

다공성 주름 패킹 구조를 포함하는 선박 EGCS(Exhaust Gas Cleaning System) 내부 유동특성에 관한 수치해석적 연구

양승호*, 서민수**, 송선남**, 권오균**, 서창대**

*울산과학기술대학교 기계공학부

**글로벌에코(주)

e-mail:shyang@uc.ac.kr

Numerical Study on Internal Flow Characteristics of Ship EGCS(Exhaust Gas Cleaning System) Including Porous Corrugated Packing Structure

Seung-Ho Yang*, Min-Soo Seo**, Sun-Nam Song**, Oh-Kyun Kwon**, Chang-Dae Seo**

*Faculty of Mechanical Engineering, Ulsan College

**Global Eco Inc.

요약

본 연구에서는 선박 EGCS(Exhaust Gas Cleaning System) 성능평가 및 고도화를 위한 기초기반연구로 실험크기(Full Scale) EGCS 모델에 대한 내부 유동해석이 수행되었다. 다공성 주름 패킹 구조를 포함하는 EGCS 내부를 다시의 이론(Darcy's Law)과 주어진 입력 파라미터를 이용하여 모델링하였고 CFD해석을 수행하였다. EGCS 내부 유동장 해석결과를 유선과 속도벡터를 이용한 가시화 방법을 통해 EGCS 내부의 복잡한 유동현상을 면밀히 관찰하고 분석하였다. 해석 결과, EGCS 내부 각 구획별 일부 국부 와류 생성이 관찰되었으나 이로 인한 유동의 정체는 나타나지 않았다. 또한, EGCS 하단부 가이드 형상이 EGCS 내부 유동장 형성에 크게 영향을 미치며 유입 배기가스의 원활한 흐름을 유도하는데에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 선박 EGCS의 성능평가를 위한 기초데이터로 활용될 수 있으며 설계개선과 EGCS 성능고도화를 위한 기초자료로 활용 가치가 높을 것으로 사료된다.

1. 서론

근래 세계물동량의 증가와 더불어 선박 발주가 지속적으로 이루어지고 있다. 선박에 의한 운송은 전 세계 물동량 운송의 대부분을 차지할 정도로 그 규모가 크고 방대하며 세계 경제에 기여하는 부분 또한 크다. 그러나, 안타깝게도 이러한 해운 산업은 환경오염의 주요 원인 중의 하나로 지목되고 있다. 그 이유는 최근 IMO의 규제가 있기 전까지 오염된 배출가스를 과거의 방식대로 여과 없이 그대로 배출하여 왔고 이에 대한 특별한 제재 없이 오늘에 이르렀다. 이러한 문제점을 인식하고 배출가스로 인한 환경오염을 줄이기 위한 다양한 방법들이 현재 고려되고 있다.

최근 신조발주 및 건조되고 있는 선박의 경우에는 고성능, 친환경 선박이 시장에서 주류를 이루고 있으며 특히 탄소중립을 위한 방안으로 LNG, 메탄올, 암모니아 등의 친환경 연료를 사용하거나 기존 운항하고 있는 선박의 경우에는 황산화물을 포함하는 오염물질을 제거할 수 있는 탈황장치를 부가적으로 부착하도록 요구하고 있다.

본 연구에서는 중유 등 기존의 선박연료를 사용할 경우 배출가스 오염물질 제거를 위해 장착하는 스크러버(Scrubber)

혹은 EGCS(Exhaust Gas Cleaning System)라 불리는 배기가스 정화장치를 대상으로 내부 유동현상과 유동특성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 CFD를 활용하여 다공성 주름 패킹 구조를 포함하는 선박 EGCS를 위한 해석법을 정립하고 대상 EGCS의 설계조건에 따른 CFD 해석수행 및 해석결과의 가시화 방법을 통해 시뮬레이션 기반의 EGCS 내부 유동특성을 분석하고자 하였다.

2. 선박 EGCS(Exhaust Gas Cleaning System)

2.1 선박 EGCS 외형

선박 EGCS는 선박의 엔진에서 배출되는 가스를 통과시켜 정화된 상태의 가스를 배출시키는 장치로 주로 연돌(Funnel) 측에 설치하여 운영한다. 선박 EGCS의 외형은 사각형상, 원통형상이 있으나 본 연구에서는 상대적으로 건조비용과 설치 환경에 대한 높은 유연성이 있는 사각형상의 EGCS를 대상으로 하여 수치해석적 연구를 수행하였다.

2.2 EGCS 내부 다공성 주름 패킹 구조

EGCS 내부에 구조화되어 설치되는 다공성 주름 패킹은 엔

진연소 후 배출가스 속에 포함된 오염물질을 제거하기 위한 EGCS 핵심 구성품의 하나로서 대단히 중요한 역할을 한다. 패키지의 재질과 구조형상은 패키지의 성능을 결정짓는 주요한 파라미터로 재질과 패키징 구조형상에 따른 유속과 압력강하량은 EGCS 전체 성능에 있어서도 상당히 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

3. 연구방법

3.1 유동해석을 위한 지배방정식

EGCS 내부 유동해석을 위한 지배방정식은 식(1), (2)와 같다(ANSYS, 2023). 각각은 연속방정식, 운동량보존 방정식을 나타낸다. 식(1)과 (2)는 내부 유체의 유동을 해석하기 위한 기초식으로서 EGCS 내부의 유동을 모사할 수 있게 해 준다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도를 나타낸다.

