



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

폭발 릴리프 밸브가 설치된
이중연료 엔진의 급기 매니폴드에
관한 폭발 현상 해석



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스 템 공 학 과

리 창 창

공 학 석 사 학 위 논 문

폭발 릴리프 밸브가 설치된
이중연료 엔진의 급기 매니폴드에
관한 폭발 현상 해석

지도교수 고 대 권

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스 템 공 학 과

리 창 창

리창창의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



위원장	공학박사	정석호 (인)
위원	공학박사	지상원 (인)
위원	공학박사	고대권 (인)

목 차

초록	iii
기호 설명	iv
그림 목록	vi
표 목록	x
I. 서론	1
1. 연구 배경 및 필요성	1
2. 연구 목적 및 내용	4
II. 이론 해석	7
1. 수송 방정식	7
2. 화학 반응 방정식	8
3. 폭발 현상	9
III. 수치 해석	12
1. CFD 모델링	12
2. 폭발 릴리프 밸브 모델링	14
3. 해석 조건	16

VI. 결과 및 고찰	20
1. 급기 매니폴드의 폭발 현상	20
2. 폭발 릴리프 밸브의 설치	33
가. 위치 선정	33
나. 입구 하단에 한 개 설치	35
다. 7번 실린더 하단에 한 개 설치	36
라. 입구 하단 및 7번 실린더 하단에 각 한 개씩 설치 ..	38
VII. 결론	41
참고 문헌	42

Explosion Consequence Analysis of Charge Air Manifolds of a Dual Fuel Engine With Explosion Relief Valves Installed

CHANG-CHANG LI

Department of Mechanical System Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

As a method to reduce environmental pollutants emitted from ships, liquefied natural gas (LNG) is used as a fuel or a dual fuel engine is used. Unlike conventional diesel engines, dual fuel engines have a potential for explosion in the charge air manifold because methane-air is pre-mixed in the charge air system. In this study, to prepare a countermeasure for an explosion consequence by analyzing the charge air manifold with explosion relief valves (ERVs) installed. In a dual fuel engine, there is a possibility that an explosion consequence may occur due to a failure during the valve overlap process. Assuming that the ignition sources were generated from the charge air valves, the explosion consequence was numerically analyzed, and the propagation of the flame and the rise in pressure were analyzed. Through this, it was possible to confirm the positions where the pressure rise were high, and the method of reducing the pressure inside the charge air manifold to less than the safety pressure by installing the ERV at these positions were analyzed. As a result of the numerical analysis, installing one ERV was not suitable for stable operation below the safety pressure of the charge air manifold. Finally, when an explosion consequence occurred in the charge air manifold, it was necessary to install two ERVs in order to reduce the pressure below the safety pressure and to ensure stable operation of the dual fuel engine. It is expected that the installation position and specifications of the ERV could be selected through the analysis of the explosion consequence of the charge air manifold of the dual fuel engine.

기호 설명

A_1	the pre-exponential factor [—]
A_2	the pre-exponential factor [—]
$C_{1\epsilon}$	Courant number [—]
$C_{2\epsilon}$	Courant number [—]
$C_{3\epsilon}$	Courant number [—]
$E_{a,1}$	the activation energy [—]
$E_{a,2}$	the activation energy [—]
G_b	the generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy [—]
G_k	represents the generation of turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients [—]
$n_{O_2,1}$	the reaction exponent for species O_2 in reaction 1 [—]
$n_{O_2,2}$	the reaction exponent for species O_2 in reaction 2 [—]
P_0	initial temperature of Fig. 2 [°C]
P_1	initial pressure [atm]
P_{ex}	the maximum explosion pressure [atm]

S_k	user-defined source term [—]
S_ϵ	user-defined source term [—]
T_0	initial temperature [K]
Y_M	represents the contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate [—]

Greek Symbols

σ_k	the turbulent Prandtl numbers for k [—]
σ_ϵ	the turbulent Prandtl numbers for ϵ [—]
β_1	the temperature exponent of reaction 1 [—]
β_2	the temperature exponent of reaction 2 [—]
μ_t	the turbulent viscosit [—]

그림 목록

Fig. 1 805 kW dual fuel engine longitudinal section

Fig. 2 Maximum explosion pressure ratios for methane/air mixtures ignited at 20 °C and at 100 kPa and 1000 kPa

Fig. 3 Explosion pressure as a function of the methane concentration for different initial temperature of the methane/air mixture

Fig. 4 805 kW dual fuel engine cross section

Fig. 5 Diagram for charge air and exhaust gas system

Fig. 6 2D modeling of the dual fuel engine charge air manifold

Fig. 7 Structure of ERV for LNG fuelled ship

Fig. 8 Meshing for charge air manifold

Fig. 9 Valve timing diagram of 4 stroke diesel engine

Fig. 10 Temperature and pressure contour results at No. 4 cylinder charge valve opened (103 CA°)

Fig. 11 Temperature and Pressure contour results at No. 4 and No. 6 cylinder charge valves opened (206 CA°)

Fig. 12 Temperature and Pressure contour results at No. 6 and No. 7 cylinder charge valves opened (245 CA°)

Fig. 13 Temperature and Pressure contour results at No. 6 and No. 7 cylinder charge valves opened (309 CA°)

Fig. 14 Temperature and Pressure contour results at No. 7 and No. 5 cylinder charge valves opened (347 CA°)

Fig. 15 Temperature and Pressure contour results at No. 7 and No. 5 cylinder charge valves opened (412 CA°)

Fig. 16 Temperature and Pressure contour results at No. 5 and No. 3 cylinder charge valves opened (450 CA°)

Fig. 17 Temperature and Pressure contour results at No. 5 and No. 3 cylinder charge valves opened (515 CA°)

Fig. 18 Temperature and Pressure contour results at No. 3 and No. 1 cylinder charge valves opened (553 CA°)

Fig. 19 Temperature and Pressure contour results at No. 3 and No. 1 cylinder charge valves opened (618 CA°)

Fig. 20 Temperature and Pressure contour results at No. 1 and No. 2 cylinder charge valves opened (656 CA°)

Fig. 21 Temperature and Pressure contour results at No. 1 and No. 2 cylinder charge valves opened (720 CA°)

Fig. 22 Pressure monitoring points

Fig. 23 Pressure plot at monitoring points

Fig. 24 Modeling with an explosion relief valve installed
– point 1 (A ERV was installed at bottom of the inlet)

Fig. 25 Pressure plot at monitoring points (A ERV was installed at bottom of the inlet)

Fig. 26 Modeling with an explosion relief valve installed
– point 2 (A ERV was installed under the No.7 cylinder)

Fig. 27 Pressure plot at monitoring points (A ERV was installed under the No.7 cylinder)

Fig. 28 Modeling with explosion relief valves installed
(ERVs were installed under the No.7 cylinder and inlet)

Fig. 29 Pressure plot at monitoring points (ERVs were
installed under the No.7 cylinder and inlet)

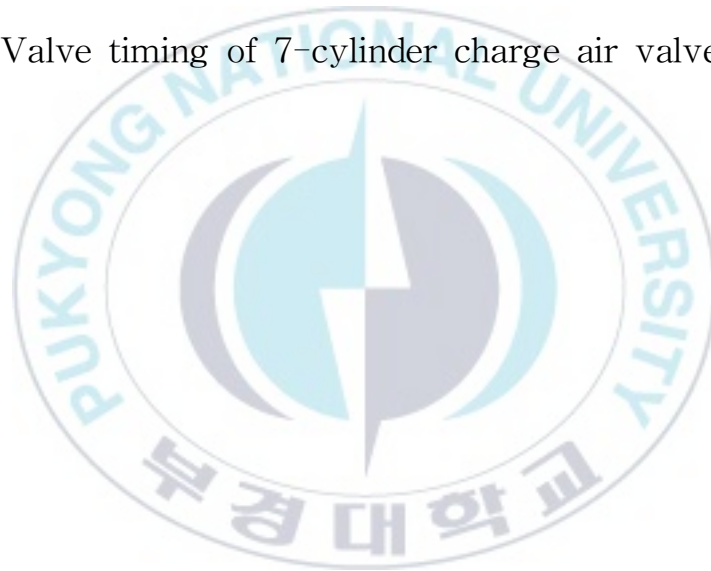


표 목 록

Table 1 Implementation schedule of SO_x, NO_x and CO₂ limits according to IMO MEPC 72/17 Annex 11

Table 2 CFD setup conditions

Table 3 Valve timing of 7-cylinder charge air valves



I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

현재 전 세계에서 사용되는 에너지 수요량이 급격히 증가하고 있으며 화석 연료의 사용으로 인해 발생하는 환경오염에 대한 논의가 이뤄지고 있다. 특히, 선박에서 화석 연료를 사용하면서 발생시키는 대기오염물질에 대한 규제가 강화되고 있다. 2018년 선박에서 발생시킨 온실가스 배출량은 전체 배출량의 약 2.89%를 차지하였으며,¹⁾ 온실가스의 주성분인 이산화탄소(CO₂)뿐만 아니라, 일산화탄소(CO), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 배출이 문제가 되고 있다. 이러한 배기가스의 배출로 인한 대기오염에 대한 규제는 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 MARPOL Annex VI를 통해 황산화물과 질소산화물에 대한 배출을 제한하고 있다. IMO에서는 배출통제지역(Emission Control Areas, ECA)을 지정하여 환경규제를 시행하고 있으며, 유럽 연합에서는 2015년 7월 이후 유럽지역 내의 항만을 운항하는 모든 선박에 대해 매년 이산화탄소의 배출량 보고서를 의무적으로 제출하는 EU-MRV 제도를 시행하고 있다.²⁾

Table 1은 IMO MEPC 72/17 Annex 11에 따른 황산화물, 질소산화물 및 이산화탄소 규제에 대한 시행 일정을 나타낸 것이다.³⁾ 또한, 선박에서 배출하는 이산화탄소를 2050년까지 2008년 대비 50% 감축하겠다는 목표를 2018년 4월에 발표하였어 선박에서 배출하는 온실가스를 제한하고 있다. SO_x 배출에 대한 규제는 2020년 1월 1일부터 황 함유량 0.5% 이하의 연료유를 사용하기로 제한하고, NO_x에 대한 규제는 2010년 7월 1일부터 시행되었다.⁴⁾

Table 1 Implementation schedule of SO_x ,NO_x and CO₂ limits according to IMO MEPC 72/17 Annex 11

Emission	Regulation	Implementation
CO ₂	MEPC245 guidelines on the method of calculation of the attained EEDI for new ships 2014	Phase 1 (2015-2019)for - 10% Phase 2 (2020-2024)for - 20% Phase 3 (2025-2029)for - 30% Phase 4 (2030- ?)for - 40%
NO _x	MARPOL 73/78 Annex VI, NO _x technical note	Tier III (less than 2.0-3.4g/kWh after 2016) 2.6g/kWh for 1,300-2000rpm
SO _x	MARPOL 73/78 Annex VI, EU directive 1999/32/EC	Less than 0.5% m/m after 2020 (outside of ECA) Less than 0.1% m/m after 2015 (inside of ECA)

이러한 규제에 대응하는 방법으로 기존의 화석 연료의 사용을 제한하고 친환경 에너지를 사용하는 방법이 논의되고 있다.⁵⁾ 현재 선박에서 배출하는 황산화물 및 질소산화물의 배출량을 줄이기 위한 대책으로는 스크러버 (scrubber)를 설치하거나, 저유황 연료유 또는 액화천연가스(liquefied natural gas, LNG)를 연료로 사용하는 방법이 제안되고 있다.⁶⁾

비용의 문제 및 선박의 특성 등에 따라 환경오염 저감을 위해 적용되는 방안이 다르며, 스크러버의 경우 부피가 크기 때문에 설치할 공간의 제한이 있는 단점이 있다. 또한, 저유황 연료유는 고유황 연료유에 비해 가격이 비싸며 윤활 성분이 낮아 부품의 교체 주기가 짧아지는 단점이 있다. 그에 반해 LNG는 경유와 가격이 비슷하며, 연료유와 같은 질량에서 20~25%

가량 더 많은 에너지를 낼 수 있으므로 경제적이다.⁷⁾ 그리고 LNG 선박의 운용 비용 측면에서 기존의 화석 연료보다 효율이 높게 나타나며 LNG를 연료로 사용하는 선박이 증가하고 있는 추세다.⁸⁾

IMO의 규제에 따라 대한민국에서는 LNG를 연료로 사용하는 친환경 정책을 펼치고 있다. 2019년 대한민국의 대외무역 의존도는 63.51%로, 수출입 화물의 99.7%가 선박을 통해 운송되고 있으며, 해운 물동량은 세계 7위이다.⁹⁾ 2021년 상반기 조선업체 수주량은 전년 동기보다 1,088만CGT로 약 724% 증가하였으며, 전 세계의 약 70% 가량의 LNG 추진선을 수주하였다.¹⁰⁾ 이처럼 LNG 선박에 대한 선진 기술을 보유하고 있는 것과 지속적인 기술 개발은 선박 수주를 통한 경제 발전을 이룰 수 있다.

LNG를 연료로 사용함에 따라 기존의 디젤 엔진에 없던 위험 요소가 발생하는데, 그 중이 폭발로 인한 사고가 가장 중요하게 여겨지며 이를 방지하기 위한 연구가 이뤄지고 있다. 폭발 사고에 관한 연구는 LNG 연료 시스템 전체에 대해 이뤄지고 있으며, 가스 공급 시스템¹¹⁾, 크랭크케이스¹²⁾, 배기 시스템에 대한 잠재 위험 분석¹³⁾ 등이 이뤄지고 있다.

본 연구에서는 LNG를 연료로 사용하는 이중연료 엔진의 LNG 급기 시스템의 잠재적인 폭발 위험에 대해 분석 하고자 한다. 폭발의 원인은 이중연료 엔진의 급기 밸브에서 밸브겹침(valve overlap) 기간 동안 급기와 배기 시스템의 화염 채널(channel)이 형성되어 점화원이 발생한 것으로 가정하였다.¹⁴⁾ 증기 상태의 LNG는 점화원을 통해 폭발이 발생할 수 있으며 이때 고압이 형성되는데,¹⁵⁾ 화염 및 고압의 형성으로 인한 이중연료 엔진 및 급기 매니폴드의 손상을 방지하는 대책을 마련하기 위해 폭발 현상을 분석할 필요성이 있었다.

