파 메커니즘을 비교하였다. 먼저 Fig. 12(a)의 1단 배플 하부 압력계수 분포를 보

면, B9 구조에서는 Fig. 13(a)에 나타난 후면 벽의 고 저압 분포와 연계되어 뚜렷한 압력 구배가 형성된다. 이 압력 구배는 후면 벽을 따라 상향 운동량을 강화하며 1단을 통과하는 유동이 상부로 연속적으로 전달되도록 유도한다. 반면 B17 구조에서는 배플 개수 증가로 인해 상향 전파 경로가 구조적으로 제한되어, Fig. 13(b)와 같이 1단 하부에 넓은 저압 영역이 형성된다. 이는 상향 가속이 아닌 단간 공간에서 유동이 체류하며 재순환하는 결과로 나타난다. 즉, 1단 하부에서는 상향 전달보다 국부 재순환이 우세하다. 이러한 차이는 2단 배플 하부(Fig. 12(b))에서도 명확하게 드러난다. B9 구조에서는 1단을 통과한 유동이 큰 차단 없이 2단 하부로 유입되어 전체적으로 연속적인 압력 분포가 형성된다. 일부 위치에서는 상향 유동에 의해 낮은 압력이 나타나고, 단간 영역에서 형성된 재순환의 영향으로 인해 부분적으로 높은 압력이 유지되지만, 전체적으로 상향 운동량이 지속된다. 반면 B17 구조에서는 1단 하부에서 발생한 재순환 영향이 2단 하부에서도 이어져 유동 전달 경로가 제한된다. 그 결과 저압 영역이 단면 전체로 확장되지 못하고 중앙부에 국부적으로 형성되며, 이는 단간 재순환 이후에도 일부 영역에서만 상향 전파가 유지되고 나머지 영역에서는 운동량 전달이 더욱 약화되었음을 의미한다.

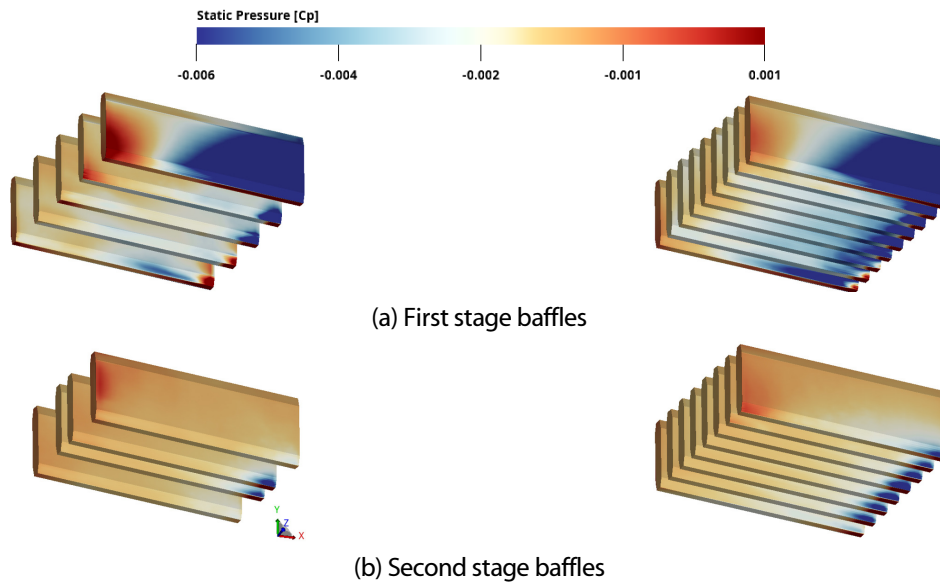


Fig. 12. Comparison of pressure coefficient distribution for baffle bottom view (left: B9 / right: B17)

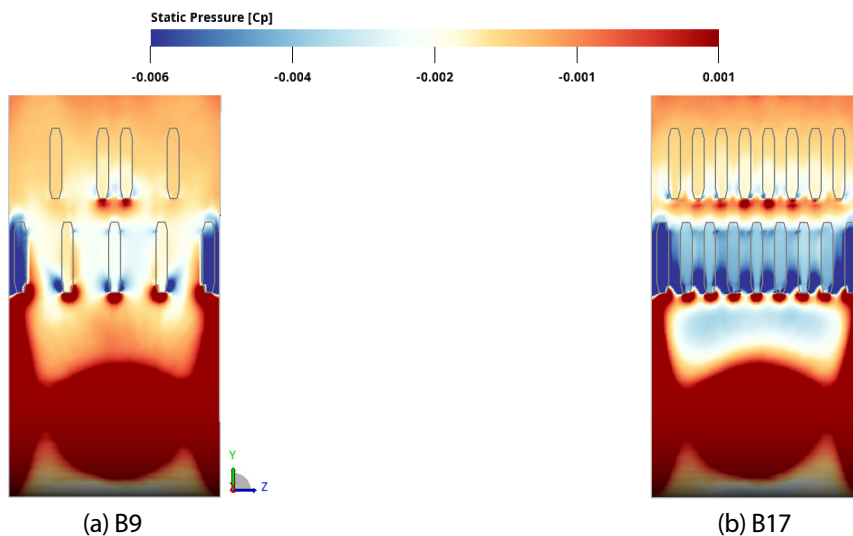


Fig. 13. Comparison of pressure coefficient distribution for rear wall inside of stack

