

LNG Vent Mast의 풍하중/지진하중 해석에 관한 연구

A Study of Wind/Earthquake Load Analysis for LNG Vent Mast

김태욱¹, 조수길¹, 박상현², 오재원¹, 이정희¹, 배상은³, 김형우^{1*}

Tae-Wook Kim¹, Su-gil Cho¹, SangHyun Park², Jae-Won Oh¹, Jung-Hee Lee¹,
SangEun Bae³, Hyungwoo Kim^{1*}

〈Abstract〉

As global warming accelerates due to global climate change, the International Maritime Organization(IMO) has set up Emission Control Area(ECA) and encourages the use of Liquefied Natural Gas(LNG). For this reason, as the demand for LNG increases, the demand and research of related equipment also increases. In this study, one of them, the vent mast for the discharge of LNG was studied. In general, vent mast receives various loads such as wind load, earthquake load and dead load during operation. Accordingly, consideration of these loads is essential for structural design and safety evaluation of the vent mast. In this study, the structural safety of the vent mast is evaluated by performing finite element analysis. As a result, the structural safety evaluation results were analyzed based on the database of materials of the vent mast, and the stress level was analyzed to provide a design guide.

Keywords : Vent Mast, Structural Analysis, Wind Load, Earthquake Load

1* 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터

E-mail:hyungwoo4601@kriso.re.kr

2 한양대학교 미래자동차공학과

3 정우이앤이(주)

1* Offshore Industries R&BD Center, KRISO

2 Department of Automotive Engineering, Hanyang University

3 Jungwoo E&E, Inc

1. 서론

세계적으로 해상에서 운송되는 화물의 양이 점차 증가하게 되고, 운송 시 사용되는 화석 연료의 증가로 인한 환경오염 물질 배출량의 증가와 함께 불안정한 기후 변화로 인해 지구 온난화가 점차 가속화되고 있다. 국제 해양 환경 관련 기구인 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 온실가스 배출 및 유해가스인 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx)의 배출에 관한 환경규제를 강화하고 있다[1]. 이러한 방안의 일환으로 배출가스 통제구역을 설정하고, 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)를 사용하도록 권장하고 있다[2].

LNG의 수요가 증가함에 따라 LNG 관련 기자재의 수요와 연구 또한 증가하고 있는 실정이다. 그 중에서도, LNG 플랜트 분야에서 기획하는 LNG의 핸들링을 위한 시스템이 가장 중요하게 생각되며, Vent mast가 그 역할을 수행하는 주요 설비로 적용되고 있다.

LNG 플랜트의 경우 펌프 혹은 탱크 내부의 압력이 설계 압력 이상으로 상승하거나 이상 상황이 진단되었을 때, 내부에 있는 기체 혹은 유체를 즉시 배출해야 한다. 이 때, LNG를 외부로 배출하기 위해 사용되는 설비가 Vent mast이다. 이런 용도로 사용되는 육상용 LNG Vent mast는 운송 시 풍하중, 지진하중, 사하중 같은 다양한 하중을 받게 된다. 그러므로 Vent mast의 구조 설계 및 안전성 평가를 위해서는 앞서 언급한 다양한 하중들이 필수적으로 고려되어야 한다.

특정 구조물의 설계 및 실적용을 위해서는 이렇게 특수한 상황의 하중들을 고려한 구조안전성 평가를 수행해야 한다. 과거 연구에서는 이러한 하중을 고려하여 유한요소해석을 이용한 해양 로딩암의 구조안전성 평가가 수행되었고[3], 액화저

장탱크의 지진 취약도 평가를 위한 수치 해석적 연구 또한 수행되었다[4]. 하지만, 육상용 Vent mast에 이러한 하중들을 적용하여 구조 안전성 평가를 수행한 연구는 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 풍하중, 지진하중, 사하중을 고려한 유한요소해석을 수행하여 Vent mast 구조물의 구조 안전성을 평가하였다. 참고로, Vent mast의 설치 및 설계를 대상으로 하는 관련 규정은 없기 때문에, LNG의 이송 관련 시스템의 종합적인 설치 및 설계에 대한 대표적인 규정인 EN 1474-3(Installation and equipment of liquefied natural gas - Design and testing of marine transfer systems)을 참조하였다[5].

