

LNGC의 화재 및 폭발 해석

하문근, 윤호병, 이희성, 김현수, 김영복, 조기현
삼성중공업 조선해양연구소 제품기술연구

Fire and Explosion Analysis of LNGC

Mun-Keun Ha, Ho-Byung Yoon, Hee-Sung Lee, Hyun-Soo Kim,
Young-Bok Kim, Ki-Hun Joh
SAMSUNG Heavy Industry, Marine system Institute, Marine system Research

1. 서론

유가상승에 따른 대응책으로 수년 전부터 천연가스산업이 국내외적으로 활성화되고 있다. 중국의 성장과 에너지 확보정책에 따른 파급효과와 청정에너지 사용의 확대에 인하여 천연가스의 수송체인도 다양화 되었다. 천연가스의 수송체인중의 하나인 액화천연가스(LNG)의 해상물동량과 LNG운반선의 선박량이 급증함에 따라, 위험물의 대량운송에 따른 안전성에 대한 관심도 높아지고 있다.

본 연구의 주요 목적은 선박을 이용한 LNG의 운송과정에서 발생할 수 있는 위험성에 대하여 전반적으로 관심을 가지고 있으나, 외부요인에 의한 LNG의 누출에 의한 화재 폭발에 대한 해석에 중점을 두고 있다. LNG운송 선박이 수출입 터미널에서 LNG의 (un)loading상황과 해상운송 상황에 있어 충돌, 테러 등의 돌발상황과 LNG운반선의 항행중에 선체에 가해지는 여러 가지 해상환경 외력에 따른 화물창의 손상 발생을 가정하여 액화천연가스의 누출에 의한 각 상황별 화재/폭발 발생조건에 대하여 연구하고자 한다.

위험성 평가와 폭발해석의 수단으로 많이 활용되는 상용 프로그램인 NEPTUNE과 FLACS를 본 연구의 해석수단으로 활용하였고, 유사한 연구사례는 U.S. Coast Guard의 LNG도입기지의 안전성 검토를 수행한 보고[1]가 있다.

2. NEPTUNE을 이용한 화재 분석

2.1 해석대상의 특성

본 연구에서는 Complete Secondary Barrier 구조인 Membrane과 독립탱크 Type의 LNG 화물창 시스템을 고려하여 LNG 적재 후 운송 시 발생 가능한 화물누출상황을 가정하여 화재와 폭발해석을 시도하고자 하였다. LNG운반선은 최근 138Km³에서 266Km³까지 대량의 LNG를 운반하고 있으며, 대개 4개 혹은 5개의 화물창으로 구성되어 한 화물창당 최대 약 53Km³의 화물을 저장하는 구조이다.

2.2 LNGC 외부 누출

LNG가 수송선 외부로 누출되었을 때 발생 될 수 있는 시나리오들은 DNV(Det Norske Veritas, 노르웨이 선급)나 ABS(American Bureau of Shipping, 미국선급) 같은 선급[2] 뿐만 아니라 관련기관의 여러 연구자들[3, 4]에 의해 많은 연구가 되어 왔다.

본 연구에서는 액화천연가스가 수송선 밖으로 누출되었을 때의 시나리오를 크게 두 가지로 나누었다. 우선 Early ignition이 일어날 경우 누출된 액화천연가스는 Jet Fire형태로 화재가 발생되며, Late ignition이 일어날 경우 Pool fire의 형태로 화재가 일어난다. 후자의

경우, 노르웨이 선급에서 제시한 누출 시나리오는 1) Leak 2)Pool formation 3)Cloud Dispersion 4) Flash fire back 5) Pool Fire 이다. 그리고 미국선급에서 제시한 시나리오 역시 노르웨이선급에서 제시한 시나리오와 거의 유사하다. 선체 밖으로 액체천연가스가 누출된 상황에 대해서 Leak 과정과 Pool Fire에 대한 영향을 노르웨이 선급사에서 만든 위험성 평가 software인 Naptune을 사용하여 그 영향을 평가 해보았다. Pool Fire의 경우 생성된 Pool의 크기에 따라서 선체에 영향을 미치는 Radiation 값을 구하였다. Jet fire의 효과에 대해서도 선체에 생긴 Hole size를 직경 1m, 0.5m, 0.01m로 변경하면서 평가하였다. 평가 결과, LNG Pool의 직경이 12mm 이상이 되면 선체에 영향을 미쳤다.