4.2 배기 스택 출구 유동 특성 분석

본 절에서는 외부로 유출되는 유동의 전파특성을 파악하기 이전, 외부 전파의 초기 단계인 출구($Y = 0$ m)에서의 속도 성분을 바탕으로 유동 발달 특성을 분석하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 각각 B9과 B17 구조의 유출면에서 X, Y, Z 방향 속도 성분(u, v, w)과 이로부터 계산된 운동에너지 분포를 나타낸 것이다. 이를 통해 각 속도 성분의 상대적 기여도를 바탕으로 유출면에서 외부로 전달되는 전파 방향을 분석하였다. 먼저 B9 구조의 경우, Fig. 14(b)에 나타난 Y 방향 속도 성분(v)은 유출면 전방을 중심으로 비교적 강한 양(+)의 값을 보이며, 상향 운동량이 우세하게 형성되어 있다. 또한 Fig. 14(a)의 X 방향 속도 성분(u)을 함께 보면, 전 후면에서 분출된 유동이 서로 반대 방향의 운동량을 갖는 형태를 보인다. 이러한 상반된 흐름은 유출면에서 충돌 합류를 유도하여 수직 방향(Y축) 운동량을 강화시키고, 결과적으로 유동이 상향으로 편향되는 유출 조건을 만든다. 이 특성은 Fig. 14(d)의 운동에너지 분포에서도 일관되게 확인된다. 운동에너지는 유출면 전방과 중앙 영역에 집중되어 있으며, 분포 패턴이 Y 방향 속도 성분(v)과 유사하게 나타난다. 이는 유출면에서의 에너지 전달이 주로 수직 방향 운동량에 의해 지배되고 있으며, B9 구조에서는 유동이 강한 상향 전파 방향성을 가진다는 것을 의미한다. 반면 B17 구조에서는 Fig. 15(b)에 나타난 Y 방향 속도 성분(v)의 크기가 B9 대비 스택 전면부에서 뚜렷하게 약하며, 이는 전방에서는 상향 운동량이 충분히 형성되지 않음을 의미한다. 후면에서는 상대적으로 높은 v 값이 나타나지만, 전체적으로는 상향 흐름이 미약하게 형성된다. Fig. 15(a)의 X 방향 속도 성분(u)을 함께 고려하면, 유출 유동이 후면을 중심으로 횡 방향(X축 음(-)의 방향)으로 확산되는 경향이 분명하게 나타난다. 또한 Fig. 15(d)의 운동에너지 분포 역시 Y 방향 속도 성분의 영향을 받지만, 에너지 집중 영역이 후면과 좌 우측으로 치우쳐 있으며, 수직 방향 운동량이 유출면 전체로 확장되지 못한다. 그 결과 B17 구조에서는 상향 운동량이 약해지고, 외부 전파가 전방보다는 횡 방향 및 후면 중심으로 확산되는 출구 조건이 형성된다.

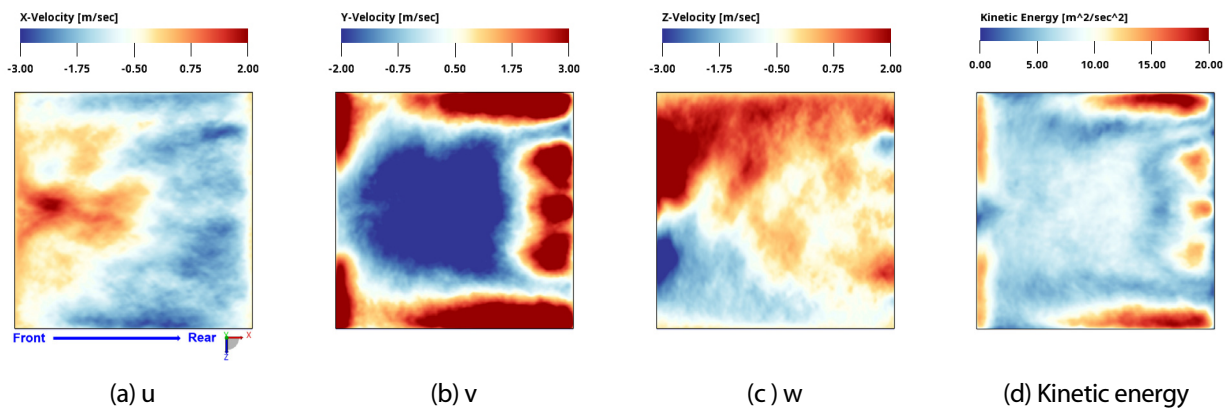


Fig. 14. Velocity components (u, v, w) at the outlet plane for B9 (left: front of the stack / right: rear of the stack)