결과적으로, Vent mast의 재료에 대한 데이터 베이스를 기반으로 구조해석을 수행함으로써 구조 안전성을 평가하고, 응력수준을 분석하여 설계 가이드를 제시하였다.

2. 구조해석 개요

2.1 유한요소해석 모델

구조해석을 수행하기에 앞서, 상용 구조해석 소프트웨어인 ABAQUS[6]를 이용하여 Vent mast의 구조해석용 유한요소 모델을 구성한 후 mesh study를 수행하였다. 이를 통해 Vent mast의 다양한 하중 하에서의 구조 안전성을 검토하였다.

구조 안전성 평가를 위한 Vent mast의 전체 높이는 24 m이며, 하단부 body의 지름은 1.02 m, 상단부 body의 지름은 0.81 m이다. 추가로, support 부의 지름은 1.02 m이다.

해석 case는 전체 높이 24 m의 1/3인 8 m와 2/3인 16 m 지점에 존재하는 support 부의 두께

에 따라 표 1과 같이 2가지로 분류하였으며, 각각의 case에 적용된 요소 타입은 ABAQUS에서 제공하는 C3D10(A 10-node quadratic tetrahedron)이다. case별로 모델에 사용된 요소 타입 및 개수, 노드 개수는 표 1에 함께 나타내었다. 추가적으로, 그림 1은 본 해석에서 구성한 ABAQUS 해석용 모델을 나타낸다.

Vent mast에 사용된 재질은 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강인 SUS304이며, 이를 적용하여 해석을 수행하였다. 표 2는 해석에 적용한 SUS304의 물성치를 나타내며, 규정에 따라 구조해석 결과 검증 시에도 SUS304의 항복 응력을 기준으로 일정 계수를 곱하여 허용응력을 산정함으로써 안전계수를 도출하였다.

또한, 구조해석에 적용된 경계 조건은 그림 2와 같이 육상과 접하는 Vent mast의 하부 플레이트에 대해 z방향으로 fixed condition을 적용하였고, 하부 플레이트의 볼트 삽입 부분에서는 볼트의 기능을 고려하기 위해서 그림 3과 같이 6자유도 방향을 모두 구속하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Information of analysis case and FE model

Case	1	2
Thickness of support	10t	20t
Element type	C3D10 (10-node Tet)	C3D10 (10-node Tet)
Number of element	249,469	488,615
Number of node	239,001	474,389

Table 2. Mechanical properties of SUS304

Material	SUS304
Density [kg/m ³]	7800
Elastic modulus [GPa]	210
Poisson ratio	0.3
Yield strength [MPa]	205

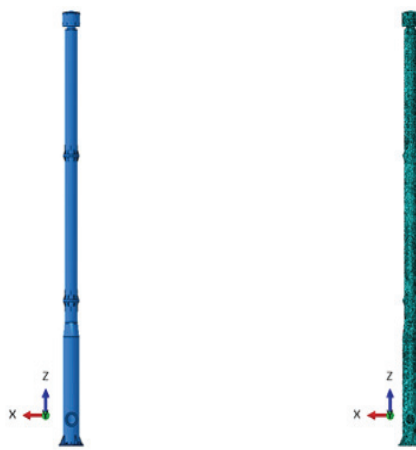


Fig. 1 FE model of vent mast for ABAQUS

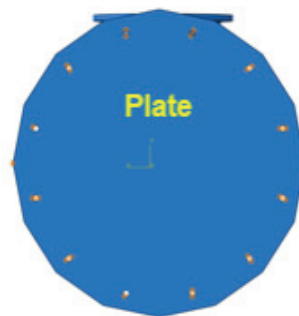


Fig. 2 Fixed condition in the z direction for the bottom plate of vent mast



Fig. 3 Fixed condition(all DOF) for bolted hole of vent mast

2.2 적용 하중

앞서 언급한 대로, 구조해석에 적용된 하중 조건은 규정 EN 1474-3에 따라 풍하중, 지진하중, 사하중을 고려하였다. EN 1474-3 규정에서는 풍하중과 지진하중이 함께 발생하는 극심한 상황은 발생할 가능성이 상당히 낮아서 고려하지 않아도 된다고 규정하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 각각의 하중을 구조해석에 적용할 때, 표 3과 같이 사하중과 풍하중을 함께 고려하는 경우와 사하중과 지진하중을 함께 고려하는 경우로 나누어서 해석을 수행하였다.

