

AHTS (Anchor Handling Tug Supply Vessels)의 FGSS room 폭발 위험성 평가

박병철(부산대학교), 배정훈(부산대학교), 김형식(부산대학교), 신성철(부산대학교), 김수영(부산대학교)
이경중(선박해양플랜트연구소), 박범진(선박해양플랜트연구소)

Explosion risk analysis of FGSS room in AHTS (Anchor Handling Tug Supply Vessels)

Byeong-cheol Park (Pusan National University), Jeong-hoon Bae (Pusan National University), Hyeong-sik Kim (Pusan National University), Sung-chul Shin (Pusan National University), Soo-young Kim (Pusan National University),
Kyung-joong Lee (KRISO), Beom-jin Park (KRISO)

요 약

최근 신개념 선박으로써 LNG를 주 연료로 사용할 수 있는 선박의 건조에 많은 관심이 기울어지고 있으며, 이와 관련한 LNG의 위험성에 대해서도 상당한 관심이 모아지고 있는 실정이다. 본 연구는 LNG 추진 AHTS(Anchoring Handling Tug Supply Vessels)에서 FGSS(Fuel Gas Supply System) room에서의 누출확산 및 폭발 시나리오를 통하여 내부 벽면에 미치는 폭발 과압을 확인하는 것이다. 시나리오는 장비에서 파공이 생겨 누출이 일어나 확산되어 점화원을 만나 폭발하는 상황을 가정하였다. FGSS room 내부는 Res. MSC. 285(86)의 지침에 의해 환기시스템을 가지고 있으며, ESD(Emergency ShutDown) system이 고장 났다고 가정하여, 누출확산 및 폭발 해석을 수행하였다. 폭발 과압을 통하여 추후 LNG 추진선박의 위험도 기반 설계를 수행할 수 있도록 하는 것이다.

Keywords: AHTS(해양시추지원선), Ventilation system(환기 시스템), Explosion risk(폭발 위험도), LNG(액화천연가스), Gas fuelled ship(가스추진선박), Risk based design(위험도 기반 설계)

1. 서 론

1.1 연구배경

국제해사기구(IMO), 유럽연합, 미국에서는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 등의 선박연료 배출가스 규제와 온실가스 규제도 강화됨에 따라 기존의 선박연료로 주로 사용되던 HFO(Heavy Fuel Oil)를 대체할 연료로써, LNG(Liquefied Natural Gas)가 환경측면과 경제성 측면에서 유리하다.

최근 신개념 선박으로써 LNG를 주 연료로 사용할 수 있는 선박의 건조에 많은 관심이 기울어지고 있으며, 이와 관련한 LNG의 위험성에 대해서도 상당한 관심이 모아지고 있는 실정이다. LNG 추진선박의 경우 기존의 선박연료를 사용하는 선박에 비해 화재 및 폭발사고에 대한 높은 위험을

가지고 있다. 이러한 사고는 인명, 환경, 재정적 피해가 더 크게 발생하기 때문에 일반적인 선박에 비해 높은 위험을 가지며, 위험도 기반의 안전설계가 요구된다. (Park, et al., 2014)

특히, 해양 플랜트 플랫폼의 경우는 국내 조선소에서 설계 및 건조하고 있으나 플랫폼을 지원하는 해양시추지원선(Anchor Handling Tug Supply Vessels, 이하 AHTS)에 대해서는 국내 건조 및 설계 경험이 부족하여 선박 건조 시 어려운 점이 많고, 폭발 위험에 따른 위험도 기반 설계도 부족하다. AHTS선박의 FGSS room에는 Res. MSC. 285(86)으로 채택된 내용에 따라 내부 공기를 시간 당 30회 순환 시키는 환기시스템 또한 필요하다. (IMO, 2009)

본 연구에서는 FGSS room에 환기시스템을 적용하여 해당 시스템의 ESD valve가 고장 난 상황을 가정하여 누출 및 폭발 해석을 수행하였고, 폭발 과압이 FGSS room에

미치는 영향을 확인하는 것이 목적이다.

