

# 가스추진선박의 가스연료공급시스템에 대한 CFD를 이용한 정량적 위험도 해석에 관한 연구

김기평<sup>1</sup>·김대현<sup>2</sup>·이영호<sup>3,†</sup>  
(사) 한국선급 전략개발팀<sup>1</sup>  
(사) 한국선급 연구소<sup>2</sup>  
한국해양대학교 기계공학부<sup>3</sup>

## A Study on the Quantitative Risk Analysis Using CFD for the Fuel Gas Supply System of Gas Fueled Ship

Kipyong Kim<sup>1</sup>·Daeheon Kim<sup>2</sup>·Youngho Lee<sup>3,†</sup>  
Korean Register Strategic Planning Team<sup>1</sup>  
Korean Register Machinery R&D Center<sup>2</sup>  
Korea Maritime and Ocean University Division of Mechanical Engineering<sup>3</sup>

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.

LNG has significant advantages in regard to environmental aspects comparing with conventional fuel oil. In fact, it is estimated that NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emission can be reduced by about 90% and 100%, respectively in case of using LNG as a fuel. LNG-fuelled ship has been considered to be the best option both from an environmental and an economic point of view. Along with these trends, some major shipyards and Classification Societies have started to carry out the risk-based system design for LNG-fuelled ship such as passenger ship, platform supply vessel and large container vessel etc. However, new conceptual gas fuelled ship has high risk level compared with vessel using traditional crude oil especially in view of gas explosion accident. Therefore safety area where installed fuel gas supply system is required risk based system design with special considerations. On this paper, the entire process necessary for the quantitative risk analysis was explained to meet the satisfactory safety level of gas fuelled ship.

**Keywords** : Gas fuelled ships(가스추진선박), Fuel gas supply system(가스연료공급시스템), Risk assessment(위험도평가), Quantitative risk analysis(정량적 위험도 해석), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

## 1. 서론

유럽 연합(EU: European Union)은 신 기후체제의 논의와 실행을 선도하고 있다. 2014년 10월, EU 합의 내용에 따르면 2030년 이후에는 1990년 대비 온실가스 배출량을 40% 감축하고 향후 각국의 상황을 고려하여 회원국별로 감축 부담을 배분할 예정이다. 해운산업계에서도 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물과 같은 배출가스에 대한 규제를 강화하고 있으며 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)는 선박으로부터의 대기오염을 줄이기 위해 선박으로부터의 오염 방지를 위한 국제협약 MARPOL(International Convention for the Prevention of Marine

Pollution from Ships) 규정을 발효하여 2020년에는 현재 환경오염물질 배출량의 5~20% 수준으로 줄이고자 노력하고 있다.

LNG를 연료로 사용할 경우, NO<sub>x</sub> 배출량은 80~90%, CO<sub>2</sub>는 25% 저감되며 SO<sub>x</sub>, PM(Particulate Materials) 배출량은 'Zero'에 근접하게 되어 국제환경기준에 적합하게 된다. 가스추진선의 주요 시스템으로는 연료저장 시스템, 연료공급 시스템 및 엔진 시스템이 있으며 이들의 성능최적화를 위한 지속적인 기술개발이 이루어지고 있다. 이미 유럽을 비롯한 주요 국가에서는 약 50여척의 가스추진선이 운용되고 있으며 2020년까지 약 30%의 현존선 및 신조선이 가스추진선(gas fuelled ship)으로 대체될 것으로 예측되고 있다.

하지만, 이와 같은 새로운 개념이 탑재된 가스추진선에 대해

서는 안전 수준을 동종의 유사 선박 이상으로 확보할 필요가 있다 (IMO, 2004). 이를 위해서는 위험도 기반 관련 기술을 개발하여 신개념 선박 설계 지침, 안전성 평가지침 및 국제기준 제정에 기여할 수 있는 안전관리기술의 기반을 확보할 필요가 있다.

## 2. 안전성평가

D조선사에서 제시한 연료 공급 시스템(FGSS: Fuel Gas Supply System)에 대한 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 제시된 선박은 Crude Oil Tanker이며 FGSS가 갑판 상부에 위치한다 (DSME, 2010). 화물 적재량에 영향을 주지 않으며 사고 시 주거 구역 등의 안전구역에 영향을 주지 않기 위해서는 아래의 Fig. 2에 표시한 위치가 선정될 가능성이 크다. 이 경우 연료탱크로부터 FGSS를 통과하여 엔진에 이르기까지의 천연가스 이송은 가스 누출 및 이로 인한 화재/폭발의 위험을 정량적으로 고려하여 위험도를 산정하고 안전성을 평가하는 절차를 필요로 하게 된다.

