



완전밀폐식 LNG 저장탱크에 작용하는 풍압에 의한 강도안전 해석에 관한 연구

†김청균 · 정남인

홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과
(2008년 3월 3일 접수, 2008년 3월 17일 채택)

A Study on the Strength Safety Analysis of a Full Containment LNG Storage Tank Due to a Wind Pressure

†Chung Kyun Kim · Nam In Jeong

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received March 3, 2008, Accepted March 17, 2008)

요 약

본 논문에서는 완전밀폐식 LNG 저장탱크의 외부탱크 측벽면과 지붕 구조물에 대한 강도안전성을 유한요소법으로 해석하였다. 예응력 콘크리트 구조물로 건설된 외부탱크는 내부탱크의 붕괴로 인해 발생하는 LNG 유체정압과 유체동압, 그리고 태풍을 포함한 외부의 풍압하중을 받는다. FEM 해석결과에 의하면, 외부탱크의 측벽면과 지붕 구조물이 서로 연결되는 링빔 구조물은 저장탱크에 작용하는 대부분의 내·외부 하중을 담당하고 있다. 이러한 해석결과를 외부탱크의 설계 포인트를 링빔에 두고, 그 다음은 지붕 구조물의 중심부에 대한 설계 안전성을 검토하는 것이다. 완전밀폐식 LNG 저장탱크 해석에서 사용한 해석모델은 LNG 누설에 의한 내부압력 및 태풍과 같은 외부압력이 결합된 복합하중에서도 안전한 강도안전성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

Abstract – Using the finite element analysis, this paper presents the strength safety of a side wall of an outer tank and a roof structures in a full containment LNG storage tank system. The outer tank structure in which is constructed with a prestressed concrete is forced by internal hydrostatic and hydrodynamic pressures of a leaked LNG and an external wind pressure including a typhoon one. The FEM computed results show that the ring beam between a side wall of an outer tank and a roof structure supports most of the internal and the external loads. This means that the design point of the outer tank system is a ring beam structure and the other one is a center part of the roof structure. In this FE analysis model of a full containment LNG tank system, the outer tank and the roof structures are safe for the given combined loads such as an internal leaked LNG pressure and an external typhoon pressure.

Key words : Wind pressure, Full containment LNG storage tank, Strength safety, Outer tank, Roof structure, FEM

I. 서 론

완전밀폐식 LNG 저장탱크(full containment LNG storage tank)는 -162°C 의 LNG를 안전하게 저장하고 공급하는 역할을 담당한다. LNG 저장탱크에는 초저온 특성이 우수한 9% 니켈강재로 제작한 평저원형의 내부탱크(inner tank)와 이 탱크의 외곽에 두꺼운 예응력 콘크리트(prestressed concrete) 구조물로 제작한 외부탱

크(outer tank), 이들 두 탱크 사이에 열이동을 차단하기 위한 단열재를 채워서 하나의 거대한 LNG 저장탱크 시스템을 구성한다[1].

외부탱크는 LNG 저장탱크의 모든 하중을 1차적으로 담당하여 강도안전성(strength safety)을 확보해야 하지만, 내부탱크의 국부적인 파손이나 급격한 붕괴로 인해 LNG가 내부탱크로부터 유출되는 경우에도 외부탱크에 의해 잠시 체류할 정도의 누설안전성을 갖추고 있어야 한다. 외부탱크는 LNG 저장탱크 시스템에 작용하는 모든 하중을 충분히 감당할 수 있도록 하기 위해 초저온

†주저자: chungkyunkim@empal.com

LNG에 의한 정압과 동압, 외부의 지진하중과 충격하중(공중 낙하물체나 미사일 등을 포함), 풍압(wind pressure)이나 설압(snow pressure)과 같은 자연의 하중을 고려하여 설계해야 한다.

