



프리스트레스 손실량을 고려한 270,000kL급 LNG 저장탱크 외조의 비산물체 속도에 따른 충돌 거동 해석

이상원 · 전하영* · 김장호 · 김준휘** · †이강원**

연세대학교 사회환경시스템공학부, *삼성엔지니어링 토목건축1팀,
**한국가스공사연구원 연구개발팀

(2013년 10월 21일 접수, 2014년 2월 18일 수정, 2014년 2월 18일 채택)

Analysis Evaluation of Impact Behavior of 270,000kL LNG Storage Outer Tank from Prestress Force Loss

Sang-Won Lee* · †Ha-Young Jun · Jang-Ho Jay Kim · Jun-Hwi Kim · Kang-Won Lee

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

* Civil and Architectural Engineering Dept. 1, Samsung Engineering, Seoul 134-090, Korea

** LNG Tank Technology Center, KOGAS RND Division, Incheon 406-130, Korea

(Received October 21, 2013; Revised February 18, 2014; Accepted February 18, 2014)

요약

LNG 저장탱크의 외조는 콘크리트 부재로 수직 방향 및 원환 방향 프리스트레싱 벽체 구조인데, 저장탱크의 대형화가 이루어짐에 따라 프리스트레싱 구간이 길어지고 결과적으로 프리스트레스 손실량이 증가하고 있다. 본 연구는 주요 사회기반시설구조물의 하나인 LNG 저장탱크에 비행체 충돌과 같은 사고가 발생하였을 때 안전성 향상을 위하여 충돌 저항 성능에 대한 분석연구를 수행하였다. 해석은 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 270,000kL급 LNG 저장탱크 외조의 비산물체 충돌에 대한 거동을 평가해보고자 하며, 해석 시 LNG 저장탱크의 대형화로 인한 PS 텐던의 길이증가에 따른 프리스트레스 손실 또한 고려될 것이다. 또한 프리스트레스 손실의 적용 유무에 따른 비산 물체 충돌에 대한 PSC 구조물의 거동 비교를 통해 구조물의 안전성 및 사용성을 평가해보고자 한다. 이 연구의 결과를 통해 프리스트레스 손실량의 적용에 따른 구조물의 거동 변화를 확인하고, 설계 시 안전성 기준 및 검토의 보조자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

Abstract - LNG storage outer tank is a vertically and horizontally prestressed concrete wall structure. Therefore, when the storage tanks become larger, prestressing tendons become longer and eventually the prestressing loss becomes larger. Also, recently, bomb terrorists and accidental crashes have occurred frequently on important infrastructures. Therefore, LNG storage tanks are also exposed to these dangerous scenarios, where they need to be evaluated and protected from these threats. Therefore, in this study, the behavior of 270,000 kL LNG storage outer tank impacted by a flying object is evaluated using implicit FEM code, LS-DYNA. In the analysis, the prestress loss due to the increased length of prestressing tendons from enlargement of outer tank is considered. A comparison study between the LNG tanks with and without prestress loss is performed to investigate the impact behavior and the effect of prestressing force change on the safety and serviceability prestressed concrete containment.

Key words : LNG tank, PCCV, Flying object, Impact analysis, Prestress loss, LS-DYNA

†Corresponding author:kalee@kogas.or.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서 론

세계적으로 LNG 저장의 수요가 증가함에 따라 LNG 저장탱크의 설계와 시공이 건설업계에서도 주목 받고 있으며 우리나라 역시 2001년 세계에서 5번째로 LNG 저장탱크 설계(140,000kL급) 기술을 국산화하였다[1]. 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 270,000kL급 LNG 저장탱크 기술개발에 힘쓰고 있다[1].

특히 국내 LNG 저장탱크의 설계 및 해석에 관한 연구는 한국가스공사 연구개발원과 대우건설 등의 탱크 시공사, 관련 대학 등에 의해 주로 이루어졌다. 한국가스공사연구개발원 등(2001)은 “LNG 저장탱크 지붕 해석 및 설계기술 개발”에서 지붕에 대한 안전 기준을 조사, 분석하여 LNG 저장탱크 지붕의 철골 구조물 및 콘크리트 구조물의 구조해석을 통한 설계 시스템을 구축하였다[2].

전제진 등(2003)은 탱크의 시공비용 및 부지의 이용 효율성이 높은 완전방호식 대용량 LNG 저장탱크의 대용량화 시 고려해야할 요인 및 기존 LNG 저장탱크의 형상을 결정짓는 요인으로 LNG 저장탱크의 구조, 내조 및 외조의 구조적인 저항능력을 검토하였고, 대용량 LNG 저장탱크 내조 및 외조 설계 시 기술적인 고려사항을 고찰하였다[3].

이 밖에도 LNG 저장탱크의 설계 및 해석과 관련한 많은 논문들이 발표되었다. 하지만 국내 LNG 저장탱크 관련 해석 연구들을 살펴보면 대부분은 하중 조건 및 하중조합조건에서 충돌 하중에 대한 해석 검토는 미미한 수준임을 알 수 있다.

국내의 충돌 관련 연구동향을 살펴보면, Wiehle와 Buckholdt(1968)는 충격하중을 받는 외부 벽 부재의 붕괴를 예측하기 위한 벽체 부재의 거동에 대해 여러 가지 조건변수를 변화시켜 그 상관관계를 규명하여 해석적 과정과 실험적 검증을 통해 전산 프로그램을 개발하려는 시도를 하였다. 또한 Wiehle(1974)는 기존 구조물에 대한 지상 충격하중의 결정을 통한 동적응답 및 각각의 대상 구조부재에 대한 파괴 이론의 평가과정을 수립한 바 있다. 구조부재에 대한 내력함수를 구하는데 사용되도록 해석적 방법이 제시되어 있으며, 각각의 부재에 등분포된 정적하중을 사용하는 데에 바탕을 두었다[4-5].