2. 연구 목적 및 내용

급기 매니폴드는 메탄-공기 혼합물이 지속적으로 공급되고 실린더를 통해 메탄-공기 혼합물이 들어가는 구조이며, 급기 밸브가 닫혀있는 상태에서 순간적으로 밀폐공간이 형성된다. 밀폐공간, 크랭크케이스, 파이프 내부의 유동에서 폭발 위험이 있으면 직렬 또는 병렬로 폭발 릴리프 밸브 (explosion relief valve, ERV)를 설치하는 것이 폭발을 대처하는 효과적인 방법이다.¹⁶⁾ ERV는 폭발로 인해 발생하는 압력을 감소시키고 화염이 외부로 유출되는 것을 방지하는 역할을 하며, ERV를 설치하는 것은 급기 매니폴드의 잠재적인 폭발 위험을 해결하는 방안이다.

급기 매니폴드에서 폭발 현상이 발생하여 압력이 상승하는 것은 급기 매니폴드의 구조, 점화원의 위치 등에 따라 다르게 나타난다.¹⁷⁾ 이중연료 엔진의 급기 매니폴드를 대상으로 폭발 실험을 수행하면 비용의 문제뿐만 아니라 엔진이 운전 중인 상태의 경우 부가적인 사고가 발생할 위험이 있어 안전상의 문제가 있다. 또한, 다양한 엔진을 대상으로 실험을 하는 것은 불가능하므로 급기 매니폴드의 내부에 화염의 전파, 압력 상승 위치 등을 분석하기 위해서는 수치 해석을 이용하여 연구하는 것이 적합하다.

본 연구에서는 이중연료 엔진의 급기 매니폴드의 잠재적인 폭발 위험의 원인에 대해 규명하고 폭발 현상의 분석을 통해 해결 방안을 모색하고자 805 kW급 7기통 중속 이중연료 엔진의 급기 매니폴드를 대상으로 수치 해석을 하였다.

Fig. 1은 805 kW급 이중연료 엔진의 종단면도를 나타낸 것으로, 본 연구의 대상인 급기 매니폴드를 강조하여 나타냈다.¹⁸⁾

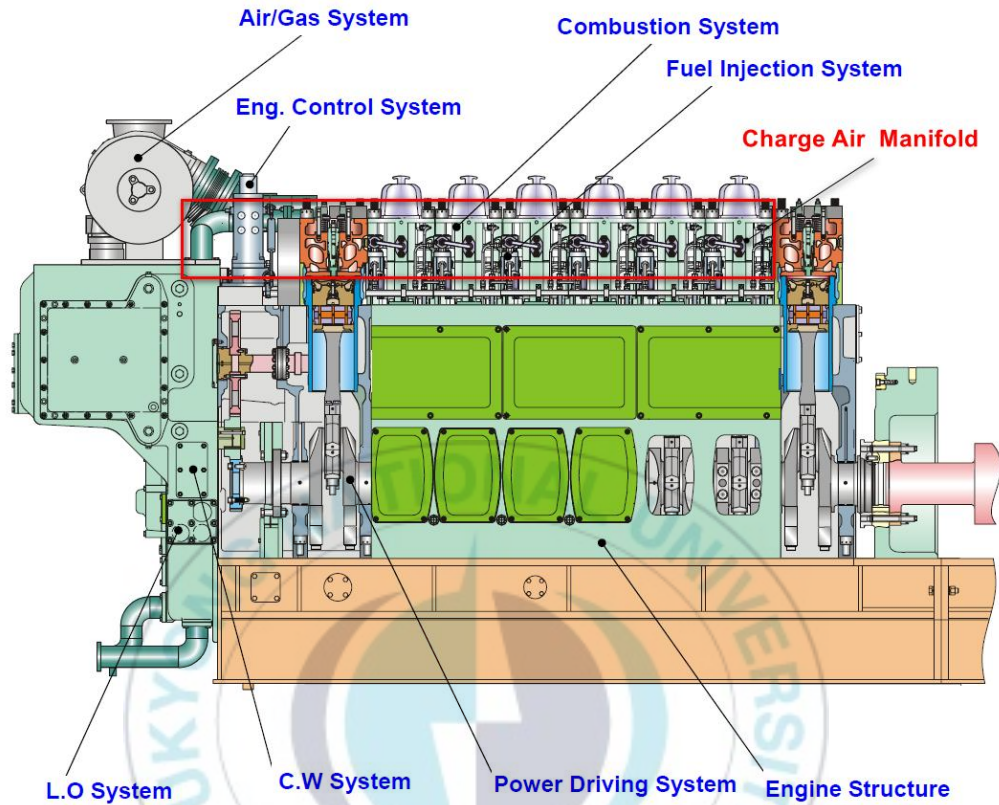


Fig. 1 805 kW dual fuel engine longitudinal section

전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용하여 급기 매니폴드의 유동에 대해 분석하였고, 이중연료 엔진의 각 실린더의 점화 순서 및 급기 밸브의 작동 순서에 따른 밸브 유동 프로파일(profile)을 적용하여 실제 엔진의 급기 유동을 모사하였다. 한 사이클 동안 급기 매니폴드의 화염이 전파되는 과정을 분석하였으며, 이러한 화염의 전파로 인한 압력의 상승은 이중연료 엔진 및 급기 매니폴드의 손상 원인이 되기 때문에 본 연구의 목적은 화염의 전파 및 폭발로 인한 압력 상승을 감소시키는 방안을 찾는 것이다.

CFD를 이용하여 급기 매니폴드에서 발생하는 폭발을 분석하고 압력이 상승하는 위치를 확인하여 그 위치에 ERV를 설치하였을 경우 결과를 분석하였다. ERV는 805 kW급 이중연료 엔진에 설치되는 표준 사양을 따랐으며, ERV의 설치 위치 및 개수에 대한 성능 평가를 하고자 하였다. 이러한 수치 해석을 이용하여 폭발을 분석한 결과를 통해 ERV의 사양 선정, 개발을 위한 기초 연구가 되고자 한다.



II. 이론 해석

1. 수송 방정식

급기 매니폴드에서 유동을 완전한 난류라 가정하고, 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 난류 유동을 수치 해석하였다. 수송 방정식은 레이놀즈 방정식을 시간 평균화한 레이놀즈 평균(Reynolds-Average Navier-Stokes, RANS) 방정식을 기반으로 모델링된다.

시간 평균 유동 방정식에서 여러 가지 난류 변수들 사이의 상호작용으로 인하여 추가적인 항들이 나타난다. 이 항들을 이용하여 난류 모델링을 하며 그 중 가장 많이 사용되고 있는 것은 $k-\epsilon$ 모델이다. 이 모델은 계산을 위해서 컴퓨터 자원이 많이 필요하지 않기 때문에 유동을 빠르게 수치 해석하기 위해서 많이 사용되어 왔다.

표준 $k-\epsilon$ 모델에 대한 수송 방정식에서 난류 운동 에너지 k 와 소산율 ϵ 는 다음 수송 방정식으로 나타낸다.¹⁹⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

이 방정식에서 G_k 는 평균 속도 변화율로 인한 난류 운동 에너지의 생성을 나타내며, G_b 는 부력으로 인한 난류 운동 에너지의 발생, Y_M 은 압축성 난류의 변동 팽창이 전체 소산 속도에 미치는 영향을 나타내며, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$,

$C_{3\epsilon}$ 는 상수이다. 또한, σ_k 및 σ_ϵ 은 각각 k 및 ϵ 에 대한 난류 Prandtl 수이며, S_k 및 S_ϵ 는 사용자 정의 소스항이다.

난류 운동 에너지 k 의 수송 방정식과 관련된 항은 식 (3)으로 정의된다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

난류 점성 μ_t 는 식 (4)와 같이 k 와 ϵ 를 이용하여 계산되며, C_μ 는 상수이다.

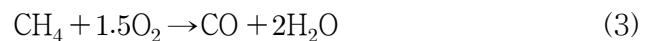
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

2. 화학 반응 방정식

난류는 화염의 전파 거동에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 화학 반응은 메탄-공기 2단계 반응의 단순화된 모델을 사용하였다.²⁰⁾

Franzelli 등이 개발한 2S-CH₄-BFER 모델은 희박 화학량론적인 혼합물, 다양한 당량비 및 압력($1\text{atm} \leq P_1 \leq 10\text{atm}$) 및 혼합물의 초기 온도 ($300\text{K} \leq T_1 \leq 800\text{K}$)에 적합한 것으로 검증되었으며, 화염의 구조와 속도를 정확하게 기술할 수 있다.²¹⁾

2S-CH₄-BFER의 반응 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.





두 반응의 순방향 반응 속률은 다음과 같다.

$$k_{f,1} = A_1 f_1(\Phi) T^{\beta_1} e^{\left(-\frac{E_{a,1}}{RT}\right)} [\text{CH}_4]^{n_{\text{CH}_4}} [\text{O}_2]^{n_{\text{O}_2,1}} \quad (5)$$

$$k_{f,2} = A_2 f_2(\Phi) T^{\beta_2} e^{\left(-\frac{E_{a,2}}{RT}\right)} [\text{CO}]^{n_{\text{CO}}} [\text{O}_2]^{n_{\text{O}_2,2}} \quad (6)$$

A_1, A_2 는 전 지수 인자, $E_{a,1}, E_{a,2}$ 는 활성화 에너지, β_1, β_2 는 각 반응의 온도 지수, $n_{\text{O}_2,1}, n_{\text{O}_2,2}$ 는 각 반응에서 O_2 에 대한 반응 지수이다.

3. 폭발 현상

메탄은 점화원이 있는 경우 연소가 가능하며, 메탄의 농도에 따라 폭발 현상이 다르게 나타난다. 밀폐공간의 메탄-공기 혼합물에서 폭발이 발생할 경우 초기 압력에 비해 최대 8배까지 압력이 상승하며,²²⁾ 급기 매니폴드에서 이러한 폭발 현상이 발생할 경우 이중연료 엔진이 손상되는 사고가 발생할 수 있다.

Fig. 2는 메탄의 폭발에 관한 기존의 선행 연구에서²³⁾, 20°C 및 100 kPa 상태 메탄이 존재하는 밀폐공간에서 압력이 증가함에 따라 폭발 범위의 최대 메탄 농도의 범위가 증가하는 것을 나타낸 것이다.

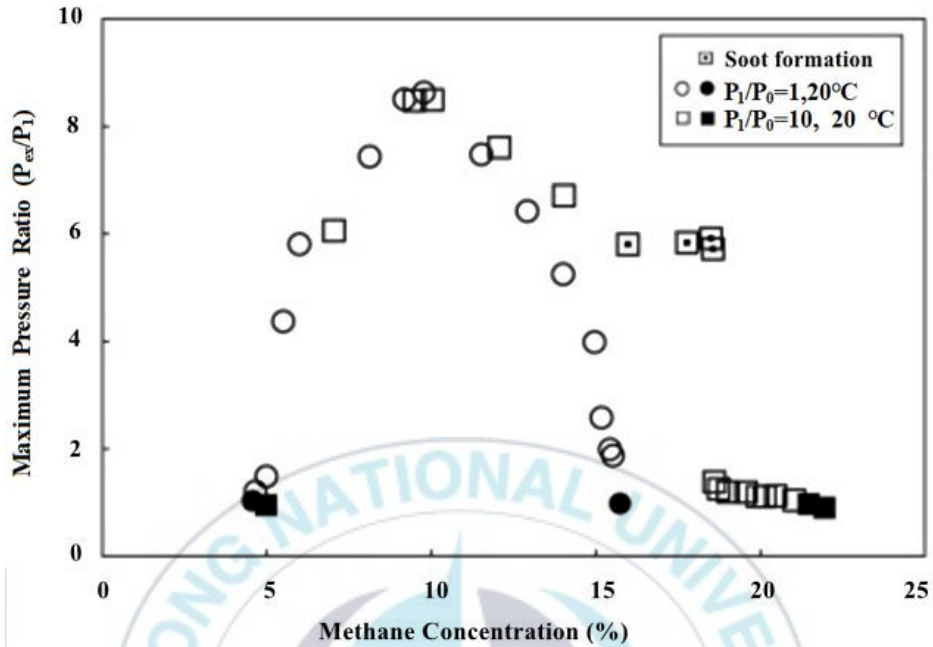


Fig. 2 Maximum explosion pressure ratios for methane/air mixtures ignited at 20 °C and at 100 kPa and 1000 kPa

Fig. 3은 초기 온도가 폭발 매개변수에 미치는 영향을 나타낸 것이다.²⁴⁾ 온도가 높을수록 폭발 압력이 커지고 메탄 농도의 폭발 한계 범위가 커지게 되므로, 폭발 현상은 주변 온도 및 압력의 영향을 받는 것임을 나타내고 있다.

메탄 농도는 폭발 현상에 가장 큰 영향을 미치며 메탄 농도가 9.5%일 때 폭발의 최대 압력이 나타난다. 본 연구에서는 메탄 농도 9.5% 상태를 기준으로 수치 해석하여 폭발 현상으로 인한 영향을 확인하고자 하였다.

