



270,000 kL급 LNG 저장 탱크 외조의 폭발량에 따른 손상도 해석적 평가

김장호^{1)*} · 최승재¹⁾ · 최지훈¹⁾ · 김태균¹⁾ · 이태희¹⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

Analytical Assessment of Blast Damage of 270,000-kL LNG Storage Outer Tank According to Explosive Charges

Jang-Ho Jay Kim,^{1)*} Seung-Jai Choi,¹⁾ Ji-Hun Choi,¹⁾ Tae-Kyun Kim,¹⁾ and Tae-Hee Lee¹⁾

¹⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Rep. of Korea

ABSTRACT The outer tank of a liquefied natural gas (LNG) storage tank is a longitudinally and meridionally pre-stressed concrete (PSC) wall structure. Because of the current trend of constructing larger LNG storage tanks, the pre-stressing forces required to increase wall strength must be significantly increased. Because of the increase in tank sizes and pre-stressing forces, an extreme loading scenario such as a bomb blast or an airplane crash needs to be investigated. Therefore, in this study, the blast resistance performance of LNG storage tanks was analyzed by conducting a blast simulation to investigate the safety of larger LNG storage tanks. Test data validation for a blast simulation of reinforced concrete panels was performed using a specific FEM code, LS-DYNA, prior to a full-scale blast simulation of the outer tank of a 270,000-kL LNG storage tank. Another objective of this study was to evaluate the safety and serviceability of an LNG storage tank with respect to varying amounts of explosive charge. The results of this study can be used as basic data for the design and safety evaluation of PSC LNG storage tanks.

Keywords : LNG storage tank, blast analysis, LS-DYNA, protective design, pre-stressed concrete

1. 서 론

전 세계적으로 LNG 수요와 LNG 저장탱크 저장량 증대의 요구가 증가함에 따라 LNG 저장탱크의 설계와 시공이 건설업계에서도 주목 받고 있으며 대한민국 역시 2001년 세계에서 5번째로 LNG 저장탱크 설계(140,000 kL급) 기술을 국산화하였다. 이후 국제적 추세인 저장탱크의 대용량화에 대응하고 LNG 저장탱크의 대형화를 통한 원가절감 및 경쟁력 제고를 위해 2005년 200,000 kL급 LNG 저장탱크 설계 기술을 개발하였으며 현재 270,000 kL급 LNG 저장탱크 기술 개발에 힘쓰고 있다.¹⁾

특히, LNG 저장탱크의 설계 및 해석에 관한 연구는 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 전세진 등²⁾은 LNG 탱크의 시공비용 및 부지의 이용 효율성이 높은 완전방호식 대용량 LNG 저장탱크의 대용량화 시 고려해야 할 요인 및 기존 LNG 저장 탱크의 형상을 결정짓는 요인으로 LNG 저장탱크의 구조, 내조 및 외조의 구조적인 저항능력을 검토하였고,

대용량 LNG 저장탱크 내조 및 외조 설계 시 기술적인 고려 사항을 고찰하였다.

Lee 등³⁾은 LNG 탱크 내조에 작용하는 LNG particle의 sloshing loads에 대한 영향을 computational fluid dynamics (CFD) 프로그램을 이용하여 해석적으로 분석하였고 이를 통해 LNG 탱크 내조 설계 시 고려할 사항을 고찰하였다.

이 밖에도 LNG 저장탱크의 설계 및 해석과 관련한 많은 논문들이 발표되었다. 하지만 LNG 저장탱크 관련 해석 연구들을 살펴보면 LNG particle의 움직임에 따라 내조에 작용하는 압력을 고려한 내조해석이 대부분이고 하중조건 및 하중조합조건에서 폭발 하중에서 LNG 탱크의 외조에 대한 해석검토는 미미한 수준임을 알 수 있다.

폭발 하중 관련 연구동향을 살펴보면, Luccioni 등⁴⁾은 400 kg TNT에 대해 폭발 하중을 받는 실제 철근콘크리트 구조물의 붕괴를 예측하기 위하여 실제 철근콘크리트 벽체를 대상 구조물을 선정하여 폭발 하중에 대한 전체의 거동에 대해 해석적 과정과 실험적 검증을 통해 규명하였다. 또한, Chen 등⁵⁾은 프리스트레스트 철근콘크리트가 철근콘크리트에 비해 구조적 강성과 내하력이 더 높을 뿐만 아니라 높은 균열 저항능을 가지고 있다는 점에 착안하여 폭발 하중을 받는 프리스트레스트 철근콘크리트 부재에 대해 해석적 과정과

*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr

Received July 15, 2016, Revised September 5, 2016,

Accepted September 22, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

실험적 검증을 통해 철근콘크리트 부재와의 폭발저항성을 비교하였다.

이 밖에 현재까지 다양한 폭발 해석이 수행되었지만, 폭발 하중에 대한 LNG 저장탱크 및 격납고 등의 full-scale 프리스트레스트 철근콘크리트의 연구는 활발히 진행되고 있지 않다. 본 연구에서는 폭발 시나리오에 따른 LNG 저장탱크 외조의 거동분석을 동적 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA로 수행하였다. 먼저 LNG 저장탱크의 적용되는 패널 부재에 대해 폭발 하중에 대한 실험을 수행하고 LS-DYNA를 이용한 유한요소 해석을 통해 유한요소 해석의 정확성을 검증하여, 270,000 kL급 full-scale LNG 저장탱크의 폭발 하중에 대한 안전성을 검토하고자 한다. 폭발 거동 해석을 통해 향후 LNG 저장 탱크 및 프리스트레스트 격납고 등의 설계 시 안전성 기준 및 검토의 보조 자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 실험 개요