Table 3. Load Cases (EN 1474-3)

No.	Load Cases	Allowable stress
1	DL(Dead Load) +WL(Wind Load)	1.2×yield strength
2	DL(Dead Load) +EL(Earthquake Load)	1.2×yield strength

사하중은 Vent mast에 재료 물성치를 적용하고 프로그램 상에서 산정한 전체 중량 8.87 ton에 대해 높이방향인 z방향으로 gravity 형태의 하중을 적용하였다.

풍하중의 경우에는 상용 소프트웨어인 ANSYS fluent를 이용하여 그림 4와 같이 풍속 40 m/s를 적용한 유동 해석 기반으로 전체 하중 15,500 N을 산출하였으며, 이를 그림 5와 같이 x방향으로 외부 전체 volume의 각각의 element에 대해 단위 부피에 분산되어 적용되는 하중인 body force 형태로 적용하였다.

지진하중의 경우에는 육상용 가스시설 및 배관의 내진설계 관련 규정인 KGS GC203 2018(가스시설 및 지상 가스배관 내진설계 기준)을 참조하여 산정하였다[7].

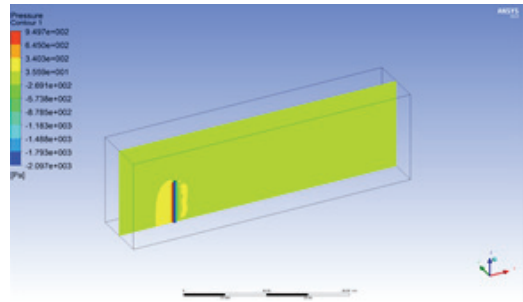


Fig. 4 Flow analysis results applying wind speed of 40m/s



Fig. 5 Wind load application of FE model

KGS GC203 2018에서는 그림 6과 같이 행정구역에 따라 지진구역 및 지진구역 계수를 구분하여 산정하고, 그림 7과 같이 재현주기에 따라 위험도 계수를 산정할 수 있다.

본 연구에서의 육상용 LNG vent mast의 경우, 지진구역 계수는 육상 설치지역인 경상남도를 기준으로 0.11g로 가정하였다[Fig. 6 참조]. 위험도 계수는 규정에 따라 내진 등급, 중요도 등급, 영향도 등급을 고려하여 내진성능수준을 먼저 산정하고, 이를 통해 지진의 재현주기 100년에 해당하는 위험도 계수인 0.57을 가정하였다[Fig. 7 참조].

표2.5.3.1 지진구역 및 지진구역계수(Z)

지진 구역	행정 구역	지진구역계수 (Z)
I	시 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시, 세종시	0.11 g
	도 경기도, 강원도, 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도	
II	도 강원도 북부, 제주도	0.07 g

강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시

Fig. 6 Earthquake zone and earthquake zone coefficient[7]

표2.5.3.2 위험도 계수(I)

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400	4800
위험도계수	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0	2.6

Fig. 7 Risk factor[7]

위의 가정을 통해 산정된 지진구역 계수와 위험도 계수를 고려하여 유효 수평 지반 가속도를 0.627로 계산하였다. 최종적으로, 단주기스펙트럼 증폭계수인 2.8을 곱하여 최대 수평 가속도를 1.76으로 산정하고, 최대 수직 가속도는 규정에 따라 최대 수평 가속도의 0.77 비율인 1.35로 산정하였다. 이와 관련된 계산 값들은 표 4에 정리하였다.

최종적으로, 표 4와 같이 산정된 최대 수평 및 수직 가속도를 구조해석에 지진하중의 형태로 적용하였다.

Table 4. Calculated results of maximum horizontal and vertical accelerations

항목	계산 값
지진구역 계수(Z)	0.11g
위험도 계수(I)	0.57
유효 수평 지반 가속도($S=Z \times I$)	0.627
단주기스펙트럼 증폭계수(α_A)	2.8
최대 수평 가속도($S_{max}=S \times \alpha_A$)	1.76
최대 수직 가속도($S_{max} \times 0.77$)	1.35

3. 구조해석 결과 및 고찰

3.1 풍하중 해석 결과

먼저, Support 부의 두께를 10t와 20t를 적용한 case 1, 2의 풍하중 및 사하중을 적용한 구조 해석 결과는 그림 8, 9와 같다.