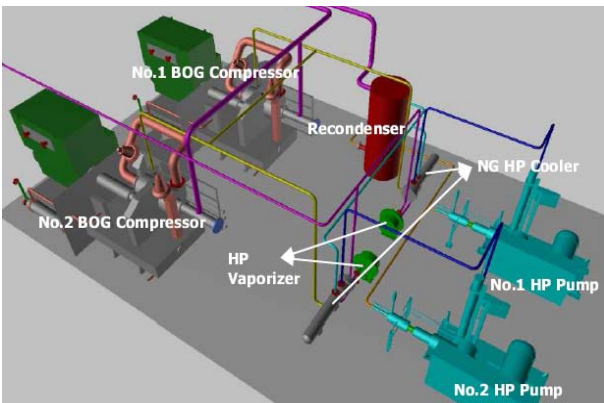


Fig. 1 Arrangement example for DSME HiVAR FGSS

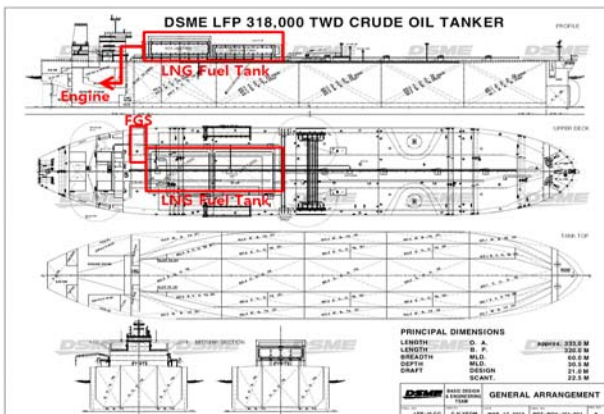


Fig. 2 Concept of FGSS installation by DSME in 2010

### 2.1 HAZID

HAZID(Hazard identification)의 목적은 새로운 개념으로부터

파생될 수 있는 위험요소를 위험도 관점에서 분석하는 것이므로 구획에 따른 잠재된 위험요소를 관리 가능한 부분들로 분류하여 평가한다 (Ramachandran & Charters, 2011). 본 연구에서 HAZID의 대상은 가스추진선이며 High-level HAZID study가 수행된다. 각각의 시스템 및 구역에 대해 잠재적인 위험요소가 지적되고 여기에 이미 적용되어 있는 Safeguards가 식별된다 (ABS, 2000). 정량적 위험 순위가 정해지는 근거로써 Table 1과 같은 Risk ranking matrix가 설정되고 위험 구역 혹은 시스템의 특성 및 위험도를 낮출 수 있는 권고사항을 제안하게 된다. HAZID 회의 이후에는 생성된 Worksheet를 회의 구성원에게 회람시켜 Feedback을 받으며 HAZID 팀 리더는 제안 및 권고사항들을 수정하여 최종 보고서를 작성하게 된다.

Table 1 Definition of severity index

		Consequence				
		Incidental	Minor	Serious	Major	Catastrophic
Frequency	RI	1	2	3	4	5
	Frequent	5	L	M	H	H
	Occasional	4	L	L	M	H
	Seldom	3	L	L	M	M
	Remote	2	L	L	L	M
Unlikely	1	L	L	L	L	M

### 2.2 HAZID Result

가스추진선 관련 HAZID에서 다양한 위험요소, 빈도, 심각도 및 Safeguards 등이 조사되었다. 추가적인 Safety action이 요구되었고 그에 따른 대응방안이 제시되었다. 총 110개의 위험요소가 식별되었으며 58개는 인식할 가치가 있는 요소, 53개는 시스템에 큰 영향을 주지 않거나 이미 식별되어 조치가 취해진 요소로 재식별 되었다. Table 2은 Hazard category에 따른 유용가능하거나 그렇지 않은 요소들을 분류한 표이다 (SAFEDOR, 2005).

Table 2 Distribution for hazard category

	Hazard Category									Sum
	Section 1-(1)	Section 1-(2)	Section 1-(3)	Section 1-(4)	Section 1-(5)	Section 2-(1)	Section 2-(2)	Section 2-(3)	Section 3-(1)	
N.A. Hazards	7	6	3	3	7	3	5	13	5	52
Available Hazards	15	2	1	0	1	22	10	6	1	58

가스추진선에 탑재된 FGSS는 기능적 특성상 중요한 위험 인자로 인식되었으며 총 50개의 위험요소가 식별되었다. Table 3에 정리한 바와 같이 High level은 5개, Medium level은 15개, Low level은 27개 그리고 Rank 외의 요소가 3개였다.

Table 3 Specific number of the identified hazards classified by the risk ranking

Risk ranking	Number of findings
H	5
M	15
L	27
Not ranked	3

- ※ The high risk (H) ranked hazards are 5 in total:
- Crew error in LNG handling;
  - Aggressive attack on LNG fuel tank;
  - Location of FGS room (close to accommodation, etc);
  - Access/exit to FGS room; and
  - Frequent leaks in FGS room

HAZID 내용을 정리하면, “위험도는 적절한 해석 기술을 통해 분석되어야 하며 기능 손실, 구성품의 손상, 화재, 폭발 및 전기적 충격 등에 대해 고려되어야 한다. 이와 함께 위험도 완화 방법이 제시되어야 하며 문서로 남겨져야 한다.”로 요약할 수 있다. 또한, Gas detection과 관련한 IGF Code 15.8.4는 가스 누출과 관련하여 다음과 같이 언급하고 있다. “The detection equipment shall be located where gas may accumulate and in the ventilation outlets. Gas dispersal analysis or a physical smoke test shall be used to find the best arrangement (IMO, 20019).” 이는 가스누출센서의 최상의 배치를 위해 가스누출해석을 수행하는 것을 권장함을 의미한다 (IMO, 2001). 이러한 가스누출해석은 가스누출 관련 방정식 대입으로 예측할 수도 있으나 수치해석 기법을 적용한 해석법이 본 연구에서는 적용되었다.

### 3. 가스누출량 산출

FGS room의 가스누출 발생량을 화학공정 모사기(공정해석 프로그램: FlowNex)를 이용하여 예측하였다. 가스누출해석을 위해서는 시스템을 구성하는 각각의 장비들의 특성을 이해하고 배치 및 구성을 최적화하여 설계를 완성한 이후, 가스누출이 발생할 가능성이 있는 시나리오를 예측하는 작업이 요구된다. 개념단계에서의 설계가 완료되면 Fig. 3과 같은 PFD(Piping Flow Diagram)로 작성되며 이를 활용하여 공정해석을 수행하게 된다.

공정 해석은 주로 시스템의 성능 향상을 위해 수행된다. 하지만 본 연구에서는 가스누출 특성을 분석하기 위한 목적으로 이에 적합한 간략화된 해석을 수행하였다. Fig. 4는 가스공급 시스템에서 ME-GI(MAN Electronic Gas Injection) 엔진으로 300 bar의 가스 연료가 공급되는 시스템의 경계조건을 나타내며 "FlowNex"를 통하여 Network로 구성한 것이다. 유입구의 압력은 301.2 bar로 설정하였으며 출구의 압력은 배관에서의 압력손실을 감안하여 301 bar로 설정하였다. 배관 내부의 질량 유량은 2.6 kg/s, 배관의 길이는 2 m로 가정하고 주어진 압력 조건하에

서 유체의 흐름이 원활하도록 배관 내경을 계산하여 44 mm의 값을 얻었다.