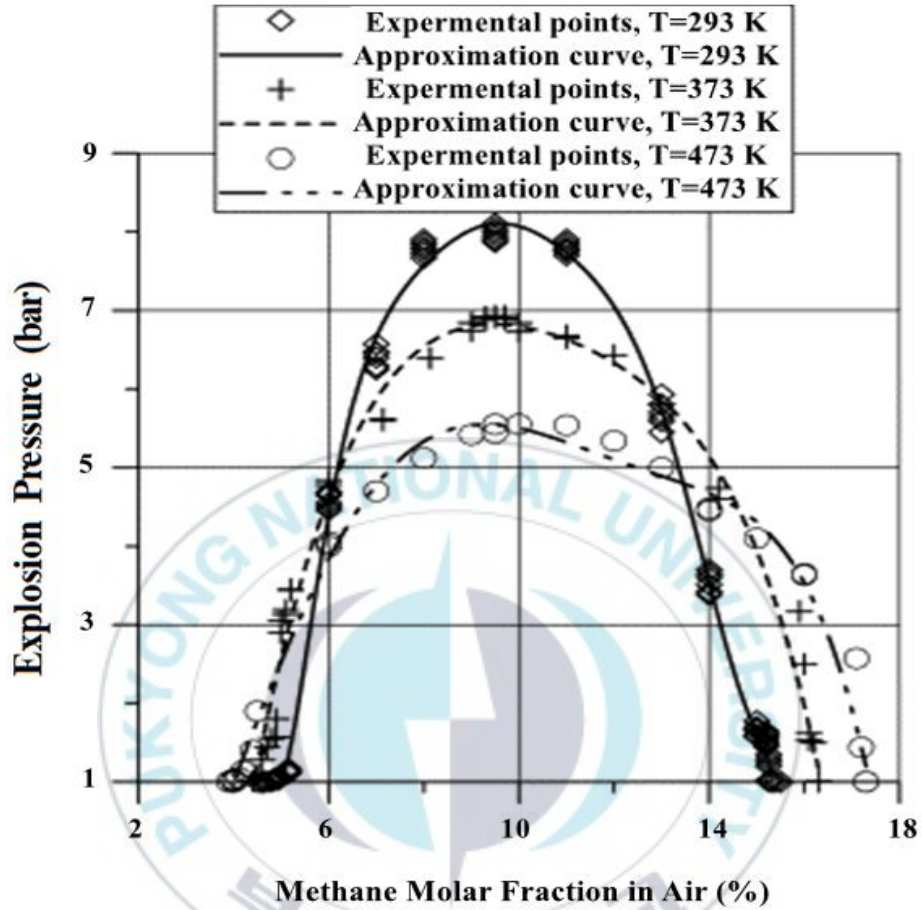


Fig. 3 Explosion pressure as a function of the methane concentration for different initial temperature of the methane/air mixture

폭발 실험은 일반적으로 밀폐공간에서 수행되며¹⁷⁾, 폭발의 발생은 점화 위치 및 밀폐된 용기 내부의 구조물에 따라 다르게 나타난다. 급기 매니폴드에서 폭발 현상이 발생할 경우 압력의 상승 및 하강은 경계 조건인 급기 밸브의 상태에 따라 다르게 나타나며, 급기 밸브의 개폐 과정에서 폭발로 인해 상승한 압력이 하강할 수 있다.

Ⅲ. 수치 해석

1. CFD 모델링

Fig. 4는 본 연구의 대상인 805 kW급 이중연료 엔진의 횡단면으로, 급기 매니폴드 부분을 강조하여 나타낸 것이다.

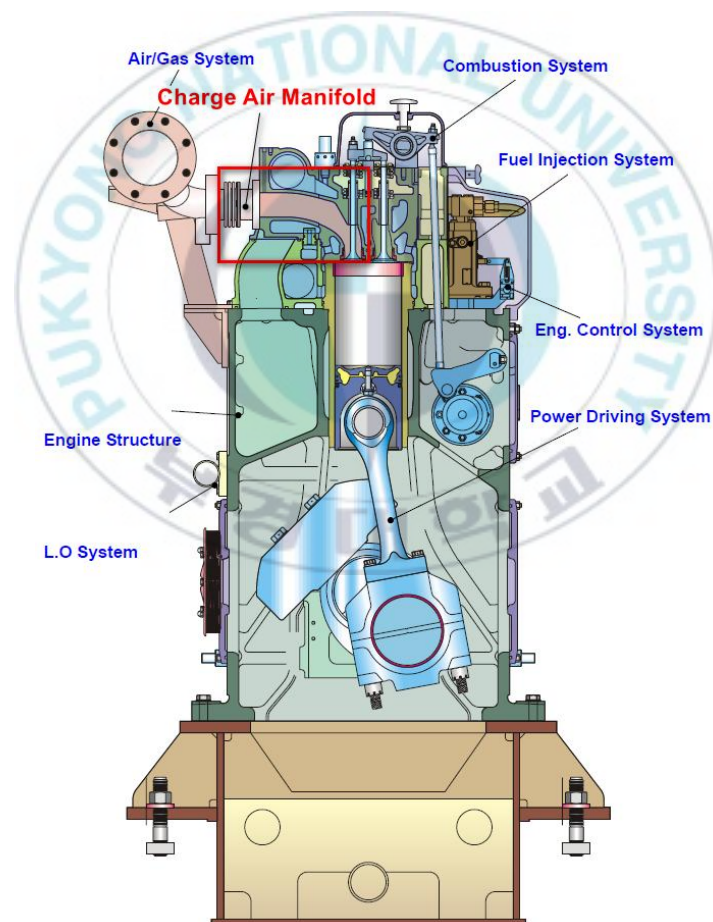


Fig. 4 805 kW dual fuel engine cross section

Fig. 5는 805 kW급 이중연료 엔진의 급기 및 배기가스 시스템의 선도를 나타낸 것으로, 급기 매니폴드 내부 유동 공간을 강조하여 나타냈다.

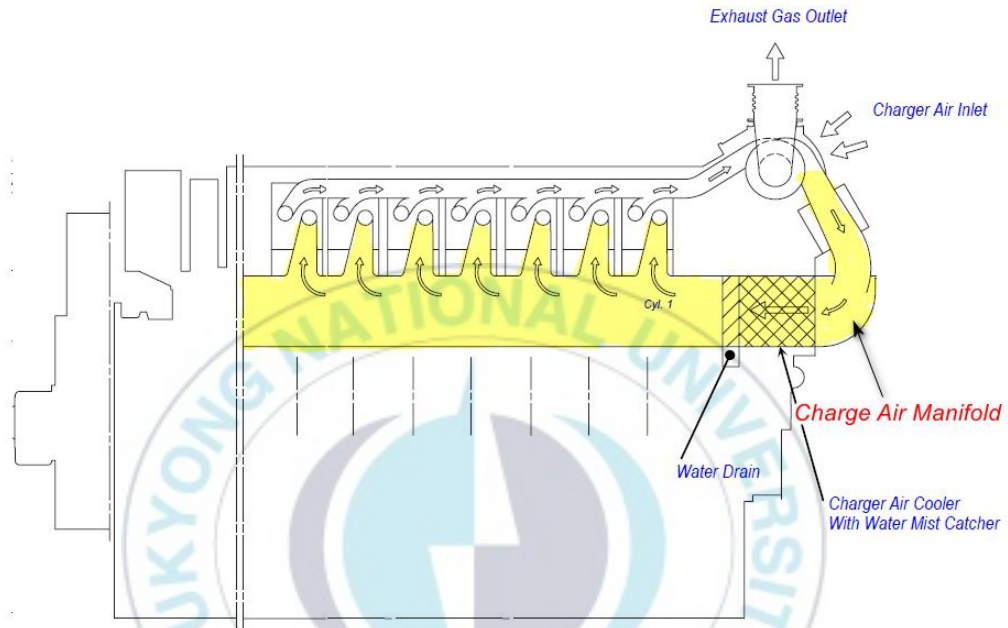


Fig. 5 Diagram for charge air and exhaust gas system

메탄-공기 혼합물이 들어오는 급기부터 실린더로 유동이 들어가는 급기 밸브까지 포함된 급기 매니폴드 전체를 모델링하여 수치 해석하였다. Fig. 4 805 kW급 이중연료 엔진의 횡단면과 Fig. 5 805 kW급 이중연료 엔진의 급기 및 배기가스 시스템 선도를 통해 유동 영역을 모델링 하였으며, Fig. 6은 급기 매니폴드 유동 영역을 나타낸 것으로 계산 자원을 감소시키기 위해 2D로 모델링하였다.

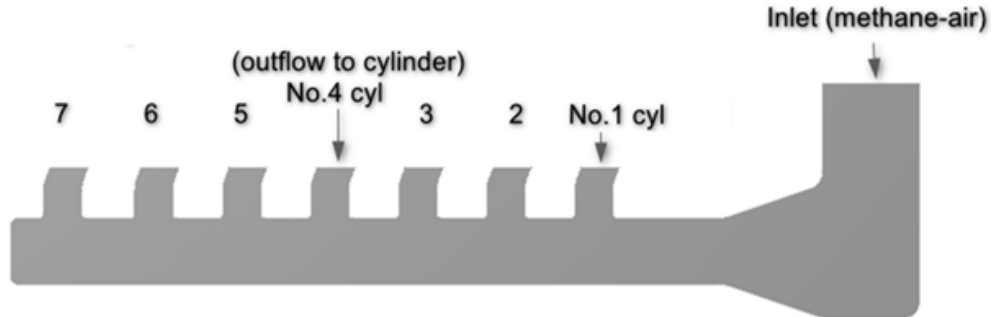


Fig. 6 2D modeling of the dual fuel engine charge air manifold

급기 매니폴드의 유동 영역 모델링에서 메탄-공기 혼합물이 들어오는 입구 경계조건이 한 개 있으며, 실린더로 유동이 들어가는 출구 경계조건은 총 7개(7기통)이다.

2. 폭발 릴리프 밸브 모델링

ERV는 폭발 사고가 발생할 경우 압력을 배출시키는 안전장치이며, ERV의 구조를 Fig. 7에 나타냈다. 밸브 시트, 밸브 플레이트 어셈블리, 디스크 스프링, 화염 채집기, 밸브 커버로 구성되어 있으며²⁵⁾, 밸브 플레이트 어셈블리는 스프링의 탄성으로 인해 차폐되어 내부의 가스 유출과 외부의 공기 유입을 차단시키고 있다. 폭발 현상이 발생하면 압력의 상승으로 인해 밸브 플레이트 어셈블리가 열리게 되고 ERV 내부로 화염이 유도된다. 타공 철판이 적층된 화염 채집기를 통과하며 화염이 외부로 유출되는 것을 방지하고 동시에 화염의 온도도 감소한다. 본 연구의 관찰 대상은 화염이 ERV로 유도되는 여부와 압력을 하강시키는 성능을 분석하고자 한다.

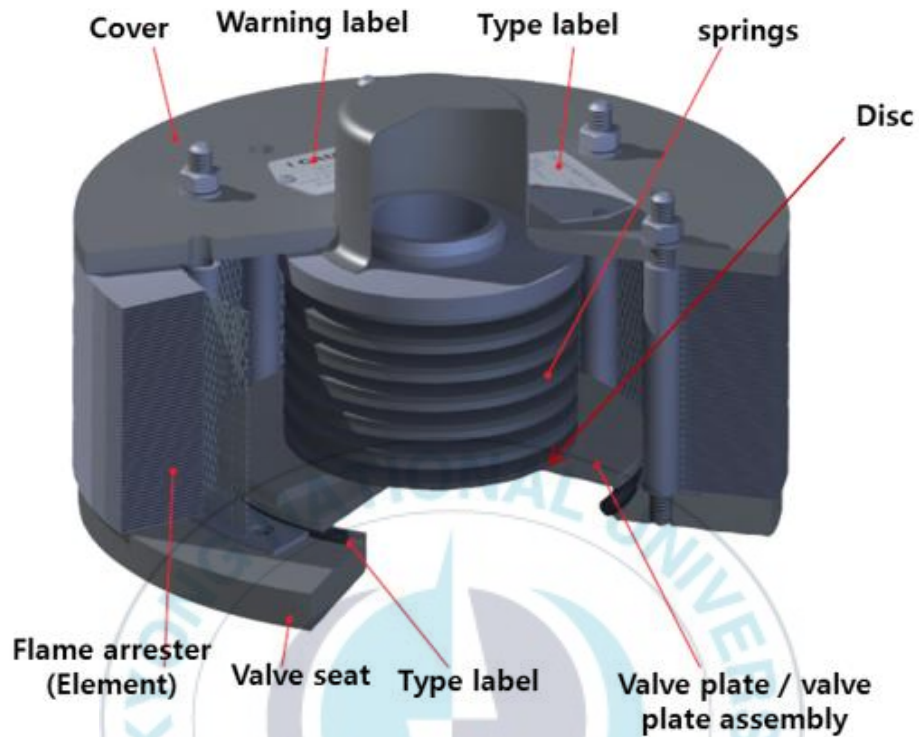


Fig. 7 Structure of ERV for LNG fuelled ship

급기 매니폴드의 내부에서 발생하는 폭발로 인해 상승하는 압력을 감소시키기 위해 ERV는 4 bar에서 열리기 시작하여 5 bar에서 최대로 열리는 사양을 선정하였고 ERV 밸브 프로파일을 사용자 정의 함수를 적용하여 구현하였다.

3. 해석 조건

급기 매니폴드에서 발생하는 폭발과 화염의 전파를 분석하기 위해 Ansys Fluent R15.0을 사용하여 유동 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 급기 매니폴드 내부에서 유동 영역의 격자 모델링이다. 강조한 부분의 격자는 불균일한 구조의 사각형 격자를 사용해서 벽 함수를 팽창층 모델로 생성하였다. 격자의 평균 길이는 0.003 m 이며, 노드의 개수는 107698개이고, 격자의 개수는 106479개이다.



Fig. 8 Meshing for charge air manifold

급기 매니폴드를 유동 해석 하기 위해 사용된 해석 조건을 Table 1에 나타냈다. 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며 이중연료 엔진의 급기를 메탄-공기 혼합물의 물성치를 사용하여 적용하였다.²⁶⁾ 급기가 들어오는 입구 경계 조건은 온도 333 K, 압력 3.5 bar이다.

Table 2 CFD setup conditions

Items	CFD analysis modeling
Viscous model	Standard $k-\epsilon$
Time	Transient
Species transport	Laminar finite rate
Material	Methane-air
Initial temperature	333 K
Initial pressure	3.5 bar

실린더 내부에서 피스톤의 상승 과정으로 인해 연료 가스는 압축되어 점화되고, 압축 행정이 완료되며 급·배기 밸브의 밸브 겹침 시기에서 밸브 타이밍이 오작동할 경우 점화원의 전달로 인해 폭발 사고가 발생할 가능성이 있다. 매니폴드 내부에서 발생하는 화염의 위치는 특정할 수 없으므로 수치 해석은 805 kW급 이중연료 엔진의 급기 밸브 중심에서 점화원이 발생하는 것으로 가정하였다.

2S-CH₄-BFER 모델은 희박과 화학 양론적 혼합물에 적합한 것으로 입증되었으며, 예혼합된 화학적 화염 구조 및 속도를 정확하게 예측한다. 메탄-공기의 혼합물로 인한 화염은 다양한 당량비 및 압력에 적합하며 ($1\text{atm} \leq P_1 \leq 10\text{atm}$), 본 연구의 초기 조건은 2S-CH₄-BFER 모델의 사용 조건을 만족한다.²¹⁾ 따라서 난류 및 화염의 유동은 2S-CH₄-BFER 모델을 적용하여 계산하였으며, 폭발 발생 시 가장 압력이 높게 나타나는 메탄 농도인 9.5% 상태의 물성치를 적용하였다.

Fig. 9는 4행정 디젤 엔진의 이론적인 밸브 타이밍 다이어그램이다. 805 kW급 이중연료 엔진의 점화 순서는 1-2-4-6-7-5-3이며 4행정 디젤 엔진의 이론적인 밸브 타이밍 다이어그램 따라 각 급기 밸브가 열린 순서는 4-6-7-5-3-1-2 순서로 진행된다.