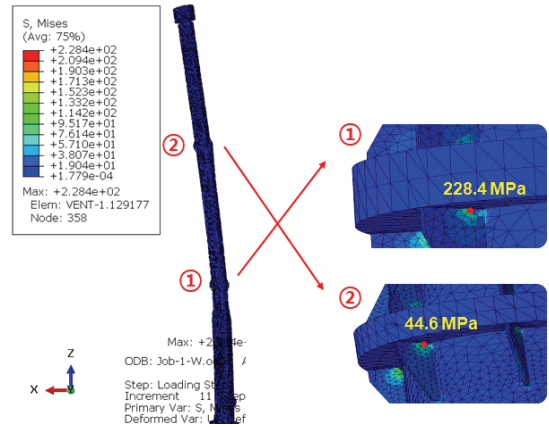


Fig. 8 Stress distribution of vent mast in case 1 applying dead load and wind load

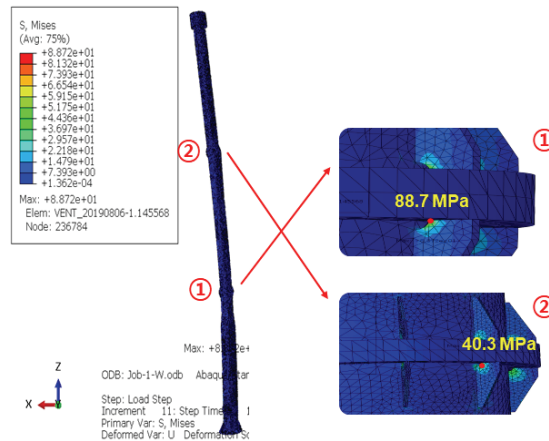


Fig. 9 Stress distribution of vent mast in case 2 applying dead load and wind load

Case 1에서의 vent mast의 1차 최대 응력은 아래쪽의 support 부에서 228.4 MPa이 발생하며, 2차 최대 응력은 위쪽의 support 부에서 44.6 MPa이 발생하였다.

해석 결과의 검증을 위해서는 적용 재료인 SUS304를 기준으로 표 3의 계수 1.2를 곱하여 허용 응력을 246 MPa로 산정하였다. 산정된 허용 응력을 이용하여 case 1에서의 1차 최대 응력에 대한 안전계수를 산정하였으며, 계산된 안전계수는 표 5에 나타난 바와 같이 1.08이다.

Case 2에서의 1차 최대 응력은 아래쪽의 support 부에서 88.7 MPa이 발생하며, 2차 최대 응력은 위쪽의 support 부에서 40.3 MPa이 발생하였다. 이 때, 1차 최대 응력에 대한 안전계수는 표 5와 같이 2.77로 계산되었다. 이에 따라 해당 vent mast 모델은 풍하중에 구조적으로 상당히 안정함을 알 수 있었다.

3.2 지진하중 해석 결과

위의 구조해석 결과에 따라 case 1의 풍하중 해석 결과에 대한 안전계수가 1.08로 상당히 낮기 때문에, 설계 시 case 1의 support 두께인 10t를 채택하지 않고 case 2의 support 두께 20t를 채택해야 한다고 가정한 후 지진하중 해석을 case 2에 대해서만 수행하였다.

case 2의 지진하중 및 사하중 해석 결과는 그림 10과 같고, Vent mast의 1차 최대 응력은 아래쪽의 support 부에서 169.3 MPa이 발생하며, 2차 최대 응력은 하부 플레이트 상단의 hole 부에서 105.1 MPa이 발생한다. 해석 결과 중 1차 최대 응력에 대하여 허용 응력에 대해 안전계수를 산정하였으며, 계산된 안전계수는 표 5와 같다.