1.2 연구동향

Kim(2011)은 LNG gas fuelled VLCC의 FGS system에서의 Res. MSC. 285(86)의 환기요건을 고려하여 room 내부의 환기효율을 알아보고, LNG 누출 시 빠져나가지 못한 Gas Cloud를 가정하여 점화원을 만나 폭발하는 시나리오로 폭발 과압을 확인하였다.

Kang(2013)은 FLACS를 이용하여 고압가스 충전소에서의 CNG, HCNG 등 가스누출에 의한 화재/폭발 상황을 모사하여 피해영향을 비교 하였다. Dan(2010)은 1998년 부천충전소 폭발사고를 모델로 DME-LPG 혼합가스가 누출됐다고 가정하고, 폭발사고의 피해예측 방법인 TNT경험식, PHAST software, CFD model 등 3가지를 이용하여 피해영향을 예측-비교하였다.

Yoon(1997)은 용기 내에 있는 기압된 액체가 누출되어 개방공간 증기운 폭발사고가 발생하는 경우의 사고영향 평가모델을 비교-분석하여, 복잡한 증기운 폭발사고의 영향평가 방법을 단순화 하였다.

2. 본 론

2.1 시뮬레이션 및 초기 조건

본 해석은 전산 유체 해석(CFD) Tool인 FLACS를 이용하여 연구를 진행하였다. 현재 FLACS를 이용한 해석은 석유 및 가스 산업과 상치 산업분야에어 광범위하게 사용되고 있으며 원자력산업, 잠재적인 분진에 의한 폭발 과 다른 시설 분야 등에도 널리 확장되고 있다. 또한 전체 3-D로 CFD 모델링을 하여 해석을 함으로써 훨씬 더 정확하게 결과를 예측할 수 있다.

해석의 순서는 Dispersion & Ventilation을 수행 한 다음 폭발해석을 수행 하였고, Fig. 1은 DMS BP200톤 AHTS의 FGS system 개념도를 참고하여 모델링 한 것이며, 환기시스템은 FGSS Room 좌/우 벽면 상부에 위치하여, 2분내에 밀폐된 구역의 내부 공기를 1회 순환시키도록 적용하였다. 가스 누출 및 환기, 폭발의 수치해석을 위해서는 시스템의 조건에 따른 각각의 위험도 기반 시나리오를 통하여 수행 하여야 한다.

밀폐된 FGSS Room 내에 환기시스템을 위한 강제 유동의 입구와 출구를 지정하고, LNG 공급을 위한 배관에서 누출되는 조건으로 파공 크기에 따른 가스 누출량을 구하였다.

누출가스의 조성은 Methane 92%, Ethane 6%, Propane

2%로 설정 하였고, 해석 공간의 내부 크기 치수는 6m (L) x 8m (W) x 3m (H)이며, 사용된 난류 모델은 $k-\epsilon$ turbulent model을 적용 하였다. 초기온도 및 압력은 25℃, 1atm (bara) 으로 설정 하였다.

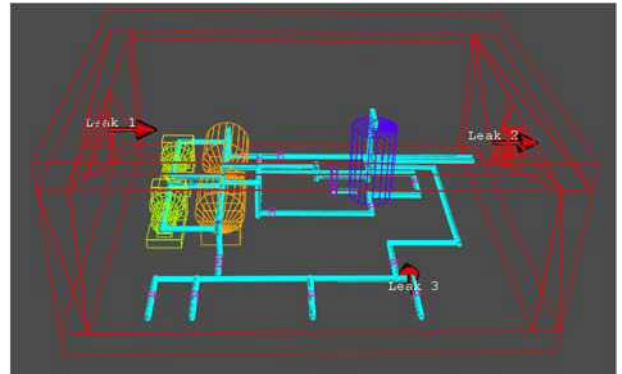


Fig. 1 BP200ton AHTS FGSS Room Model

본 연구에서는 압축가스의 밀도가 액화가스 밀도보다 낮은 경우로써, 가스누출이 단열팽창에 의해 진행되고, 누출부의 속도는 가스용기 내부의 압력이 임계압 P_c 보다 높아 가스의 누출속도가 음속 이상이 된다. 다음 식(1)로 본 시나리오에서의 가스가 음속이상으로 누출되는 것을 확인할 수 있다.

$$P_c = P_0 \cdot \left[\frac{\gamma+1}{2} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (1)$$

여기서, P_0 는 가스용기 외부의 압력 (Pa) , γ 는 단열팽창시의 비열계수를 의미한다.