보통 LNG 저장탱크는 인제에 의한 폭발이나 붕괴 사고가 대부분이지만, 2002년에 발생한 통영기지의 LNG 저장탱크 사고[2-4]에 대한 원인규명 단계에서 일본 연구진이 제시한 태풍에 의한 사고 가능성은 대단히 흥미로운 시나리오였다. 우리나라는 한반도의 지정학적 위치로 인해 태풍의 피해[5]를 매년 경험하기 때문에 LNG 저장탱크처럼 대형 콘크리트 구조물을 건설할 경우는 반드시 풍압을 고려해야 한다. 2003년의 “매미”처럼 강력한 태풍은 LNG 저장탱크와 같은 초대형 구조물의 강도안전성에 영향을 미칠 수 있는 중요한 외부하중으로 LNG 외부탱크 설계에서 고려해야 한다. 지난 20년간 우리나라에서 건설된 LNG 저장탱크는 급격하게 증가하였지만 풍압에 대한 안전성 연구는 지진하중 연구에 비해 많이 부족한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 LNG 외부탱크에 풍압이 작용할 경우, 콘크리트 구조물의 강도안전성에 관련된 응력과 거동특성을 유한요소법으로 해석하고자 한다.

II. 해석모델 및 해석조건

2.1. 외부탱크의 해석모델

LNG 저장탱크에 작용하는 내외부의 모든 하중을 담당하기 위한 외부탱크는 바닥(bottom), 측벽(side wall), 지붕(roof)이 하나의 일체형 구조물로 제작되어 지진하중, LNG에 의한 가스압과 액압, 풍압과 설압 등과 같은 하중조건을 충분히 견디도록 설계되어 있다. 여기에 완전밀폐식의 LNG 저장탱크는 완전방호식의 개념으로 제작되므로 내부탱크에서 발생한 증발가스나 내부탱크의 손상으로 인한 LNG의 외부누설을 완벽하게 차단하는 기능도 함께 확보해야 한다.

하중과 밀봉기능을 함께 확보해야 하는 외부탱크는 예응력 콘크리트(prestressed concrete) 구조물의 완전방호 개념으로 건설되기 때문에 원자력 발전소의 콘크리트 구조물 이상의 강도안전성을 확보하고 있다. 외부탱크의 외곽에 작용하는 풍압, 설압, 낙하물에 의한 충격하중 등 강도안전성을 고려하는 제1순위는 태풍에 의한 풍압을 가장 위험한 설계기준으로 삼고 있다. 따라서 Fig. 1에서 보여준 외부탱크 구조물에 유한요소법을 적용하여 풍압을 중심으로 강도안전성에 대한 수치해석 연구를 수행하였다.

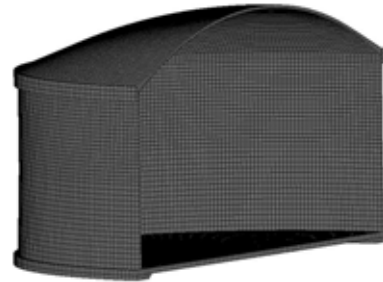


Fig. 1. Finite element model of the prestressed concrete outer tank.

내부탱크 구조물의 강도안전성 해석을 위해 사용한 유한요소는 4개의 노드(node)를 갖는 Bilinear Thin-shell로 복잡한 판 구조물뿐만 아니라 곡선형태의 셸(shell) 구조물 해석에도 적합하고, 특히 비선형 유한요소해석에 유용한 요소이다. 본 연구에서 사용한 유한요소해석 프로그램은 MSC/MARC이다[6].

2.2. 외부탱크에 작용하는 하중조건

모든 하중을 담당해야 하는 외부탱크 구조물은 고강도 안전성을 확보할 수 있도록 고밀도의 압축강도 콘크리트로 건설하기 위한 설계기준을 엄격하게 적용하고 있다. 그러나 콘크리트 구조물은 제조과정에서 이물질의 혼입, 기공의 발생, 불완전한 양생 등에 의해 국부적인 결함은 존재하지만 강도에는 문제가 없다. 이들 결함을 반영한 강도안전성에 대한 검증은 실제의 저장탱크에 대한 모의실험을 통해 수행할 수는 있지만 현실적으로 불가하기 때문에 불가피하게 유한요소법으로 해석한다. 본 연구에서 사용한 FEM 해석법은 Table 1과 같은 기계적 특성을 갖는 외부탱크 콘크리트 구조물의 균질성을 보장할 것이라는 가정하에 강도안전성을 고찰하기로 한다.

Fig. 2에서 보여준 LNG 외부탱크의 내측면에는

Table 1. Mechanical properties of a prestressed concrete.