미국전력연구소 EPRI(2002)는 원자력 플랜트의 전격납타입을 대표하는 컨테이너에 대하여 충돌 해석을 수행하였다. 해석은 항공기의 국소 충돌과 「전체

적인 충돌」을 평가하는 해석을 수행하였다[6-8].

또한 국내에서는 신상섭 등(2011)이 RC(Reinforced Concrete), SC(Steel-Plate Concrete) 격납구조에 대한 대형 민항기 충돌에 관한 응답해석을 Hydrocode인 Autodyn-3D를 통해 수행하였다[9].

이 밖에 현재까지 다양한 충돌 해석이 수행되었지만, 비산물체 충돌에 대한 LNG 저장탱크의 해석적 거동에 대한 연구는 국내외적으로 찾기 힘들다. 본 연구에서는 설정한 가상 시나리오에 따른 저장탱크 외조의 거동분석을 동적 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA로 수행하였다[10]. 먼저 LNG 저장탱크와 비산물체의 크기 및 충돌속도에 따른 거동을 LS-DYNA를 이용한 유한요소 해석을 통해 평가하여 LNG 저장탱크의 안전성을 검토하고자 한다. 또한 270,000kL급 저장탱크의 대형화에 따른 프리스트레스 손실량 적용 유무에 따른 충돌 거동 해석을 통해 향후 프레스트레스 격납 구조물의 설계 시 안전성 기준 및 검토의 보조 자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

II. 비산물체 충돌 시나리오 선정

2.1. 충돌대상 물체의 선정

한국가스공사에서는 Table 1과 같이 BS 7777 코드에 따라 LNG 저장탱크 설계 시 다음과 같은 비산물체에 의한 외부 충돌 시 안전성이 확보되는 것을 요구하고 있다[11].

따라서 본 연구에서는 위와 같은 BS 7777 코드의 충돌 시나리오를 기준으로 해석을 수행하여 LNG 저장탱크의 충돌에 대한 전체 구조물의 거동을 살펴본 후, 충돌체의 속도 및 크기에 대한 구조물의 충돌 거동 변화를 추가적으로 살펴보기 위해 구조물의 충돌 안전성 평가를 위한 최대 하중을 선정하고자 한다.

2.2. 충돌 위치 선정

본 연구에서는 주변 환경에 대한 영향을 배제하고, 구조물에 가장 큰 손상을 초래할 것으로 예측되는 충돌부위 및 기존 충돌관련 연구 등을 종합적으로 참고하여 그 위치를 선정하였다.

Table 1. BS 7777 Code

질량	2000kg
속도	50m/sec
크기	직경 1m의 구
충돌 각도	벽체와 수직

프리스트레스 손실량을 고려한 270,000kL급 LNG 저장탱크 외조의 비산물체 속도에 따른 충돌 거동 해석

Table 2. Impact position

충돌 위치	특징
30m	벽체의 약 2/3 지점으로 텐던의 배치가 적고 지점으로부터 멀어 충돌 시 큰 변위가 발생할 것으로 예상된다.
15m	벽체의 약 1/3 지점으로 텐던의 배치가 촘촘하고 강성이 큰 바닥판에 구속되어 있어 응력이 집중되어 있다.

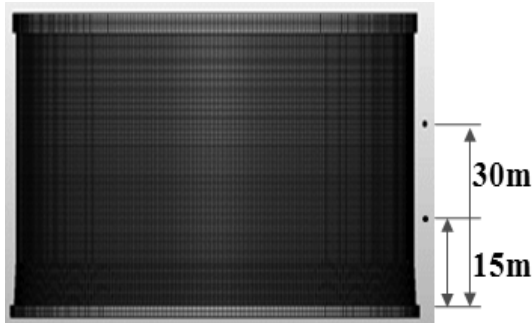


Fig. 1. Impact position.

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 충돌부 텐던의 배치, 간격, 규격은 Fig. 2와 같이 나타내었다. 이렇게 응력이 집중된 부분에 큰 충돌 하중이 가해진다면 구조물에 큰 손상을 초래하게 될 것으로 예상된다.

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 충돌 하중이 가해지게 되면 변위의 제어가 어려울 것으로 판단된다. 이러한 벽체의 구조적 특징을 참고하여 충돌 위치를 선정하고, Table 2에 정리 하였고 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. 충돌 해석 조건

충돌은 정상적인 가동상태에서 발생하는 것으로 가정하였으며, 정상가동 상태에서 LNG 저장탱크 외조는 자중, 프리스트레싱 하중, 내압 및 온도하중

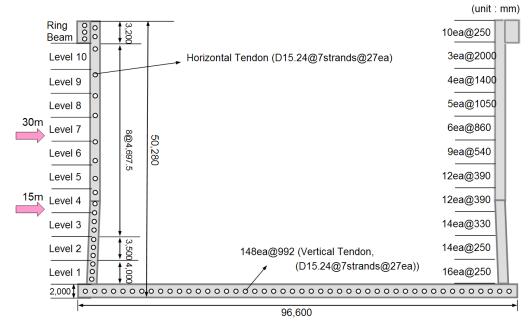


Fig. 2. Cross section of LNG tank.