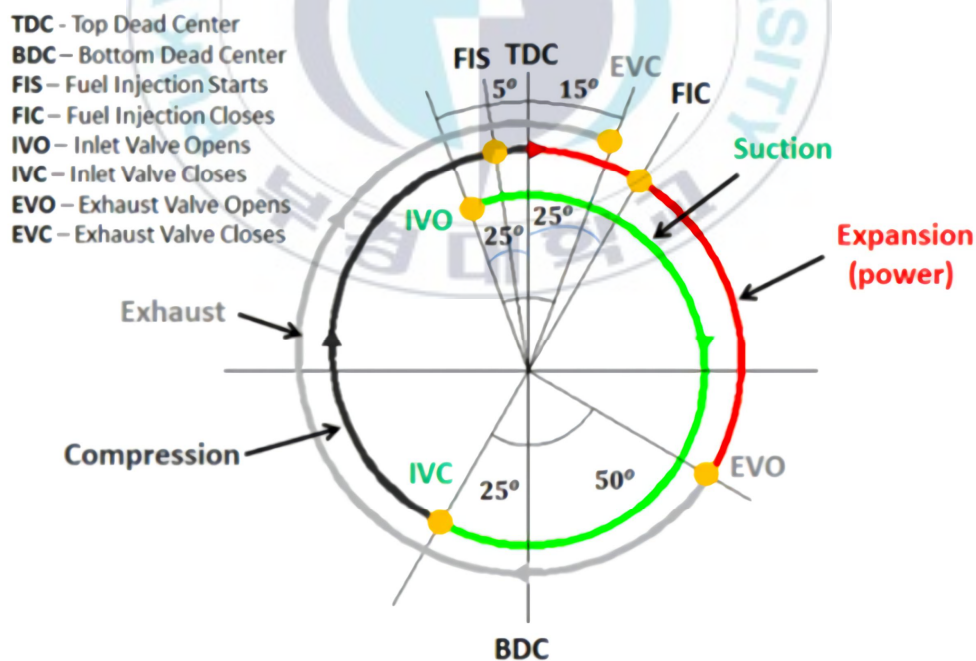


Fig. 9 Valve timing diagram of 4 stroke diesel engine

805 kW급 이중연료 엔진의 회전 속도는 900 rpm이고 4행정이므로 720 크랭크 각도(crank angle degree, CA°)에 소요되는 시간은 약 0.067 sec이다. 본 연구에서는 한 사이클 동안의 유동에 대해 수치 해석 하였으며, 급기 밸브의 작동 상태를 Table 2에 나타냈다. 메탄의 폭발은 지속적 이 아닌 순간적으로 발생하기 때문에 각 급기 밸브가 개폐되는 상태에서 해석 결과를 분석하였으며, 각 실린더 당 급기 밸브가 열려있는 기간은 244 CA°로 동일하다.

Table 2 Valve timing of 7-cylinder charge air valves

charge valve (Number of cylinders)	charge valve open (CA°)	charge valve close (CA°)
4	1	245
6	103	347
7	206	450
5	309	553
3	412	656
1	515	759
2	618	862

VI. 결과 및 고찰

ERV가 설치되지 않았을 경우 발생하는 현상에 대해 분석하기 위해, ERV를 설치하지 않은 급기 매니폴드에 대하여 각 실린더의 급기 밸브에서 점화원이 발생하여 폭발 사고가 발생하는 것으로 수치 해석하였다. 급기 매니폴드의 내부에서 발생하는 폭발로 인한 압력 변화를 분석하고 이러한 과정을 거쳐 ERV를 설치하기 적합한 위치를 선정하였다. 또한, ERV를 설치한 후 급기 매니폴드에 적용되는 ERV의 위치에 따른 결과에 대해 분석해 보았다.

1. 급기 매니폴드의 폭발 현상

ERV가 설치되지 않은 급기 매니폴드의 내부에서 폭발로 인해 발생하는 화염과 압력의 변화에 대해 분석하였다. 결과는 급기 밸브가 닫히거나 열린 상태에 따라 비교하였다.

Fig. 10은 1번 실린더에서 점화된 상태이며 4번 급기 밸브가 최대로 열린 상태에서 온도 및 압력 분포 결과이다.

최대 온도는 2480 K 이며, 입구 경계를 통해 유입되는 연료 가스의 압력이 급기 매니폴드의 7번 급기 밸브 방향으로 전파되며 전파 과정에서 급기 밸브가 열려있는 4번 실린더로 압력이 빠져나가는 것을 확인하였다.

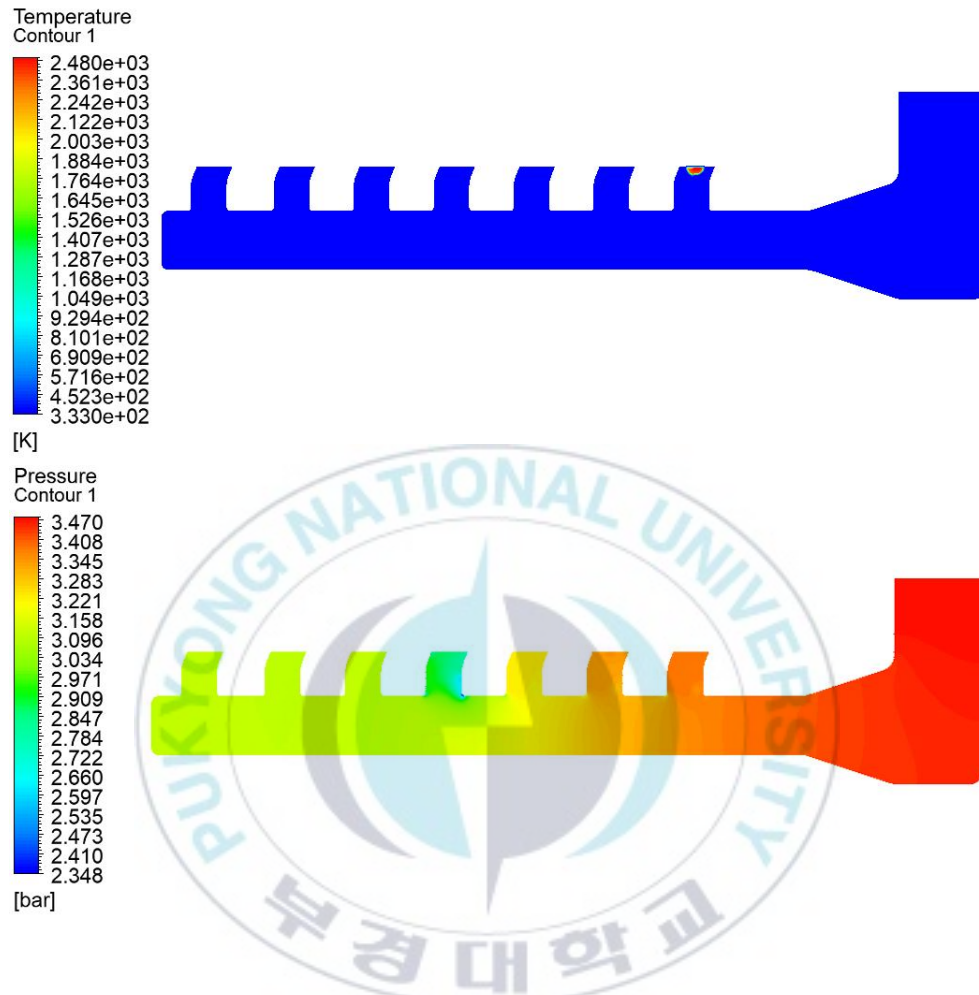


Fig. 10 Temperature and Pressure contour results at No. 4 cylinder charge valve opened (103 CA°)

7번 급기 밸브가 열리는 시점(206 CA°)에서 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 1번 실린더에서 화염이 사라지며 4번 실린더의 위치에서 압력이 상승하였다. 6번 급기 밸브가 열린 상태이기 때문에 압력이 빠져나가고 있으며 압력은 지속적으로 7번 실린더 방향으로 전파되고 최대 압력은 2.6 bar로 나타났다.

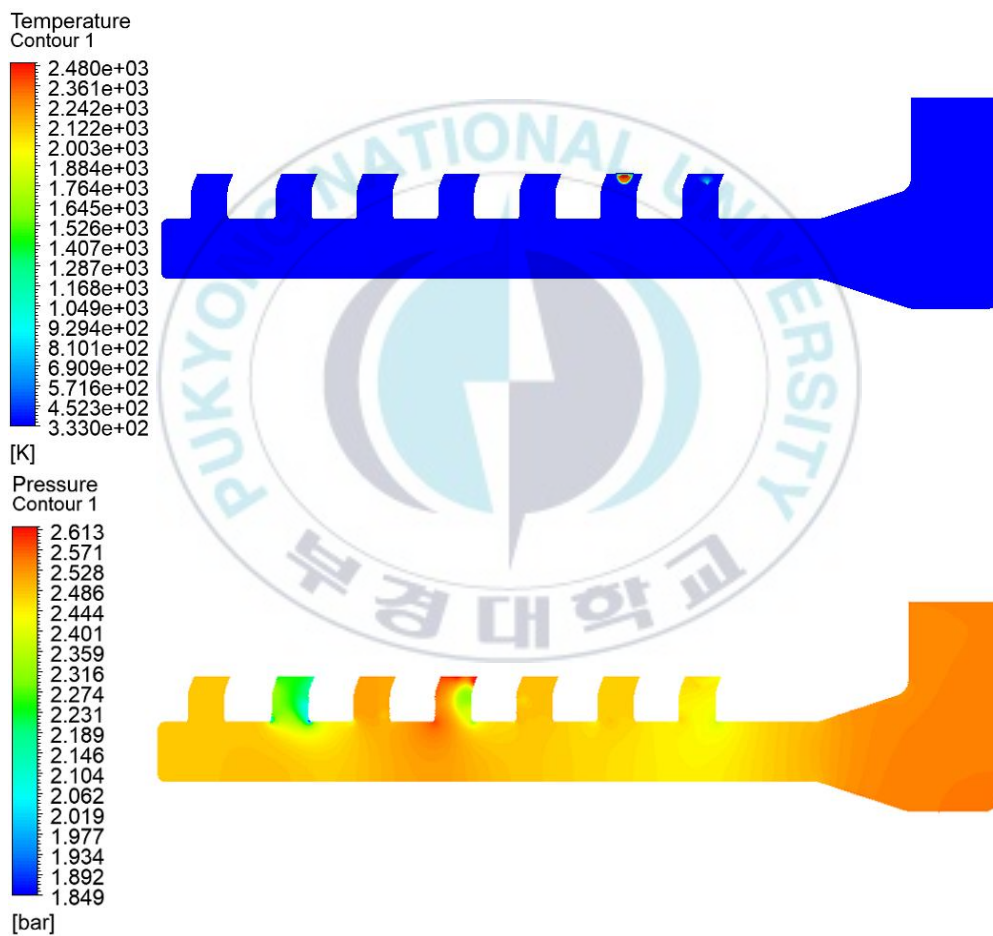


Fig. 11 Temperature and Pressure contour results at No. 4 and No. 6 cylinder charge valves opened (206 CA°)

4번 급기 밸브가 닫히는 시점(245 CA°)에서 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 6번, 7번 급기 밸브가 열리는 시점에서 2번, 4번 실린더의 화염이 전파되지 않았다. 4번 급기 밸브가 닫힌 상태로 인해 기존의 4번 실린더의 압력이 6번, 7번 급기 밸브로 전파되며 급기 매니폴드의 최대 압력은 2.4 bar로 나타났다.

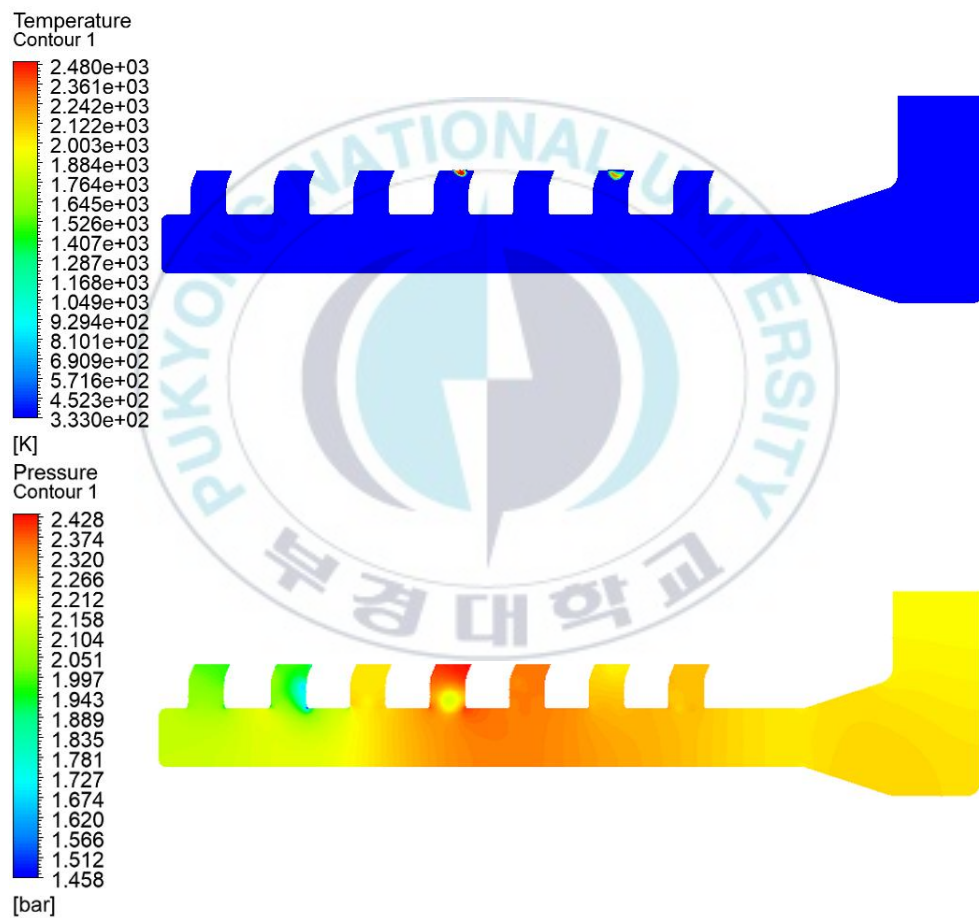


Fig. 12 Temperature and Pressure contour results at No. 6 and No. 7 cylinder charge valves opened (245 CA°)

5번 급기 밸브가 열리는 시점(309 CA°)에서 온도 및 압력 결과를 Fig. 13에 나타냈다. 5번 급기 밸브가 열리기 전의 상태로 1번, 2번 실린더에서 발생하였던 화염은 소멸되고 3번 실린더로 화염이 전파되고 있다. 이전의 결과는 7번 실린더의 압력이 높게 나타났지만, 이 시점에서는 6번 실린더의 압력이 높게 나타났고 최대 압력은 1.9 bar로 나타났다.