음속 이상의 가스속도는 이론적으로 해당 가스의 최대 음속과 같다. 가스의 속도가 음속 이상일 경우, 저장용기로부터의 가스 누출량은 다음 식 (2)를 통하여 파공 크기에 따른 2가지 시나리오의 누출량을 구하였으며, 주 동작 유체는 공기와 메탄으로 구성하였다 (KOSHA, 2010).

$$Q = \frac{dG}{dt} = C_D \cdot A \cdot P \cdot \sqrt{\frac{\gamma M}{RT} \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (2)$$

여기에서,

$\frac{dG}{dt}$: 가스의 누출량 (kg/s)

P : 저장용기 내부의 압력 (Pa)

γ : 단열팽창시의 비열계수, $\gamma = (C_p/C_v)$,

A : 가스가 누출되는 개구부의 면적 (m^2),

M : 가스의 몰 질량 (kg/kmol),

T : 저장용기 내부의 절대온도 (K)

R 가스상수 (8314 J/kmol · K)

실제의 유체 유동은 유체 마찰, 벽면 경계층 형성, 유량 검출부의 수축 부와 유동 유체의 실제 수축부의 불일치, 밸브 벽면을 통한 열 전달 등의 영향으로 이상적으로 가정하였던 질량 유량의 경우와 일치하지 않기 때문에 실제적 유량 값을 유도해 내기 위해 유출계수(Discharge Coefficient, C_D)를 도입하여 사용하였다. 현재 LNG 및 LNG-FPSO 선박용 안전밸브의 유출계수는 선급의 인정을 받기 위해 최소 0.8이상의 수준이 요구되고 있고, 본 연구에선 최소 수준의 유출계수를 사용하여 실제 질량 유량을 계산하였다 (KOSHA, 2010).

$$C_D = \frac{Q_a(\text{Actual Flow Rate, kg/s})}{Q_t(\text{Theoretical Flow Rate, kg/s})} \quad (3)$$

메탄(LNG의 92% 비)은 무색 무취인 가연성 기체로서 공기보다 가벼워 누출 시 내부 천장에 Gas cloud를 형성하는 경향이 높으며 폭발 범위는 Fig. 3과 같이 LFL(Lower Flammability level) 5% ~ UFL(Upper Flammability level) 15.4% 이고, 폭발 위험이 가장 높은 농도는 9% ~ 10%이다.

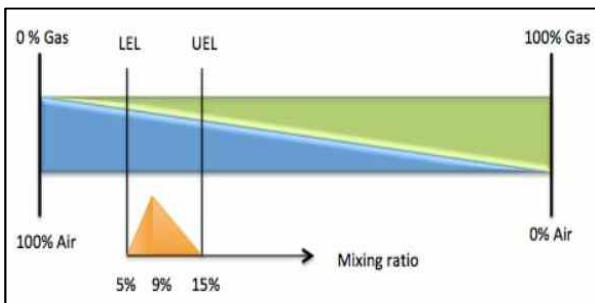


Fig. 3 Range of inflammability (LNG)

본 해석은 누출 및 폭발 해석 수행 시 폭발에 가장 위험한 농도인 10% 일 때의 시간을 계산한 후, 누출확산 해석을 통하여 위험 농도 부분의 Gas cloud의 크기를 확인 하고, 점화원(정전기에 의한 스파크)을 설정하여 폭발해석을 수행하였다. 폭발의 상한과 하한의 농도 조건이 부합되는 위치라 하더라도 환기효율 및 기관, 장치의 배치, 밀집도 등에 따라 누출 가스의 이동이 달라 지며, 수치해석 및 실험을 통하여 폭발 상황에 대한 현실적인 판단이 이루어져야 한다.