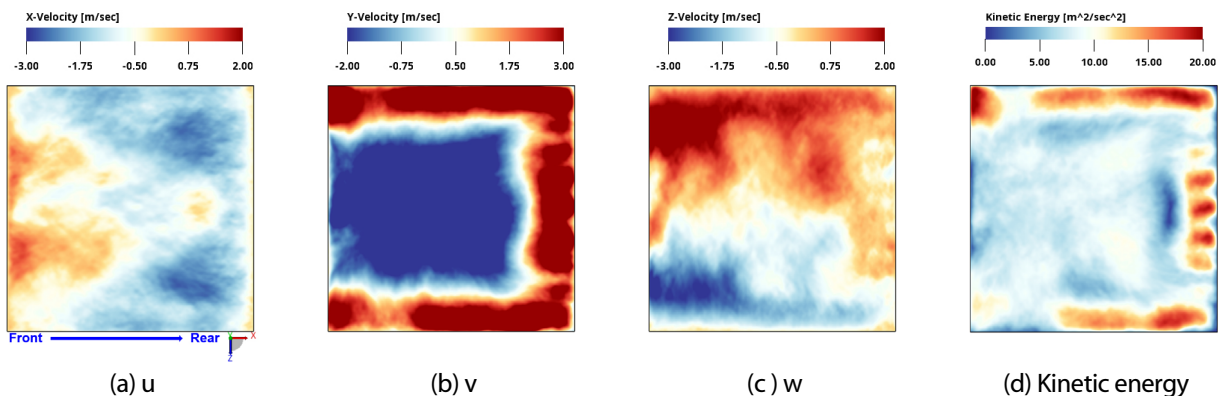


Fig. 15. Velocity components (u, v, w) at the outlet plane for B17 (left: front of the stack / right: rear of the stack)

4.3 배기 스택 외부 유동 특성 분석

앞선 유출면에서의 유동 특성 분석 결과를 바탕으로, 본 절에서는 스택 외부에서의 유동 특성을 분석하기 위해 XY, YZ 단면에서의 속도 성분을 분석하고, 외부 수직 높이에 따른 유동 전파특성을 분석하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 각각 B9과 B17 구조에서 스택 외부 영역의 속도 성분(u, v, w) 분포를 나타낸다. 본 절에서는 외부 영역에서 형성되는 유동 확산 특성을 유출면 전파 방향성과 연계하여 분석하였다. 먼저 B9 구조의 경우, Fig. 16(a)에서 확인하였듯이 X 방향 속도 성분(u)은 전방에서 상승한 유동이 후방으로 이동하고, 후방에서 상승한 유동이 전방으로 이동하는 형태를 나타낸다. 즉, 전 후방에서 서로 반대 방향의 횡 방향 운동량이 형성되며, 이러한 흐름은 출구 상부에서 마주치며 충돌한다. 이러한 상반된 횡 방향 흐름의 상호작용은 Fig. 16(b)의 Y 방향 속도 성분(v)에서 더 뚜렷하게 확인된다. 전 후방에서 이동한 유동이 상부에서 충돌함에 따라 횡 방향 운동량이 상쇄되고, 상대적으로 수직 방향 성분이 강화되면서 상향 전파가 지배적으로 형성된다. 또한 Fig. 16(c)의 Z 방향 속도 성분(w)을 보면, 외부 유동이 수직 방향으로 전파될 때 중심부로 수렴하는 흐름이 나타난다. 이는 상향 전파가 외부 영역에서도 지속되며, 유동이 중심축 방향으로 정렬되는 특성을 반영한다.

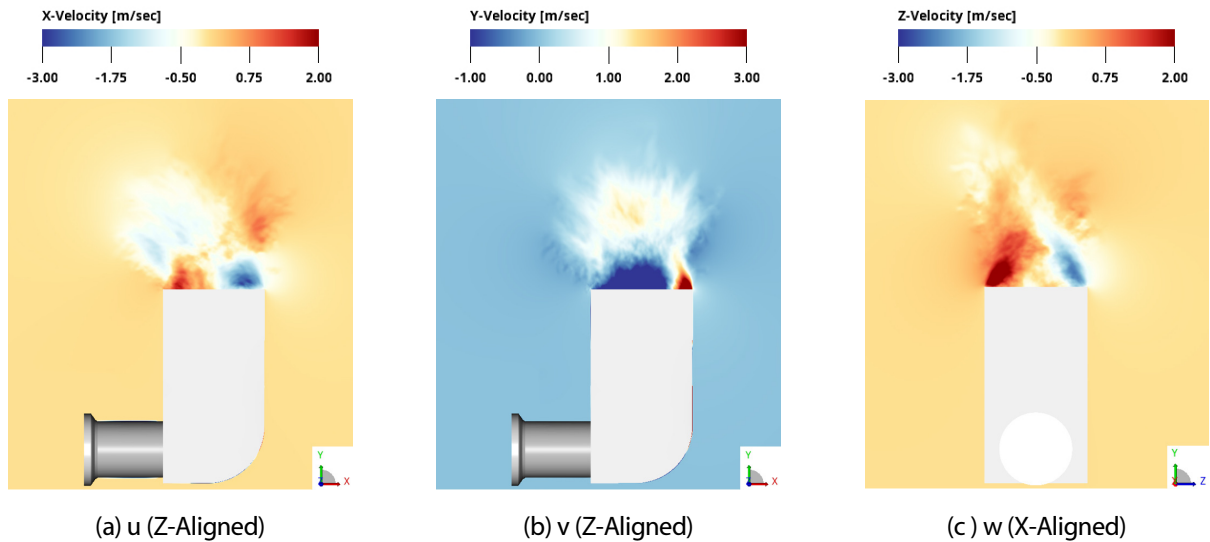


Fig. 16. Sectional distributions of velocity components (u, v, w) for B9; identifying external propagation characteristics