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 폭발 하중에 대한 거동 및 구조물에 가해지는 손상 등을 파악하기 위해서 LNG 저장탱크에 적용되는 패널 부재에 대한 폭발 실험 수행과 해석적 검증을 통해 폭발 해석의 정확성을 먼저 검토할 예정이다. 폭발 실험은 한국국방과학연구소 다락대 시험장에서 실험을 수행하였으며, 2번의 예비실험과 5번의 본 폭발실험으로 나눠 진행하였다. 예비실험은 폭약

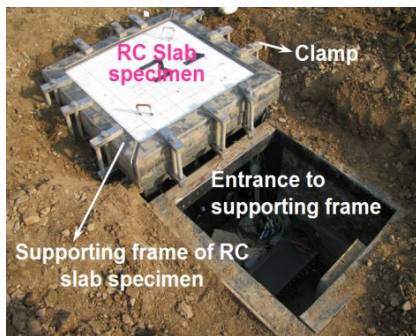


Fig. 1 Mounting frame for RC specimen

Table 1 Material properties

Material Properties (Unit)		Value
Concrete	Compressive strength (MPa)	25.6
	Tensile strength (MPa)	2.20
	Young's modulus (GPa)	28.8
	Poisson's ratio	0.166
Reinforcing bar	Yield strength (MPa)	400
	Ultimate strength (MPa)	600
	Mass density (ton/m ³)	7.85
	Young's modulus (GPa)	200.0
	Poisson's ratio	0.3

량에 의한 폭발 하중이 구조물에 가해졌을 때, 구조물에 설치된 게이지의 응답 및 구조물의 거동을 파악할 수 있는 적절한 폭약량을 산정하기 위한 실험으로 진행되었으며, 실제 실험에서는 TNT 15.88 kg (35 lbs)를 사용하였다. 실험 대상구조물은 철근콘크리트 패널 구조물로 선정하였으며, 콘크리트 시편을 지면과 동일한 위치에 거치시켜 구조물 부근의 대기 중 자유폭발을 유도하였다. 폭발로 발생할 수 있는 회절 및 간섭 효과를 최소화하여 콘크리트 시편 위에서만 폭발압력하중을 받을 수 있도록 하였다. 따라서 콘크리트 시편의 거치와 거동 측정을 위하여 Fig. 1과 같은 시편 지지 구조물을 SM-520, 두께 7 mm의 강재로 제작하였다. 별도의 강재 앵글과 클램프를 제작하여 콘크리트 시편과 지지 구조물이 고정될 수 있도록 하였다. D10 철근을 양단 배근하여 1,000×1,000×150 mm의 철근콘크리트 슬래브로 제작하였다. 사용된 D10 철근은 항복강도 400 MPa, 극한강도 600 MPa이며, 양방향 모두 82 mm 간격으로 배근하였다. 선정된 대상 구조물에 사용된 콘크리트의 재료물성실험을 수행하였고 이를 Table 1에 나타내었다.

3. 폭발 해석 수행 및 해석적 검증

폭발 하중은 내압, 자중 등의 축대칭 하중과는 달리 비대칭 하중으로 일반적으로 3차원 유한요소해석이 요구되어 LS-DYNA explicit 해석프로그램을 이용해서 폭발 하중을 받는 패널부재 실험을 시뮬레이션 하였다.

3.1 유한요소모델 및 경계조건

폭발실험에서의 앵글과 클램프를 사용하여 콘크리트 시편과 지지 구조물을 고정시켰던 것을 비슷하게 모사하기 위해서 철근콘크리트 패널의 상부면과 하부면의 양단을 fixed로 설정하였으며, 상세 모델링은 다음 그림 Fig. 2와 같다.

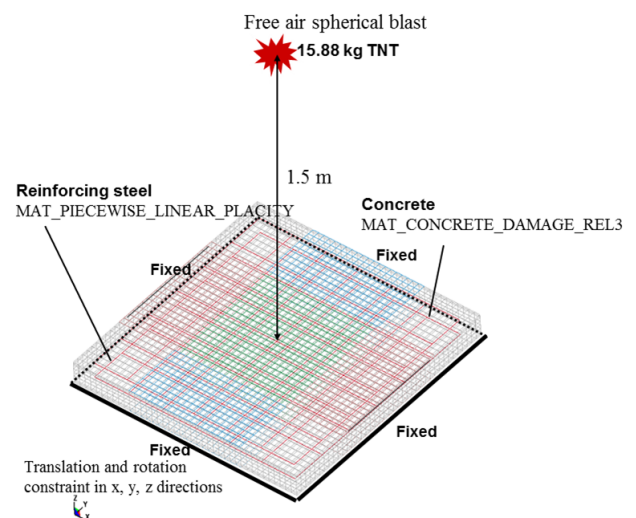


Fig. 2 Finite element models of slab

3.2 재료 모델

동적유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA에서는 많은 수의 콘크리트 재료 모델을 제공하는데 그중에서도 *MAT_BRITTLE_DAMAGE (MAT_96), *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (MAT_111), *MAT_PSEUDO_TENSOR (MAT_16) *MAT_CSCM_CONCR, ETE (MAT_159), *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 등의 콘크리트 재료 모델을 제시하고 있다. 본 연구에서는 콘크리트는 폭발 하중의 특성이 반영된 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (MAT_72)을 사용하였다. MAT_072R3는 MAT_16을 수정보완하여 재료의 변형률 효과와 누적 손상의 특징이 반영된 재료모델이며, 폭발하중의 평가에 필요한 동적강도증진효과를 고려할 수 있다. 폭발하중을 받는 콘크리트 재료모델에 대한 신뢰성은 다양한 연구⁶⁻⁸⁾ 등을 통해 검증되었다.

철근은 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_24)를 사용하였다. 이 재료모델은 등방성 재료모델로서 운동경화(kinematic hardening)을 고려한다. 뿐만 아니라, 변형률 속도에 따른 응력을 정의할 수 있다.