본 연구의 시나리오는 LNG 저장탱크에서 LNG가 FGS system을 거쳐 엔진룸으로 이동되는 상황에서 배관에 파공이 생겨, 누출되는 상황으로 ESD 밸브의 고장으로 가스가 차단 없이 계속 누출되는 상황을 가정하였다. 위의 시나리오를 통하여 아래 Table 1과 같이 가스 누출

시나리오를 작성하였다.

Table 1 Gas leakage scenario

No.	Leak hole Diameter [mm]	Time to leak [s]	Mass flow of ventilation [kg/s]	Mass flow of leakage [kg/s]
1	20 mm	60 s	1 kg/s	0.2 kg/s
2	100 mm	10 s	1 kg/s	5 kg/s

해석의 수행 시 격자의 사이즈를 조절하여 생성하게 되고, 해석 조건에 맞는 경계조건을 입력한 뒤 수치해석의 결과를 확인할 수 있는 모니터 포인트 설정해야 한다.

2.2 시뮬레이션 결과분석

2.2.1 누출해석

가스 누출확산에 관한 시뮬레이션은 2가지 파공 크기에서 가스가 누출되어 FGSS Room 내부에 가스가 10% 농도로 가득 차는 상황으로 하였다. 모니터 포인트는 환기 시스템의 작동 여부를 알 수 있는 환기 시스템의 입/출구와 가스가 누출되는 곳의 입구, 그리고 Room 내부의 중앙 부분으로 지정하였다. Fig. 2 ~ 7은 누출확산의 수치해석 결과로써 각 모니터링 포인트(4개의 측정점)에서의 가스 구름의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 7은 파공 직경 20mm 일 때의 가스 누출확산 해석이며, Fig. 8은 환기시스템의 입/출구 부와 누출지점, 공간내부 중앙지점에서의 가스 농도를 보여주며, 약 46초부터 폭발 시 가장 큰 피해를 입을 수 있는 가스 농도인 10%가 되는 것을 확인하였고, 시뮬레이션은 FGSS room 내부가 10%의 농도로 가득 차는 상황까지 수행하였다.

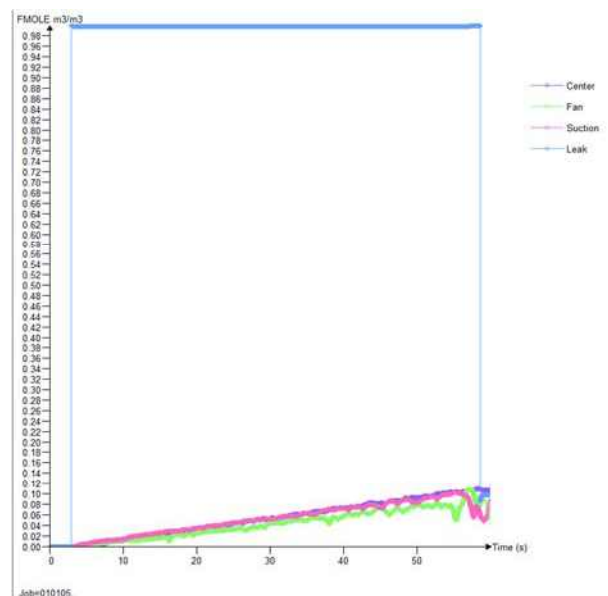


Fig. 7 Case1 (mass flow rate: 0.2 [kg/s])

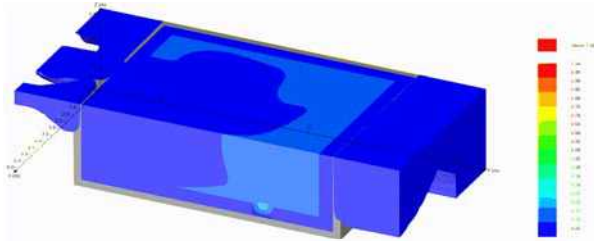


Fig. 8 Case1 Internal gas concentration

Fig. 9는 배관이 완전 파단 되는 누출확산해석 결과 그래프이며, Fig. 10은 누출량이 많아 1초부터 누출이 시작되어 6초에 Room 내부의 농도가 10%로 되는 것을 확인하였다.