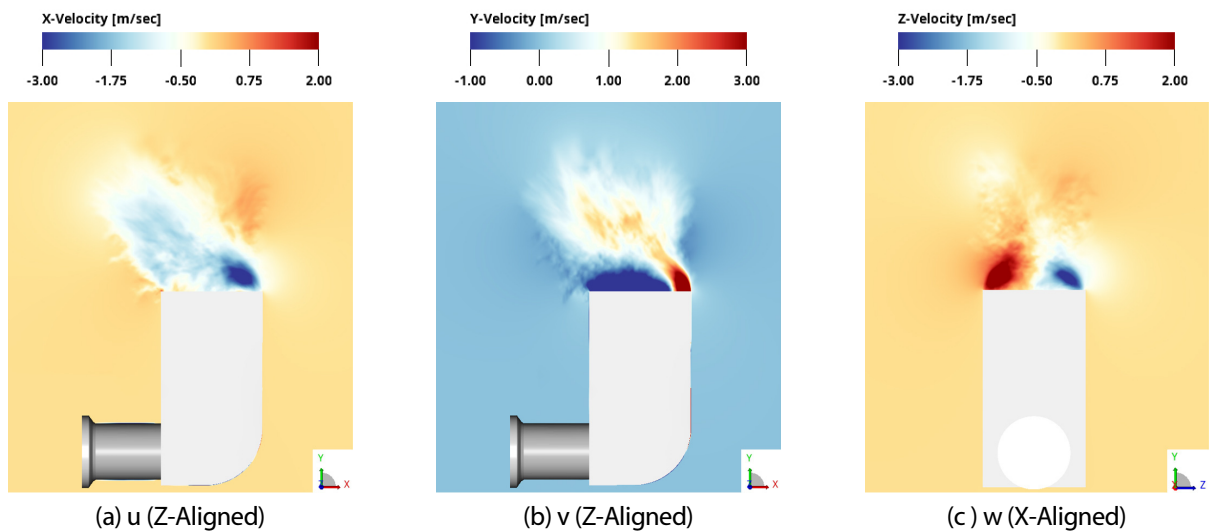


Fig. 17. Sectional distributions of velocity components (u, v, w) for B17; identifying external propagation characteristics

반면 B17 구조에서는 Fig. 17(a)의 X 방향 속도 성분(u)에서 확인되듯, 외부 영역의 유동이 전반적으로 후방에서 전방으로 이동하는 단방향 전파특성을 보인다. 이는 B9 구조에서 나타난 전 후방 유동의 상호 충돌과 달리, 횡 방향 흐름이 특정 방향(X축 음(-)의 방향)으로 정렬되는 형태이며 이러한 경향은 Fig. 17(b)의 Y 방향 속도 성분(v)에서 더욱 분명하게 나타난다. B17 구조에서는 수직 방향 속도 성분이 주로 후방에서만 형성되며, 전방에서는 수직 성분이 약하거나 오히려 외부 유동이 유입되는 패턴을 보인다. 이는 상향 운동량이 출구 전면에서 동시에 형성되는 것이 아니라, 후방에서 생성된 상향 흐름이 전방으로 이동하며 전달되는 구조임을 의미한다. 또한 Fig. 17(c)에 나타난 Z 방향 속도 성분(w) 분포에서는 B9 구조와 유사하게 유동이 상향 전파되며 중심부로 집속되는 경향이 나타난다.

배기 스택 외부의 속도 성분에 대해 단면 유동장 분석을 수행하였을 때, B9, B17 구조에서는 서로 다른 외부 전파특성이 확인되었다. 이에 따라 서로 다른 전파특성에서 비롯되는 구간별 유동 특성 및 유동의 소산 특성을 분석하기 위해 배기 스택 외부 수직 높이에서 속도장을 비교 분석하였다. Fig. 18은 배기 스택 외부 영역을 수직 방향으로 구분한 분석 기준을 나타낸다. 외부 유동은 유출면에서 형성된 속도 성분 분포에 따라 서로 다른 확산 및 전파특성을 보이며, 이러한 특성은 높이에 따라 달라진다. 이에 따라 본 절에서는 외부 영역의 유동 확산을 정량적으로 파악하기 위해 스택 출구 상부를 기준으로 $Y = 1, 3, 5, 7$ m의 네 구간을 정의하고, 각 단면에서 속도 크기와 공간 분포를 분석하였다.