3.3 폭발 하중 모델링

LS-DYNA에서는 구조물에 적용되는 폭발 하중을 모사하는 *LOAD_BLAST 옵션을 제공하고 있다. 이 옵션을 사용하여 폭발 하중으로 인한 구조물의 거동 및 폭발 압력의 변화 등의 정확성이 이미 많은 연구들에서 검증이 되었다.^{9,10,11)} 본 연구에서는 실제 실험과 동한 조건인 TNT 15.88 kg (35 lbs)의 폭약을 슬래브 구조물에서 1.5 m 떨어진 위치에서 구형으로 폭발하는 경우에 대하여 반사 압력파에 대한 최대 압력을 산정하였고, 폭발파에 의한 하중은 콘크리트 슬래브 전면에 비균질하게 적용하였다. 폭발압력과 충격량의 시간이력은 Fig. 3과 같다.

3.4 실험 결과 및 해석적 검증

해석의 정확성을 검증하기 위해 예비실험에서 수행하였

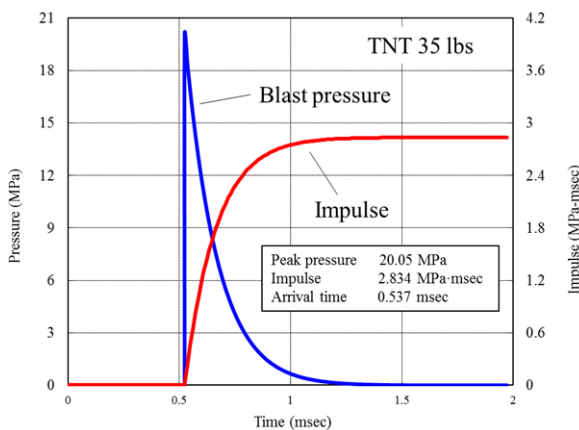


Fig. 3 Pressure-time history

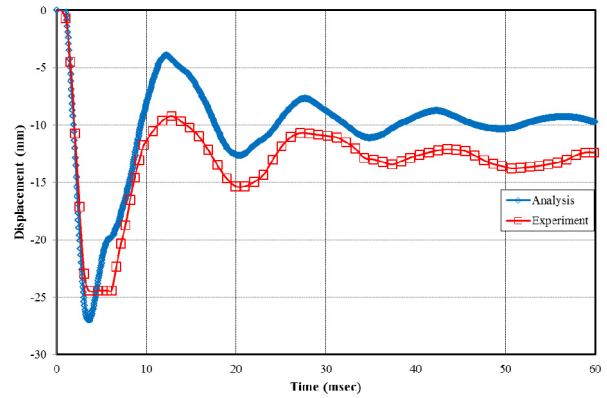


Fig. 4 Comparison of experimental and analytical displacement results.

Table 2 Comparison of experimental and analytical maximum displacement results

	Experiment	Analysis
Maximum displacement (mm)	24.40	27.01

던 콘크리트의 시편의 최대처짐의 결과로 구조물의 거동을 분석하는 방식과 잔류 처짐량의 결과로 구조물의 거동을 분석하는 방식으로 나누어 전체적인 결과를 분석하였다. 실험에서 LVDT를 이용하여 콘크리트 시편의 하단중앙부의 처짐량 및 구조물의 거동을 측정하였고 이를 해석결과와 비교하여 Fig. 4와 Table 2에 나타내었다. 폭발해석의 결과를 실험결과와 비교하였을 때 최대처짐량은 약 10% 및 잔류 변위량은 약 15%로 차이는 것으로 보아 실험결과의 해석적 검증이 충분히 이루어졌다고 판단된다. 즉, 본 연구에서 사용한 콘크리트 재료모델을 사용하였을 경우 유한요소해석결과가 방호설계의 적용에 타당성이 있음을 검증하였다.

4. LNG 저장탱크의 폭발 시나리오 선정

4.1 폭발 위치 선정

본 연구에서는 주변 환경에 대한 영향을 배제하고, 구조물에 가장 큰 손상을 초래할 것으로 예측되는 폭발 위치 및 기존 폭발관련 연구 등을 종합적으로 참고하여 그 위치를 선정하였다.¹²⁾

저장탱크 외조 구조물의 벽체는 유체압, 내압 등 설계하중에 의해 상부에 비하여 하부 쪽에 훨씬 큰 응력이 작용한다. 이 응력을 상쇄시켜주기 위해 벽체 하부 쪽에는 상부보다 훨씬 촘촘히 PS 텐던이 배치되며, 또한 벽체 하부가 강성이 큰 바닥판에 구속되어 있어 벽체의 하부 쪽에 응력이 집중되게 된다. 탱크의 상하 폭발위치에서의 텐던의 배치, 간격, 규격은 Fig. 5와 같이 나타내었다. 이렇게 응력이 집중된 부분에 큰 폭발 하중이 가해진다면 구조물에 큰 손상을 초래하게 될 것으로 예상된다.

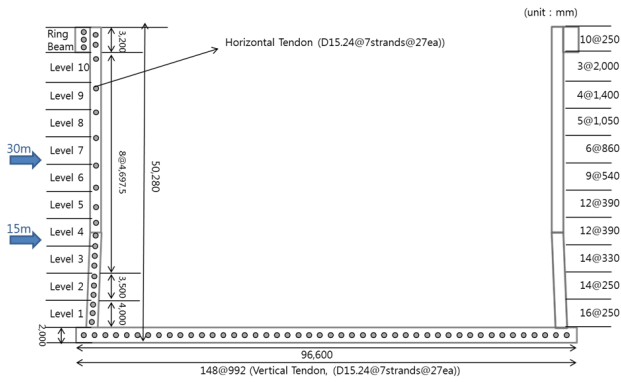


Fig. 5 Cross-section details of 270,000-kL LNG tank.