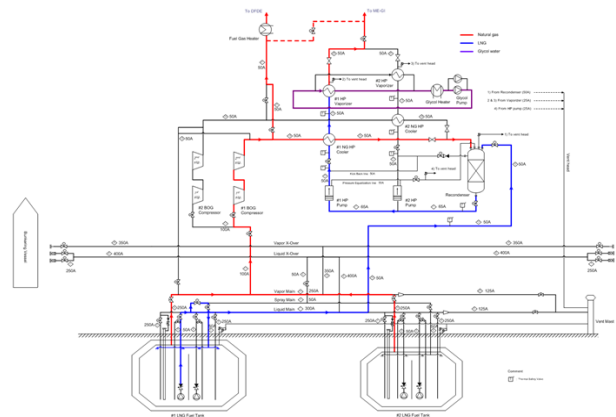


Fig. 3 PFD for gas fuel supply system ref. DSME

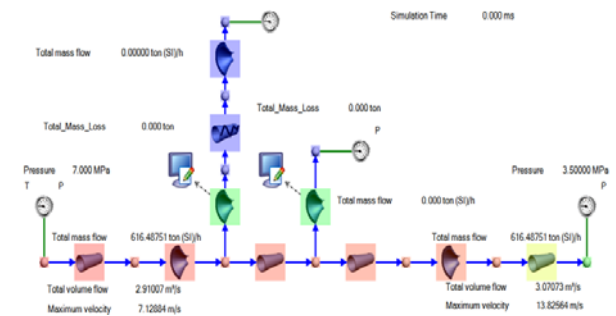


Fig. 4 Network setup for FGSS arrangement

해석을 위한 경계조건 설정 및 모델링이 완료되면 가스누출을 위한 시나리오를 구성하게 된다. 시나리오는 설계자 및 관련 전문가의 의견을 바탕으로 설정되었으며, 밸브의 차단 방법, 누출 가스의 탐지 시간, 파공 및 파단의 조건 등을 고려하여 설정되었다. 또한, 밸브의 특성을 고려하여 순간적인 차단, 선형으로 0.5초간의 시간을 두고 차단되는 현상을 구현하였으며 이러한 사항들을 시나리오 1~4로 나누어 아래에 간략히 정리하였다. 해석이 시작되는 시점을 0초로 하고 0.1초 동안은 정상 상태의 운영을 유지한다. 각 시나리오 별 파공의 크기는 배관의 약 20%, 50%, 100% 파단(rupture) 상태의 세 가지로 구성하여 아래와 같이 총 12 Case의 해석을 수행하였다.

- 가스누출 시간과 밸브차단 시간에 따른 시나리오의 구성
  - Scenario 1: Leak 발생과 동시에 밸브 순간 차단
  - Scenario 2: Leak 발생 1초 후 밸브 순간 차단
  - Scenario 3: Leak 발생 후 밸브 작동하지 않음
  - Scenario 4: Leak 발생 8초 후 밸브 0.5초 간 선형으로 차단
- 각 Scenario 별 파공의 크기는 ① 완전파단, 배관의 100% 파단 ② 배관의 50% 파단, ③ 배관의 20% 파단 3 단계로 총 12 Case의 해석을 수행

Table 4 Result for leak loss in case of 4 scenarios

Scenario	Leak size(%)	Vent loss(Ton)	Leak loss(Ton)	Total loss(Ton)
1	100	370	202,694	0.54
	50	415	90,333	0.57
	20	437	16,693	0.58
2	100	407	229,395	64
	50	446	105,528	29
	20	440	17,198	5
3	100	407	229,395	N/A
	50	446	105,528	N/A
	20	444	17,198	N/A
4	100	433	309,518	649
	50	444	107,803	242
	20	442	17,231	41

Table 4에 나타낸 해석의 결과에서 시나리오 1은 짧은 시간동안 누출되는 가스량과 가스누출의 순간속도를 측정하기 위해 수행되었다. 시나리오 2는 1초 동안 누출 가능한 가스량과 순간 속도 등을 분석할 수 있으며 1초 간 추가적으로 누출되는 양은 파공의 크기가 배관의 100 %일 때 약 63 kg인 것으로 확인할 수 있다. 시나리오 3에서는 안전밸브가 차단하는 역할을 수행할 수 없는 상황에 대한 해석이다. 이는 최악의 상황으로 고려될 수 있으며 밸브 차단이 이루어지지 않는 경우에 해당한다. 시나리오 4의 결과는 시나리오 2와 연계하여, 1초와 8초 간 누출되는 유량의 연관성을 확인할 수 있다. 이러한 상호 연관된 가스누출량을 예측함으로써 결과의 신뢰성을 다소 확보할 수 있도록 하였다. 시스템이 가동되는 가스배관 내 유량 및 누출량을 예측하기 위해서는 실험을 통한 방법 외에는 사실상 불가능하기 때문에, 이러한 공정해석 프로그램을 사용하는 방법은 현재로서, 가장 유용 가능한 방법인 것으로 판단된다. 또한, 이는 폭발해석에서 요구하는 가스클라우드의 크기를 정량적으로 비교할 수 있도록 하여 수치해석 경계조건의 정량성을 확보할 수 있게 한다.

### 4. 가스 클라우드 수치 해석

LNG 연료 추진을 위해 장착되는 M엔진의 ME-GI 엔진은 300 bar, 45 °C 조건의 LNG 분사를 요구한다. 여기서 300 bar의 고압가스를 엔진에 분사하기 위해서는 고압 펌프 후단의 기관 설비에 대한 안전 조치를 필요로 하게 된다. 이와 관련한 IMO Res. MSC. 285(86)의 환기 요건에서 “펌프 및 압축기 실에는 부압형식의 적절한 기계식 통풍장치가 제공되어야 하며 시간당 최소 30회 이상의 환기능력을 가지는 것이어야 한다.”로 규정하여 안전조치 강화를 요구하고 있다. 가스누출해석에 이러한 환기 규정을 반영하기 위해서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석이 적합한 것으로 판단되어 가스누출 및 환기, 확산에 관한

CFD 해석을 수행하였다. 초기경계조건으로써 긴급차단밸브(emergency valve)의 동적 특성을 고려하여 가스누출이 약 8초간 지속된 후, 완전 차단되며 송풍기는 정상 작동이 유지되도록 설정하였다.