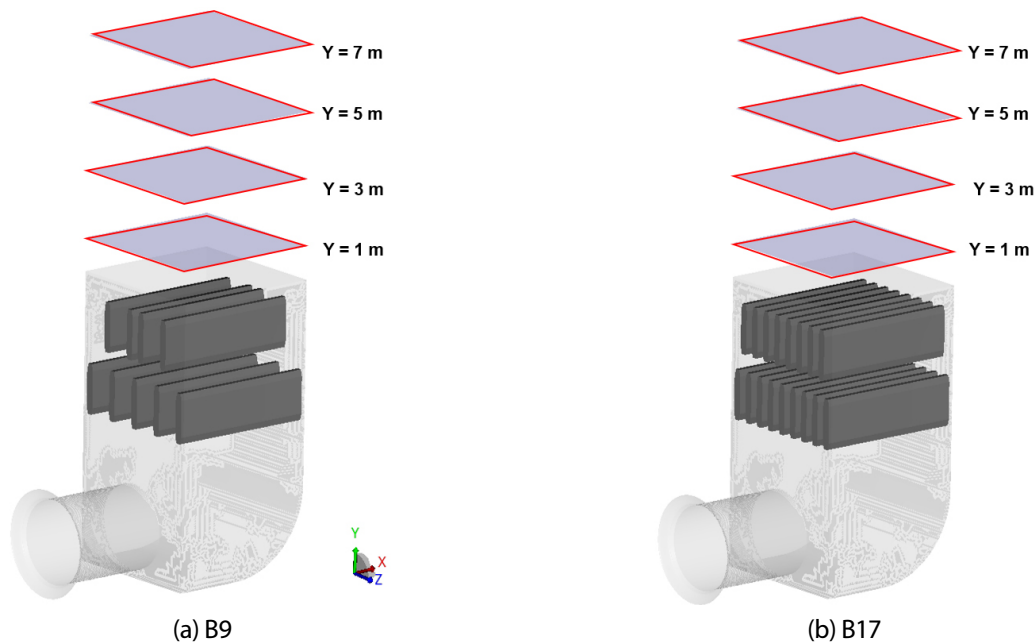


Fig. 18. Vertical segmentation of the external domain surrounding the exhaust stack

Fig. 19와 Fig. 20은 앞서 정의한 외부 영역 네 구간($Y = 1, 3, 5, 7$ m)에서의 속도 크기 분포를 등고선(Contour)으로 나타낸 것이다. 본 절에서는 각 높이에서의 속도 분포를 통해 외부 유동의 확산 및 소산 특성을 분석하였다. 먼저 B9 구조의 $Y = 1$ m 단면을 보면, 전 후방 영역을 중심으로 강한 속도 크기가 유지된다. 이는 유출면에서 형성된 상향 운동량이 외부 근접 영역에서도 지속되고 있음을 의미한다. 높이가 증가한 $Y = 3$ m에서는 고속 영역의 면적과 강도가 감소하지만, 단면 중심을 따라 수직 방향 전파특성은 유지된다. 이후 $Y = 5$ m에서는 속도 크기가 전반적으로 약화되며, $Y = 7$ m에서는 국소 영역을 제외하고 대부분의 영역에서 유동의 소산이 진행된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 B9 구조에서 유동이 출구 이후에도 일정 높이까지 수직 방향으로 안정적으로 전파된다는 점을 보여준다. 반면 B17 구조는 $Y = 1$ m에서부터 고속 영역이 국부적으로 분포하며, B9 대비 수직 전파가 균일하지 않다. $Y = 3$ m에서는 유동이 스택 전면(좌측)으로 편향된 형태

가 뚜렷하게 나타나며, 이는 유출면에서 형성된 유동이 수직 방향으로 균일하게 상승하기보다는 일부 경로를 따라 횡 방향으로 전파되고 있음을 의미한다. 이후 $Y = 5$ m에서는 속도 크기가 급격히 감소하고, $Y = 7$ m에서는 외부 영역 전반에서 소산된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 B17 구조에서는 횡 방향으로 상향 전파되는 흐름이 우세하여 수직 방향의 소산이 B9보다 더 낮은 높이에서 발생하는 경향을 보인다.