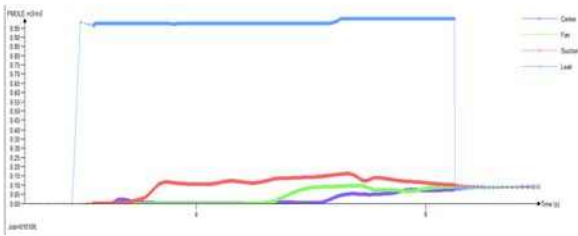


Fig. 9 Case2 (mass flow rate: 5 [kg/s])

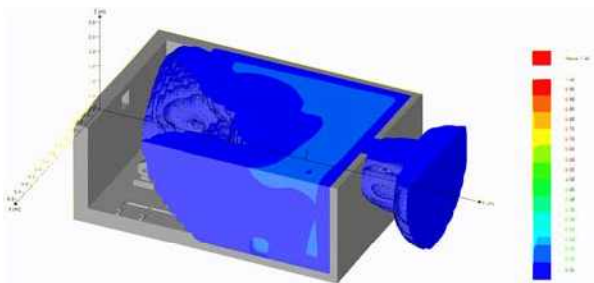


Fig. 10 Case2 Gas concentration

2.2.2 폭발해석

폭발 해석을 수행에 있어 가장 중요한 점은 가스 폭발대기(Explosive gas atmosphere)가 만족됨을 판단하는 것이 중요하다. 가스폭발대기는 대기상태에서 발화, 소비되지 않은 혼합물로 연소가 계속될 수 있는 가스나 증기상태의 가연성 물질이 혼합되어 있는 상태를 말한다.

최저 폭발 한계 이하의 농도에서는 폭발성 물질의 농도가 희박하기 때문에 정상적인 조건에서는 연소 또는 폭발이 발생하지 않게 되며, 최고 폭발 한계 이상의 농도에서는 산소 부족으로 인하여 연소 또는 폭발현상이 유발되지 않는다. 그러나 실제 상황에서 공간 전체의 평균농도가 최저폭발한계 이하라도 부분적으로 농도가 높게 형성된 영역이 존재하기 때문에 상당한 주의가 필요하다. 또한 최고 폭발한계 이상으로 형성된 가스는 주변의 공기에

희석되면서 최고 폭발한계 이하로 내려갈 가능성을 갖고 있으므로, 폭발성이 존재하는 것으로 보고 충분한 주의가 필요하다.

본 연구에서의 폭발해석 시나리오는 가스 누출에 의해 FGSS Room 내부의 공간에 가연성 가스가 10%의 폭발 농도가 되는 지점에서 점화원(정전기에 의한 스파크)을 만나는 즉시 폭발이 되도록 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 파공이 20mm 일 때의 폭발 해석 상황이며, 해석결과 그래프에서 46.468071초에 가장 큰 압력 값을 가지는 것으로 확인 되었다.

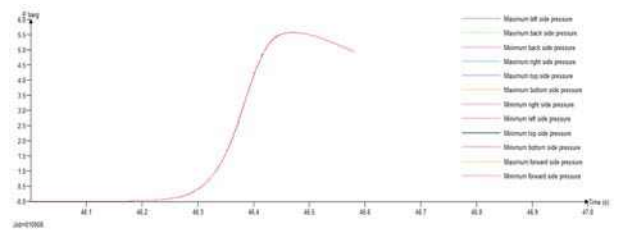


Fig. 10 Case1 (mass flow rate: 5 [kg/s])

Table 2는 Case1에서의 내부 벽면 전체의 폭발 압력 과압을 나타내고 있고, 내부 왼쪽 벽면에서 최대 압력 5.592319bar 가 되는 것을 확인하였다.

Table 2 Case1 (Maximum/minimum pressure)

Location [wall]	Maximum pressure [bar]	Minimum pressure [bar]
Left	5.592319	5.576714
Right	5.576629	5.576431
Forward	5.581422	5.577407
Back	5.583261	5.578067
Top	5.581419	5.580920
Bottom	5.580798	5.576171

Fig. 11은 배관이 완전 파단 됐을 때의 폭발 해석 상황이며, 해석결과 그래프에서 4.352988초에 가장 큰 압력 값을 가지는 것으로 확인되었다.

