

# 유동 해석을 이용한 산업용 초대형 컨테이너 선박의 가스파이프 구조개선

최성민<sup>1</sup>, 김종원<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과

<sup>2</sup>한국기술교육대학교 기전융합공학과

## Improvement of Gas Pipe Structure for ULCS using Flow Analysis

Sungmin Choi<sup>1</sup>, Jongwon Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, KOREATECH

<sup>2</sup>Department of Electromechanical Convergence Engineering, KOREATECH

**요약** 최근 컨테이너 선종은 물류비 감소를 위한 대형화 및 그에 따른 선박운용 효율의 향상을 위하여 수명 증가 및 경량화를 위한 다양한 기술의 적용이 필수적으로 요구되고 있다. 선박의 크기 증가에 따른 엔진의 효율 저하와 이와 관계된 부수적인 설비들은 대형화에 따른 효과성 검증 없이 그 크기와 형태를 증가시켜 대형 선박에 적용되고 있다. 본 논문에서는 기존의 대형 컨테이너 선박에 적용되는 배기가스 파이프를 초대형 선박에 적용하기 위하여 유동 해석을 실시하고 그 결과를 바탕으로 초대형 선박에 적용 가능한 구체적인 배기가스 파이프의 구조 형태를 연구하였다. 이를 위하여 기존의 가스 파이프에 초대형 선박의 엔진운용 조건을 적용하여 모델링하고, 모델링에 필요한 주요 요소를 결정하고 이를 CFD에 적용하여 시뮬레이션을 통해 연구하였다. 그 결과를 바탕으로 유량의 흐름, 불필요한 구간 등을 효과적으로 개선하여 설계된 가스파이프는 초대형 컨테이너 선박의 운용효율 증가를 기여할 수 있다.

**Abstract** Recently, container vessels are required to be applied various technologies to improve ship life-cycle and operating efficiency for the cost decreasing of logistics. The degradation of engine efficiency due to the increasing capacity of the ship and the related equipment of facilities are applied to large-scale ships without considering the condition of ship operation by increasing the ship size and feature. In this paper, the flow analysis is performed with existing gas pipe in large-scale container ship with the operation-condition of higher capacity engine and facilities, and the results were used on the new gas pipe design for ULCS (Ultra Large Container Ship). The newly designed gas pipe can be expected to increase the operating efficiency of ULCS.

**Keywords** : Flow Analysis, Gas Pipe, Operating Efficiency, Ship Logistics, ULCS

### 1. 서론

유가의 변동, 물류의 다양화 및 대형화에 따라 각 해운업체에서는 물류비용 절감을 위하여 컨테이너선의 대형화를 추진하고 있다. 이러한 선종의 대형화로 인해 선박에 탑재되는 엔진, 각종 운용설비, 장비 및 배관 등도

선박의 규모 증가에 따라 그 크기와 무게의 증가 동시에 수반된다.

초대형 컨테이너 선박을 효과적으로 운용하기 위해서는 엔진의 특성이 매우 중요한 요소로 작용되며, 배기가스 파이프는 엔진 및 선체의 크기증가에 비례하여 매우 커지고 이는 선체 및 컨테이너 화물을 비롯한 선박 전체

본 논문은 2018년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Jongwon Kim(Korea University of Technology and Education)

Tel: +82-41-560-1249 email: kamaui@koreatech.ac.kr

Received January 30, 2019

Revised March 25, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

의 운용품질 및 수명에 매우 중요한 영향을 미치는 요소로 작용된다[1][2].

선박엔진의 대형화 및 고 효율화에 따른 운용 조건은 고온 고압 상태에서 운전 중인 엔진 부품 및 지지 구조물의 복합적인 악화 현상을 발생한다. 특히 배기관 및 이를 지지하고 있는 구조물의 성능, 진동특성 및 구조적인 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 해당 문제를 파악하여 구조 해석과 측정을 통한 결과 분석을 통해서 최적의 설계를 수행하여 한다[3].

선박의 엔진은 선체에 결합되어 있어 엔진의 고유 특성인 진동, 열 및 배출가스 압력과 같은 요소는 엔진과 관련된 부수적인 설비들을 통해 선체 전체에 물리적인 영향을 가하여 선박의 수명과 품질을 저하시킨다. 특히 엔진의 연소를 통해 발생하는 배출 가스는 높은 압력을 갖는 고열의 기체로 유해물질을 포함하고 있어 엔진의 진동과 더불어 선박의 품질에 매우 악영향을 주는 요소이다. 특히 배출가스의 열과 압력은 선체에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 배출가스 파이프의 설계는 여러 요소를 고려하여 최적화된 설계가 필요하다.