Parameters	Material	Concrete
Young's modulus, MPa		3.04×10^4
Poisson's ratio		0.2
Mass density, kg/m ³		2,500
Thermal expansion coefficient at -200°C, $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$		10×10^{-6}
Thermal conductivity at -200°C, W/m · K		2.326
Specific heat at 100°C, J/kg · K		837.21

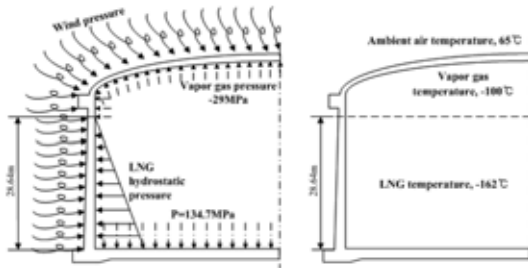


Fig. 2. Boundary conditions of the outer tank structure.

Table 2. External forces by a wind pressure depending on the wind speed.

Speed, m/s	Force, N
20	705,845
30	1,583,411
40	2,814,952
50	4,398,363
60	6,333,642
70	8,620,791

LNG 액압과 증발가스 압력, 초저온 하중이 복합적으로 작용하고, 외측면에는 Table 2에서 제시한 풍압이 작용한다는 하중조건을 적용한 상태에서 LNG 저장탱크의 강도안전성을 해석하였다.

외부탱크의 외측면에 작용하는 풍압은 Table 2에서 제시한 풍압하중을 사용하였고, LNG 저장탱크의 강도 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있는 풍압은 태풍에 의한 일시적인 충격하중이 대표적이다.

태풍은 최대풍속이 17 m/s 이상의 열대성 저기압에서 발생하는 거대한 습공기 소용돌이로 LNG 저장탱크 처럼 구조물의 수압면적이 증가할수록 강력한 파괴력을 갖는다. 태풍은 최대풍속의 크기에 따라 보통은 약, 중, 강, 매우 강한 태풍의 4가지로 분류한다. 약한 태풍은 최대풍속이 17 m/s~25 m/s일 때, 중급 태풍은 최대풍속이 25 m/s~33 m/s일 때, 강한 태풍은 최대풍속이 33 m/s~44 m/s일 때, 매우 강한 태풍은 최대풍속이 44 m/s 이상일 때로 풍속과 풍압하중 데이터를 Table 2에서 제시한다.

III. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 내부탱크가 파손함에 따라 Fig. 2의 외부탱크에는 LNG에 의한 내부하중 및 태풍과 같은 풍압하중에 의한 외부하중들이 벽면에

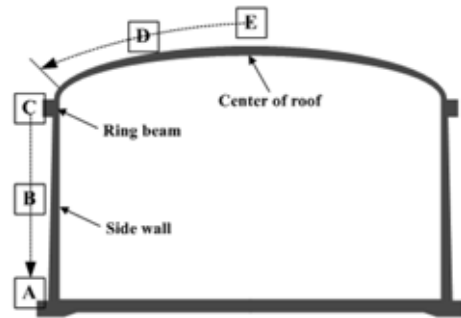


Fig. 3. Observed positions of the stress and the deformation along a side wall and a roof structure.

작용할 경우 발생하는 콘크리트 구조물의 응력과 변위량에 대한 강도안전성을 고찰하였다.

Fig. 3은 외부탱크의 측벽면과 지붕 구조물에 걸리는 응력과 변형거동 안전성에 대한 측벽면과 지붕 구조물의 강도안전성 관찰방향을 2차원적으로 나타내고 있다. 즉, 강도안전성 고찰을 위해 관찰한 주요부는 외부탱크의 측벽면 하단부 A와 중간부 B, 링빔부 C, 지붕과 링빔부의 중간부 D, 지붕의 중심부 E 등 5 곳이다.

3.1. 외부탱크 측벽면의 응력 및 변위량

외부탱크 구조물의 외벽면에 작용하는 풍속이 0 m/s~70 m/s일 때, 즉 미풍에서 매우 강한 태풍급 이상의 풍압이 외벽면을 강타할 경우 콘크리트 구조물에서 발생하는 응력과 변위거동 특성을 Fig. 4에서 제시한다. 풍속이 가장 높은 70 m/s에 대한 Fig. 4(a)의 해석결과에 의하면 지붕과 측벽면을 연결하는 링빔부 C에서 가장 높은 17 MPa의 von Mises 등가응력이 발생하고, 측벽면의 중간부 B보다 약간 높은 곳에서 가장 낮은 2.8 MPa의 von Mises 등가응력이 작용하지만, 측벽면의 하단부 A에서는 15.2 MPa로 다시 증가하면서 안전한 콘크리트 구조물을 형성하고 있다.