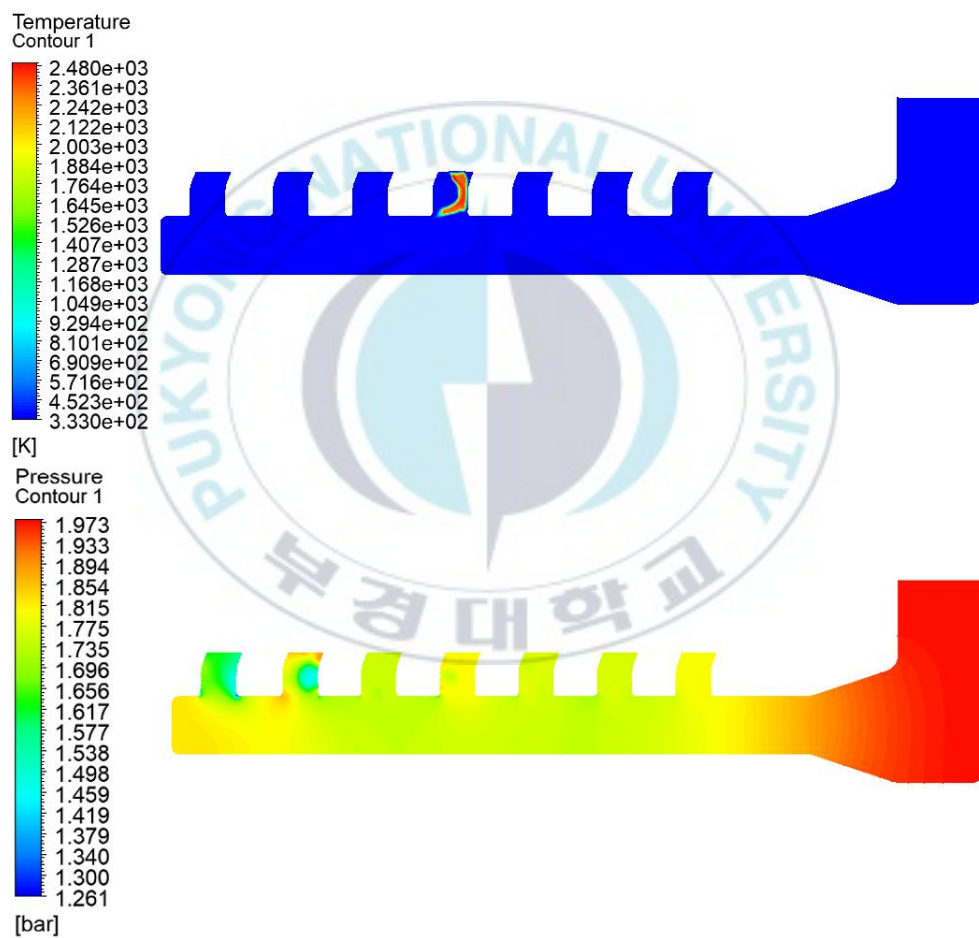


Fig. 13 Temperature and Pressure contour results at No. 6 and No. 7 cylinder charge valves opened (309 CA°)

6번 급기 밸브가 닫히는 시점(347 CA°)에서 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 14에 나타냈다. 4번 실린더에서 발생하는 화염은 5번 급기 밸브가 열리는 영향으로 인해 5번 실린더로 전파되었으며, 6번 실린더로 배출되던 압력이 6번 급기 밸브가 닫히는 영향으로 인해 정체 현상이 나타나고 일부 압력은 7번 실린더를 통해 배출되었으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 1.8 bar로 나타났다.

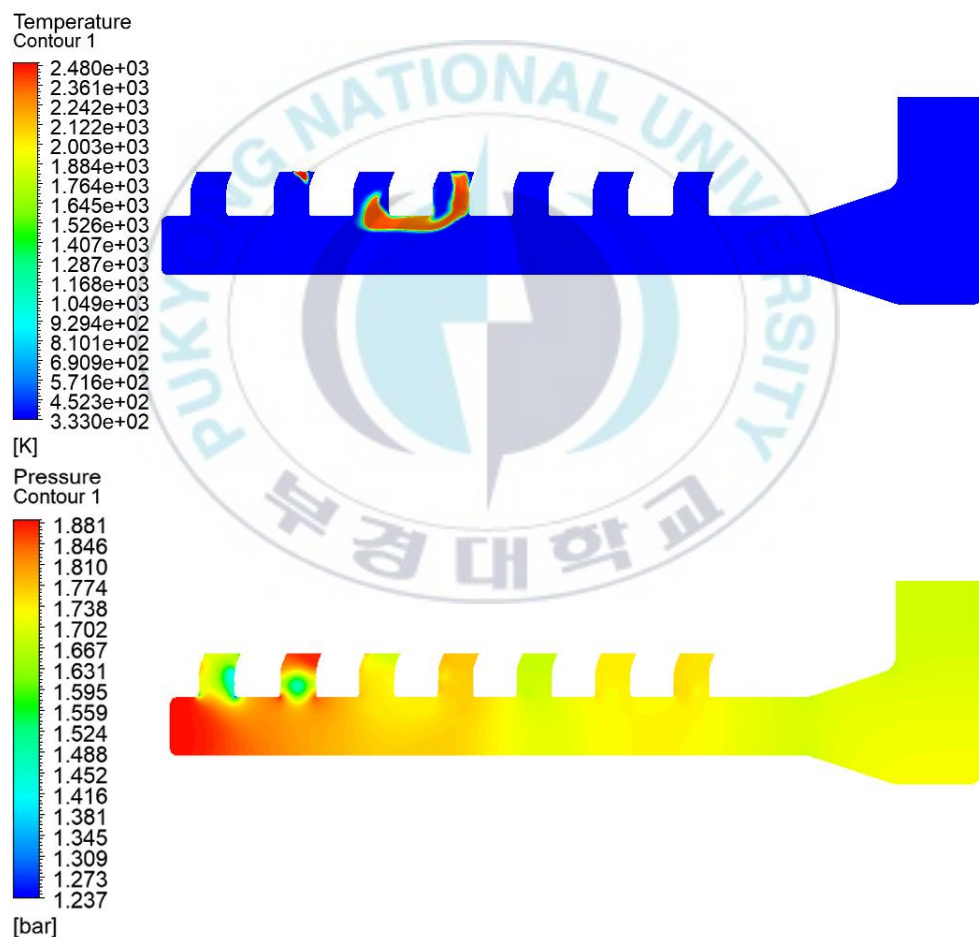


Fig. 14 Temperature and Pressure contour results at No. 7 and No. 5 cylinder charge valves opened (347 CA°)

3번 급기 밸브가 열리는 시점(412 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 15에 나타냈다. 5번 및 6번 실린더의 화염이 7번 실린더로 전파되는 것을 확인하였다. 이전 시점의 6번 및 7번 실린더에서 정체되어있던 압력은 7번 실린더로 빠져나갔으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 2.3 bar로 나타났다.

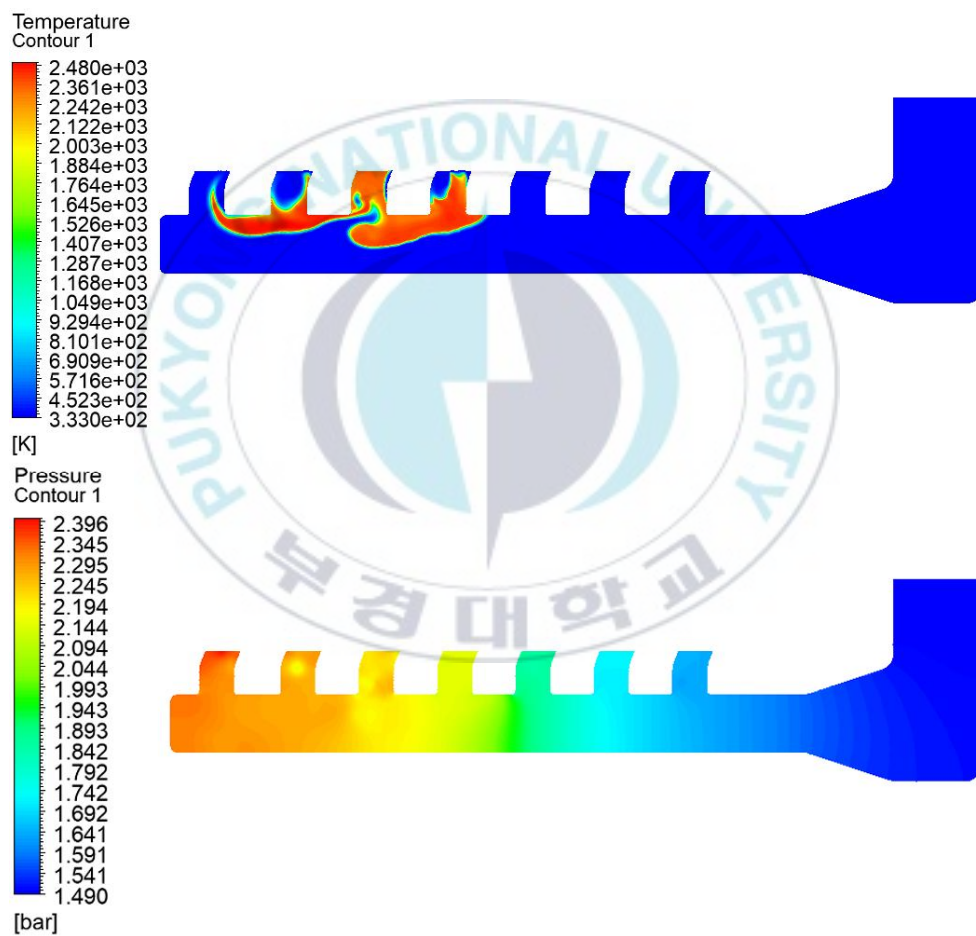


Fig. 15 Temperature and Pressure contour results at No. 7 and No. 5 cylinder charge valves opened (412 CA°)

7번 급기 밸브가 닫히는 시점(450 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 16에 나타냈다. 5번 및 6번 실린더에 있는 화염은 5번 실린더를 통해 빠져나가며, 4번 실린더의 화염은 3번 실린더를 통해 빠져나갔다. 6번 및 7번 실린더의 위치에서 높은 압력이 정체되어 있으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 2.7 bar로 나타났다.

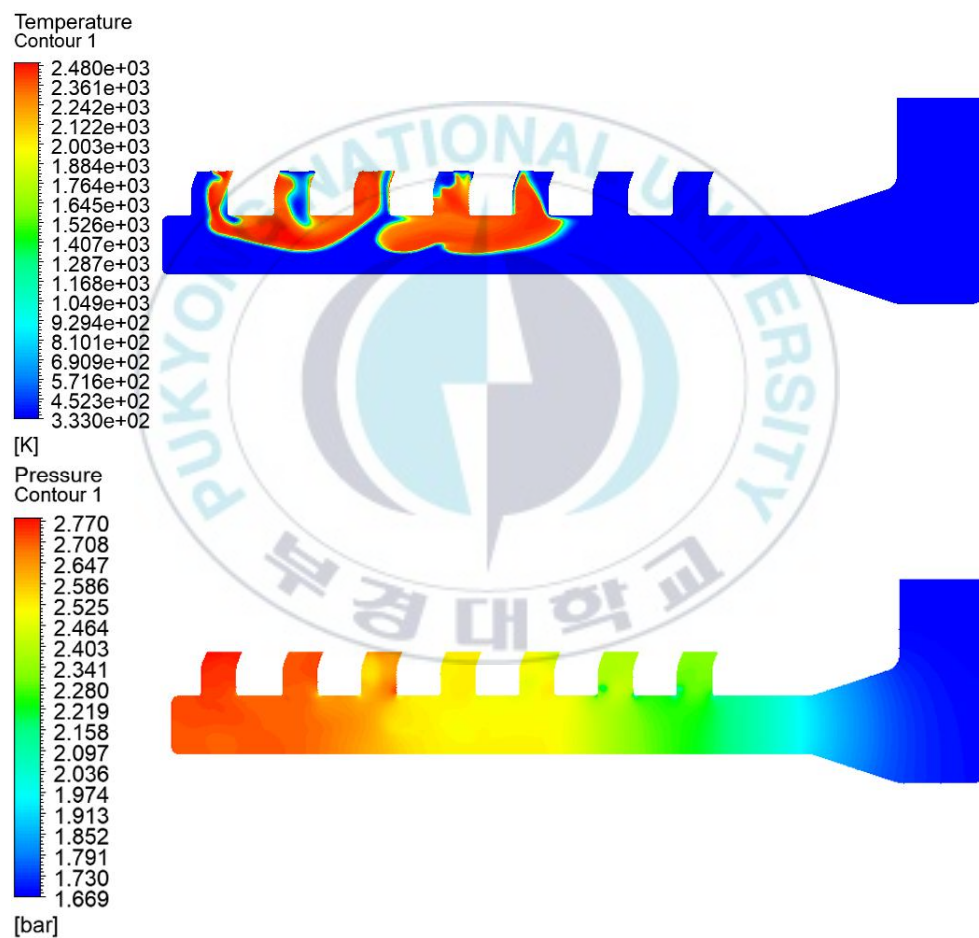


Fig. 16 Temperature and Pressure contour results at No. 5 and No. 3 cylinder charge valves opened (450 CA°)

1번 급기 밸브가 열리는 시점(515 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 17에 나타냈다. 압력이 7번 실린더 옆 벽에 반사되어 입구 방향까지 영향을 미친 것을 확인할 수 있었다. 이 과정에서 일부 압력은 5번 및 3번 실린더로 빠져나가고 급기 압력과 중첩되는 현상을 나타냈으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 4.4 bar로 나타났다.