가스파이프의 최적구조 설계를 위하여 다음과 같이 중요 요소(main issues)를 정의하고 이를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 산업용 초대형 선박을 위한 가스 파이프 모델링을 연구하였다.

## 2. 가스파이프 유동해석 및 개선

### 2.1 연구 방법 및 절차

#### 2.1.1 전산유체역학(CFD)

전산유체역학 (CFD: Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)이란 유체 흐름에 관한 지배방정식인 나비에-스톡스 방정식 (Navier-Stokes Equation)을 유한체적법 (FVM: Finite Volume Method, 이하 FVM)을 사용하여 이산화 함으로써 변환된 대수 방정식을 수치 기법의 알고리즘을 사용하여 유체 유동 문제를 해석하는 것이다.

3차원 비압축성 유체에 대한 나비에-스톡스 방정식은 다음 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다[4].

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

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + U_j \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] = 0 \tag{2}$$

여기서,

- $\rho$  : 공기의 밀도(=1.225kg/m<sup>3</sup>)
- $i$  : 3차원 직교좌표계의 방향 텐서
- $x_i$  : 3차원 직교좌표계
- $U_i$  :  $i$ 방향의 속도 성분
- $P$  : 압력
- $\mu$  : 공기 점성계수(=1.8×10<sup>-5</sup>kg/m·s)

이다.

식(1)은 연속 방정식을, 식(2)는 운동량 방정식을 나타낸다.

본 연구의 대상인 선박용 가스 파이프는 3구 소형 입구를 갖고 중형 출구를 갖는 4구형 가스배출 파이프로 입-출구가 결합되는 파이프 교차 위치에는 해석모델 적용을 위한 밸브의 비정상 유동특성을 나타내는 구조로 정상적인 유동특성 확보를 위한 파이프 직경의 10배 이상의 공간 확보가 불가능한 구조이다. 또한 이를 공간적인 축소를 통한 정상유동 확보를 위한 재질변경도 불가능한 조건을 가지고 있으며 밸브제어를 위한 난류분포의 제어도 불가능 한 구조를 가지고 있다[5].

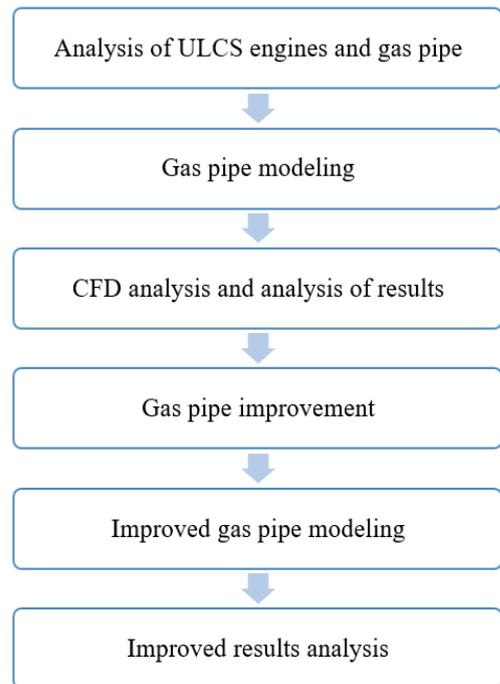


Fig. 1. Procedure to simulation

### 2.1.2 연구 수행 절차

본 연구는 여러 연구사례를 통해 검증된 절차와 방법의 CAD 및 CFD 프로그램을 이용한 방법으로 진행하였다[6][7]. 주된 순서는 Fig. 1과 같다.

대상 엔진과 가스파이프의 분석을 통하여 경계조건을 결정하고 이를 기반으로 한 가스파이프의 모델링을 실시하고 이를 CFD 해석 프로그램을 이용하여 해석 및 결과를 분석한다.

## 2.2 엔진과 배기 시스템의 구성

### 2.2.1 선박의 엔진구성

컨테이너선에 설치되는 엔진과 배기 장치는 Fig. 2와 같이 메인 엔진, 리시버, 보일러 등으로 구성된다. 메인 엔진에서 나오는 배출 가스는 가스파이프를 통해 선박외부로 방출된다. 특히 초대형 선박에 사용되는 엔진 시스템은 소형 선박에 비해 고열의 배출가스가 발생되기 때문에 열에너지를 재활용할 수 있는 부수적인 설비를 Fig. 3과 같이 갖추고 있다[8].