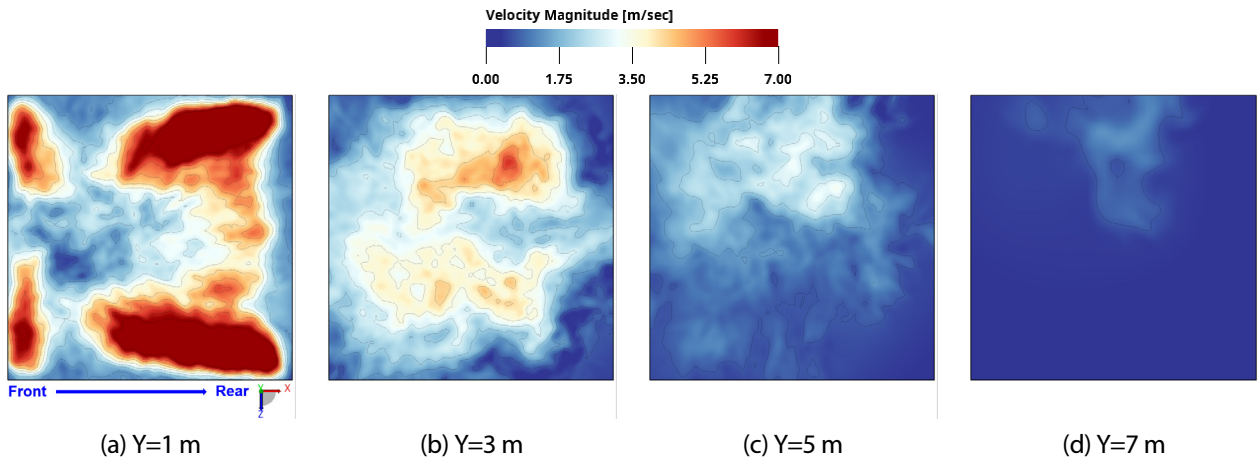


Fig. 19. Comparison of external velocity magnitude distribution with respect to height (B9) (left: front of the stack; right: rear of the stack)

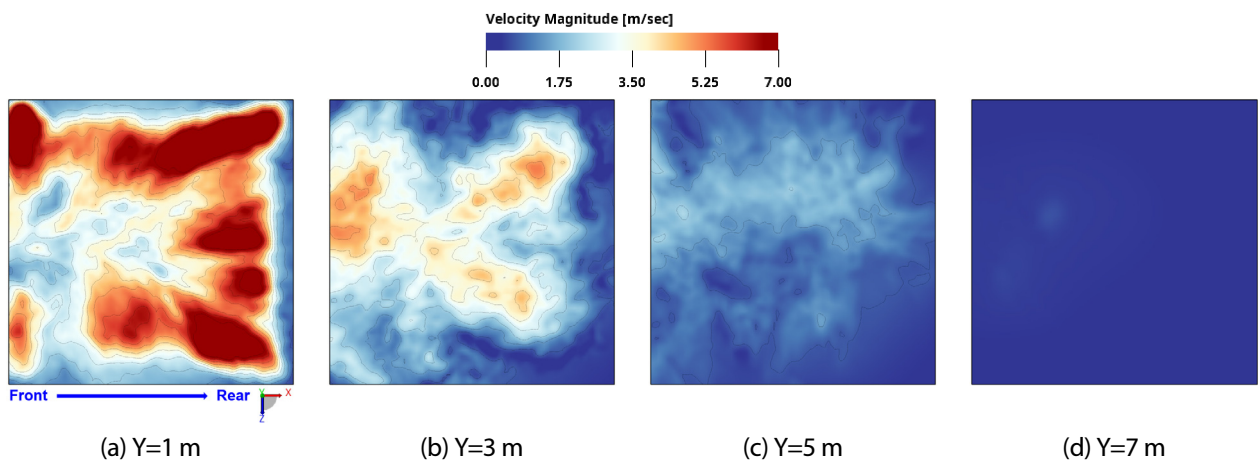


Fig. 20. Comparison of external velocity magnitude distribution with respect to height (B17) (left: front of the stack; right: rear of the stack)

5. 결론

본 연구에서는 산업 플랜트 및 발전 설비의 배기 스택 내부에서 발생하는 비정상 제트 난류 유동의 발달 메커니즘을 규명하기 위해, 배플 개수 변화에 따른 유동 전파특성을 고정밀 LBM 기반 전산해석을 통해 체계적으로 분석하였다. 스택 내부 구조물에 의해 형성되는 유동 재편 과정과, 유출면에서 외부 영역으로 확산되는 유동의 방향성을 단계적으로 평가함으로써, 배플 개수가 유동 구조에 미치는 핵심적인 영향을 확인하였다. 우선 내부 유동 분석 결과, B9 구조에서는 배플 개수가 적어 유입 유동이 상대적으로 큰 저항 없이 상향으로 전달되며, 1, 2단 배플을 통과하는 과정에서도 운동량 감쇠가 제한