또한 x-방향의 변위거동을 보여준 Fig. 4(b)에 의하면, 수직방향으로 작용하는 변위량은 최대 1.7 cm로 링빔부 C에서 나타났고, 외부탱크의 바닥면으로 가면서 변위량이 완만하게 줄어드는 경향을 보여준다. 그러나 y-방향의 거동특성을 보여준 Fig. 4(c)는 풍압조건에 대해 약간씩 다르게 나타났다. 최대변위는 링빔부 C보다 약간 아래쪽에서 발생하였으나, 실제의 반경방향 변위량 크기는 극히 작으며, 오차범위에서 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 해석에 적용한 풍압 조건에 대한 측벽면 구조물의 강도안전성은 충분히 확보된 것으로 생각된다.

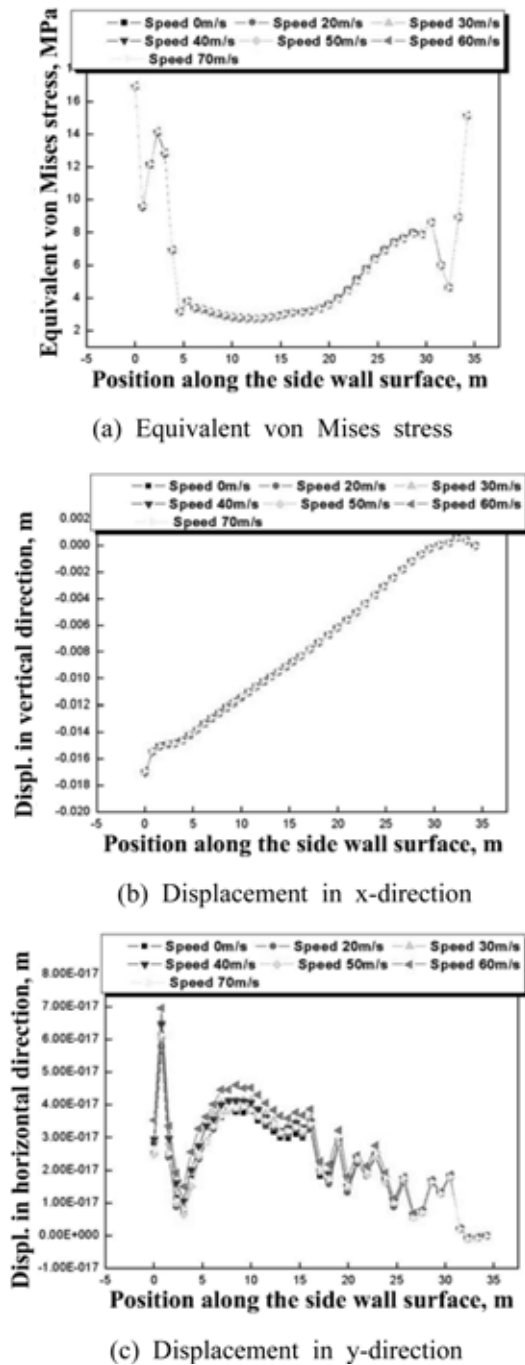


Fig. 4. Stress and displacement of the side wall in outer tank structure.