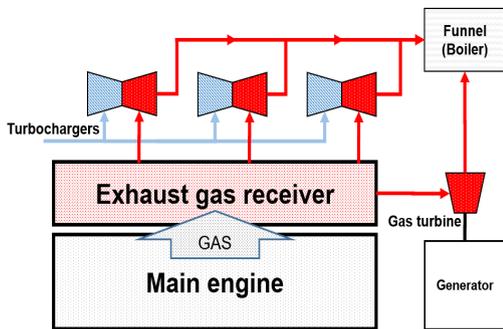


Fig. 2. Configuration of vessel engine

### 2.2.2 초대형 컨테이너 선박의 엔진 시스템

메인엔진은 선박추진 프로펠러, 발전기, 보일러 등의 선박운용에 필요한 동력을 생산한다. 특히 메인엔진은 선체에 직접 탑재되어 있어서 엔진의 고유진동이 최소화될 수 있도록 설계된다.

초대형 컨테이너 선박은 수많은 컨테이너의 적재에 따른 선체의 균형 및 밸런스를 위하여 선체에 직접 진동을 고려하여 엔진을 선정하지만, 각 엔진 제조사에서는 엔진운용에 따른 배출가스 열과 압력을 고려하여 가스파이프를 별도로 설계하지 않는다. 따라서 Fig. 3과 같이 선정된 엔진에 대한 가스파이프는 엔진에 직접 부착

하지 않고 엔진과 가스파이프 사이에 리시버(receiver)를 장착하여 배출가스를 수집하고 이를 터보차저(turbocharger)를 통해 배출함으로써 가스파이프에 전달되는 가스압력을 고르게 유지시켜 진동특성을 최소화 하고 있다.

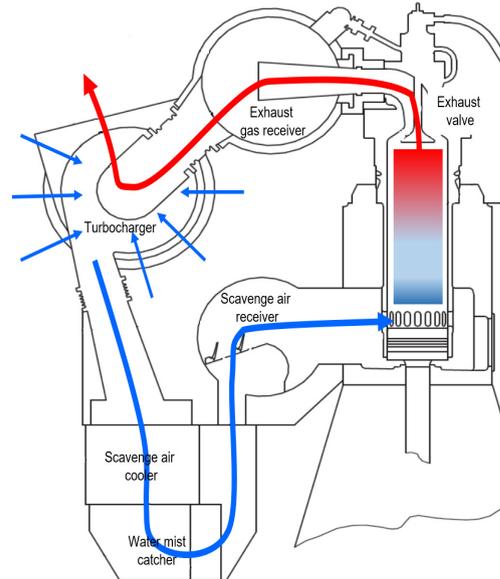


Fig. 3. Exhaust gas system engine

## 2.3 가스 파이프 모델링 및 유량 해석

### 2.3.1 가스 파이프 유량 해석 기준

본 연구대상 컨테이너 선박은 2017년도에 제작된 세계 최대의 컨테이너선 OOCL 사의 21,100TEU 급의 ULCC로 정의하였고, 공개된 정보를 활용하여 동 선박에 사용된 엔진(MAN사의 11G95ME-C9.5)을 모델링 조건으로 활용하였다.

Table 1은 선박의 주기관(main engine) 및 발전기(generator engine)의 엔진 출력에 따른 배기가스 유량의 샘플을 보여주고 있다. 현재 선박에 탑재되어 운전되고 있는 엔진의 사양 및 운전범위가 다양하기 때문에 본 연구에서는 선박 엔진의 출력에 따른 배기가스 유량의 평균치를 사용하여 출력 1kW당 엔진 배기가스의 유량을 10(kg/h)로 가정하였다[9].

엔진의 조건은 최고 출력 61,530(kW)을 고려하였으며, 선박 엔진의 출력에 따른 배출가스 유량의 평균치를 이용하여 출력 1kW당 엔진 배기가스의 유량을 10(kg/h)로 가정하였고 중앙 흡에 5개의 피스톤에서 발생하는 배

출가스가 연결되며, 양쪽 흡에는 각각 3개의 피스톤으로부터 발생하는 배출가스가 연결된다. 또한 대형 선박에서는 앞서 언급한 리시버와 터보차저를 기본적으로 탑재하고 있어 엔진의 배출가스 유량은 균일한 가스 압력 상태를 유지하도록 구조화 되어있어 Table 2를 통해 모델링 조건을 제시하였다.