적으로 발생하였다. 1단과 2단 사이 단간 영역에서도 강한 정체나 지배적인 재순환이 발생하지 않아, 내부 유동이 비교적 균일한 형태로 유지되었다. 이러한 내부 흐름의 연속성은 상부 배플을 통과한 이후에도 유지되어, 유동이 스택 출구 방향으로 명확히 정렬되는 경향을 보였다. 반면 B17 구조에서는 배플 수 증가로 인해 내부 유동 경로가 제한되고, 단간 영역에서 국부 정체와 재순환이 뚜렷하게 형성되었다. 특히 하부 영역에서부터 전 후방의 유동 분배가 비균일하게 나타나며, 1단 배플 하부에서 넓은 저압 영역이 형성되어 상향 전파가 방해되는 양상이 확인되었다. 2단 하부에서도 이러한 재순환 영향이 이어지며, 상향 운동량이 특정 경로로만 집중되는 비대칭 구조가 나타났다. 이는 내부에서 이미 유동 에너지 손실이 누적되는 주요 원인으로 작용하였다. 유출면 분석에서는 두 구조의 차이가 더욱 명확하게 드러났다. B9 구조에서는 전 후방 유출 유동이 반대 방향의 횡 운동량을 가지고 유출면 상부에서 합류하며, 이 과정에서 횡 방향 운동량이 상쇄되고 수직 방향 운동량이 강화되는 특성이 관찰되었다. 결과적으로 유출면 전체에서 상향 속도 성분이 우세하게 형성되었고, 운동에너지 분포 역시 수직 방향 성분에 의해 지배되는 형태를 보였다. 반면 B17 구조에서는 상향 운동량이 유출면 전체에서 동시에 형성되지 못하고, 후방에서만 뚜렷하게 나타났다. 전방에서는 상향 운동량이 약해지고 일부 영역에서는 외부 유동이 역으로 유입되는 경향이 확인되었다. 외부 영역에서의 높이 방향 분석을 통해 이러한 차이는 더욱 확실해졌다. B9 구조에서는 $Y = 5\text{ m}$ 까지 고속 영역이 유지되며, $Y = 7\text{ m}$ 에 이르러서야 대부분의 영역이 소산되는 모습이 나타났다. 이는 B9 구조에서 유동이 상대적으로 더 높은 높이까지 전달됨을 의미한다. 반면 B17 구조에서는 $Y = 3\text{ m}$ 에서 이미 속도가 크게 감소하고, $Y = 5\text{ m}$ 에서는 대부분의 영역에서 유동이 약화되며, $Y = 7\text{ m}$ 에서는 거의 완전히 소산되었다. 즉, B17 구조에서는 수직 방향으로 전달되는 운동량이 내부 배플과의 상호작용 과정에서 크게 손실되고, 외부 영역에서는 낮은 높이에서 빠르게 소산되는 특징을 보였다. 종합하면, 본 연구는 배플 개수 변화가 배기 스택 내부 유동 구조, 유출면 전파특성, 외부 확산 거동에 미치는 영향을 단계적으로 규명하였으며, 구조물 개수가 유동 전달 경로와 운동량 분배에 큰 영향을 주는 핵심 인자임을 확인하였다. 특히 배플 개수가 많을수록 내부에서의 유동 재순환 및 정체가 증가하고, 이로 인해 상향 전파가 제한되며 외부 확산이 비대칭적으로 형성되는 경향이 명확하게 드러났다.

본 연구는 배플 개수만을 독립 변수로 설정하여 유동 발달 메커니즘을 규명하는 데 초점을 두었으며, 소음 저감을 목적으로 한 다공성(Porous) 배플 적용은 분석 범위에서 제외하였다. 향후 연구에서는 배플 위치, 간격, 배열 방식 등 구조적 요소의 변화를 추가적으로 고려하여 유동 발달 특성을 확장 분석할 예정이며, Porous 물성 적용을 통해 유동 음향 특성을 동시에 개선할 수 있는 구조 최적화 방향을 제시하고자 한다. 이를 통해 배기 스택 내부 구조물 설계에 필요한 기초 데이터를 제공하고, 유동 성능과 소음 성능을 함께 고려한 실효성 있는 설계 기준을 확립하는 데 기여할 것이다.

후 기

본 연구는 한양이엔지(주)의 산학협력 연구 과제 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 이 연구는 2025년도 경상국립대학교 글로벌대학30사업에 의하여 수행되었습니다.

References

- [1] 2013, Peixinho, J. and Besnard, H., "Transition to turbulence in slowly divergent pipe flow," *Phys. Fluids*, Vol.25, No.11.
- [2] 2013, Boghosian, M.E. and Cassel, K.W., "A pressure-gradient mechanism for vortex shedding in constricted channels," *Phys. Fluids*, Vol.25, No.12.