Table 3 Blast position

Blast location	Features
30 m from the ground (mid-height region)	The strength at the mid-height region of the wall is lower than that at support region.
15 m from the ground (support region)	PS tendons were placed much more densely and stress was concentrated in the lower regions.

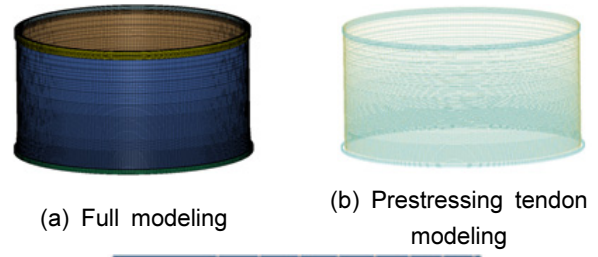
벽체의 중간부분은 하부에 비해 적용되는 설계하중이 작아 PS 텐던이 적게 배치되므로 설계하중을 제외하고 저장탱크 외조벽체 자체의 강도만을 고려하게 되면 하부에 비해 중간부의 강도가 떨어진다. 또한 지붕이나 바닥판과의 거리가 멀어 벽체 중간 높이에 폭발 하중이 가해지게 되면 변위의 제어가 어려울 것으로 판단된다. 이러한 벽체의 구조적 특성을 참고하여 폭발 위치를 선정하고, Table 3에 정리하였고 Fig. 5에 나타내었다.

4.2 폭발 해석 조건

폭발 하중의 발생은 LNG 저장탱크의 정상가동 상태에서 발생하는 것으로 가정하였다. 정상가동 상태에서 LNG 저장탱크 외조는 자중, 프리스트레싱 하중, 내압 하중 등을 받고 있으며, 그중 정상가동시의 내압은 크기가 작고 외부 폭발 하중에 대하여 역방향으로 작용하므로 무시하였다.

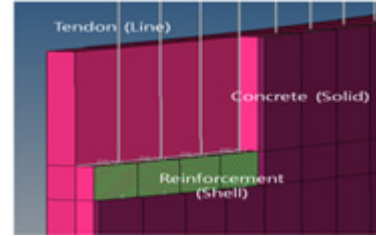
5. LNG 저장탱크 외조의 유한요소 모델

3차원 모델링에서는 콘크리트 및 강재 벽체 등에 대한 모델링을 Shell 요소의 2차원 요소를 사용할 수 있으나 shell 요소를 사용할 경우 해석 시간이 비교적 빠르지만 접합부에서의 강성 중복 문제 등 구조물의 이상화에 따른 문제점들을 해결해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Hypermesh 11.0을 사용하여 콘크리트 단면을 Solid 요소로 모델링하였으며 콘크리트, 철근, 텐던 등의 재료의 실제 물성치 및 비선형성을 모두 고려하였다.



(a) Full modeling

(b) Prestressing tendon modeling



(c) Detail of modeling

Fig. 6 Modeling of LNG tank.

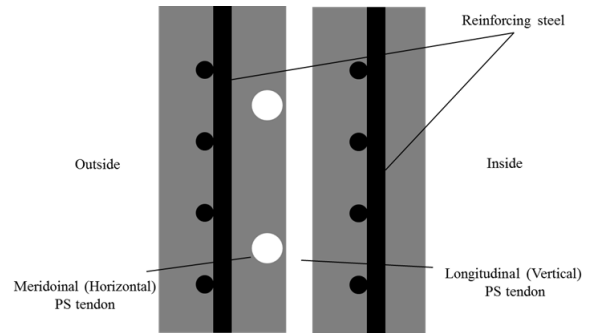


Fig. 7 Cross-section of LNG tank (vertical section)

5.1 LNG 저장탱크 외조의 기하학적 특성

본 연구에서 폭발 해석 시 사용한 구조물은 270,000 kL급 LNG 저장탱크 외조로 바닥 슬래브부터 돛형지붕까지 그 높이가 59.659 m이고 벽체와 링빔까지의 높이가 약 48.28 m이다. 저장탱크 외조의 내부 반지름은 46.2 m이고 외벽 두께는 하단의 7.5 m 높이까지는 0.75~1.2 m의 구배를 가지며 그 위로는 0.75 m로 일정한 두께를 갖는 형상을 나타낸다. Fig. 6(a)는 단면도에 따른 실제 유한요소모델의 그림이며 Fig. 6(c)는 저장탱크의 외조의 단면도다. Table 3은 LNG 저장탱크 외조의 주요 제원을 나타낸 것이다. 벽체는 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 단면 상세는 Fig. 7과 같다. PS 텐던과 철근의 배치는 벽체 내 배치 위치에 따라 달라지며 벽체 모델링 시 그 배치를 모두 반영하여 실제 벽체에 가까운 모델을 구현하고자 하였다.

5.2 LNG 저장탱크 모델링 요소별 물성치

LNG 저장탱크 외조의 모델링에 사용된 요소별 물성치를 다음 Table 4에 정리하였다. 모델링은 실제 설계에 사용된 재료들의 설계 물성치와 동일한 값들을 사용하였다.

Table 4 Material properties

	Material property (unit)	Value
Concrete	Mass density (ton/m ³)	2.4
	Compressive strength (MPa)	40
	Young's modulus (GPa)	31.75
	Poisson's ratio	0.2
Reinforcing steel	Mass density (ton/m ³)	7.85
	Yield strength (MPa)	400
	Young's modulus (GPa)	200.0
	Poisson's ratio	0.3
Prestressing tendon	Mass density (ton/m ³)	7.85
	Young's modulus (GPa)	195.0
	Poisson's ratio	0.3
	Vertical PS force (MPa)	862.5
	Horizontal PS force (MPa)	1153

5.3 LNG 저장탱크 외조의 유한요소 모델

폭발 하중은 비대칭 하중이므로 구조물 전체의 거동을 확인하기 위해서는 full model이 필요하다. 따라서 폭발 해석을 위해 Hypermesh 11.0을 이용하여 3D full model을 구현하였으며 더욱 정확한 예측을 위해 3D 입체 요소인 솔리드 요소로 모델링하였다.