Table 1. Exhaust gas data of engine

	Engine power (%)	Engine power (kW)	Exhaust gas temperature at T/C outlet (K)	Exhaust gas flow (kg/h)	Exhaust gas flow/Engine power (kg/h)/kW
M/E	100	80,123	549	655,565	8
	75	60,100	535	499,143	8
	50	40,079	591	304,403	8
	25	20,039	585	171,459	9
	100	68,493	546	573,389	8
	75	51,371	530	463,814	9
	50	34,246	560	319,911	9
	25	17,120	572	164,084	10
G/E	100	3,470	591	26,770	8
	75	2,602	593	21,115	8
	50	1,735	627	14,368	8
	25	867	616	9,138	11
	10	347	549	6,698	19
	100	3,135	617	22,133	7
	75	2,351	636	16,971	7
	50	1,567	648	11,906	8
	25	783	618	7,754	10
	10	313	543	5793	18
Average value					10

Table 2. Exhaust gas pressure data of engine

Spec.	Value	Unit
Derated Maximum Continuous Rating	61,530	kW
Pressure	3 Piston	153,825
	5 Piston	256,375
	Total	615,300
Average Pressure	10	(kg/h)/kW

### 2.3.2 가스 파이프 모델링

가스 파이프는 지름 2,600mm의 원통 구조에 무게 약 5ton(12T/두께)을 갖는 철판 재료의 구조로 엔진 배출 가스를 가스파이프로 전달하기 위한 터보차저 3개가 연결될 수 있는 4구형(입력 흡 3개, 출력 흡 1개) 가스파이프로 대형 선박에서 일반적으로 통용되고 있는 가스 파이프의 구조이다. 이는 보통 크기의 선박에서 사용되는 3구형 원통 가스파이프의 Size를 증가시켜 사용하는 범용적인 가스 파이프형태로 그 모양과 구조는 Fig. 4와

같다. 특히 재료는 가스파이프의 무게증가에 따른 서포트(support)의 집합을 견고히 하기 위하여 철판 금속재료의 강건성 확보가 필수적이며, 집합부 진동에 의한 구조의 변형 등을 고려할 때 더욱 강건함을 확보 할 수 있는 재료와 구조로 이루어져 있으며, 본 연구에서는 유동 해석을 기초로 하기 때문에 특별히 집합부 강건성은 배제 하였다.

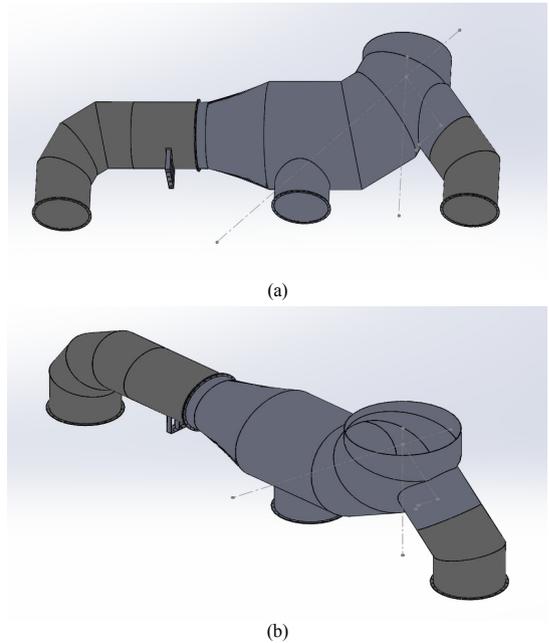


Fig. 4. Gas pipe modeling

### 2.3.3 가스 파이프 유량 해석

가스파이프 해석을 위해서 적용된 조건은 앞서 언급한 내용에 따라 아래와 같이 정의하였다.

- 파이프의 유량속도는 steady 상태로 가정한다.
- 파이프는 구속 되어있는 상태로 진동 및 흔들림은 고려하지 않는다.
- 파이프의 질량 및 유량을 고려하여 해석한다.