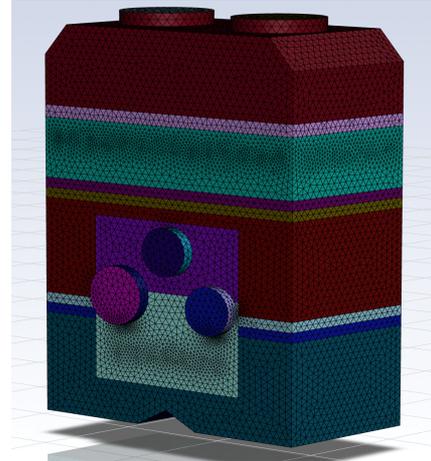
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서, p 는 압력, $\vec{\tau}$ 는 응력텐서, $\rho \vec{g}$ 는 중력, \vec{F} 는 외력을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 내부유동 해석도구로 유체 해석분야에서 뛰어난 성능을 보여주고 있는 ANSYS Fluent를 사용하였다.

3.2 CFD 해석모델링

대상 EGCS는 배기가스가 전면부 3곳에서 유입되고 상부 2곳에서 배기가스가 유출되는 사각형상의 외형을 가지며 내부는 입구쪽에 곡면형상의 유로가 구성되어 있고 내부 구획은 다공성 패키징 구조 부분이 하부와 상부 2곳에 있으며 출구쪽 바로 아래부분에 미세 분진 등을 제거하는 데미스터(Demister)가 있다. 유입된 배기가스가 바닥면으로 향하게 될 때 유입부의 끝단부분 아래 바닥면에서 좌우로 잘 퍼져나갈 수 있도록 가이드 형상(Guide Shape)을 구성한 것이 특징이다. 또한, 바닥면을 지나 유동이 상부로 향하게 될 때 입구유로를 둘러싼 부분에 다공성 패키징을 설치하여 다공성 패키징 구조 부분을 통과하도록 구조화 되어 있으며 CFD 유동해석을 위한 형상 모델링과 격자 모델링에 이러한 특징을 모두 반영하여 EGCS 해석을 수행하였다. 그림 1은 EGCS 외형 및 EGCS 격자 모델링을 나타낸다.



[그림 1] EGCS 외형 및 EGCS 격자 모델링

EGCS 내부유동 해석을 위해 약 37만개의 다면체 격자(Polyhedral Mesh)를 해석모델 내부에 구성하였다. 패키징 구조 부분과 데미스터 주변에 조밀한 격자를 구성하여 다공성 주름 패키징 부분에서의 정도높은 해석이 가능하게 하였다.

배출가스가 유입되는 3곳은 각각 속도입구(Velocity Inlet) 조건을 부여하였고 배출가스가 유출되는 2곳은 압력출구(Pressure Outlet) 조건을 부여하였다. 그 외 내부 구획을 나누는 격벽과 형상을 이루는 외벽은 벽면경계(Wall Boundary) 조건을 부여하였다.

다공성 주름 패키징 구조를 통과하는 배기가스는 유속변화에 따라 압력강하량이 발생하게 되며 이를 해석모델링에 반영하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다시의 법칙(Darcy's Law)을 이용하여 다공성 매질에 대한 이론 기반의 수식과 계수를 다공성 주름 패키징 구조 부분에 적용하였다. 식(3)은 다시의 법칙을 나타내며 유속에 따른 압력강하량을 2차 곡선의 형태로 모사하여 입력으로 사용하였다.

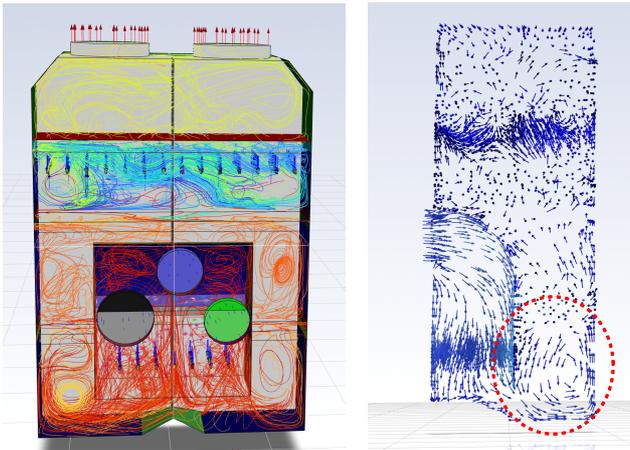
$$\Delta P = \frac{C \cdot t \cdot \rho}{2} \cdot V^2 + \frac{1}{\alpha} \cdot \mu \cdot t \cdot V \quad (3)$$

여기서, ΔP 는 압력강하량(Pressure Drop), C 는 관성저항(Inertia Resistance), t 는 다공성 매질 두께(Thickness), ρ 는 밀도(Density), $\frac{1}{\alpha}$ 는 점성저항(Viscosity Resistance), μ 는 점도(Viscosity), V 는 유체속도(Fluid Velocity)를 각각 나타낸다.