철근은 주철근을 포함한 주요철근을 모델링에 모두 포함시켰는데 구조물의 크기가 초대형이다 보니 개별적으로 철근을 모델링하기가 어렵고 요소의 수가 지나치게 많아져 해석시간이 길어질 뿐만 아니라 이번 해석의 목적은 국부적 폭발 거동이 아닌 구조물의 전체적 거동을 확인하고자 하는 것

이므로 철근의 상세 모델링은 필요하지 않다고 판단되었다. 따라서 철근을 분포시켜 이상화하였으며 분포된 철근은 철근 직경, 간격, 콘크리트 두께상의 위치 등을 엄밀하게 고려하기 위해 1D 빔 요소의 두께를 입력하는 방식을 이용하였고 *Constrained_Lagrange_in_Solid 접촉조건을 이용하여 콘크리트 요소 내에 매입시켰다.

프리스트레싱 텐던의 경우 철근만큼 밀집된 형태가 아니므로 개개의 프리스트레싱 텐던을 요소처럼 모델링하는 것이 바람직하다. 따라서 프리스트레싱 텐던은 1D 빔 요소를 사용하여 콘크리트 내에 프리스트레싱 텐던의 배치 및 규격을 고려하여 *Constrained_Lagrange_in_Solid 접촉조건을 이용하여 콘크리트 요소 내에 매입시켰다. 또한 부착식 텐던으로 가정하여 콘크리트 솔리드 요소와 텐던의 변위장을 일치시켰다. 폭발 해석 시 긴장력을 초기 조건으로 설정하여야 한다. 이를 구현하기 위해 LS-DYNA에서 제공하는 Initial_Stress_Beam 옵션을 통해 프리스트레싱 긴장력 적용하였다. Initial_Stress_Beam 옵션을 사용하는 경우 프리스트레싱 텐던 빔 요소에 적용시킨 힘이 초기조건으로 일정하게 유지된다고 가정한다. Fig. 8은 긴장력이 도입된 초기의 응력분포 나타낸 것이다.

6. LNG 저장탱크 외조의 폭발 해석 결과

6.1 폭발량에 따른 LNG 저장탱크의 폭발 거동

본 연구에서 폭발량을 선정하는 데 있어 예비실험 및 해석에서 사용하였던 TNT 15.88 kg (35 lbs)와 ASCE¹³⁾에서 제시한 사람이 구조물 외조의 폭발하중을 가할 수 있는 최대 폭발량인 TNT 45.36 kg (100 lbs)로 선정하여 폭발 해석을 진행하였다. Fig. 9은 15.88 kg (35 lbs), 45.36 kg (100 lbs)의 TNT를 벽체 중간부분인 지면으로부터 30 m 높이 및 벽체로부터 1 m stand-off를 두고 폭발한 경우에 PSC 저장탱크 외조 벽체에 나타나는 유효응력의 변화이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 TNT와 벽체의 폭발 이력 시간은 매우 짧다. TNT 45.36 kg (100 lbs)의 대용량 폭발에서 짧은 폭발시간으로 인해 벽체는 짧은 시간 내에 큰 충격력이 발생하며, 폭발면에 국소적으로 발생한 집중응력은 폭발 이후 구조물 전체로 퍼져나가는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 TNT 15.88 kg (35 lbs)에서는 큰 충격력이 발생하지 않은 것으로 파악되었다. Fig. 10

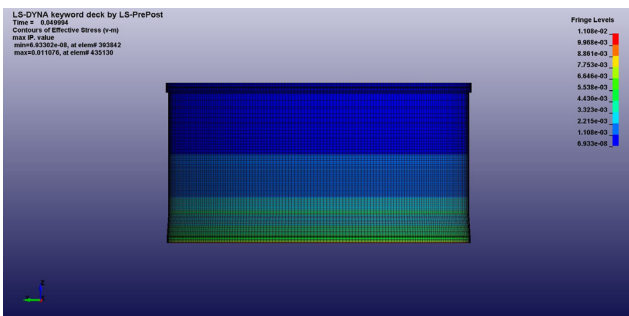


Fig. 8 Initial stress distribution by PS force

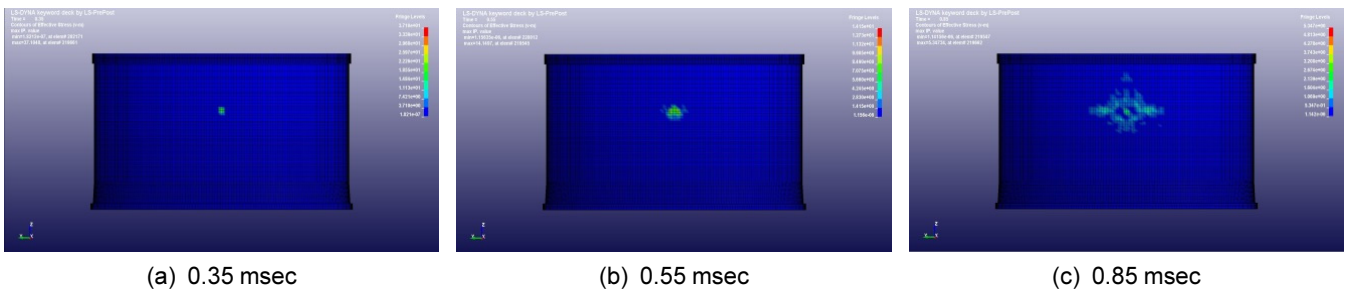


Fig. 9 Effective stress behavior.