2.3 LNGC 내부 누출

화물창에서 액화천연가스의 누출이 생긴다면, 일차적으로 화물창과 접하고 있는 부분인 Cofferdam, Ballast water Tank, 그리고 Duct Keel 부분으로 누출이 생기게 될 것이다. 각 부분의 온도는 액화천연가스가 기화하기에 충분히 높은 온도를 유지하고 있기 때문에 화물창으로부터 누출된 액화천연가스는 누출되면서 바로 기화한다고 가정 했을 때, 각 부분에서의 액화천연가스의 농도가 Low Flammable Limit(LFL)보다 높게 되고, 각 부분에 발화 원인이 있다면, 그곳은 화재의 위험성이 생기게 된다. 따라서 각 부분의 농도가 LFL에 도달되기 전에 venting등과 같은 조치를 해야만 한다.

각 부분에 대해서 한 시간 동안 누출이 발생하였을 때 LFL에 도달 하게 되는 누출 크기를 계산하였다. Duct keel과 Cofferdam의 경우 각각 1.43 mm, 2.26 mm 의 크기 일 때 한 시간 누출 시 LFL에 도달하는 것으로 계산되었다. 그리고 Ballast water tank의 경우 액체천연가스 액체 표면으로부터의 높이에 따라서 계산 했으며, 액체표면과 가까운 탱크 상부 부분에서 누출이 있을 때 보다 탱크 하부 부분에 누출이 있을 경우가 liquid head의 영향으로 누출 속도가 빠르게 되고 따라서 LFL에 도달되는 시간이 빠르며, 같은 시간일 경우 더 작은 누출 크기에도 LFL에 도달되게 된다. 액체표면으로부터 각각 2m, 12m, 25m 지점에서 누출이 1 시간 동안 발생되었을 경우에 Ballast water tank가 LFL에 도달하게 되는 누출 크기를 계산한 결과 각각, 5.97mm, 3.81mm, 3.17mm의 크기가 나왔다.

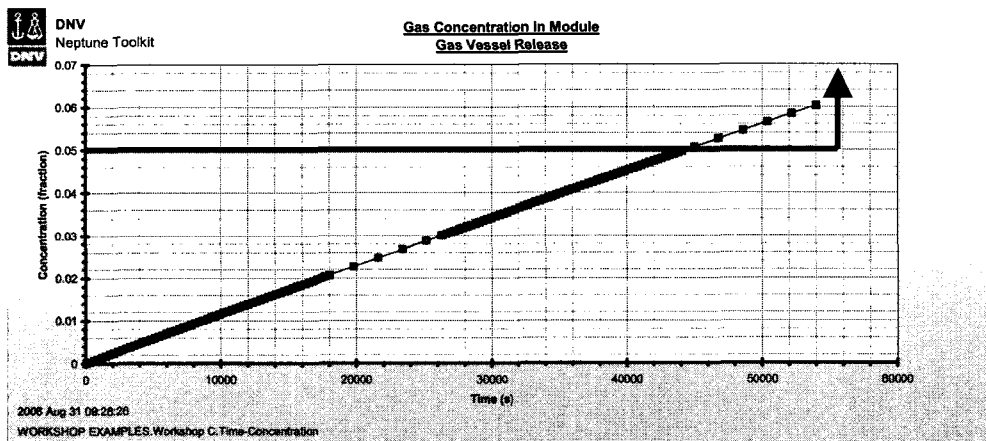


그림. 1 Cofferdam 내 LNG 기체 누출 시 LFL에 도달하는 시간

또한 5mm의 누출이 발생이 발생하였을 경우 LFL에 도달되는 시간을 계산하였다. 위에 누출 결과는 액화천연가스가 액체상태로 액체의 Liquid head의 영향으로 누출되는 것을 계산한 것으로 식(1)과 같은 미국선급에서 추천한 모델을 사용하여 계산 하였다.