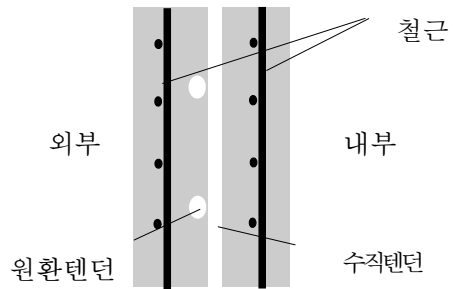


Fig. 3. Cross section of LNG tank.

등을 받고 있다. 이 중에서 정상가동시의 내압은 크기가 작고 또한 외부 충돌 하중에 대하여 역방향으로 작용하므로 무시하였다. 또한 온도하중도 내·외부 온도차에 의한 열응력차가 크지 않아 무시하였다.

충돌 하중은 짧은 시간에 큰 변형을 일으키므로 충돌체와 벽체 사이의 충돌면에 있어서 적합한 경계면 처리가 필요하다. 또한 콘크리트는 재료 특성상 콘크리트 구조물에 가해지는 하중에 대한 에너지를 흡수하므로 충돌 하중에 대한 변형량과 충격력 사이의 상관관계를 찾기 어렵다. 따라서 충돌 시나리오에서 제시한 직경 1.0m의 충돌 면적에 충격력을 가해주는 방법 대신, 직접 2000kg의 질량을 가진 직경 1.0m의 충돌체를 모델링 하고 해석 프로그램인 LS-DYNA의 접촉 알고리즘(Contact Algorithm; Contact Automatic One Way Surface to Surface)을 이용하여 저장탱크 외조의 벽체와 충돌체 사이의 경계면을 구성하였다.

충돌 각도는 BS 7777 코드에서 요구하는 가장 큰 충돌 효과가 나타나는 벽체에 직각방향의 충돌 각도를 설정하였다.

III. LNG 저장탱크 외조의 유한요소 모델

비산물체 충돌 하중은 내압, 자중 등의 축대칭 하중과는 달리 비대칭 하중으로 일반적으로 3차원 유한요소해석이 요구된다. 3차원 모델링에서는 벽체 등에 대한 모델링을 쉘 요소(Shell element)의 2차원 요소를 사용할 수 있으나 이 경우 해석 시간이 비교적 빠른 장점을 갖지만 집합부에서의 강성 중복 문제 등 구조물의 이상화에 따른 문제점들을 해결해야 하는 등의 주의를 요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Hypermesh 11.0을 사용하여 콘크리트 단면을 입체 솔리드 요소(Solid element)로 모델링하였으며 콘크리트, 철근, 텐던 등의 재료의 실제 물성치 및 비선형성을 모두 고려하였다.

3.1. LNG 저장탱크 외조의 기하학적 특성

본 연구에서 충돌 해석 시 사용한 구조물은 270,000 KL급 LNG 저장탱크 외조로 바닥 슬래브부터 돔형 지붕까지 그 높이가 59.659m이고 벽체와 링빔만 그 높이가 약 48.28m이다. 저장탱크 외조의 내부 반지름은 46.2m이고 외벽 두께는 하단의 7.5m 높이까지는 1.2~0.75m 의 구배를 가지며 그 위로는 0.75 m로 일정한 두께를 갖는 형상을 나타낸다. Fig. 2는 저장탱크 외조의 단면도이며 Fig. 4는 단면도에 따른 실제 유한요소모델의 그림이다. Table 3은 LNG 저장탱

Table 3. Main features

종류	LNG 저장탱크 외조 구조물 특징
벽체 두께	0.75m
벽체 높이	48.28m
벽체 내경	46.2m
링빔	있음
바닥판 프리스트레싱	있음

크 외조의 주요 제원을 나타낸 것이다. 벽체는 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 단면 상세는 Fig. 3과 같다. PS 텐던과 철근의 배치는 벽체 내 배치 위치에 따라 달라지며 벽체 모델링 시 그 배치를 모두 반영하여 실제 벽체에 가까운 모델을 구현하고자 하였다.

3.2. LNG 저장탱크 모델링 요소별 물성치

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

3.3. 프리스트레스 긴장력 손실 설계

Table 4에 나타낸 PS 텐던 긴장력은 LNG 저장탱크 설계 시 사용된 값으로 모든 손실 후의 최종 평균 긴장력이다.

하지만 본 연구에서는 가스탱크의 용량이 증가함에 따라 텐던의 길이 증가에 따른 프리스트레스 손실을 도입함으로써, 이것이 구조물의 충돌 거동에 미치는 영향을 평가해 보고자 한다. 이때 한쪽 부벽으로부터 P_0 로 설정하고 마찰에 의한 길이 방향의 손실을 모델링 시 도입하고자 한다. 손실 후의 최종 긴장력을 초기 긴장력 P_0 로 설정하였을 때 한쪽 부벽으로부터 α 각 만큼 떨어진 곳의 긴장력은 식 (1)로 계산하여 도입한다[12].

$$P = P_0 e^{-(\mu\alpha + kl)} \quad (1)$$

여기서, P_0 = 초기 긴장력 (N/mm²)

P = 각 변화 α 지점의 긴장력 (N/mm²)

α = 부벽으로부터의 각 변화 (radian)

l = 부벽으로부터 각 변화 α 만큼 일어난 점까지의 텐던의 곡선 길이

μ = 단위 각도 당 마찰계수 (/radian)

k = 단위 길이 당 마찰계수 (/m)