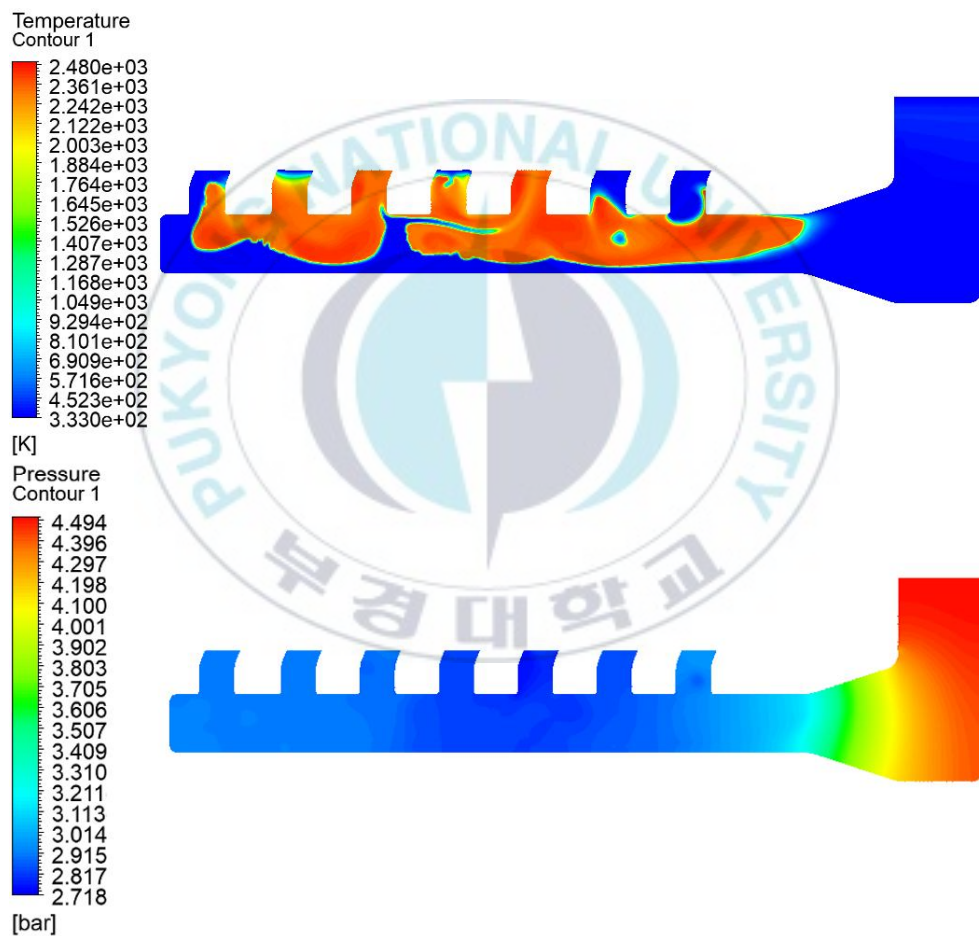


Fig. 17 Temperature and Pressure contour results at No. 5 and No. 3 cylinder charge valves opened (515 CA°)

5번 급기 밸브가 닫히는 시점(553 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 18에 나타냈다. 입구 하단 벽에 압력이 반사되며 동시에 입구 하단의 화염은 3번 실린더를 통해 빠져나갔다. 3번 실린더를 통해 빠져나가는 압력과 7번 실린더 방향으로 전파되는 압력이 나타났으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 4.4 bar로 나타났다.

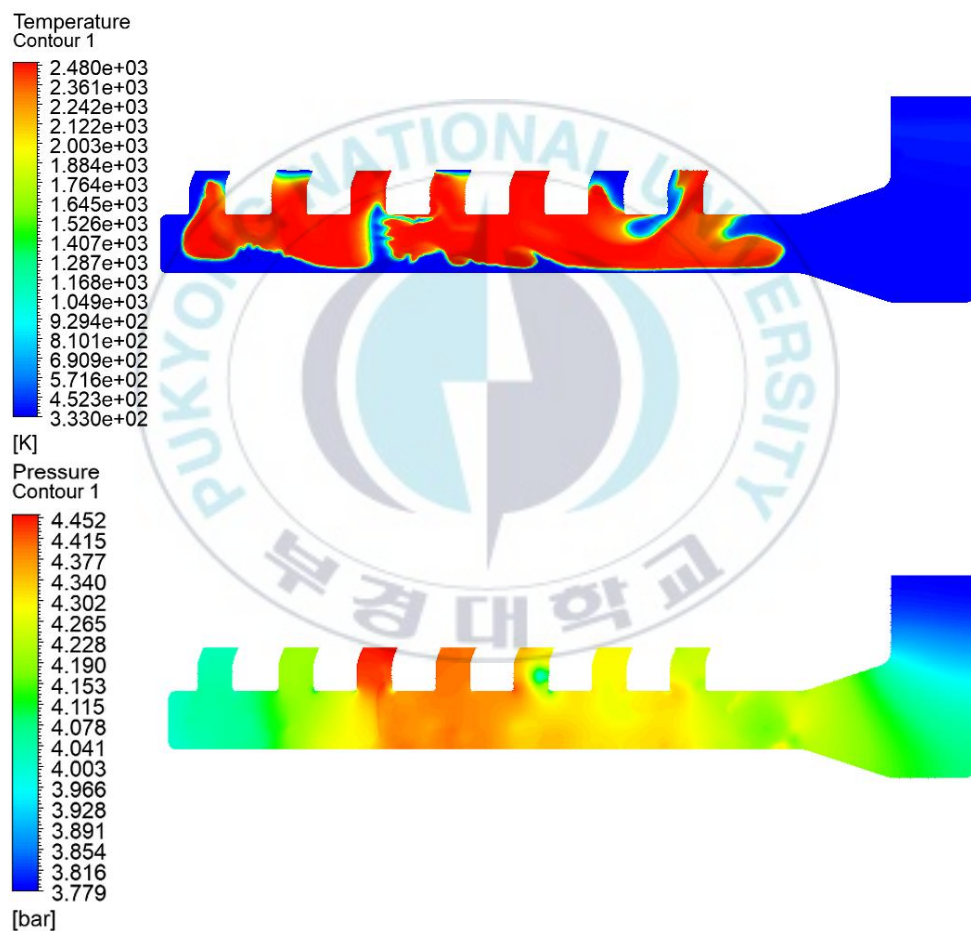


Fig. 18 Temperature and Pressure contour results at No. 3 and No. 1 cylinder charge valves opened (553 CA°)

2번 급기 밸브가 열리는 시점(618 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 19에 나타냈다. 화염은 3번 실린더로 들어가고 7번 실린더 옆 벽에 반사되는 압력이 입구 방향으로 전파되며 화염도 동시에 전파되는 것을 확인하였다. 1번 및 3번 실린더를 통해 압력이 빠져나가고 입구 위치에서 높은 압력이 나타났으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 8.8 bar로 나타났다.

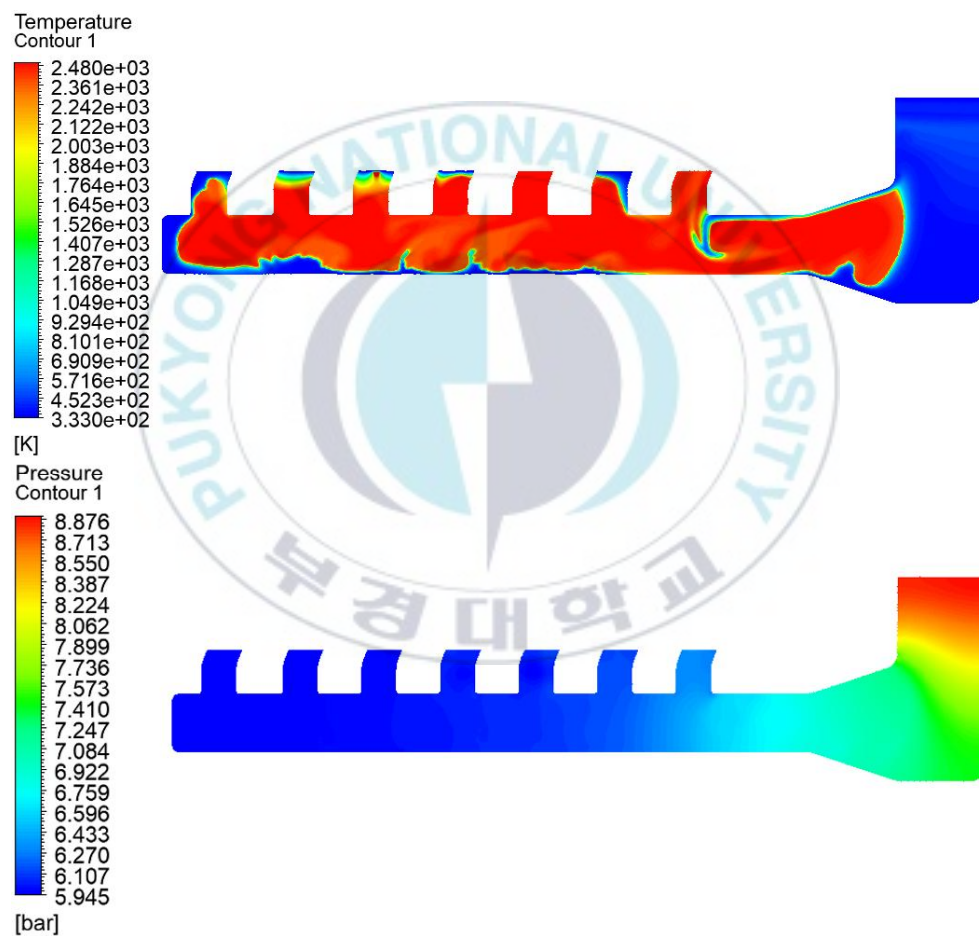


Fig. 19 Temperature and Pressure contour results at No. 3 and No. 1 cylinder charge valves opened (618 CA°)

3번 급기 밸브가 닫히는 시점(656 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 20에 나타냈다. 급기 매니폴드 내부의 전체적으로 화염이 전파되어 있으며 1번 및 2번 실린더를 통해 화염이 빠져나가고 있다. 압력은 7번 실린더를 통해 빠져나가고 있으며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 8.8 bar로 나타났다.

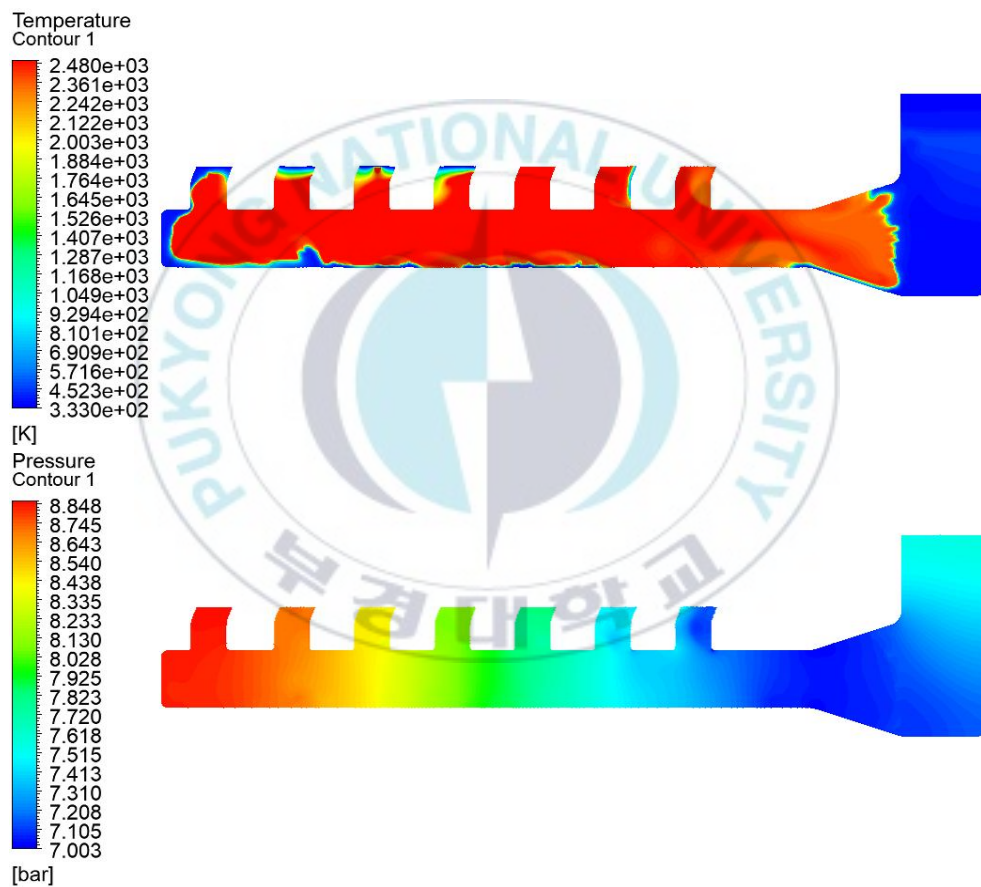


Fig. 20 Temperature and Pressure contour results at No. 1 and No. 2 cylinder charge valves opened (656 CA°)

한 사이클이 끝나는 시점 (720 CA°)의 온도 및 압력 분포 결과를 Fig. 21에 나타냈다. 급기 매니폴드의 화염은 1번 및 2번 실린더로 들어가며, 압력도 1번 및 2번 실린더로 빠져나가지만 입구 하단 부분에서 높은 압력이 형성되며, 급기 매니폴드의 최대 압력은 9.1 bar로 나타났다.