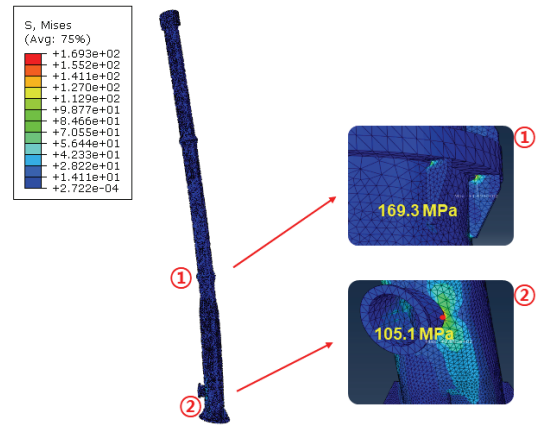


Fig. 10 Stress distribution of vent mast in case 2 applying dead load and earthquake load

Table 5. Structural analysis results

Case	Maximum stress [MPa]	Allowable stress [MPa]	Safety factor
1 (DL+WL)	228.4	246	1.08
2 (DL+WL)	88.7	246	2.77
2 (DL+EL)	169.3	246	1.45

계산된 안전계수의 값에 대한 평가는 사용 재료의 종류와 구조물의 용도에 따라 달라지며, 설계자가 경험적으로 그 값에 대한 평가를 수행하게 되어있다. 일반적으로, 취성재료가 아닌 연성재료인 스테인리스강에 대해서는 추가적인 마진을 두지 않는다[8]. 또한, 신뢰성 있는 재료를 사용하고, 작용 하중 및 응력의 크기를 파악할 수 있는 구조물의 경우 1.25~1.5정도의 안전계수만 확보되어도 충분히 안전한 구조물이라고 평가할 수 있다[8]. 따라서 본 해석 모델의 실적용은 적합하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Vent mast의 설계를 위해 구조적 안전성 평가를 수행하였고, 최종적으로 응력 수준을 분석하고 적용 재료인 SUS304에 대해 안전계수를 산정하였다. 이에 따라 vent mast 적용의 적합성 평가를 수행하였다.

해석 시에는 두 가지의 support부 두께에 대한 해석 case를 선정하여 해석을 수행하였으며, 크게 풍하중, 지진하중, 사하중에 대해 구조 안전성을 평가하였다.

각각의 결과에 대하여 1차 최대 응력 발생 지점은 해석 case 및 적용 하중의 종류에 관계없이 같았다. 결론적으로, case 2의 풍하중 해석 결과의 경우, 최대 응력은 88.7 MPa로 안전계수 2.77을 확보할 수 있었다. 또한, 지진하중 해석 결과의 경우, 최대 응력은 169.3 MPa로 안전계수 1.45를 확보할 수 있었다. 이에 따라 본 해석 모델의 실적용은 적합하다고 판단된다.

결과적으로, 본 연구에서는 vent mast의 전체적인 구조에 작용하는 다양한 하중에 대한 구조 안전성을 평가하였다. 추후의 연구에서는 vent mast 구조물의 보강 시 적용되는 와이어나 트러스와 같은 보강 형태에 따른 응력수준 감소를 평가하기 위해 추가적인 해석적 연구 또한 수행할 예정이다.

사 사

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양플랜트 머티리얼 핸들링 핵심기술 및 운영·유지보수 위험도 평가/관리 기술 개발” 사업(PES3470) 및 2020년 해양플랜트 서비스산업 공동활용 기반구축 사업(PGS3991)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Det Norske Veritas (DNV), “Greener Shipping in the Baltic Sea”, Technical report, (2010).
- [2] T. Unseki, “Environmentally Superior LNG-Fueled Vessels”, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 50, no. 2, pp. 37-43, (2013).
- [3] C. Y. Song, H. Y. Choi, and S. H. Shim, “Structural safety evaluation of marine loading arm using finite element analysis”, Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 27, no. 1, pp. 43-50, (2013).
- [4] S. M. Lee, and Y. J. Lee, “Seismic Fragility Assessment of Liquid Storage Tanks by Finite Element Reliability Analysis”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 18, no. 4, pp. 718-725, (2017).
- [5] EN 1474-3, Installation and equipment of liquefied natural gas – Design and testing of marine transfer systems – Part 3:Offshore transfer systems, European Standard, (2008).
- [6] ABAQUS Users Manual, Version 2016, Dassault Systems, (2016).
- [7] KGS(Korea Gas Safety) GC203 2018, Code for Seismic Design of Gas Facilities and Aboveground Pipes, Korea Gas Safety Corporation, (2018).
- [8] J. P. Vidosic, “Machine Design Projects”, Ronald Press Company, (1957).

(접수: 2020.03.05. 수정: 2020.03.25. 게재확정: 2020.04.02.)