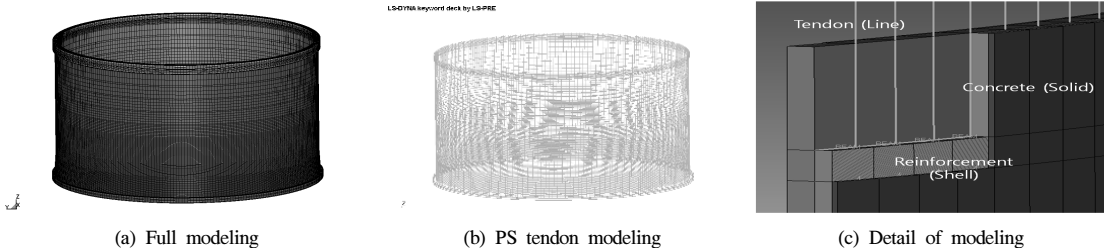


Fig. 4. Modeling of LNG tank.

Table 4. Material properties

재료	LNG 저장탱크 외조 벽체		
	콘크리트	질량	(ton/m ³)
압축강도		(N/mm ²)	fck = 40
휨강도		(N/mm ²)	0.6fck = 24
탄성계수		(kN/m ²)	Ec = 31.75 e ⁶
포아송비			μ = 0.2
철근	질량	(ton/m ³)	ms = 7.85
	항복인장강도	(N/mm ²)	fy = 400
	탄성계수	(kN/m ²)	Es = 200.0 e ⁶
	포아송비		μ = 0.3
PS 텐던	질량	(ton/m ³)	mst = 7.85
	탄성계수	(kN/m ²)	Es = 195.0 e ⁶
	포아송비		μ = 0.3
	긴장력(vertical)	(N/mm ²)	862.5
	긴장력(horizontal)	(N/mm ²)	1153

3.4. LNG 저장탱크 외조의 유한요소모델

충돌 하중은 비대칭 하중이므로 구조물 전체의 거동을 확인하기 위해서는 풀 모델링이 필요하다. 따라서 충돌 해석을 위해 Hypermesh 11.0을 이용하여 3D 풀 모델을 구현하였으며 더욱 정확한 예측을 위해 콘크리트를 3D 입체 요소인 솔리드 요소(solid element)로 모델링하였다.

철근은 주철근을 포함한 주요철근을 모델링에 모두 포함시켰는데 구조물의 크기가 초대형이다 보니 개별적으로 철근을 모델링하기가 어렵고 요소의 수가 지나치게 많아져 해석시간이 길어진다는 단점이 발생한다. 또한 이번 해석의 목적은 국부적 충돌 거동인 아닌, 구조물의 전체적 거동을 확인하고자 하는 것이므로 철근의 자세한 모델링이 필요하지는 않다고 판단되었다. 따라서 철근은 하나하나 개별적으로 모델링하지 않고 분포시켜 이상화하였으며 분포된 철근은 철근의 직경, 간격, 콘크리트 두께상의 위치 등을 엄밀하게 고려하기 위해 셸 요소(shell element)를 이용하여 콘크리트 요소 내에 묻는 방식을 사용하였다.

PS 텐던의 경우 철근만큼 밀집된 형태는 아니므로 개개의 텐던을 요소처럼 모델링하는 것이 바람직하다. 따라서 텐던은 1D 요소를 사용하여 콘크리트 내에

텐던의 배치 및 규격을 고려하여 묻는 방식으로 모델링하였다. 충돌 해석 시 프리스트레싱 하중은 초기 조건으로 설정하여야 하므로 LS-DYNA의 Initial Stress Beam 옵션을 통해 프리스트레싱 하중을 적용시켰다. Initial Stress Beam 옵션을 사용하는 경우 빔 요소(beam element)에 적용시킨 힘이 초기 조건으로 계산된 후 일정하게 유지된다고 가정된다.

바닥판 슬래브는 수직방향 텐던이 벽체로부터 내려와 고정되는 위치이므로 벽체와 바닥판을 고정시켜 모델링하였다. 또한 바닥판은 말뚝기초에 의해 지지되므로 경계조건으로 바닥판 슬래브를 모두 고정(fix)시킨 후 해석을 수행하였다.

IV. LNG 저장탱크 외조의 충돌 해석 결과

4.1. BS 7777코드 시나리오의 충돌 거동

Fig. 5는 2000kg의 강체를 50m/s의 속도로 벽체에 수직 충돌하여, PSC 저장탱크 외조 벽체에 나타나는 von Mises 응력의 시간 흐름에 따른 변화이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 비산물체와 벽체의 충돌 시간은 매우 짧다. 짧은 충돌시간으로 인해 벽체에는 큰 충격력이 발생하며, 충돌면에 국소적으로 발생한 집중응력은 충돌 이후 구조물 전체로 퍼져나가며 충돌면 부근의 잔류응력이 시간에 따라 소산되는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6(a)는 충돌로 인해 발생하는 최대 변위 발생 지점의 시간이력에 따른 최대 변위를 나타내는 그래프이다. 그래프를 통해 충돌이 발생하는 42 msec 시점에서 변위가 증가하기 시작하여 43 msec에서 약 0.44 mm의 최대변위가 발생하였으며, 충돌 이후 변위는 충격파의 전파에 따라 점차 감소하여 결국에는 아주 미소한 잔류변형을 남겼음을 알 수 있다. 강체로 비산물체를 모델링하였기 때문에 충돌이 매우 짧은 순간 발생하였다가 비산물체가 바로 튕겨나감에 따라 외부 충돌하중이 벽체 후면까지 충분히 전달되지 못해, 충돌하중에 비해 벽체에 발생한 변위가 충분히 발생하지 못한 것으로 보인다. 하지만 충돌에 의한 변위 그래프가 구조물의 충돌 거동을 잘 반영하고 있다고 판단되는 바, 변위 자체의 크기보다는 변위의 변화 추이를 통해 PSC 저장탱크의 충돌 거동을 예측해 보고자 한다.