FGS room을 수치해석에서 요구하는 기상의 3-D모델로 변환하기 위해 CATIA 및 ANSYS-CFX가 적용되었으며 결과를 Fig. 5~6에 나타내었다. 3-D모델과 격자를 생성하고 경계조건을 결정 한 후, 경계조건의 특성에 따라 적용되는 난류모델을 선정하고 이에 따른 격자의 Quality를 보장하도록 한다 (ANSYS, 2010). 본 해석에서 사용된 난류 모델은 k-ε turbulent model이며 격자의 크기는  $Y+ < 100$ 의 조건에 적합하도록 생성하였다 (Wilcox, 2005). 해석에 사용된 격자생성에는 I-Cem CFD를 이용하였으며, 벽면 근처에는 Prism mesh를 유동장에는 Tetra mixed mesh를 사용하였고, 전체 격자수는 약 11,000,000개이다.

Fig. 6에 표시된 가스 누출부분에서 시나리오에 따른 가스 누출이 발생된다. 가스 누출에 관한 정량적 데이터는 앞서 공정해석을 수행한 결과를 바탕으로 재 산출되었으며 결과 값은 대략 0.097~1.6 kg/s의 범위를 가진다. 이는 앞서 수행한 공정해석에서 연료공급시스템의 연료 공급량을 감안하여 관련 전문가들의 협의를 통해 적절한 누출 범위로 재설정된 결과이다.

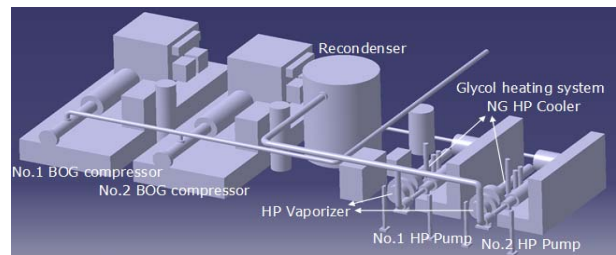


Fig. 5 Result of 3-D modelling for FGS room



Fig. 6 Height of leakage on the 3-D modelling for FGS room

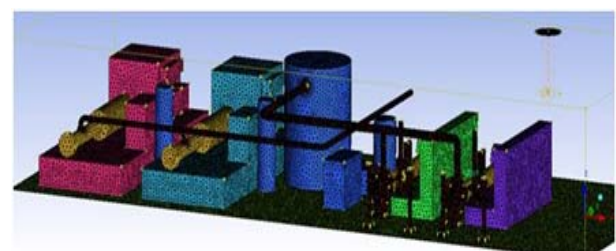


Fig. 7 Mesh generation for FGS room



해석도메인의 정보를 Table 5에 간략히 정리하였으며 파공에 의한 가스 누출 시나리오를 공정해석 결과를 바탕으로 산출하여 Table 3에 나타내었다. 주 작동유체는 공기와 메탄이며 메탄의 특성상 약 LFL(Low Flammable Limit) 5.5vol%~UFL(Upper Flammable Limit) 14vol%에서 인화성을 가지므로 본 해석의 후 처리 과정에서는 50,000ppm 이상을 기준으로 메탄 잔류량 분포도를 통한 환기효율성 및 폭발위험성을 검토하였다.

Table 5 Specification of 3-D domain for CFD analysis

Numerical domain	
FGS room size	14m(W) x 6m(L) x 2.5m (H)
Total element	11,000,000
Mesh type	Tetra mesh & Prism mesh
Ventilation	The air ventilation rate is set to provide at least 30 air changes per hour(IGF code)
Pressure type	The space is always in a state of positive pressure
Exhaust (Outlet)	1.83 kg/s in air
Inlet	Atmospheric pressure
Condition	Leak and dispersion in FGS room

Table 6 4 scenarios for gas release CFD analysis

No.	Hole Diameter [mm]	Time to leak[s]	Mass flow of air [kg/sec]	Mass flow of CH4 [kg/sec]
Case 1	12.7	8	1.5	0.09
Case 2	25.4	8	1.5	0.39
Case 3	38.1	8	1.5	0.89
Case 4	50.8	8	1.5	1.59

가스누출해석의 결과로써 Fig. 8~10에 해당하는 Case 1~3의 경우, LFL 이하에서 메탄 분포가 형성되므로 폭발의 위험이 적다고 판단되나 Fig. 11의 경우, 누출이 시작되고 약 10 ~ 50초 이상 지속적으로 메탄 농도가 LFL 이상으로 나타나고 있어 폭발 위험이 높은 것을 확인할 수 있다. Case 1, 2는 가스 농도가 LFL에 도달하지 않기 때문에 가스공급시스템의 배관 및 안전밸브는 Case 2 이하의 조건에 맞게 설계되는 것이 시스템 안전의 관점에서 적합한 수준인 것으로 판단된다. Fig. 12~15는 가스가 누출되는 현상을 가시적으로 표현한 결과이다. Fig. 12~15까지 점차 가스농도가 짙게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 8~11의 결과와 비교하여 가스분포를 예측할 수 있다. Fig. 15의

Case 4의 경우는 가스 누출 부위뿐만 아니라 기관실 전체에 Gas cloud가 형성되는 것을 확인할 수 있다. Case 4의 경우에는 기관실에 전기 설비 등의 노후 혹은 인적 요소에 의한 점화 요인이 있을 경우, 폭발의 위험이 상당히 높을 것으로 판단된다. IMO에서 언급한 환기 효율에 관한 규정은 Case 3, 4의 조건에서 환기 용량에 관한 규정을 강화하거나 폭발 완화를 위한 추가 설비가 필요한 것으로 판단된다.