$$Q = Cd \pi \rho R^2 (2gH)^{1/2} \quad (1)$$

화물창에서 누출되는 액화천연가스가 화물창의 2차 방벽 내에 머물면서 기화되고 2차 방벽과 각 부분 사이에 압력차이에 의해서 누출 되었을 경우에 대해서 노르웨이 선급사의 소프트웨어인 Neptune을 사용하여, 누출 크기를 직경 3mm부터 9mm까지 변화하면서 LFL 까지 걸리는 시간에 대하여 계산 하였다. 그리고 early ignition이 발생되어 jet fire가 cofferdam에 발생되었을 경우에 대해서도 계산을 하였다. 5mm, 8mm 누출이 발생될 때, LFL에 도달하는 시간은 12시간 40분, 4시간 43분이며 Jet fire의 경우 8mm 이상일 때부터 cofferdam 외부에 불길의 닿아 다른 화물창이나 거주구에 영향을 미쳤다.

2.4 Relief Valve Release

화물창안서 수송되는 액화천연가스는 외부와의 온도차등의 원인으로 인해서 에너지를 받게 되고 화물창 용량의 0.15%/ day 정도의 액화천연가스가 기화되어 BOG (Boil-Off Gas)가 된다. 이처럼 기화된 BOG의 영향으로 화물창의 압력은 상승하게 되고 화물창의 안전성을 위해서 일정 이상의 압력이 되면 BOG를 외부로 배출하게 된다. 보통 화물창의 압력이 0.05 barg 정도에서 초기에 운전하게 되며, 압력이 0.25 barg가 되면 Relief valve를 개방하여 BOG를 방출하게 된다. 이 때 방출되는 BOG에 의해 생기는 위험성에 대해서 Neptune을 이용하여 계산하였다. 우선 방출되는 BOG의 양을 계산하기 위해 BOG의 온도를 -155oC에서 0.05 barg일 때 와 0.25 barg 일때의 기체 상태의 Mole density를 HYSYS 소프트웨어로 물성을 계산을 하였고, Peng-Robinson 식을 상태 방정식으로 사용하였다. 그리고 화물창에서 기체가 차지하고 있는 부피를 Mole density에 곱하여 방출되는 BOG의 몰 수를 구하였다. Relief valve로 BOG가 방출될 때 발생하는 jet fire의 영향에 대하여 Neptune[5] 소프트웨어를 사용하여 계산 하였다. 이때 Relief valve의 위치에 따라서 거주구에 미치는 영향을 확인 하였다. 이때 대기의 조건은 1.03 bara, 20oC이며, Relief valve의 orifice diameter는 1cm 이며, 풍속 2 m/s의 조건이다. 그리고 방출 양 계산으로부터 방출 속도와 방출 시간을 계산 하였으며, 각각 0.02151 kg/s와 9040 sec 의 값이 나왔다.