Fig. 6(b)는 최대 변위 발생 지점에서의 시간이력에 따른 von Mises 응력의 변화를 보여주는 그래프로 최대 응력은 충돌이 발생한 시점인 42 msec일 때 발생하였다. 최대 응력은 41.59 MPa로 나타났으며 충돌시간이 짧았던 만큼 충돌하중이 벽체에 가해지는 순간 응력이 급격하게 증가하였다가 충돌면에서의 충격응력이 벽체 전체로 퍼져나가면서 응력이 빠

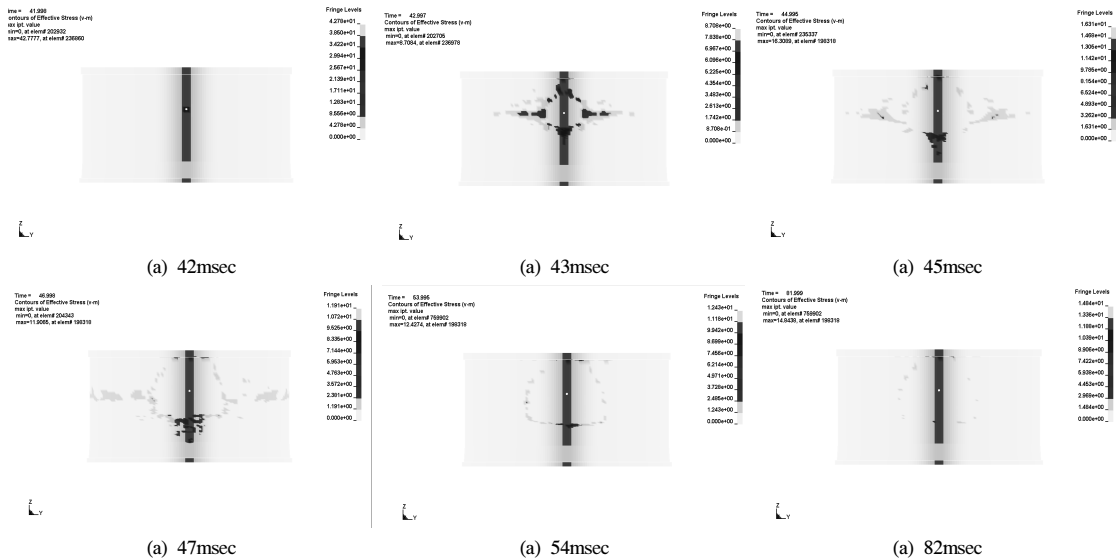


Fig. 5. Von-Mises stress behavior.

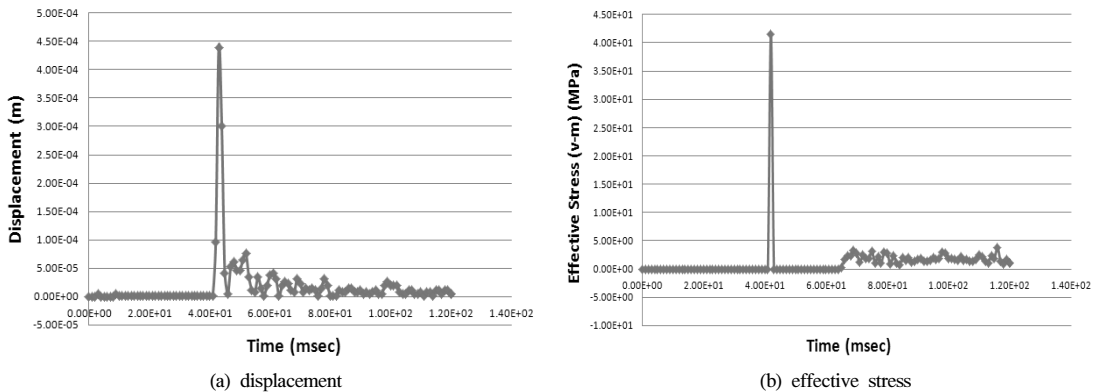


Fig. 6. Displacement & Effective stress-time history.

르게 소산되는 응력의 거동을 보여주고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 응력거동을 보이고 있는 구조물의 외부충돌하중 영향 평가를 다음과 같이 수행하고자 한다. PSC 저장탱크 구조물의 설계 시 외부충돌하중과 같은 극한한계상태에서는 콘크리트에 부분재료계수 1.3을 적용하여 콘크리트 강도를 감소시킴으로써 구조물의 안전성을 확보하고 있다. 하지만 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램을 사용한 시뮬레이션을 통해 직접 외조 구조물 벽체에 충돌하중을 가해주었으므로 부분재료계수를 적용하여 콘크리트 강도를 감소시킬 필요가 없다고 판단