주어진 조건을 이용하여 유량에 따른 가스 파이프 내의 가스이동 상태를 모델링 및 경계조건을 제시하여 시뮬레이션 하였다. 실행된 결과를 통해 알아볼 수 있는 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

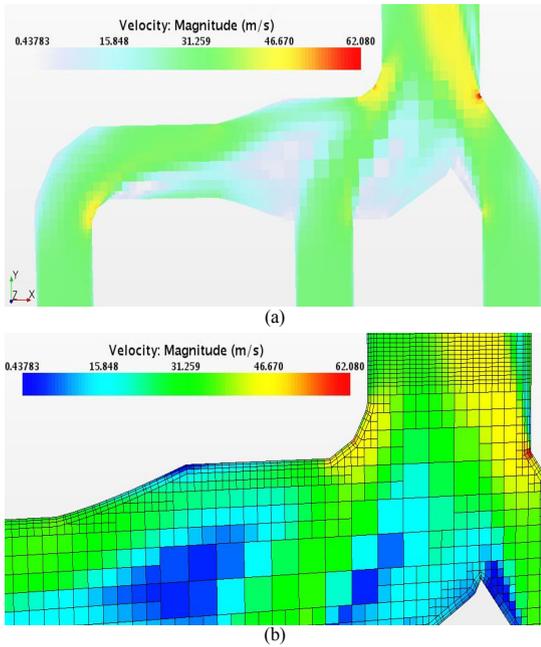


Fig. 5. Gas pipe flow analysis

가스 파이프 유량 해석을 통해 Fig. 5(a)와 같이 파이프 연결부의 모서리 유량이 집중 발생하는 구간과 10m/s 이하로 배출가스가 지나가는 불필요한 구간 (dead-zone) 이 발생하는 영역이 있음을 확인하였고, 최대 62.1m/s에서 0m/s 까지 배출가스의 유량차가 확연히 나타남을 볼 수 있었다. 이는 기존의 일반적인 가스파이프의 Size 변경을 통한 가스파이프 설계가 효율적이지 못한 부분이 있음을 보여주었고, 불필요한 영역의 존재로 인한 중량 및 유량의 증가에 따른 선박의 품질 및 성능저하 요인이 있음을 Fig. 5(b)를 통해 구체적으로 확인할 수 있었다.

## 2.4 가스 파이프 개선

### 2.4.1 가스 파이프 개선 및 유량 해석

기존 가스파이프에서 보여준 불필요한 영역과 과도한 유량이 발생하는 구간을 수정하여 새롭게 설계된 모델을 제시하였다. 개선된 가스파이프의 형태는 Fig. 6과 같다. 불필요한 구간을 삭제하고 최대유량 발생 구간을 변경하여 가볍고 단순화시켜 설계 하였다.

해당 파이프를 기존과 동일한 조건하에 시뮬레이션 하였으며 해당 결과는 Fig. 7을 통해 확인 할 수 있다. 최대유량 속도가 기존모델의 62.08m/s에서 52.924m/s로 9.156m/s 감소(17.3%)됨을 확인 할 수 있었고, 가스파이

프 내의 전체적인 유량흐름의 분포가 균일한 속도의 안정된 모습을 Table 3과 같이 나타냄을 확인 할 수 있었다.