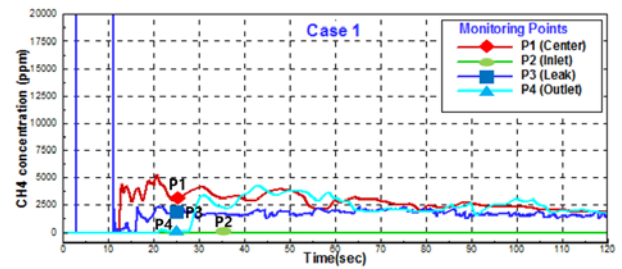


Fig. 8 CH4 concentration at measuring points for case 1 (Gas leak rate: 0.0994 [kg/s])

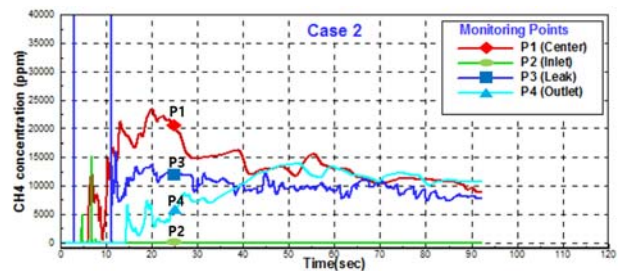


Fig. 9 CH4 concentration at measuring points for case 2 (Gas leak rate: 0.3978 [kg/s])

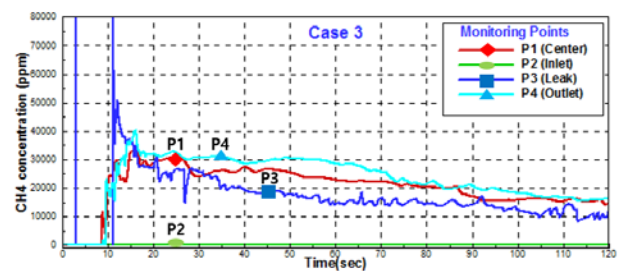


Fig. 10 CH4 concentration at measuring points for case 3 (Gas leak rate: 0.8951 [kg/s])

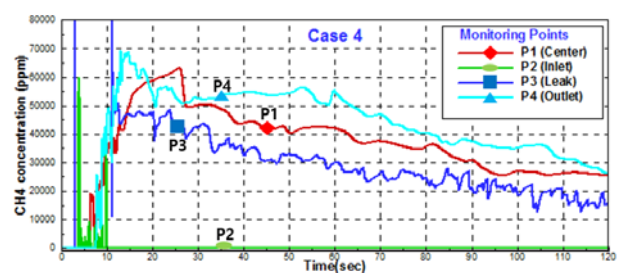


Fig. 11 CH4 concentration at measuring points for case 4 (Gas leak rate: 1.5912 [kg/s])

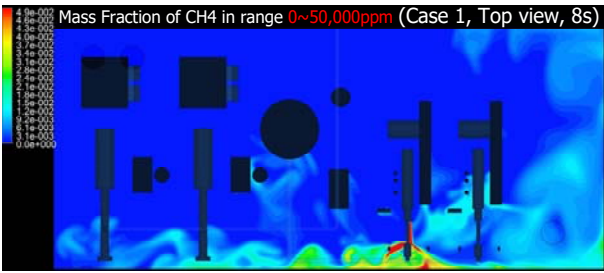


Fig. 12 Concentration of CH4 for case 1, top view at 8s

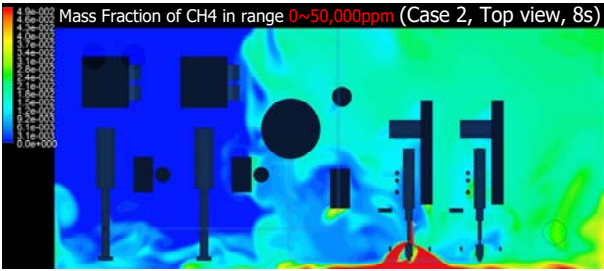


Fig. 13 Concentration of CH4 for case 2, top view at 8s

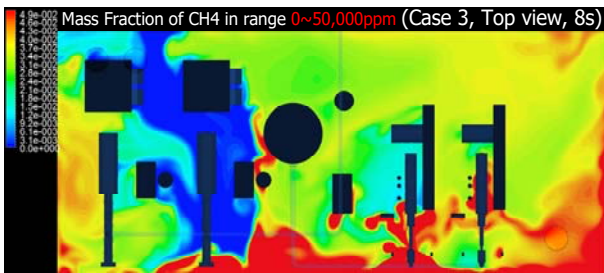


Fig. 14 Concentration of CH4 for case 3, top view at 8s

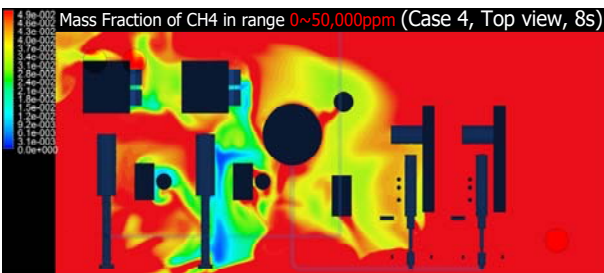


Fig. 15 Concentration of CH4 for case 4, top view at 8s

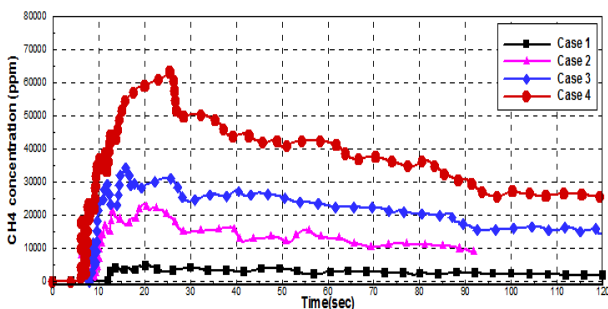


Fig. 16 Time variations of CH4 mass fraction at center measuring points for 4 cases (0~120 seconds)

해석 결과를 검토한 결과, 본 연구에서 구성한 시나리오에서 Gas cloud가 수초 내지 수분동안 형성될 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며 특히, Case 3~4의 경우에는 폭발 위험에 관한 요건을 만족하는 것으로 판단된다. 이는 IMO에서 언급되어 있는 환기 규정을 가스추진선에 적용하기에는 적절하지 않을 수도 있다는 것을 의미하며 동시에 각각의 가스추진선에서 누출 가능한 가스의 양을 면밀히 검토할 필요가 있음을 의미한다.