되었으므로 재료의 설계 강도인 $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ 그대로를 재료의 한계허용응력(재료) σ_a 로 설정하였다. 또한 해석 수행 시 콘크리트의 재료 설계에 동적하중에 대해 변형률 속도에 대한 강도증진계수를 적용해 주었기 때문에 비산물체 충돌하중에 대한 한계허용응력(하중) σ'_a 은 재료의 한계허용응력(재료) σ_a 에 강도증진계수 γ_f 를 곱한 값을 사용하여 충돌하중에 대한 벽체의 안전성을 평가하고자 한다. 본 연구에서는 김호진(2007)의 연구에서 사용한 강도증진계수를 사용하였는데, 이 증진계수는 실험결과에 기초하여 적용된 강도증진계수를 고충격의 경우 높은 변

프리스트레스 손실량을 고려한 270,000kL급 LNG 저장탱크 외조의 비산물체 속도에 따른 충돌 거동 해석

형률 속도까지 나타낼 수 있도록 연장시킨 것이다. 최대 변형률 속도는 0.065 sec^{-1} 로 이에 대응되는 강도증진계수 γ_f 는 1.229이다. 실제 프리스트레스트 콘크리트에 작용하는 극한하중에 대한 강도증진효과는 콘크리트 뿐 만 아니라, 철근 및 텐던의 강도증진효과가 발생할 것이나, 본 연구에서는 극한상황에 대해서 고려하기 위하여 콘크리트의 강도증진효과만을 고려하였다[13].

따라서 본 연구에서는 벽체에 충돌에 의해 발생한 최대 응력 σ_{max} 와 위에서 구한 바와 같은 충돌하중에 대한 한계허용응력(하중) σ'_a 을 비교하여 비산물체의 외부충돌하중에 대한 PSC 저장탱크 외조 벽

체의 충돌 영향 평가를 실시하고자 하며, 그 결과를 **Table 5**에 명시하였다. 위에서 살펴본 바와 같이 BS 7777 코드의 외부충돌하중 시나리오에 따라 유한요소 해석을 실시해 본 결과 충돌 당시 벽체에 순간적으로 발생한 최대 응력은 41.59 MPa로 콘크리트의 한계허용응력인 49.16 MPa보다 작으므로 벽체의 충돌 영향 평가에서 손상에 대해 안전측으로 평가할 수 있다. 이렇게 국부적으로 발생한 집중응력은 구조물 전체로 충격과 형태로 전파되어 벽체의 반발거동에 의해 소실되며, 전파되는 응력은 충돌시의 집중응력에 비해 현저히 작으므로 벽체에 큰 변형을 일으키지 않을 것으로 판단된다.

Table 5. Impact assessment

높이	σ_{max} (MPa)	σ_a (MPa)	γ_f	σ'_a (MPa)	충돌영향평가
30	41.59	40	1.229	49.16	$\sigma'_a > \sigma_{\text{max}}$ (만족)
15	94.06	40	1.237	49.48	$\sigma'_a < \sigma_{\text{max}}$ (손상)

4.2. 비산물체의 최대 속도 및 크기 선정

우선 비산물체의 크기가 충돌 거동에 미치는 영향을 확인해보기 위해 충돌 속도를 50m/sec로 고정하고 크기를 1m와 2m로 변경하여 높이 30m 지점에 충돌 해석을 수행한 결과 충돌 후 시간 흐름에 따라 저장탱크 외조 벽체에는 **Fig. 7**과 같은 von Mises 응력 거동이 나타나는데 비산물체가 충돌했을 때 응력 거동은 지름과 상관없이 흡사한 형상을 나타내고

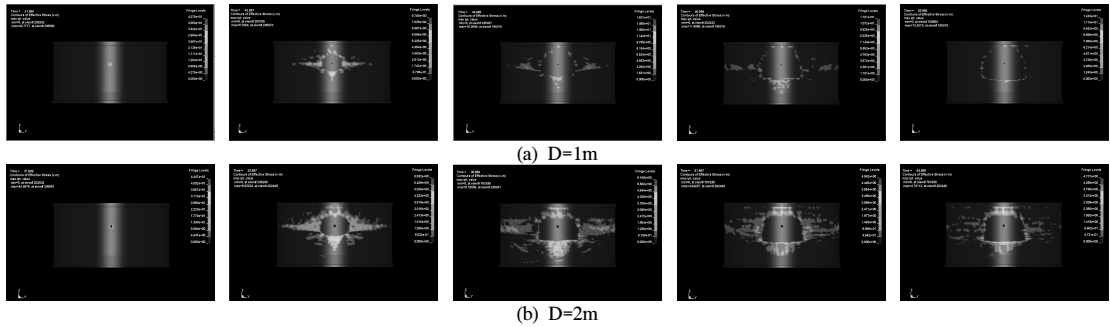


Fig. 7. von Mises stress behavior.

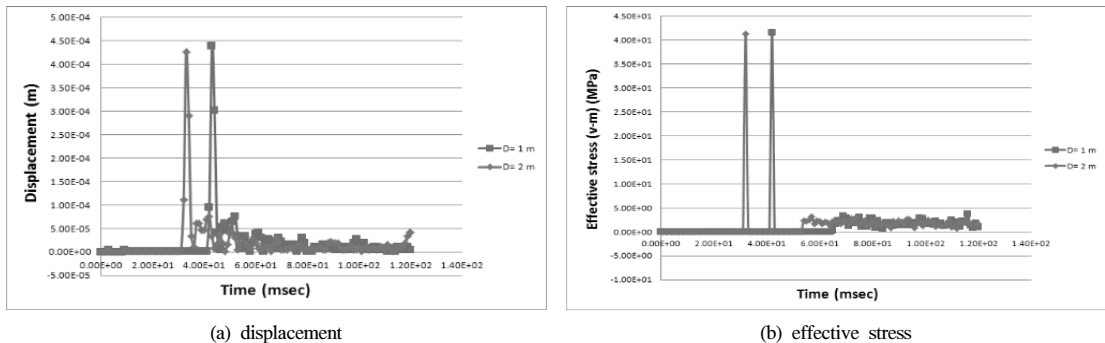


Fig. 8. Comparison of displacement and effective stress.