3.2. 지붕 구조물의 응력 및 변위량

지붕(roof) 구조물의 외벽면에 작용하는 풍속이 0 m/s~70 m/s일 때 지붕 콘크리트 구조물에서 발생하는 응

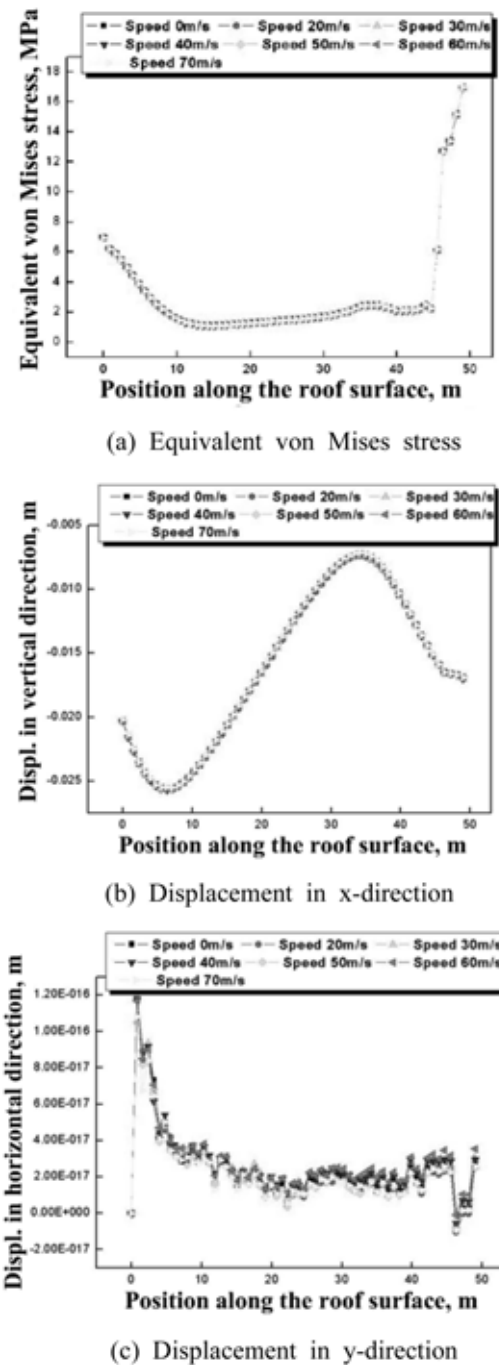
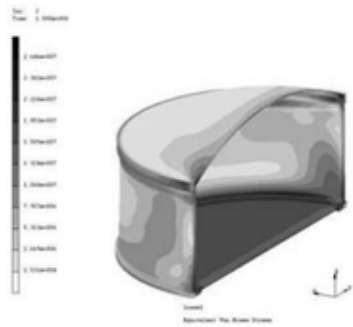


Fig. 5. Stress and displacement of the roof in outer tank structure.

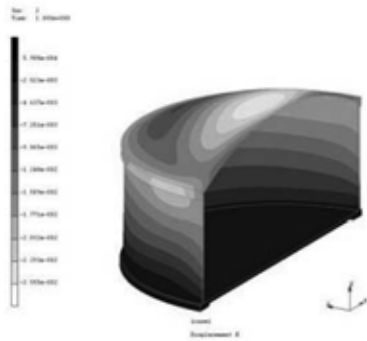
력과 변위거동 특성을 Fig. 5에서 제시한다. 풍속이 가장 높은 70 m/s에 대한 Fig. 5(a)의 응력거동 해석결과에 의하면 지붕의 연결부인 링빔부 □에서 가장 높은

17 MPa의 von Mises 등가응력이 발생하였고, 지붕과 링빔 구조물의 중간부근인 ㉔에서 가장 낮은 1.2 MPa의 응력이 작용하다가 지붕의 중심부 ㉑에서 7 MPa로 다시 상승함을 알 수 있다. 이것은 지붕 구조물에 걸리는 하중은 모두 링빔 구조물을 통해 측벽면 콘크리트로 전달되도록 설계함으로써 강도안전성을 확보하도록 하였다.

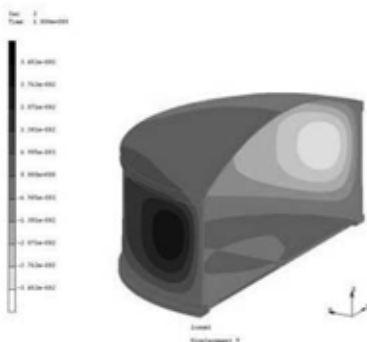
또한 x-방향의 변위거동을 보여준 Fig. 5(b)에 의하



(a) Equivalent von Mises stress distribution



(b) Displacement distribution in x-direction



(c) Displacement distribution in y-direction

Fig. 6. Stress and displacement distributions of the outer tank at the wind speed of 70 m/s.