4 cases의 해석 결과를 그래프로 나타낸 Fig. 16은 가시화된 결과 값에서 유추되는 농도보다 다소 낮은 농도를 나타내는 경향이 있다. 이는 농도를 측정하는 방식이 한 지점에서 순간적으로 측정되기 때문으로 이로 인해 다소 오차를 갖게 된다. 특히, 내부 유동의 흐름이 복잡할수록 오차 범위는 클 수 있으므로 그래프와 메탄 분포도의 비교 검증이 요구된다. 이와 같이 CFD 해석 결과로 얻은 농도 데이터를 기반으로 폭발의 위험을 정량적으로 분석하기 위해서는 폭발 실험을 수행하는 과정이 필요하나 이는 시간과 비용이 많이 들며 위험하므로 지양되는 방법이다. 또 다른 방법으로는 폭발 수치해석을 수행하는 방법을 고려할 수 있으며 폭발해석을 수행함에 있어 중요한 과정으로 가스누출 및 확산 해석에서 얻은 농도에 관한 결과를 반영하는 것이 중요하다. 정성적, 정량적으로 얻은 결과를 비교 검토하여 적절한 오차 범위 수준을 고려한 폭발 해석을 수행하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

## 5. 폭발 해석

폭발해석을 수행하기 위해 상용 프로그램을 이용하여 3-D 모델링 작업을 수행하면 Fig. 17과 같다. 폭발해석은 유체에 대한 전산해석이 이루어 질수 있도록 Fig. 18과 같은 격자를 필요로 하게 되며 이러한 해석 도메인에 관한 기본적인 정보를 정리하면 Table 4와 같다. 또한, 앞서 수행된 가스 누출 및 확산해석의 결과에서 얻은 Gas cloud에 관한 정보를 크기와 질량으로 변환하여 나타내면 Table 5와 같다. 상용 폭발해석 프로그램 'FLACS'을 이용하여 해석을 수행하였으며 이 프로그램에서는 가스의 양을 Gas cloud의 부피를 통해 결정하기 때문에 앞서 수행된 가스 누출 및 확산 시뮬레이션의 결과를 반영하기 위해 Gas cloud의 부피를 조절하여 설정하였으며 정확한 부피의 산출에 대한 보안을 위해 오차 범위를 고려하여 4 Cases의 폭발해석을 수행하였다 (FLACS, 2014; Hansen, et al., 2010).

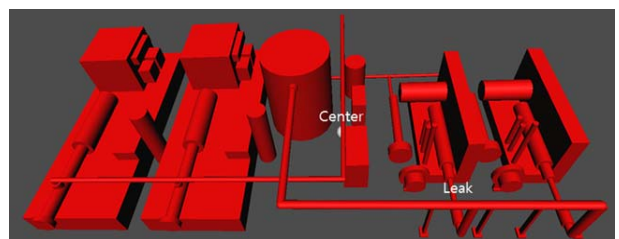


Fig. 17 3-D model for the explosion analysis

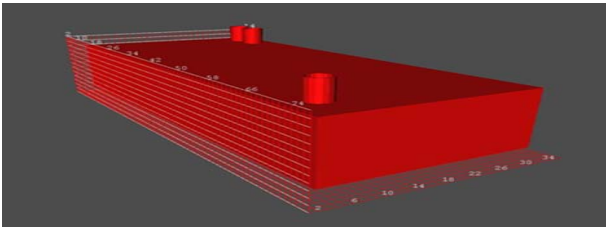


Fig. 18 Mesh generation for the explosion analysis

Table 7 Information for the analysis domain

Blocked volume	50.59 [m <sup>3</sup> ]
Total volume	368.725 [m <sup>3</sup> ]
Equivalence ratio	1
Oxygen contents, volume % O <sub>2</sub> of O <sub>2</sub> +INERTS	O <sub>2</sub> /(O <sub>2</sub> +IN) 20.95 %
Flammability limits, equivalence ratios (ER)	LFL % 0.531 100.0
	UFL % 1.722 324.4
Flammability limits, equivalence ratios (EQ)	LFL % 0.347 100.0
	UFL % 0.633 182.4

Table 8 Gas cloud status

No	Gas cloud size [m <sup>3</sup> ]	Amount of gas [kg]	Methane composition [%]	Flammability limits [%]
Case 1	0.25	0.00077	91.53	0.531
Case 2	0.5	0.008	91.53	0.531
Case 3	0.75	0.025	91.53	0.531
Case 4	1	0.067	91.53	0.531

폭발 해석의 결과로서 예측된 폭발압력을 그래프로 나타내면 Fig. 19~22와 같다. 특히 사항으로써, 폐쇄 구역 내 폭발의 특성상 압력이 소멸할 때, 진동 현상이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 진동에 약한 계측기 등에 다소 영향을 줄 것으로 우려된다. 최대폭발압력을 정리하면 Table 9, Fig. 23과 같다. 이를 통해 폭발 압력의 크기는 Gas cloud의 크기와 일정 비율로 비례하며 증가하는 것을 확인할 수 있다.