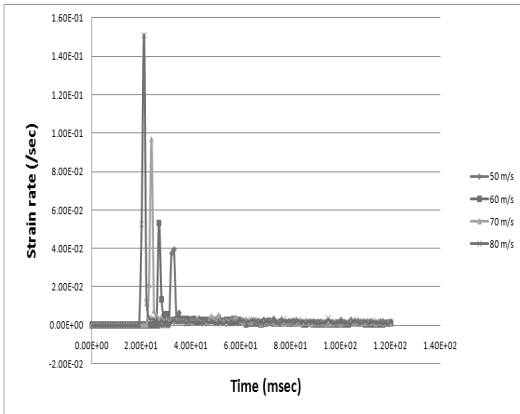


Fig. 9. Strain rate.

있다. Fig. 8의 최대 변위 발생 지점의 시간이력에 따른 변위와 시간이력에 따른 von Mises 응력의 변화의 그래프를 보면 알 수 있듯이 충돌 순간 변위 및 응력치가 최대값에 급격하게 도달하였다가 충격파가 분산되며 급격하게 줄어들어 작은 잔류 변형 및 잔류 응력만을 남긴다는 점에서 유사하나 비산물체의 지름이 2m인 경우가 아주 미세하게나마 작은 크기의 최대 변위 및 최대 응력을 보였다. 이는 같은 질량에 대한 응력 거동이라 본다면 지름이 2m인 경우가 더 넓은 범위에서의 응력분포를 나타내고 있기 때문에 더 안정적인 충돌 거동을 보이고 있기 때문으로 판단되었다.

Fig. 9는 각각의 충돌속도 변화에 따른 충돌 영향 평가를 수행하기 위해 필요한 변형률 속도를 나타낸 그래프이다. 충돌 속도의 변화에 따라 최대 변위 및 최대 응력 값이 증가하고 있음을 확인해 볼 수 있다. 비산물체의 충돌 속도가 증가하게 되면 충돌체가 갖게 되는 운동에너지가 증가하게 되므로 충돌 시 벽체가 받는 충격력이 증가하게 되며 구조물의 거동에 더 큰 영향을 미치게 되는 것이다. 특히 운동에너지는 속도의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 그 편차가 더욱 커지게 된다. 그래프의 수치들을 통해 충돌 영향 평가를 실시한 결과를 Table 6에 나타내었다.

표에서 볼 수 있듯이 비산물체의 충돌 속도 60m/s까지는 충돌 영향 평가 시 LNG 저장탱크 외조 벽체의 손상에 대해 안전측으로 판단할 수 있지만, 그 이상의 속도에서는 최대 응력 값이 외벽의 손상에 대한 한계허용응력 값을 상회하였다. 따라서 지름 2 m 비산물체의 충돌 해석 시 LNG 저장탱크 외조 벽체의 손상에 관한 안전성이 확보되는 수준은 60m/s로 정할 수 있다.

Table 6. Impact assessment

v (m/s)	σ_{max} (MPa)	σ_a (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (/sec)	γ_f	σ'_a (MPa)	충돌영향평가
50	41.3	40	0.039	1.206	48.24	$\sigma_{max} < \sigma'_a$
60	44.6	40	0.053	1.218	48.72	$\sigma_{max} < \sigma'_a$
70	55.6	40	0.097	1.257	50.28	$\sigma_{max} > \sigma'_a$
80	69.1	40	0.151	1.264	50.56	$\sigma_{max} > \sigma'_a$

4.3. 프리스트레스 손실이 도입된 충돌 거동

4.2 장에서 텐던의 길이에 따른 프리스트레스 손실이 도입되지 않은 h=30m 충돌위치에서의 벽체 상부면에서의 충돌 영향 평가를 통해 PSC 저장탱크 외조 벽체의 손상에 관한 안전성을 만족하는 비산물체의 최대 속도 및 크기는 60 m/sec와 지름 2m으로 결정하였다. 즉, 본 충돌 해석에서는 저장탱크의 외조 벽체에 마찰에 의한 손실이 반영된 프리스트레스 하중을 도입하여 모델링하였으며, 질량 2000 kg, 지름 2 m, 속도 60 m/s을 가진 비산물체를 벽체에 수직으로 충돌시켜 구조물의 충돌 거동을 예측해 보았다. Fig. 10과 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 프리스트레스 손실을 도입한 경우와 도입하지 않은 경우가 거의 비슷한 거동을 하고 있으며 최대 변위 및 최대 응력 역시 매우 흡사하게 나타났다. 길이에 따른 마찰 손실을 적용하여 텐던에 도입된 최대 및 최소 프리스트레스의 차이는 약 25% 정도로, 비산물체가 충돌하는 위치에 최소 프리스트레스가 적용되도록 모델링이 되었으므로 PSC 저장탱크 외조 벽체의 충돌에 대한 저항성이 약화되어 충돌 시 프리스트레스 손실이 도입 안 된 경우에 비해 더 큰 변형이 발생할 것으로 예상되었다. 하지만 충돌 해석 수행 결과 시간이력에 따른 변위 및 응력 변화 그래프를 보았을 때 프리스트레스 손실의 도입 유무에 관계없이 매우 유사한 충돌 거동 양상을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 충돌 높이 30m의 위치에는 약 90 cm 정도의 넓은 간격으로 텐던이 배치되어 있으며 충돌 시 그 영향이 매우 국부적으로 나타나는 경향으로 미루어 보아 프리스트레스 손실에 의한 충돌 저항성 약화가 충돌 거동에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