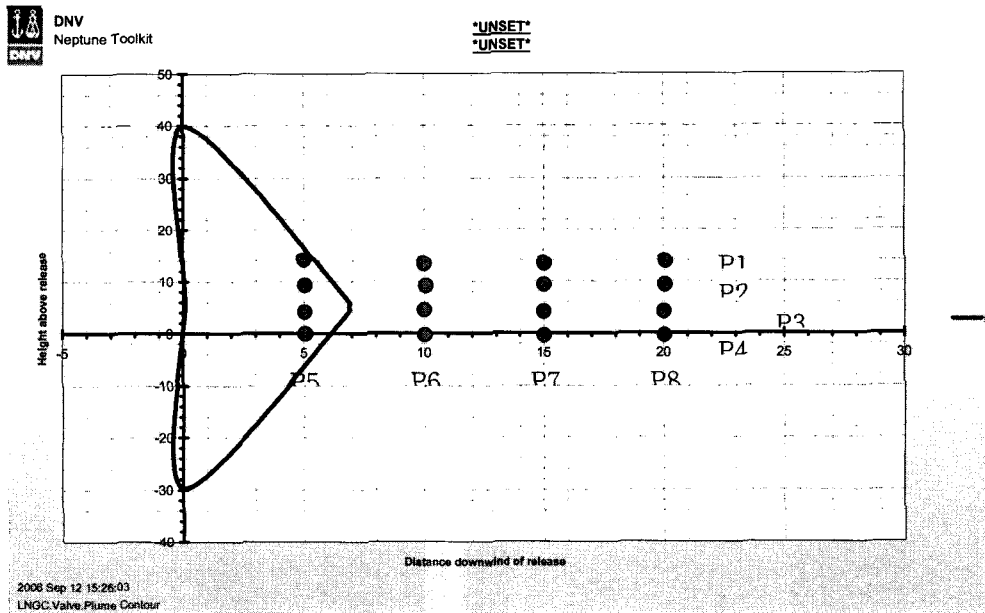


그림. 2 Relief valve 누출 시 valve 위치에 따른 거주구 위험성 평가

위의 조건으로부터 계산한 결과 Relief valve의 위치에 따라서 거주구에 화염의 영향을 미치지 않게 할 수 있다는 결과가 나왔으며, 설계 시 계산결과를 반영할 수 있을 것이다. 그리고 Relief valve의 orifice 직경을 각 5cm 이상으로 늘렸을 경우 Relief valve의 위치에 상관없이 거주구가 화염의 영향을 받는 것으로 결과가 나왔다.

3. FLACS를 이용한 폭발 분석

폭발에 의한 위험성평가는 크게 총 세가지로 나누어 실시하였는데, 첫째는 외부공격 또는 내부균열 등으로 인한 선축으로의 가스누출 시 폭발해석, 둘째는 운항 중 화물창의 균열로 인한 Ballast tank, Duct keel, Cofferdam 등으로의 가스누출 시 폭발해석, 셋째는 Relief valve로부터의 가스누출 시 폭발해석 이다. 각각의 폭발 시나리오는 산소와 메탄의 구성비율을 폭발이 가능한 0.5에서 2.0 사이로 가정하였으며(실제 발생확률이 낮음), FLACS[6]를 이용하여 폭발 시 발생하게 되는 압력과 온도를 계산하였다.

3.1 선축 누출가스의 폭발해석

먼저 소량 누출($45,000\text{m}^3$ 기화상태) 후 점화 경우에 대한 위험성 평가를 하였고 그림 3 과 같은 압력과 온도의 시계열을 얻었다. 압력의 경우 밀폐구간이 아니므로 낮은 값(0.02bar 이하)을 지나 온도의 경우 상당히 높은 값(2000도 이상)까지 도달함을 확인할 수 있었다.

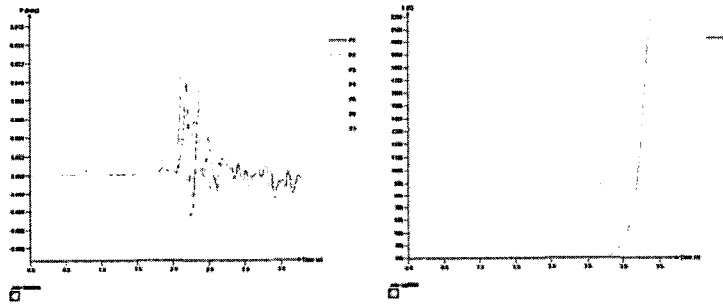


그림 3. 소량누출 후 폭발시 압력 및 온도변화

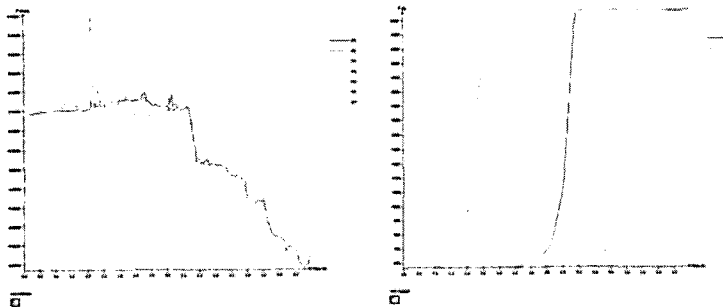


그림 4. 대량누출 후 폭발시 압력 및 온도변화

다음으로 다량의 누출($1,000,000\text{m}^3$ 기화상태) 후 점화 경우에 대한 위험성 평가를 하였으며 그림 4와 같은 압력과 온도의 시계열을 얻었다. 소량에서의 결과와 비슷한 양상을 보여주었다.