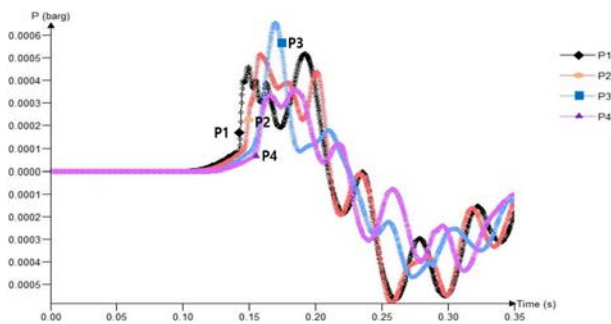


Fig. 19 Explosion overpressure curves as a function of time for case 1(gas cloud size : 0.253 m)

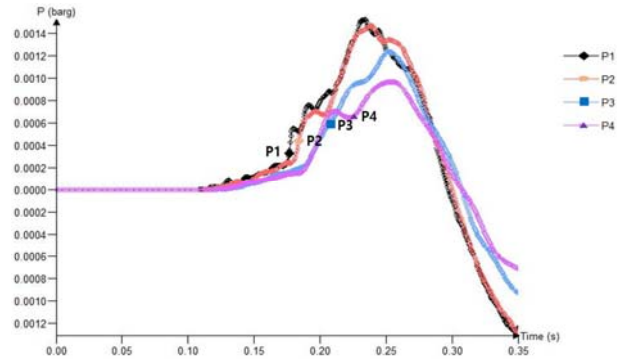


Fig. 20 Explosion overpressure curves as a function of time for case 2(gas cloud size : 0.53 m)

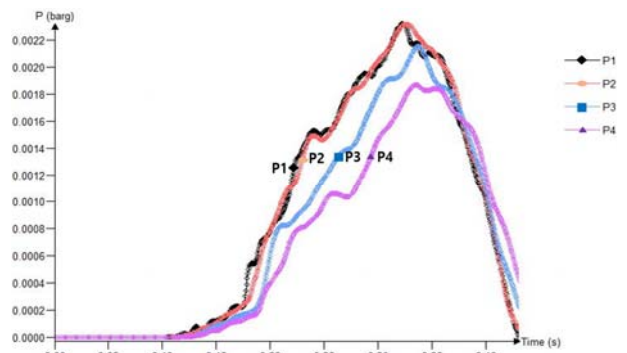


Fig. 21 Explosion overpressure curves as a function of time for case 3(gas cloud size : 0.753 m)

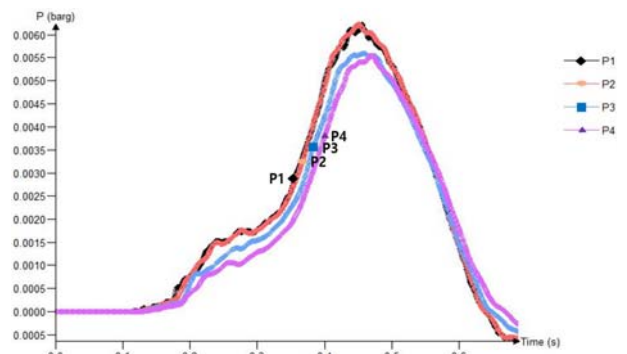


Fig. 22 Explosion overpressure curves as a function of time for case 4(cas cloud size : 1.03 m)

Table 9 Result of explosion analysis as a function of time on the monitoring point 1-4 for 4 cases

	Explosion overpressure[barg]
Case 1	0.0006
Case 2	0.0014
Case 3	0.0022
Case 4	0.006



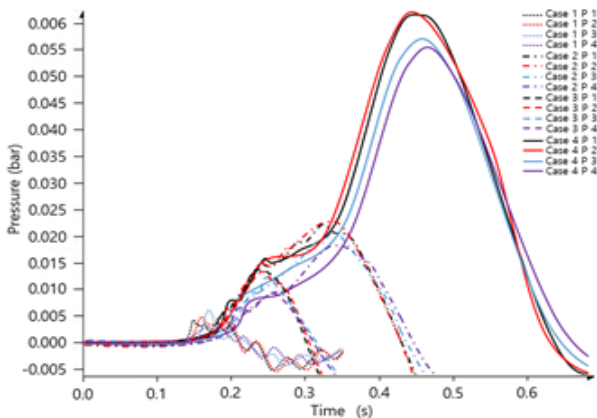


Fig. 23 Explosion overpressure curves as a function of time for case 1~4

폭발압력 분포도는 Fig. 24~28과 같다. 각 Case별 폭발압력 분포의 경향은 상당히 유사하기 때문에 Case 4에 대한 폭발압력의 변화만을 나타내었다. 시간대별로 최초 점화가 발생하고 약 0.04초간 폭압이 팽창하여 0.5초간 소멸하는 현상을 확인 할 수 있다. 폭압의 팽창에 비하여 소멸하는데 시간이 걸리는 이유는 폐쇄구역이기 때문인 것으로 판단된다.

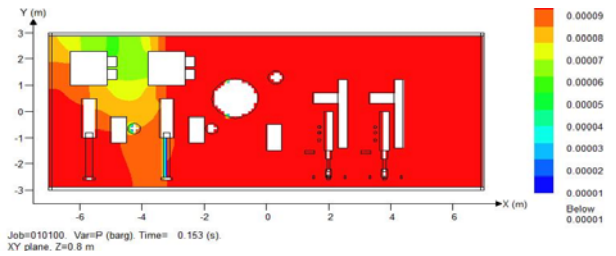


Fig. 27 Blast pressure distribution on case 4 (gas cloud size: 1.03 m, 0.153 sec)

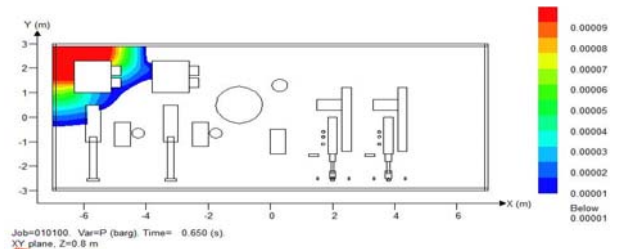


Fig. 28 Blast pressure distribution on case 4 (gas cloud size: 1.03 m, 0.65 sec)