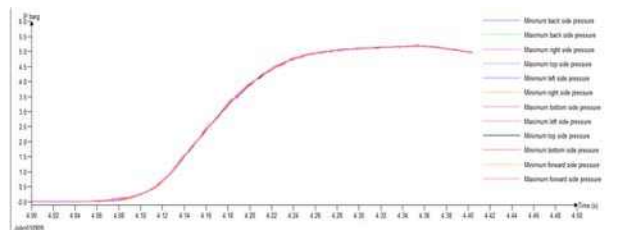


Fig. 11 Case2 (Ignition time 4[Sec])

Table 3은 Case2에서의 내부 벽면 전체의 폭발 과압을

나타내고 있고, 내부의 바닥 부분에서 최대 압력 5.207964bar 가 되는 것을 확인하였다.

Table 3 Case2 (Maximum/minimum pressure)

Location [wall]	Maximum pressure [bar]	Minimum pressure [bar]
Left	5.185160	5.169038
Right	5.192001	5.177774
Forward	5.184923	5.170850
Back	5.189806	5.175086
Top	5.187017	5.170823
Bottom	5.207964	5.171796

두 시나리오의 결과로 파공의 크기가 클수록 더 작은 폭발압력이 지정된 위치에서 나타났다. 내부부피에서 10%가 되는 농도를 동일하게 하였고, 압력이 다른 원인은 실제로 폭발 대기가 되는 Gas cloud의 크기가 다르기 때문이다. 폭발가능 농도의 Gas cloud의 크기가 클수록 내부의 폭발 압력은 더 커질 것이다.

각 시나리오의 결과 값이 상당한 수차이므로 폭발 상황 발생 시 큰 피해를 입을 것으로 보이며, 결과 값을 이용하여 방폭벽 설치나 내부 벽면의 두께를 두껍게 하는 등 위험도 기반 설계가 필요하다. 본 연구에서의 시나리오에는 ESD valve가 고장 난 상황을 가정하여 해석을 수행하였으므로, 추후 실제 선박의 FGS system에 대한 조건을 통해 면밀한 시나리오 작성을 하여 상세폭발해석이 수행해야 할 것이다.

3. 결론

AHTS의 FGSS room에서의 누출 및 폭발 해석은 다음과 같다.

- 총 2가지 시나리오로 FGSS room 내부의 환기 시스템을 적용하여 누출확산 및 폭발 해석을 수행하였다.
- 누출확산 및 폭발해석을 수행함으로써 가스추진선박의 위험도 기반 설계에 참조할 수 있는 데이터를 구축하였다.

시나리오의 파공 크기에 대한 부분을 실제적인 데이터를 통하여 크기를 지정하고, 추후 연구를 통하여 좀 더 현실성 있는 시나리오를 작성하여 실제 FGSS room 내부 구조설계에 반영할 수 있는 폭발해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2011-0030671)과 선박해양플랜트 연구소의 연구용역 “LNG 연료 AHTS 선박의 LNG 유출로 인한 폭발 해석”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- CMR Gexcon, FLACS manual 9.1
- Kang, H.K., Kim, K. P. & Park, J. H., 2011, Investigation of Dispersion and Ventilation Efficiency for Leak Capacity of NG in a FGS Room of Gas Fuelled Ship, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 3 ~ 5.
- Kim, K.P. & Kang, H.G. 2011. Gas Dispersion Analysis for Leak Capacity of NG in a FGS Room of Gas Fuelled Ship. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, pp 312~316.
- Kim, K. P., Kang, H.K., Choung, C.H. & Park, J. H., 2011, On the Application of CFD Codes for Natural Gas Dispersion and Explosion in Gas Fuelled Ship, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 35(7) pp. 946~956.
- Korea Occupational Safety & Healthy Agency, 2010. Technical guidance for setting and management of gas explosion risk location, E-47-2010.
- Park, B. C., Bae, J. H., Shin, S. C., Kim, S. Y., 2014, Risk assessment of Ship-To-Ship LNG bunkering at BUSAN NEWPORT, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, pp.300 ~ 302.
- Res. MSC. 285(86), 2009, Interim guidelines on safety for natural gas-fuelled engine installations in ships, IMO.