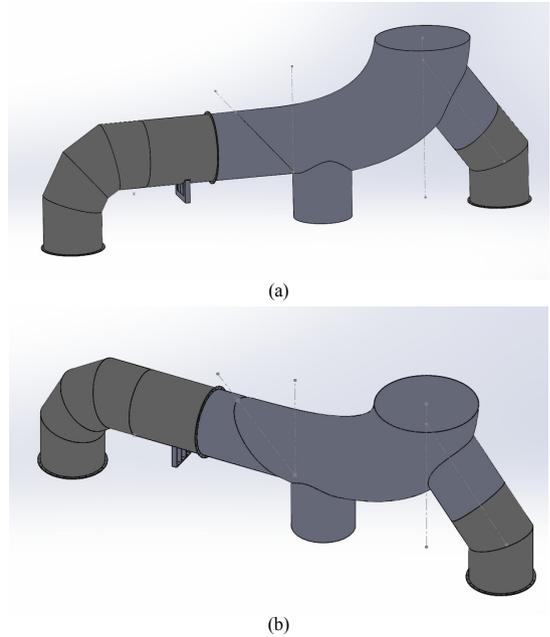


Fig. 6. Improved gas pipe modeling

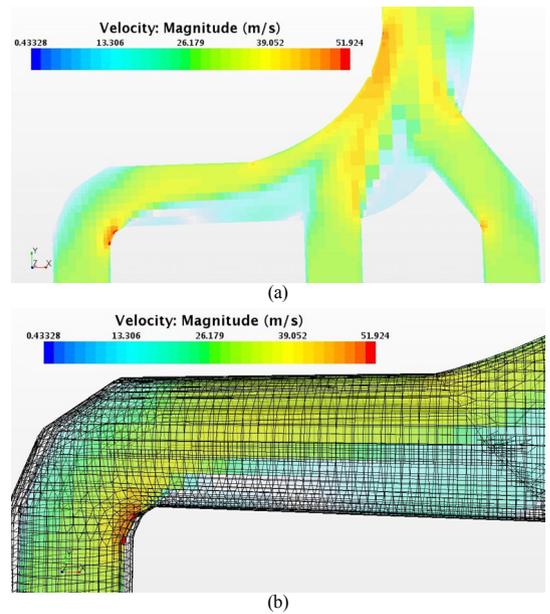


Fig. 7. Improved gas pipe flow analysis

Table 3. Exhaust gas pressure improvement rate

Spec.		Value	Unit
Maximum flow rate	Existing	62.08	m/s
	Improved	52.92	
Improvement rate		17.30	%

### 3. 결론

대형 컨테이너 선종의 가스파이프 분석을 통해 유량 흐름에 대한 특성에 대해 확인할 수 있었고, 운항 중인 선종의 엔진 출력 결과에 따라, 가스파이프가 받는 피로도가 증가함을 볼 수 있었다.

시뮬레이션을 통하여 모서리 구간에 유량이 집중되며 일부 구간에 dead-zone이 발생하는 현상을 확인하였으며 해당 구조의 개선을 통해 최대 유량 속도의 감소와 전체적인 유량 흐름의 분포가 안정됨을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 유량의 집중 및 저하 구간에 대한 설계 개선이 된 가스파이프 모델의 제시를 통해 선박의 수명 연장, 운용비용의 감소 및 제작 원가절감에 큰 도움이 될 것으로 확신한다.

### References

[1] Kim. Y, Kim. B. H, Park. S. G, Choi. B. K, Malenica. S, "On the torsional vibratory response of 13000 TEU container carrier - full scale measurement data analysis", Journal Ocean Engineering, Vol. 158, pp. 15-28, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.065>

[2] Perkovic. M, Gućma. M, Luin. B, Gućma. L, Brcko. T, "Accommodating larger container vessels using an integrated laser system for approach and berthing" Journal Microprocessors and Microsystems, Vol. 52, pp. 106-116, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.05.015>

[3] Park. D. S, Kim. C. S, Jeong. D. C, "Heat-Structure Coupled Analysis of Exhaust Gas Receiver in Large Diesel Engine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 18-19, 2005.

[4] Cho. J. H, Yim. S. R, Lee. K. S, Han. S. E, "A study on the evaluation of wind environment and analytical method using CFD analysis", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 28, pp. 99-106, 2012.

[5] Park. Y. C, Park. H. S, Kim. S. P, "Analysis method on structural safety evaluation of butterfly valve of piping for LNG carrier", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7, No. 4, pp

76-81, 2008.

[6] Taha. T, Cui. Z. F, "CFD modelling of slug flow in vertical tubes" Chemical Engineering Science, Vol.61, pp. 676-687, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.07.022>

[7] Shin. D. W, Kim. L. H, "A Comparison with CFD Simulation and Experiment for Steam-methane Reforming Reaction in Double Pipe Continuous Reactor" Journal of Energy Engineering, Vol.22, pp. 226-236, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2013.22.2.226>

[8] Nielsen. K. V, Blanke. M, Eriksson. L, Vejlgard-Laursen. M, "Marine diesel engine control to meet emission requirements and maintain maneuverability", Journal Control Engineering Practice, Vol. 76, pp 12-21, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.03.012>

[9] Park. S. K, "A study on temperature characteristic of the gases supplied to SOFC system by utilizing the ship exhaust gas", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 8, pp 822-828, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.8.822>

### 최 성 민(Sungmin Choi)

[준회원]



- 2009년 2월 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학사
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학부 석사과정

<관심분야>

조선 선박, 시뮬레이션, 기계 제어, 산업응용시스템

### 김 종 원(Jongwon Kim)

[정회원]



- 2007년 8월 : KOREATECH 전기전자공학과 (공학박사)
- 2016년 9월 : KOREATECH 기전융합공학과 조교수

<관심분야>

지능제어, 융합기술, 산업응용시스템 제어