## 6. 결론

본 연구에서는 새로운 개념의 가스추진시스템이 탑재된 가스추진선의 위험도를 기존 선박의 위험 수준으로 완화하기 위해 요구되는 정량적인 위험도를 예측하기 위해 다양한 해석을 수행하였다. HAZID 결과에서 주요한 위험구역으로 인식된 FGS room에서의 정량적인 가스누출량, 환기성능 및 폭발위험도를 예측하여 그 결과를 정리하였다. 최종적으로 도출하고자 한 폭발해석결과에서의 폭발압력은 선박의 구조적 결함을 야기하여 손상을 줄 것으로 판단되는 일반적인 압력범위(1~2 bar) 이하의 값을 갖는 것으로 예측되었다.

하지만 기관구역의 경우, 정상적인 항해를 위해 필수적인 정밀기계장치, 계측기, 회전기기, 압력장치 등의 설비가 갖추어져 있다. 또한 추가적인 폭발위험인자로서 가연성 액체연료를 사용하는 기계장치가 주로 설비되어 있는 장소이기 때문에 폭발압력으로 인한 보조 기관 및 주변 기기에 대한 구조적 손상과 고온에 의한 추가적인 폭발 현상이 발생할 수 있는 위험이 있다. 이러한 연쇄적인 폭발 손상은 선박의 안전항해에 영향을 줄 수 있으므로 상기 제시된 충격압력에서 각종 기계장치가 원활히 작동될 수 있도록 보호해야 하며 기본적으로 작업자에 대한 안전 또한 고려되어야 할 대상으로 판단된다.

그러므로 가스추진시스템을 갖는 기관구역에서는 폭발로 인한 피해를 줄이기 위해 요구되는 대안을 필수적으로 제시해야 한다고 판단된다. 폭발해석에서 얻은 압력 분포는 구조해석을 위한 경계조건으로 설정되며 구조해석의 결과는 선박의 구조변형 및 설계변경에 대한 자료로 활용되나, 현재 수행된 해석의 결과를 분석하면 추가적인 구조해석의 수행보다는 폭발 압력의 최대치를 완화시켜 피해를 최소화하고 폭발 후 일어날 수 있는 화재에

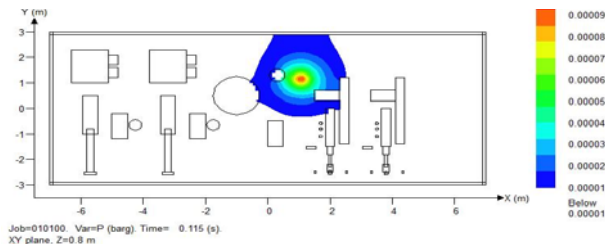


Fig. 24 Blast pressure distribution on case 4 (gas cloud size: 1.03 m, 0.115 sec)

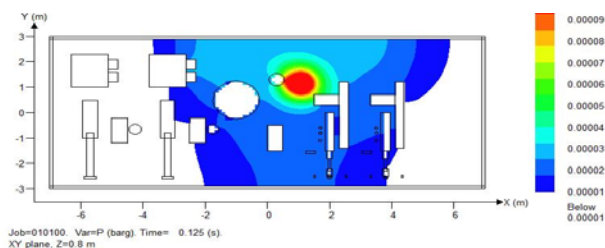


Fig. 25 Blast pressure distribution on case 4 (gas cloud size: 1.03 m, 0.125 sec)

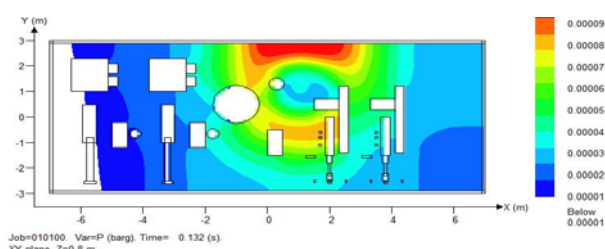


Fig. 26 Blast pressure distribution on case 4 (gas cloud size: 1.03 m, 0.132 sec)



대한 대응 방안을 강구하는 것이 더욱 적절한 조치인 것으로 판단된다. 특히, 기관구역에서의 폭발 완화장치는 협소한 공간 및 밀집된 기관장치의 배치에 영향을 주지 않을 수 있는 방법을 제시하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

## References

- ABS, 2000. *Guidance notes on risk assessment applications for marine, offshore oil and gas industries*. ABS: Houston, United states.
- ANSYS, 2010. *CFX-12 Solver theory manual*. CFX Ltd: Oxfordshire.
- DSME, 2010. *Joint research project on LNG fueled 318,000 TWD COT, interim information release*. DSME: Geoje, Republic of Korea.
- FLACS, 2014. *FLACS v10 Solver theory manual*, Gexcon AS: Bergen, Norway.
- Ganapathy ramachandran and David charters, 2011. *Quantitative risk assessment in fire safety*. Spon press: New York, USA.
- Hansen, O.R. Gavelli, F. Ichard, M. & Davis, S.G., 2010. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*, 23, pp.857-877.
- IMO, 2001. *MSC/Circ.1002, Guidelines on alternative design and arrangements for fire safety*. IMO: Albert Embankment London, United Kingdom.
- IMO, 2004. *SOLAS: Consolidated text of the international convention for the safety of life at sea*. IMO: Albert Embankment London, United Kingdom.
- IMO, 2009. *Res.MSC.285(86) Interim guidelines on safety for natural gas-fuelled engine installations in ships*. IMO: Albert Embankment London, United Kingdom.
- SAFEDOR, 2005. *D.4.5.2, Risk evaluation criteria*. Germanischer Lloyd: Hamburg, Germany.
- Wilcox, D., 1993. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, INC.: La Canada, CA.



김기평



김대현



이영호