3.2 선체 내부 누출가스의 폭발해석

선체 내부의 가스누출은 그 원인에 관계없이 누출지역을 기준으로 세가지로 나누어 계

산을 수행하였는데, 첫번째는 Ballast Tank로의 누출 후 점화가 이루어진 상황이고, 두번째는 Cofferdam으로의 누출 후 점화가 이루어진 상황이며, 세번째는 Duck Keel로의 누출 후 점화가 이루어진 상황이다. 또한 FE Analysis로 구조해석을 수행하여 1bar의 등분포 하중당 최고 80Mpa의 응력이 발생함을 확인할 수 있었다.

그림 5는 Ballast tank 내의 폭발 시 압력변화와 온도변화로서, 압력은 1.8bar 이상까지 등분포로 전체 표면에 작용하며 온도는 1900K이상 연소가 일어나는 수초간 지속적으로 작용함을 확인할 수 있었다. Cofferdam 내에서의 폭발 시 압력변화와 온도변화는 Ballast tank와 비슷하며 압력은 2.8bar 이상까지 등분포로 전체 표면에 작용하며 온도는 2000K이상 연소가 일어나는 수초간 지속적으로 작용하였다. 그림 6은 Duct Keel 내에서의 폭발 시 압력변화와 온도변화로서, 압력은 2.8bar 이상까지 등분포로 전체 표면에 작용하며 온도는 2000K이상 연소가 일어나는 수초간 지속적으로 작용함을 보여주었다.

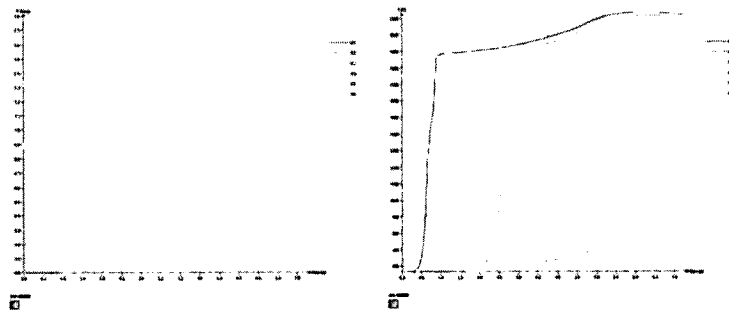


그림 5. Ballast Tank 내부 폭발시 압력 및 온도변화

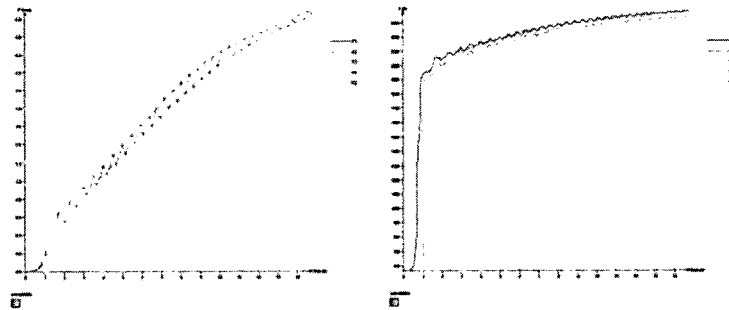


그림 6. Duct keel 내부 폭발시 압력 및 온도변화

폭발에 의한 구조적 파손을 알아보하고자 위의 계산결과와 FE Analysis를 바탕으로 예측한 폭발 시 발생 Stress를 참고로 한 결과, 폭발에 의해 발생하는 응력은 최대 400Mpa 정도이고 이는 선박건조 시 사용되는 후판이 기본적으로 가지는 응력인 235Mpa를 넘는 값들이 많으므로 폭발 시 구조적 파손은 필히 동반되리라고 예측되었다.