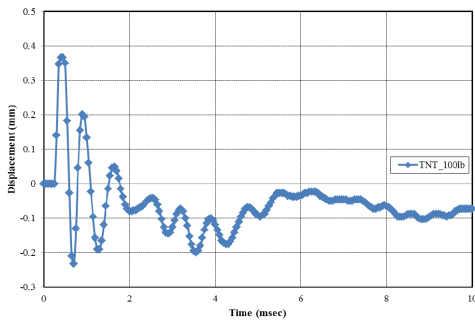


Fig. 10 Displacement-time history

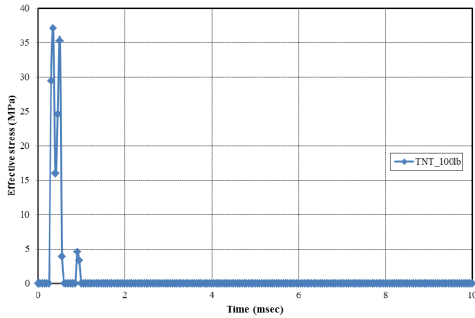


Fig. 11 Effective stress-time history

은 TNT 45.36 kg (100 lbs)의 폭발로 인해 발생하는 최대 변위 발생지점의 시간이력에 따른 최대 변위를 나타내는 그래프다. 그래프를 통해 폭발이 최대로 활성화되는 0.25 msec 시점에서 변위가 0.36 mm의 최대변위가 발생하였으며, 폭발 이후 변화는 충격파의 전파에 따라 점차 감소하여 결국에는 아주 미소한 잔류변형을 남겼음을 알 수 있다. Fig. 11은 TNT 45.36 kg (100 lbs)로 폭발해석 시의 최대 변위 발생지점에서의 시간이력에 따른 유효응력의 변화를 보여주는 그래프로 최대 응력은 폭발이 최대로 활성화되는 0.25 msec일 때 발생하였다. 최대 유효응력은 37.1 MPa로 나타났으며 폭발의 특성상 폭발시간이 짧았던 만큼 폭발 하중에 벽체에 가해지는 순간 응력이 급격하게 증가하였다가 폭발면에서의 폭

발응력이 벽체 전체로 퍼져나가면서 응력이 빠르게 소산되는 거동을 보여주고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 응력거동을 보이고 있는 구조물의 폭발 하중 영향 평가를 다음과 같이 수행하고자 한다. PSC LNG 저장탱크 구조물의 설계 시 외부 폭발 하중과 같은 극한한계상태에서는 콘크리트에 부분재료계수 1.3을 적용하여 콘크리트 강도를 감소시킴으로써 구조물의 안전성을 확보하고 있다. 하지만 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램을 사용한 시뮬레이션을 통해 직접 외주 구조물 벽체에 폭발 하중을 가해주었으므로 부분재료계수를 적용하여 콘크리트 강도를 감소시킬 필요가 없다고 판단되었으므로 재료의 설계 강도인 $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ 그대로를 재료의 한계허용 응력으로 설정하였다.

본 연구에서는 김호진, Malyar 등^{14,15,16)}의 연구에서 사용한 강도 증진계수를 사용하였는데, 이 증진계수는 실험결과에 기초하여 적용된 강도증진계수를 고충격의 경우 높은 변형률 속도까지 나타낼 수 있도록 연장시킨 것이다. 최대 변형률 속도는 0.065 sec^{-1} 로 이에 대응되는 강도증진계수는 1.229이다. 실제 프리스트레스트 콘크리트에 작용하는 극한 하중에 대한 강도증진효과는 콘크리트뿐만 아니라, 철근 및 프리스트레싱 텐던에도 적용이 되어 효과가 발생할 것이나, 본 연구에서는 극한상황에 대해서 고려하기 위하여 콘크리트의 강도증진효과만을 고려하였다.

또한 벽체에 작용하는 폭발하중은 3차원 공간적인 하중이며, 경계조건을 고려하지 않는다면 슬래브와 유사한 형태의 파괴모드를 갖는다. 특히 국지적인 파괴 성향은 폭발물의 근접정도와 벽체의 강도 및 강성에 영향을 받으며, 폭발 하중과 같이 탄성한계를 넘어설 수 있는 강한 동적하중을 받을 경우 콘크리트 구조물의 변위량은 횡변위량 뿐만 아니라 전단변위량 및 부재 연결부에서의 지점 회전량에 의해 지배될 수 있다. ASCE¹³⁾에서는 지점회전, 단면의 전단변형률 등을 고려하여 폭발하중에 대한 구조물의 손상정도에 따른 응답한계를 제시하고 있는데, 콘크리트 구조물의 응답한계 기준을 다음의 Table 5에 정리하여 나타냈다. 이를 통해 폭발

Table 5 Typical failure criteria for structural elements of concrete structures (ASCE, 1999)

Element type	Material properties	Failure type	Criteria	Light damage	Moderate damage	Severe damage
Beam	Concrete ($\rho > 0.5\%/\text{face}$)	Global bending/ Membrane response	Ratio of center-line deflection to span,	4%	8%	15%
		Shear	Average shear strain across section,	1%	2%	3%
Slab		Bending/ Membrane		4%	8%	15%
		Shear		1%	2%	3%
Column		Compression	Shortening/height	1%	2%	4%
Load-bearing wall		Compression	Shortening/height	1%	2%	4%
Shear wall		Shear	Average shear strain across section	1%	2%	3%

Table 6 Blast assessment

Max. displacement (mm)	Arrival time (sec)	Displacement / span length (δ/L)	Damage level
0.23	0.35	0.08%	No damage ($\delta/L < 4\%$)

Table 7 Structural Design for Physical Security (ASCE, 1999)