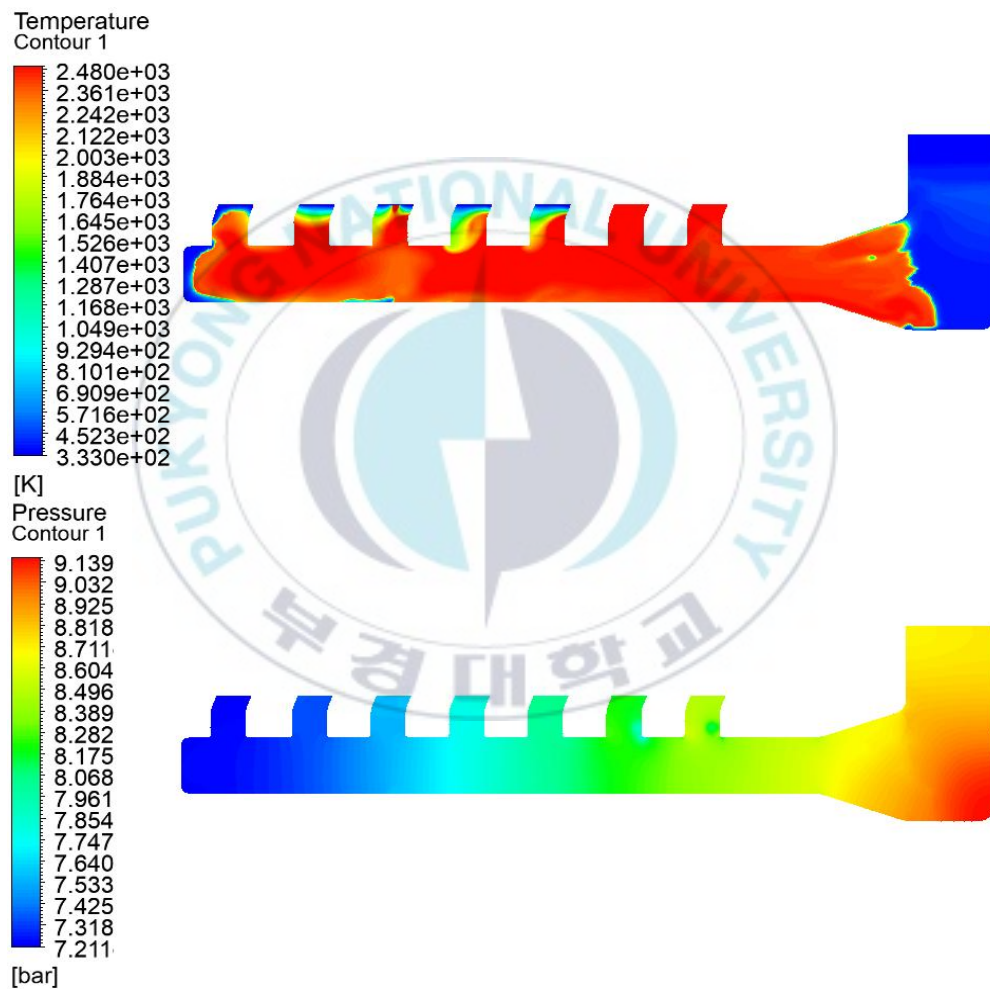


Fig. 21 Temperature and Pressure contour results at No. 1 and No. 2 cylinder charge valves opened (720 CA°)

2. 폭발 릴리프 밸브의 설치

가. 위치 선정

급기 매니폴드에서 폭발 해석 결과를 통해 폭발이 발생하였을 경우 압력이 먼저 상승한 두 위치에 대하여 시간에 따른 압력의 변화를 확인해보았다. Fig. 22는 압력 측정 위치를 나타낸 것으로 Point 1은 급기 하단 부분이며, Point 2는 7번 실린더 하단 부분이다.

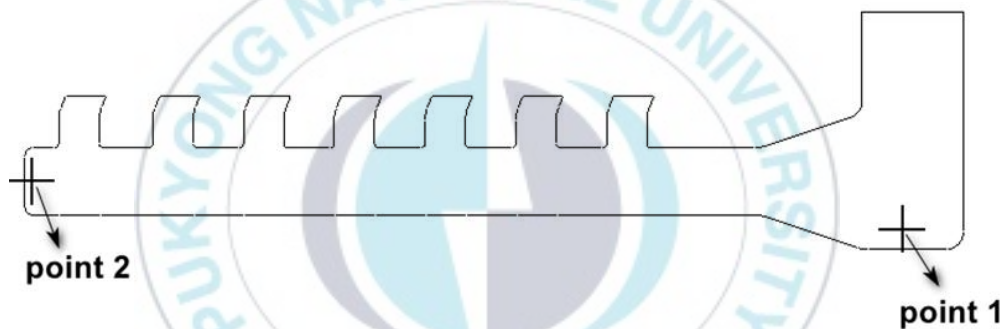


Fig. 22 Pressure monitoring points

Fig. 23은 압력 측정 위치에서 시간에 따른 압력의 변화를 나타낸 것이다. 결과를 비교해보면, Point 1과 Point 2에서 0.04 sec까지 급기 밸브가 열리고 닫히는 과정으로 인해 급기 매니폴드의 압력이 낮은 상태이다. Point 1과 Point 2를 비교하면, Point 1에서 압력이 먼저 ERV의 개방 압력(4.0 bar)에 도달하였고, 0.04 sec부터 급기 매니폴드 내부의 폭발로 인해 압력이 급격히 상승하여, 0.05 sec 이후에는 허용 압력(5.0 bar) 이상으로 압력이 증가하는 것을 확인하였다.

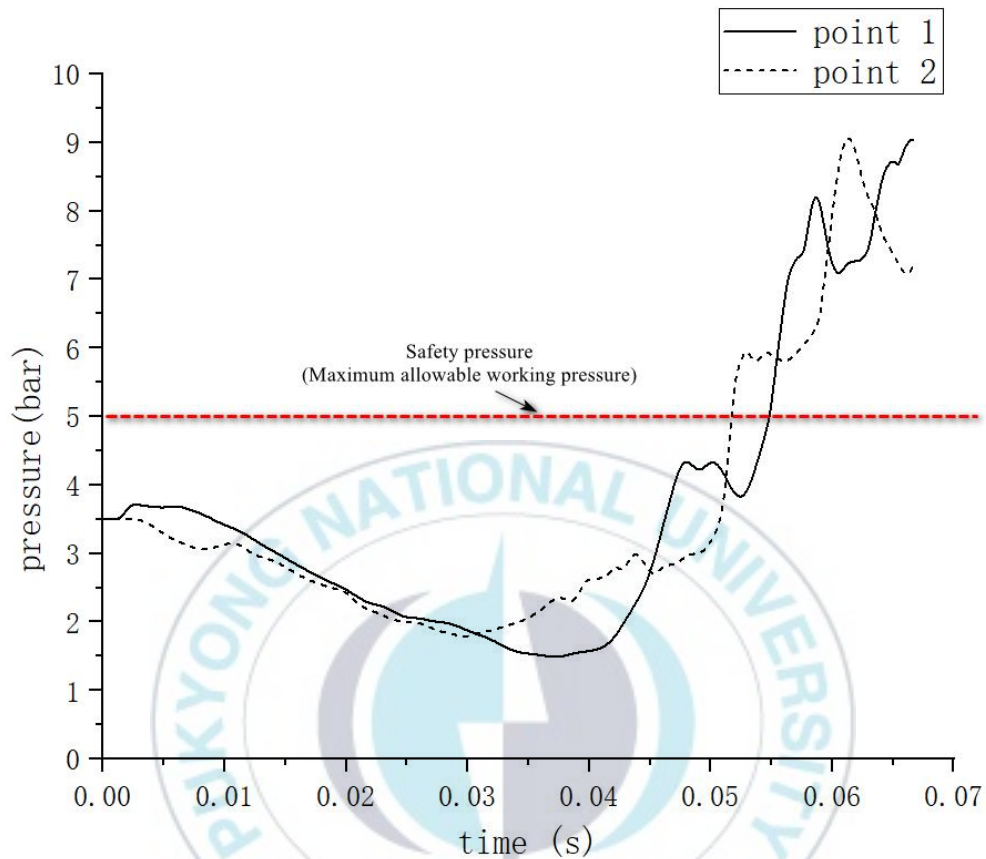


Fig. 23 Pressure plot at monitoring points

급기 매니폴드에서 허용 압력 이상의 압력 상승을 감소시키기 위해 ERV를 설치한 결과를 비교하였으며, ERV의 설치는 아래의 3가지 경우에 대하여 수치 해석 하였다.

Case 1: ERV를 입구 하단(Point 1)에 한 개 설치

Case 2: ERV를 7번 실린더 하단(Point 2)에 한 개 설치

Case 3: ERV를 입구 하단(Point 1) 및 7번 실린더 하단(Point 2)에 각각 개씩 설치

나. 입구 하단에 한 개 설치

Fig. 24는 ERV를 입구 하단(Point 1)에 한 개 설치한 위치를 나타낸 것이다. ERV가 설치되지 않은 급기 매니폴드에서 폭발 해석 결과를 통해 Point 1 및 Point 2를 비교하면 Point 1에서 압력 결과가 먼저 ERV의 개방 압력인 4 bar에 도달하였다.

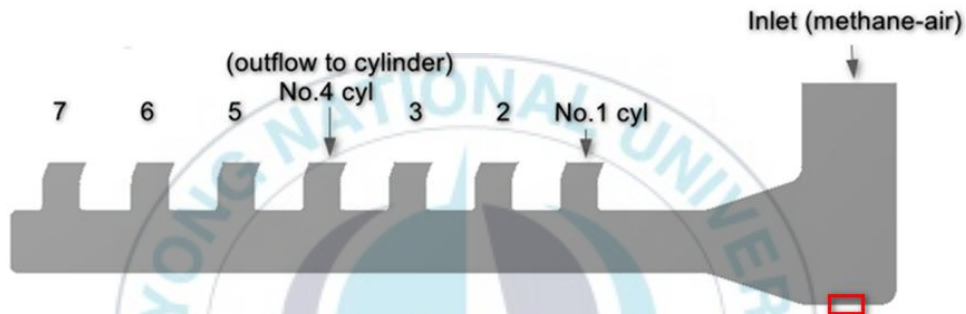


Fig. 24 Modeling with an explosion relief valve installed - point 1
(A ERV was installed at bottom of the inlet)

Fig. 25는 Case 1에 대하여 Point 1 및 Point 2의 시간에 따른 압력 결과이다. Point 1 및 Point 2에서 0.04 sec까지 급기 밸브가 열리고 닫히는 과정에서 압력이 하강해있는 상태이다. 0.04 sec부터 급기 매니폴드의 내부 폭발로 인해 압력이 급격하게 상승하는데 0.047 sec까지 급기 밸브가 ERV의 개방 압력을 초과하기 때문에 ERV가 열려 압력이 배출되고 일부 고압은 7번 실린더 부근에서 나타났다. ERV가 열린 이후 압력이 순간적으로 4.9 bar까지 하강하였다가 다시 압력이 증가하지만, 허용 압력인 5.0 bar 이하의 결과가 나타났으며 ERV가 미설치된 경우에 비해 최대 압력은 48.7% 감소하였다.

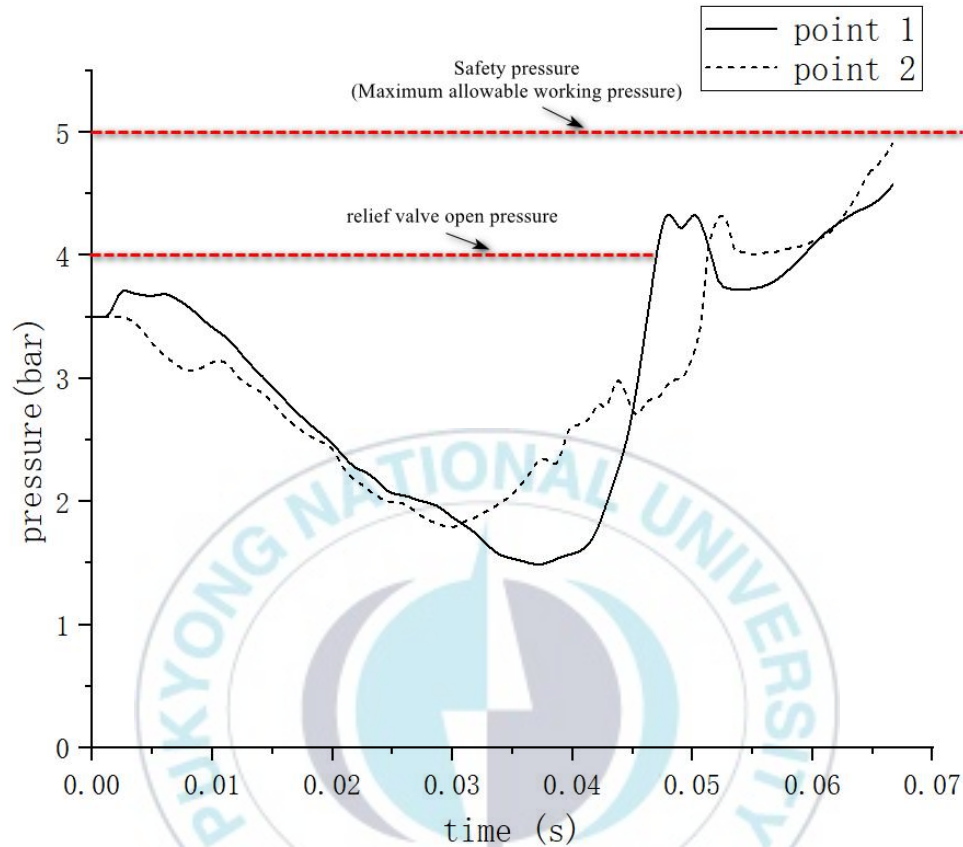


Fig. 25 Pressure plot at monitoring points
(A ERV was installed at bottom of the inlet)

다. 7번 실린더 하단에 한 개 설치

Fig. 26은 7번 실린더 하단(Point 2)에 ERV를 설치한 위치를 나타낸 것이다. ERV가 설치되지 않은 급기 매니폴드에서 폭발 해석 결과에서 Point 1 및 Point 2를 비교하면 Point 2에서 압력 결과가 먼저 허용 압력 5.0 bar 이상으로 증가한다.