EGCS로 유입되는 배기가스가 상대적으로 고속인 점을 고려하여 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 일정 유량의 유입과 유출이 발생함을 고려하여 정상상태(Steady State) 해석을 수행하였다.

4. 결과

다공성 주름 패킹 구조를 포함하는 EGCS 내부 유동장 분석을 위한 CFD 해석이 수행되었다. 내부 유동장 가시화 방법으로서 유선(Streamline)과 속도벡터(Velocity Vector)를 이용하여 EGCS 내부 배기가스의 흐름을 면밀히 관찰하였고 유동 특성을 분석하였다.



[그림 2] EGCS 내부 유선(정면, 좌)와 속도벡터(전면, 우)

그림 2은 EGCS 내부 유선(좌)과 속도벡터(우)를 나타낸다. 좌측 그림은 EGCS를 전면에서 바라보았을 때 EGCS 내부 배기가스의 흐름을 유선의 형태로 나타낸 것이다. 유선의 흐름을 살펴보면, 3곳의 유입구를 통해 EGCS 내부로 들어온 배기가스가 구획을 나누고 있는 격벽을 따라 바닥면쪽으로 이동하게 되고 바닥면에 형성되어 있는 삼각기둥 모양의 가이드 형상에 의해 유동이 좌우로 원활하게 이동하는 것을 살펴볼 수 있다. 또한, EGCS 하단부 좌우측에 큰 와류(Vortex)가 생성되는 것이 관찰되고 하단부 와류의 위치와 크기는 첫 번째 다공성 주름 패킹 아래에 국한되어 있는 것을 살펴볼 수 있다. 우측 그림은 EGCS를 측면에서 바라보았을 때 내부 유동을 속도벡터의 형태로 나타낸 것이다. 입구쪽으로 유입된 배기가스가 구획을 나누고 있는 격벽을 따라 하부로 내려오는 것을 살펴볼 수 있으며 하단부의 가이드 형상에 의해 유동이 후면부로 원활히 이동하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

선박 EGCS 성능평가 및 고도화를 위한 기초기반연구로 실물 크기 EGCS 모델에 대한 유동해석이 수행되었다. 다공성 주름 패킹 구조를 포함하는 EGCS 내부를 다시의 이론과 주어진 입력 파라미터를 이용하여 모델링하고 CFD 해석을 수행하였다. EGCS 내부 유동장 해석결과를 유선과 속도벡터를

이용한 가시화 방법을 통해 EGCS 내부의 복잡한 유동현상을 면밀히 관찰하고 분석하였다. 해석결과를 토대로 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 다공성 주름 패킹 구조를 포함하는 선박 EGCS 해석모델링 기법과 해석법을 정립하였다. 정립된 해석법을 이용하면 다양한 파라미터 변화에 따른 EGCS 내부 유동장 변화결과를 구해낼 수 있다.
 2. EGCS 내부 각 구획별 일부 국부 와류 생성이 관찰되었으나 이로 인한 유동의 정체는 나타나지 않는 것으로 나타났다. 즉, EGCS 내부로 유입된 배기가스가 다공성 주름 패킹 구조 부분과 데미스터를 순차적으로 통과하여 상부의 배기가스 출구로 유동의 정체없이 배출된다.
 3. EGCS 하단부 가이드 형상이 EGCS 내부 유동장 형성에 크게 영향을 미치며 유입 배기가스의 원활한 흐름을 유도하는 데에 큰 효과가 있다.
- 본 연구결과는 선박 EGCS의 성능평가를 위한 기초데이터로 활용될 수 있으며 EGCS 설계개선과 EGCS 성능고도화를 위한 기초자료로 활용가치가 높을 것으로 사료된다.

References

- [1] ANSYS, ANSYS Fluent User's Guide, ANSYS Inc. 2023
- [2] H. Cong, C.Wang, X.Gao, X.Li, H.Li and A. N. Pavlenko, "Pressure Drop Simulation of Structured Corrugation Foam Packing by Computational Fluid Dynamics", *Journal of Engineering Thermophysics*, 25, pp.301-313, 2016.
- [3] M.Zivdar, R. Rahimi, M. Nasr, M. Haghshenasfard, "CFD Simulation of Pressure Drop in KATAPAK-S Structured Packing", *Iranian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 64-71, 2005.
- [4] Lassauce, A., Alix, P., Raynal, L., Royon-Lebeaud, A. and Haroun, Y., "Pressure Drop, Capacity and Mass Transfer Area Requirements for Post-Combustion Carbon Capture by Solvents", *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*, 69.6, pp. 1021-1034, 2014.
- [5] Obeid F., Janajreh I. and Chaouki Ghenai, "Numerical Modeling of Demister in Multi Stage Flash(MSF) Desalination", *10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 2014.