Aggressor Tactics	Design Basis Threat Severity	Weapons	Tools
Moving Vehicle Bomb / Stationary Vehicle Bomb	Very High	2,000 lbm TNT	12,000 lbm truck
	High	500 lbm TNT	5,000 lbm truck
	Medium	100 lbm TNT	4,000 lbm car
	Low	50 lbm TNT	4,000 lbm car
Exterior	High	IID, IED (100 lbm TNT) and grenades	None
	Medium	IID, IED (2 lbm TNT) and grenades	
	Low	IID, Rocks and clubs	

Table 8 Blast assessment according to explosive charges

Explosive charges	Max. displacement (mm)	Displacement / span length (δ/L)	Damage level
45.36 kg (100 lbs)	0.23	0.08 %	No damage ($\delta/L < 4\%$)
226.80 kg (500 lbs)	0.98	0.33 %	No damage ($\delta/L < 4\%$)
909.18 kg (2,000 lbs)	2.73	0.91 %	No damage ($\delta/L < 4\%$)

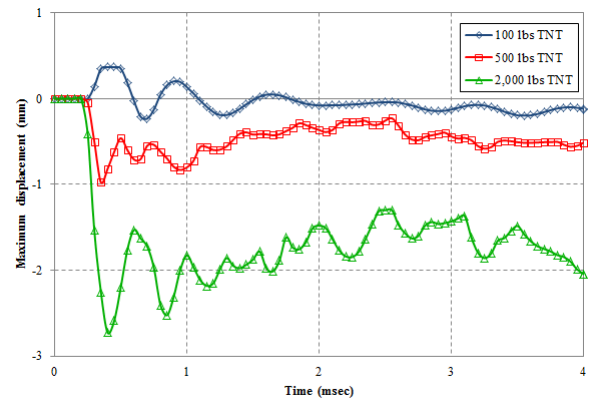
하중에 대한 벽체의 안전성을 평가하고자 한다. 위에서 살펴본 바와 같이 TNT 45.36 kg (100 lbs)의 외부 폭발 하중 시나리오에 따라 유한요소해석을 실시해 본 결과 폭발 당시 벽체에 순간적으로 발생한 최대 처짐량은 0.23 mm로 $\delta/L = 0.08\%$ 으로서 ASCE 기준에 의한 휨 변형에 대해 경미한 손상으로 판단되는 4% 이하이므로 벽체의 폭발 영향 평가에서 손상에 대한 안전측으로 평가할 수 있다. LNG 저장탱크 외조의 손상 평가 결과를 Table 6에 명시하였다. 이렇게 국부적으로 발생한 집중응력은 구조물 전체로 충격파의 형태로 전파되어 벽체의 반발거동에 의해 소실되며, 전파되는 응력은 폭발시의 집중응력에 비해 현저히 작으므로 벽체에 큰 변형을 일으키지 않은 것으로 판단된다.

6.2 TNT 최대 폭발량 선정

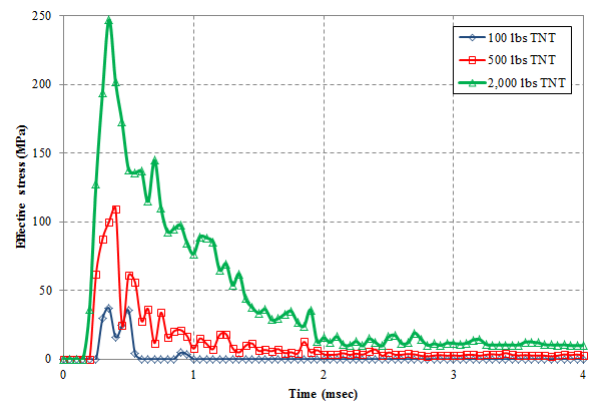
TNT 폭발량이 폭발 거동에 미치는 영향을 확인해보기 위하여 폭발 위치를 앞서 수행한 폭발 해석과 동일하게 지면으로부터 30 m, 벽체로부터 stand-off를 1 m로 고정하고 ASCE에서 제시한 moving vehicle bomb 공격으로 구조물에 가해질 수 있는 폭발량에 따른 폭발 시나리오를 기준으로 high threat severity의 TNT 폭발량 226.80 kg (500 lbs), very high threat severity의 TNT 폭발량 909.18 kg (2,000 lbs)로 변형하여 해석을 수행하였다. ASCE¹³⁾에서 제시한 폭발량에 따른 폭발 시나리오를 Table 7에 나타내었다.

Fig. 12에서 폭발량 변화에 따라 최대 변위 및 최대 응력 값이 증가하고 있음을 확인해 볼 수 있다. 폭발량이 증가하게 되면 운동에너지가 증가하게 되므로 폭발 시 벽체가 받는 충격력이 증가하게 되며 구조물의 거동에 더 큰 영향을 미치게 되는 것이다. 그래프의 수치들을 통해 폭발 영향 평가를 실시한 결과를 Table 8에 나타내었다.

Table 8에서 볼 수 있듯이 폭발량 226.80 kg (500 lbs) 및 909.18 kg (2,000 lbs)의 Table 5의 ASCE기준에 의한 휨 변형에 대해 4% 이하이므로 폭발 영향 평가시 LNG 저장탱크 외조 벽체의 손상에 대해 안전 측으로 판단할 수 있다. 따라서 ASCE 기준에 의한 LNG 저장탱크 외조 벽체의 폭발하중에 따른 손상은 과약하였을 때 모두 안전성이 확보된다고 할 수 있다.