면, 수직방향으로 작용하는 변위량은 지붕의 중간부 ㉒와 중심부 ㉑ 사이에서 최대 2.6 cm가 차지게 나타났고, 지붕의 중심부 ㉑에서는 2 cm 정도 아래로 처져 있고, 링빔부 ㉑와 지붕의 중간부 ㉒ 사이에서 가장 낮은 0.7 cm의 변위거동 특성을 보여준다. 또한 y-방향의 거동특성을 보여준 Fig. 5(c)의 해석결과에 의하면 모든 풍압에 대해 수평방향, 즉 반경방향으로 계산한 지붕의 중앙부 ㉑와 링빔부 ㉑ 인접부근에서 상대적으로 높은 변위량을 나타냈다. 그러나 이들 y-방향의 실제 변위량은 극히 작은 것으로 오차범위에 있다. 따라서 본 해석에서 고려한 태풍급의 높은 풍압조건에서도 지붕 구조물의 강도안전성은 충분히 확보된 것으로 생각된다.

3.3. 최대풍속에 따른 응력 및 변위량

Fig. 6은 저장탱크에 최대풍속 70 m/s가 작용할 경우, 저장탱크 구조물에 걸리는 응력과 변위거동 분포특성을 해석한 결과이다. 외부탱크 구조물의 링빔부 ㉑에서 von Mises 등가응력이 가장 높고, 바닥면과 측벽면을 연결하는 ㉒ 부근에서도 높은 응력이 걸리고 있음을 알 수 있다. x-방향의 변위량 거동측면에서 보면, 측벽면의 링빔부 ㉑와 루프의 중심부 ㉑에서 큰 변위량을 나타낸다. 그러나 y-방향의 변위 거동량은 측벽면의 중간부 ㉒에서 상대적으로 높게 나타났다.

IV. 결 론

외부탱크의 외벽면에 가해지는 보통의 풍압하중은 문제가 없으나 태풍과 같은 충격하중은 초대형 저장탱크의 강도안전성에 영향을 미칠 수 있어 설계단계에서 중요하게 다루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 140,000 m³ 저장용량의 외부탱크 측벽면과 지붕을 밀폐형으로 연결한 콘크리트 구조물에 대한 강도안전성을 검증하기 위해 FEM으로 해석하였다.

풍속이 증가함에 따라 외부탱크의 측벽면과 지붕에는 높은 응력과 변위량이 발생하면서 특히 링빔부의 위험성은 증가한다. 따라서 링빔부의 강도를 크게 증가시킨 안전설계가 일반화되면서 현재의 LNG 외부탱크 구조물은 안전하다 할 수 있다. 또한 지붕 구조물도 측벽면 구조물처럼 반경이 증가함에 따라 지붕의 중앙부에서 강도나 변위거동량이 증가하는 경향으로 나타나지만, 외부탱크의 링빔부에 의해 대부분의 지붕하중을 담당하도록 설계해야 지붕 구조물의 강도안전성을 확보할 수 있다.

LNG 외부탱크에 대한 강도안전성을 확보하기 위해

거대한 링빔 콘크리트 구조물을 도입하였지만, 아직도 다른 부위에 비해 상대적으로 높은 위험성을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 지붕의 중심부는 외부탱크의 반경이 증가함에 따라 불가피하게 변위거동량이 증가하면서 응력보다는 변위 위험성이 높아진다. 따라서 LNG 저장탱크의 저장용량이 초대형으로 증가하면서 측벽면의 링빔과 지붕의 중심부에 대한 강도보강이 중요함을 알 수 있다.

참고문헌

[1] 김청균, “LNG 저장탱크의 제조 및 검사기준 연구보

- 고서”, 홍익대학교, (1989)
[2] 김청균, “LNG 저장탱크 손상원인 조사보고서”, 인코크손해사정(주), (2003)
[3] 최인수, “통영 3호 탱크 내부손상 보수 착수”, 가스산업신문, (2003. 4.)
[4] 최인수, “통영 LNG 3호 탱크 내부손상 원인”, 가스산업신문, (2003. 7.)
[5] 최인수, “태풍 ‘매미’ 통영 LNG기지도 강타”, 가스산업신문, (2003. 9.)
[6] MSC/MARC Vol. B: Element Library, MSC, Inc., (2005)