- [3] 2019, Lesshafft, L., Semeraro, O., Jaunet, V., Cavalieri, A.V. and Jordan, P., "Resolvent-based modeling of coherent wave packets in a turbulent jet," *Phys. Rev. Fluids*, Vol.4, No.6, 063901.
- [4] 2002, Celik, E. and Rockwell, D., "Shear layer oscillation along a perforated surface: a self-excited large-scale instability," *Phys. Fluids*, Vol.14, No.12, pp.4444-4447.
- [5] 2004, Celik, E. and Rockwell, D., "Coupled oscillations of flow along a perforated plate," *Phys. Fluids*, Vol.16, No.5, pp.1714-1724.
- [6] 2012, Sriromreun, P., Thianpong, C. and Promvong, P., "Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol.39, No.7, pp.945-952.
- [7] 2003, Yilmaz, M., Comakli, O., Yapici, S. and Sara, O.N., "Heat transfer and friction characteristics in decaying swirl flow generated by different radial guide vane swirl generators," *Energy Convers. Manag.*, Vol.44, No.2, pp.283-300.
- [8] 2011, Zohir, A.E., Aziz, A.A. and Habib, M.A., "Heat transfer characteristics in a sudden expansion pipe equipped with swirl generators," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.32, No.1, pp.352-361.
- [9] 2018, Rosti, M.E., Brandt, L. and Pinelli, A., "Turbulent channel flow over an anisotropic porous wall – drag increase and reduction," *J. Fluid Mech.*, Vol.842, pp.381-394.
- [10] 2007, Quibén, J.M. and Thome, J.R., "Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.28, No.5, pp.1060-1072.
- [11] 2004, Lucic, A., Emans, M., Mayinger, F. and Zenger, C., "Interferometric and numerical study of the temperature field in the boundary layer and heat transfer in subcooled flow boiling," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.25, No.2, pp.180-195.
- [12] 2004, Bourich, M., Hasnaoui, M. and Amahmid, A., "Double-diffusive natural convection in a porous enclosure partially heated from below and differentially salted," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.25, No.6, pp.1034-1046.
- [13] 2020, Pickering, E., Rigas, G., Nogueira, P.A., Cavalieri, A.V., Schmidt, O.T. and Colonius, T., "Lift-up, Kelvin-Helmholtz and Orr mechanisms in turbulent jets," *J. Fluid Mech.*, Vol.896, p.A2.
- [14] 2013, Cavalieri, A.V., Rodríguez, D., Jordan, P., Colonius, T. and Gervais, Y., "Wavepackets in the velocity field of turbulent jets," *J. Fluid Mech.*, Vol.730, pp.559-592.
- [15] 2006, Baydar, E.R.T.A.N. and Ozmen, Y.Ü.C.E.L., "An experimental investigation on flow structures of confined and unconfined impinging air jets," *Heat Mass Transf.*, Vol.42, No.4, pp.338-346.
- [16] 2007, Abdel-Fattah, A., "Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol.31, No.8, pp.1061-1072.
- [17] 2007, Chang-geng, L. and Jie-min, M., "Experimental and numerical simulation study of heat transfer due to confined impinging circular jet," *Chem. Eng. Technol.: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, Vol.30, No.10, pp.1355-1361.
- [18] 2017, Li, Z. and Gao, Y., "Numerical study of turbulent flow and heat transfer in cross-corrugated triangular ducts with delta-shaped baffles," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.108, pp.658-670.
- [19] 2024, Uddin, N., Weigand, B., Younis, B.A., Lyulinetsky, R. and Ali, K., "Flow and heat transfer dynamics of an altered impinging plane jet using an insert," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.150, p.107151.
- [20] 2022, Teruna, C., Rego, L., Casalino, D., Ragni, D. and Avallone, F., "A Numerical Study on Aircraft Noise Mitigation Using Porous Stator Concepts," *Aerospace*, Vol.9, No.2, 70.
- [21] 2023, Hwang, Y.H., Kim, S.J., Cho, K.C., Myong, R.S. and Lee, H., "Computational Analysis of Tip Clearance Effect on Aerodynamic and Acoustic Performance of the Ducted Fan," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.28, No.4, pp.106-116.
- [22] 2025, Song, H.S., Hwang, Y.H., Kim, S.J., Myong, R.S. and Lee, H., "Numerical Investigation of Propeller Wake Effect on the Wing Aerodynamics with Distributed Electric Propulsion," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.29, No.4, pp.24-38.
- [23] 2024, Kim, S.J., Hwang, Y.H., Myong, R.S. and Lee, H., "Interactional aerodynamics and acoustics of a rotor with

an airframe in hover,” *Phys. Fluids*, Vol.36, No.1, p.027121.

- [24] 2021, Degriigny, J., Cai, S.-G., Boussuge, J.-F. and Sagaut, P., “Improved Wall Model Treatment for Aerodynamic Flows in LBM,” *Comput. Fluids*, Vol.227, 105041.
- [25] 2023, Plelkhanov, M., Ivashchenko, V., Karpenko, A. and Mullyadzhano, R., “Numerical Simulation of a Turbulent Pipe Flow: FluidX3D LBM Validation,” *E3S Web of Conferences*, Vol.459, p.03010.
- [26] 1992, He, X. and Luo, L.S., “Theory of the Lattice Boltzmann Method: From the Boltzmann Equation to the Lattice Boltzmann Equation,” *Phys. Rev. E*, Vol.56, No.6, p.6811.
- [27] 2016, Prause, J., Emmi, Y., Noll, B. and Aigner, M., “LES/RANS Modeling of Turbulent Mixing in a Jet in Crossflow at Low Velocity Ratios,” *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, CA*, AIAA Paper 2016-0609.
- [28] 1984, Andreopoulos, J. and Rodi, W., “Experimental Investigation of Jets in a Crossflow,” *J. Fluid Mech.*, Vol.138, pp.93-127.
- [29] 2015, Mann, A., Kim, M.S., Neuhierl, B., Perot, F., Powell, R., Rose, T. and Krueger, J., “Exhaust and Muffler Aeroacoustics Predictions Using Lattice Boltzmann Method,” *SAE Int. J. Passeng. Syst. –Mechanical Systems*, Vol.8, No.3, pp.1009-1017.