(a) Displacement



(b) Effective stress

Fig. 12 Comparisons of displacement and effective stress

7. 결 론

본 연구에서 LNG 저장탱크 외조 벽체에 대한 폭발 시뮬레이션을 수행하여 외조 벽체의 외부 폭발 하중에 대한 저항 성능을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 폭발량을 선정하는 데 있어 예비실험의 폭발량 및 사람이 휴대할 수 있는 폭발량 45.36 kg (100 lbs)로 선정하여 LNG 저장탱크 구조적 취약 위치에 폭발 해석을 수행한 결과 발생한 응력에 비해 변위는 매우 미소한 크기로 발생하였는데 이는 매우 짧은 순간 폭발이 발생하여 충격력이 벽체 후면까지 전달되지 못했기 때문으로 판단된다.
- 2) 벽체 손상에 대해 ASCE에서 제시한 폭발 영향 평가를 기준으로 손상에 관한 폭발 영향 평가를 실시하여 LNG 저장탱크의 내폭성능을 확인하였다.
- 3) 1 m stand-off 폭발 이격거리, TNT 45.36 kg (100 lbs)의 짧은 순간 발생하는 폭발 하중 해석을 통한 손상도 분석 결과, 초기 순간 발생하는 폭발 하중이 폭발하중의 주요한 손상 요소가 되는 것을 확인하였다.
- 4) ASCE에서 제시한 콘크리트 구조물에 발생 가능한 폭발 시나리오별 위험도 평가를 기준으로 하여 폭발량을 TNT 45.36 kg (100 lbs), 226.80 kg (500 lbs), 909.18 kg (2,000 lbs) 으로 선정하여 폭발량에 따른 폭발 하중 해석을 수행하였으며 최대 폭발량인 909.18 kg (2,000 lbs)의 하중에서도 LNG 저장탱크는 안전한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구개발사업의 연구결과입니다(No. 1403010). 또한, 이 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(중견연구자-도약연구사업, No. 2016R1-A2B3009444). 이에 감사드립니다.

References

1. Kim, C. K., and Kim, H. G., "Optimized Design of Roof Structure in LNG Storage Tank", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 36-43.
2. Jeon, S. J., Jin, B. M., Yoo, J. W., and Kim, Y. J., "Design Basis for Large Above-Ground LNG Tank", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 31-37.
3. Delorme, L., Iglesias, A. S., and Perez, S. A., "Sloshing Loads Simulation in LNG Tankers with SPH", *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Barcelona, Spain, 2005.
4. Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., and Danesi, R. F.,

- "Analysis of Building Collapse Under Blast Loads", *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 63-71.
5. Chen, W., Hao, H., and Chen, S., "Numerical Analysis of Prestressed Reinforced Concrete Beam Subjected to Blast Loading", *Materials & Design*, Vol. 65, No. 83, 2015, pp. 662-674.
6. Jiang, H., Wang, X., and He, S., "Numerical Simulation of Impact Tests on Reinforced Concrete Beams", *Materials & Design*, Vol. 39, No. 14, 2012, pp. 111-120.
7. Wang, F., Wan, Y. K. M., Chong, O. Y. K., Lim, C. H., and Lim, E. T. M., "Reinforced Concrete Slab Subjected to Close-in Explosion", *Proc., 7th German LS-DYNA Forum*, Bamberg, Germany, 2008.
8. Yi, N. H., Kim, J. H. J., Han, T. S., Cho, Y. G., and Lee, J. H., "Blast-Resistant Characteristics of Ultra-High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 28, No. 1, 2012, pp. 694-707.
9. Fang, Q., Qian, Q. H., and Shi, Y. L., "A Rate-Sensitive Analysis of R/C Beams Subjected to Blast Loads." *International Conference on Structures under Shock and Impact*, Udine, 1996.
10. Li, J., and Hao, H., "Influence of Brittle Shear Damage on Accuracy of the Two-Step Method in Prediction of Structural Response to Blast Loads", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 54, No. 19, 2013, pp. 217-231.
11. Shi, Y., Hao, H., and Li, Z. X., "Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Loads", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 11, 2008, pp. 1213-1227.
12. Lee, S. W., Jun, H. Y., Kim, J. H. J., Kim, J. H., and Lee, K. W., "Analysis Evaluation of Impact Behavior of 270,000 kL LNG Storage Outer Tank from Prestress Force Loss", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 18, No. 1, 2014, pp. 31-40.
13. Conrath, E. J., "Structural Design for Physical Security: State of the Practice", *American society of civil engineers*, 1999.
14. Kim, H. J., Nam, J. W., Kim, S. B., Kim, J. H., and Byun, K. J., "Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 241-250.
15. Malvar, L. J., "Review of Static and Dynamic Properties of Steel Reinforcing Bars", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, 1998, pp. 609-616.
16. Malvar, L. J., and Ross, C. A., "Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 735-739.

요약 LNG 저장탱크의 외조는 콘크리트 부재로 수직 방향 및 원환 방향 프리스트레싱 벽체 구조인데, 저장탱크의 대형화가 이루어짐에 따라 프리스트레싱 구간이 길어지고 그에 따른 극한 하중을 받는 LNG 저장탱크의 거동에 대한 분석이 필요하다. 본 연구는 주요 사회기반시설구조물의 하나인 LNG 저장탱크에 테러와 같은 폭발 사고가 발생하였을 때 안전성 향상을 위하여 폭발 저항 성능에 대한 분석연구를 수행하였다. 해석은 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 270,000kL급 LNG 저장탱크 외조의 TNT 폭발에 대한 거동을 평가해보고자 한다. 또한 TNT 폭발량에 따른 폭발에 대한 LNG 저장탱크의 거동 비교를 통해 구조물의 안전성 및 사용성을 평가해보고자 한다. 이 연구의 결과를 통해 폭발량에 따른 구조물에 거동 변화를 확인하고, 설계 시 안전성 기준 및 검토의 보조자료로 활용할 수 있도록 한다.

핵심용어 : LNG 저장탱크, 폭발 하중 해석, LS-DYNA, 방호설계, 프리스트레스트 콘크리트