3.3 거주부 인접지역 누출가스의 폭발해석

거주부 인접지역에서의 가스누출 원인은 Relief Valve의 작동으로 가정하였고 이로 인해 누출될 수 있는 최대 가스의 양을 산정하여 거주부 앞면 하단에서의 점화로 인한 폭발 계산을 수행하였다. 계산결과 중 가장 높은 온도 발생시 압력 및 온도변화는 그림 7과 같다. 즉, 압력은 0.02bar 이하로 그리 높지 않으나 온도가 2300K 이상이 수초간 지속되는 부분이 있음을 확인할 수 있었다.

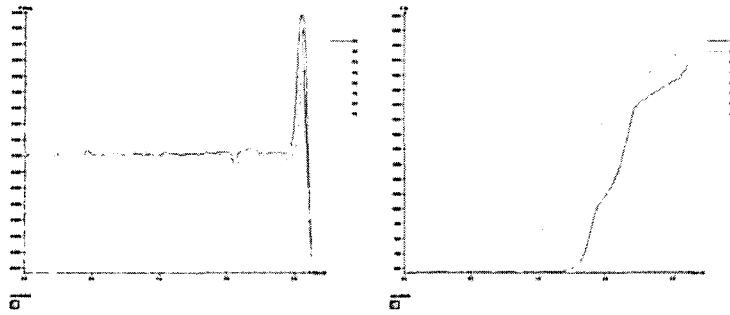


그림 7. 거주부 인접지역 폭발시 압력 및 온도변화

4. 결 론

Neptune를 이용하여 누출과 화재 해석을, FLACS를 이용하여 누출의 결과로 발생할 수 있는 폭발 해석을 수행하였다. 본 모델에 대한 폭발계산은 가스구성비나 발화조건이 실제 일어나기 거의 불가능한 상황이지만 인위적으로 최악의 상황을 가정하였다.

Pool Fire의 경우 생성된 Pool의 크기에 따라서 선체에 영향을 미치는 Radiation 값을 구하였고 Jet fire의 효과에 대해서도 선체에 생긴 Hole size를 변경하면서 평가 하였다. 평가 결과, LNG Pool의 직경이 12mm 이상이 되면 선체에 영향을 미쳤다. Hole size를 변화 하면서 LFL까지 걸리는 시간을 계산하고 early ignition이 발생되어 jet fire가 cofferdam에 발생되었을 경우에 대해서도 계산을 하였다. 5mm, 8mm 누출이 발생될 때, LFL에 도달하는 시간은 12시간 40분, 4시간 43분이며 Jet fire의 경우 8mm 이상일 때부터 cofferdam 외부에 불길의 닿아 다른 화물창이나 거주구에 영향을 미쳤다. Relief valve의 위치에 따라서 거주구에 화염의 영향을 미치지 않게 할 수 있다는 결과가 나왔으며, Relief valve의 orifice 직경을 5cm 이상으로 늘렸을 경우 Relief valve의 위치에 상관없이 거주구가 화염의 영향을 받는 것으로 결과가 나왔다.

가정된 가스누출 시나리오를 바탕으로 폭발 결과를 산정해 본 결과, 개방된 공간에서는 압력보다 온도에 중점적인 관심을 두어야 할 것으로 보이고, 밀폐된 공간에서는 온도 영향 뿐만 아니라 압력도 상당히 크므로 구조적 대형손상이 우려될 것으로 예측되었다.

5. 참고 문헌

- [1] Hightower, H. et. al., "Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a LNG Spill Over Water", *Sandia National Laboratories*, (2004)
- [2] Risk Consulting Division, "Consequence Assessment Methods for Incidents involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers", *ABS Consulting*, (2004)
- [3] Authen, T.K. et. al., "Gas Carriers-Effects of Fire on the Cargo Containment System", *Proceeding, GASTECH*, 76, (1976)
- [4] Brandeis, J. and Ermak, D. L., "Numerical Simulation of Liquefied Fuel Spills: II. Instantaneous and continuous LNG Spills on an unconfined water surface", *Int. J. for Num Meth. In Fluids*, 6, 127-140, (1980)
- [5] Neptune Offshore Introduction, *DNV Software*, (2006)
- [6] FLACS, "FLACS V8 User's Guide", *A company in the CMR Group*, (1999)