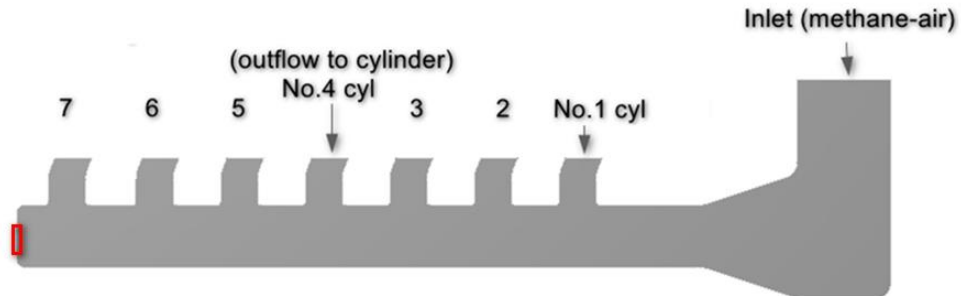


Fig. 26 Modeling with an explosion relief valve installed – point 2
(A ERV was installed under the No.7 cylinder)

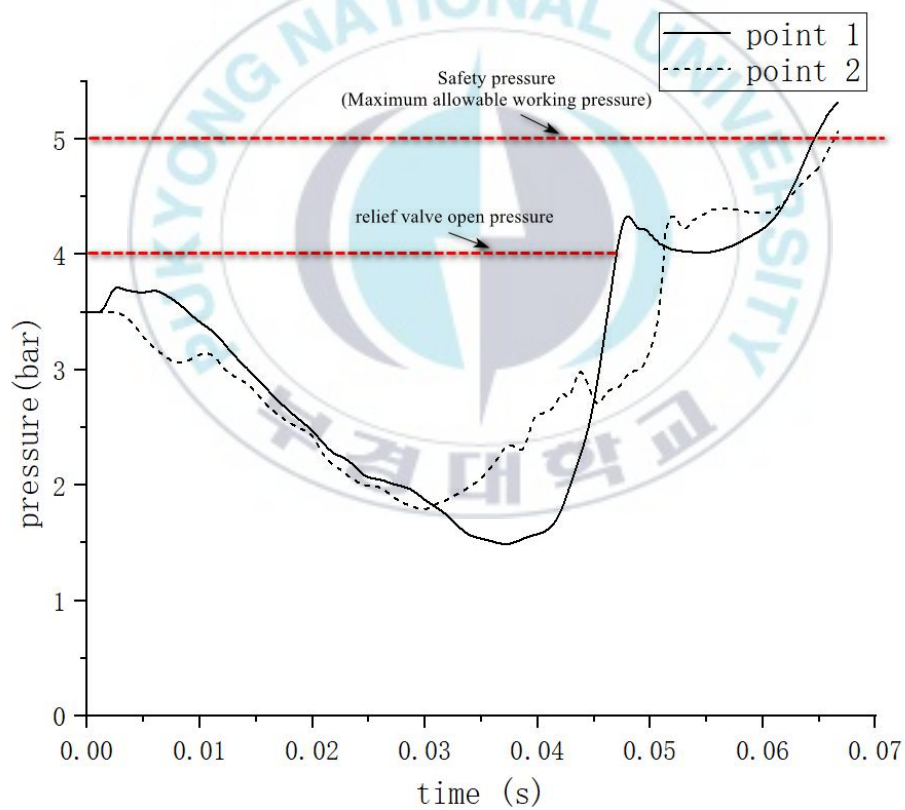


Fig. 27 Pressure plot at monitoring points
(A ERV was installed under the No.7 cylinder)

Fig. 27은 Case 2에 대하여 Point 1 및 Point 2의 시간에 따른 압력 결과이다. 7번 실린더 하단(Point 2) 위치에서 ERV의 개방 영향으로 인해 압력이 하강하여 최종적으로 급기 매니폴드에서 압력은 5.3 bar까지 하강한다. 하지만, 급기 매니폴드의 허용 압력인 5.0 bar를 초과하였으며 ERV를 미설치하였을 경우에 비해 최대 압력은 45.4% 감소하였다.

라. 입구 하단 및 7번 실린더 하단에 각 한 개씩 설치

Case 1과 Case 2를 비교하면, Case 1이 급기 매니폴드의 허용 압력을 초과하지 않고 ERV가 미설치 된 경우에 비해 급기 매니폴드의 최대 압력은 48.7% 감소하였다. 하지만, Case 1은 4.9 bar까지 상승하여 허용 압력까지 0.1 bar 차이로 안정적인 상태라 판단할 수 없었다.

따라서, ERV를 입구 하단(Point 1) 및 7번 실린더 하단(Point 2)에 각 한 개씩 설치하여 안정적인 상태가 되는지 확인할 필요성이 있었다. Fig. 28은 ERV를 입구 하단(Point 1) 및 7번 실린더 하단(Point 2)에 각 한 개씩 설치한 위치를 나타낸 것이다.

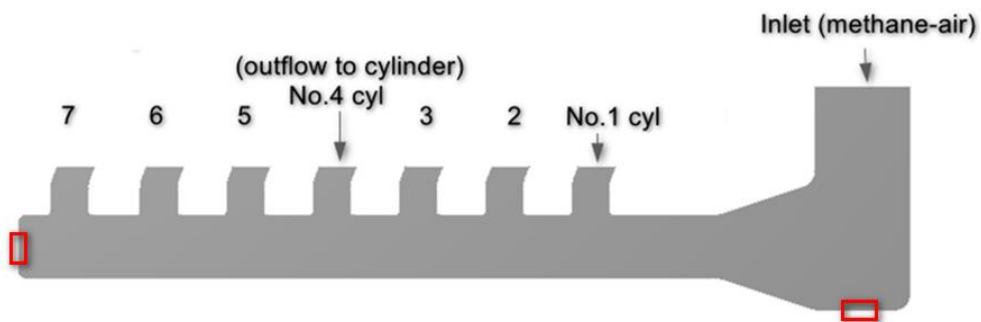


Fig. 28 Modeling with explosion relief valves installed (ERVs were installed under the No.7 cylinder and inlet)

Fig. 29는 Case 3에서 Point 1 및 Point 2에서 시간에 따른 압력 결과를 나타낸 것이다. 급기 매니폴드에서 발생한 폭발로 인해 상승한 압력이 입구 하단에 설치된 ERV로 빠져나가고 동시에 7번 실린더 하단 부분에서도 4 bar이상에서 ERV가 열려 압력이 빠져나가고 있다. ERV가 열린 이후 급기 매니폴드의 압력은 3.4 bar까지 하강하였고, 급기 매니폴드의 최대 압력은 허용 압력인 5.0 bar 이하로 나타났고 또한, ERV를 미설치한 경우에 비해 65% 감소하였다.

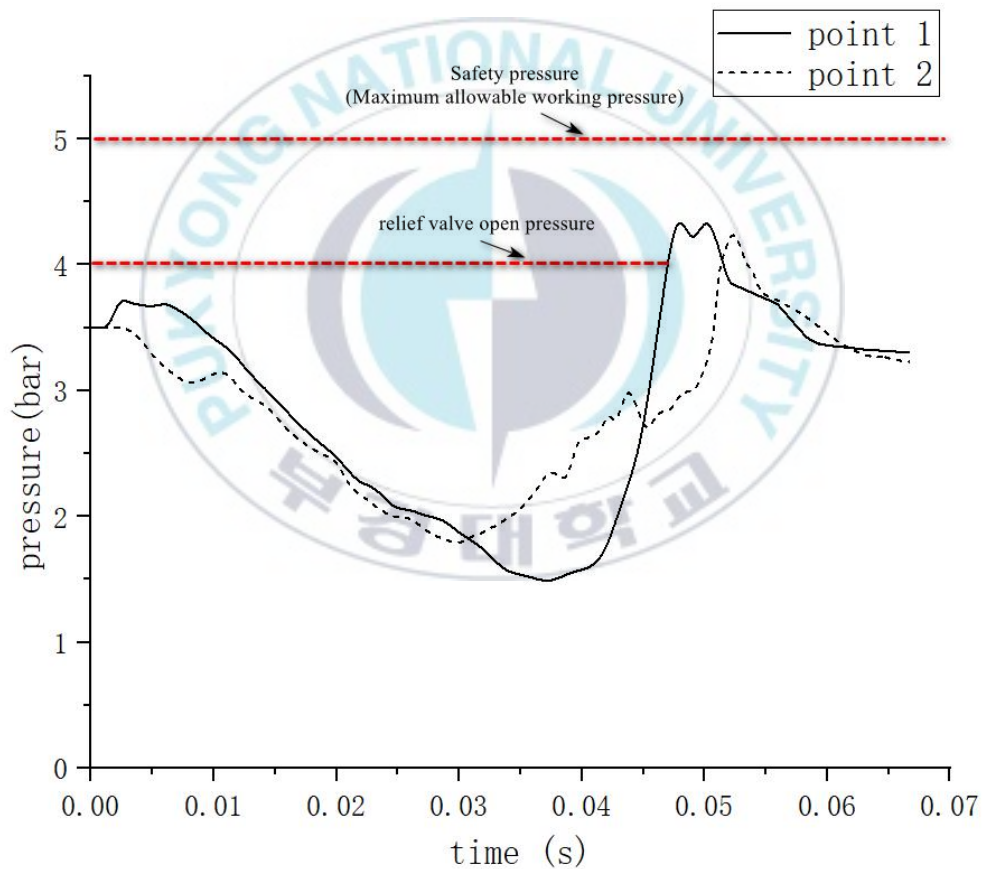


Fig. 29 Pressure plot at monitoring points
(ERVs were installed under the No.7 cylinder and inlet)

최종적으로, ERV를 두 개 설치하였을 경우에 급기 매니폴드에 폭발이 발생하여도 안정적으로 허용 압력 이하의 상태를 유지할 수 있었다.

ERV의 크기는 국제선급협회 등의 규정에 따라 DF 엔진의 사양과 급기 매니폴드의 규격에 따라 정하고 있으며, 본 연구에서는 정해진 규격의 ERV를 대상으로 모델링 하였으나, 향후 ERV를 선정하는데 ERV의 크기를 추가적으로 고려해야 할 필요가 있을 것으로 생각한다.



VII. 결론

폭발 릴리프 밸브(explosion relief valve, ERV)가 설치된 이중연료 엔진의 급기 매니폴드에서 발생하는 폭발 현상에 대해 수치 해석하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) ERV를 설치하지 않은 급기 매니폴드에서 폭발 현상이 발생할 경우, 압력은 최대 9.7 bar까지 상승하였다. 급기 매니폴드의 입구 하단과 7번 실린더 아래에서 압력 상승이 가장 높게 나타났으며, 이 부분에 ERV를 설치해야 할 필요가 있었다.

2) ERV를 급기 매니폴드의 입구 하단에 설치할 경우, ERV가 열린 이후 압력 결과는 4.9 bar까지 감소하였고, 7번 실린더 하단에 설치할 경우, ERV가 열린 이후 압력 결과는 5.3 bar까지 감소하였다. 급기 매니폴드의 허용 압력 5.0 bar 이하인 안정적 상태를 위해서 ERV 한 개를 설치하는 것은 적합하지 않았다.

3) ERV를 급기 매니폴드의 입구 하단 및 7번 실린더 하단에 각 한 개 설치하였을 경우, ERV가 열린 이후 압력 결과는 3.4 bar까지 감소하여 급기 매니폴드의 허용 압력을 초과하지 않았다.

급기 매니폴드에서 폭발 현상이 발생하였을 경우, 허용 압력 이하로 압력을 감소시키고 이중연료 엔진의 안정적인 운전을 위해서는 두 개의 ERV를 설치해야 할 필요가 있었다. 수치 해석을 통해 압력 상승이 높게 나타나는 위치를 확인할 수 있었으며, 이를 활용하여 ERV의 설치 위치를 선정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. IMO (2020), Fourth IMO GHG Study 2020.
2. EUROPEAN UNION MRV REGULATION 2018.
3. RESOLUTION MEPC.304(72) ANNEX 11 2018.
4. IMO (2020), IMO 2020 - cleaner shipping for cleaner air.
5. Richard G. Newell, Daniel Raimi, Seth Villanueva, and Brian Prest (2020), Global Energy Outlook 2020: Energy Transition or Energy Addition, Resources for the Future.
6. IMO (2020), IMO 2020 - cutting sulphur oxide emissions.
7. Ralph McGill, William Bill Remley, and Kim Winther(2013), Alternative Fuels for Marine Applications, IEA-AMF, PP.16-17.
8. Tommaso Iannaccone (2020), Sustainability of cruise ship fuel systems: Comparison among LNG and diesel technologies, Journal of Cleaner Production.
9. 한국해운협회 (2020), 해운산업의 중요성
10. 발전공기업도 친환경선박으로 전환한다, (산업통상자원부, 2021. 7. 7).
11. 이상익 (2015), 액화천연 가스 연료 선박의 연료 공급 장치 폭발 잠재 위험 분석, 한국마린엔지니어링학회지, 39(9), pp. 918-922, pp. 918-922.
12. 이효렬, 안중환, 김동건 (2016), LNG 연료 추진 선박용 크랭크실 릴리프 밸브 화염방지기의 유동해석 및 폭발시험, 한국생산제조학회지, 25(3), pp. 171-176.

13. Kees van Wingerden (2016), LNG-Engine Safety: Design of Protective Measures Using CFD, Chemical Engineering Transactions, Bergen, Norway.
14. James M. Wilson and Philip G. Tyrer (1980), Explosion Protection for Diesel Engines Offshore, Society of Petroleum Engineers, London, United Kingdom.
15. John A. Alderman, PE, CSP, (2005), Introduction to LNG Safety, PROCESS SAFETY PROGRESS, 24(3), pp. 144-151.
16. Johannes Kühmayer and Johannes Besau (2002), EXPLOSION RELIEF VALVE, USOO6488048B2.
17. J. Kindracki, A. Kobiera, G. Rarata and P. Wolanski (2007), Influence of ignition position and obstacles on explosion development in methane - air mixture in closed vessels, 20(4-6), pp. 551-561.
18. Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Engine & Machinery Division, INSTRUCTION BOOK VOLUME 1-Engine type H17/28.
19. ANSYS. Inc. (2015), Fluent Theory Guide, p. 81.
20. T. Nguyen, C. Strebing, G.E. Bogin Jr. and J. Brune (2021), A 2D CFD model investigation of the impact of obstacles and turbulence model on methane flame propagation, Process Safety and Environmental Protection, 146, pp. 95-107.
21. Benedetta Franzelli, Eleonore Riber, Laurent Y.M. Gicquel and Thierry Poinot (2012), Large Eddy Simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame, Combustion and Flame, 159(2), pp. 621-637.

22. Szal Kundu, Jafar Zanganeh and Behdad Moghtaderi (2016), A review on understanding explosions from methane - air mixture, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, pp. 507-523.
23. B. Vanderstraeten, D. Tuerlinckx and J. Berghmans (1997), Experimental study of the pressure and temperature dependence on the upper flammability limit of methane/air mixtures, *Journal of Hazardous Materials*, 56, pp. 237-246.
24. M. Gieras, R. Klemens, G. Rarata and P. Wolan'ski (2006), Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40 dm³ at normal and elevated temperature, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, pp. 263 - 270.
25. 이효렬, 안중환 (2015), LNG 연료추진 선박용 크랭크실 릴리프 밸브 스프링의 설계 및 평가, *한국생산제조학회지*, 24(3), pp. 263-269.
26. Satish Kumar, Hyouk Tae Kwon, Kwang Ho Choi, Wonsub Lim, Jae Hyun Cho and Kyungjae Tak (2011), LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development, *Applied Energy*, 88 pp. 4264-4273.