프리스트레스 텐던이 촘촘히 배치된 PSC 저장탱크 외조 벽체 하부면의 경우는 상부면의 경우와는 달리, 프리스트레스 손실로 인한 효과가 여실히 드러났다. 프리스트레스 손실로 인해 약화된 프리스트

래싱 힘은 벽체 하부의 강성을 감소시켰고, 따라서 프리스트레스 손실을 도입하기 전과 동일한 충돌 하중이 가해졌음에도 불구하고 충돌 시 발생한 최대 변위는 증가하고, 최대 응력은 감소한 것을 Fig. 10(b)과 Fig. 11(b)을 통해 확인할 수 있었다. 즉, 프리스트레스 손실에 의해 벽체 하부면의 강성이 감소되며 비산물체 충돌 시 벽체에 발생하는 충돌 응력은 감소하였지만 충돌 변위는 증가하는 거동을 보이고 있으므로 결과적으로 프리스트레스 손실은 구조물의 외부충돌하중에 대한 저항성을 약화시킨 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서 LNG 저장탱크 외조 벽체에 대한 비산물체 시뮬레이션을 수행하여 외조 벽체의 외부충돌하중에 대한 저항 성능을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 한국가스공사에 채택하고 있는 BS 7777 코드의 외부충돌하중 시나리오를 바탕으로 구조물의 상부 및 하부에 대한 충돌 해석을 수행한 결과 발생한 응력에 비해 변위는 매우 미소한 크기로 발생하였는데 이는 비산물체를 강체로 모델링하였기 때문에 매우 짧은 순간 충돌이 발생하여 충격력이 벽체 후면까지 전달되지 못했기 때문으로 판단된다.

(2) 벽체 손상에 대해 자체적으로 충돌 영향 평가 기준을 설정하고, 이 손상에 관한 충돌 영향 평가를 실시하여 이를 만족시키는 수준에서의 비산물체의 최대 속도 및 크기를 도출함으로써 프리스트레스 손실을 도입한 경우에 대한 새로운 외부충돌하중 시나리오를 설정하였다.

(3) 프리스트레스 손실의 도입 결과 텐던의 배치가 비교적 넓은 벽체 상부면의 충돌 거동에 대해서는 프리스트레스 손실의 도입 유무가 큰 영향을 미치지 않았다. 하지만 텐던의 배치가 매우 촘촘한 벽체 하부면에 대해서는 프리스트레스 손실의 도입 시 텐던의 긴장력 약화로 인해 벽체의 강성이 작아져 변위는 증가하고 응력은 감소하는 불안정한 거동을 보여주었다.

(4) 프리스트레스 손실을 도입함으로써 더욱 정확한 구조물의 충돌 거동을 예측할 수 있었으며, 특히 충돌하중에 취약성을 나타내는 벽체의 하부에 있어서는 그 효과가 증대될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업 LNG 플랜트사업단의 연구비지원과 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원(No. 2010-1620100180)에 의해 수행되었습니다.

사용기호

- P_0 : 텐던의 초기 긴장력[N/mm²]
- P : 텐던의 곡선길이 1에서의 텐던의 긴장력 [N/mm²]
- l : 텐던의 곡선길이[m]
- v : 비산물체의 충돌속도[m/s]
- h : 비산물체의 충돌 위치[m]
- D : 비산물체의 지름[m]

그리스 문자

- l : 텐던의 곡선길이[m]
- μ : 단위 각도당 마찰계수[/radian]
- k : 단위 길이당 마찰계수[/m]
- σ_{max} : 충돌 시 벽체에 발생한 최대 응력
- σ_a : 재료의 한계허용응력
- γ_f : 강도증진계수
- σ'_a : 충돌하중에 대한 한계허용응력
- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도

참고문헌

- [1] 한국가스공사 연구개발원, *LNG 저장탱크 국산화 개발 및 상용화*, 12-28, (2004)
- [2] 한국가스공사, *LNG 저장탱크 지붕 해석 및 설계 기술 개발*, 한국가스공사 연구보고서, 7-53, (2001)
- [3] Jeon, Se-Jin, Jin, Byeong-Moo and Kim, Young-Jin, "Design Basis of Large Above-ground LNG Tank", *KCI*, 15(3), 31-37, (2003)
- [4] Wiehle, C. K. and Buckholdt, J. L., *Summary of Existing Structures Evaluation Part I : Walls*, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, (1968)
- [5] Wiehle, C. K., *Evaluation of Existing Structures*, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, (1974)
- [6] EPRI, *Aircraft Crash Impact Analysis Demonstrate Nuclear Power Plant's Structural Strength*, 1-10,

- (2002)
- [7] Eibl, J. and Malt, E. H., *Airplane Impact on Nuclear Power Plants*, Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, No. J03-6, (2003)
- [8] Itoh, M. and Katayama, M., "Computer Simulation of a Boeing 747 Passenger Jet Crashing into Reinforcement Concrete Wall", *Materia Scientia*, 465-466, 73-78, (2004)
- [9] Shin, Sang-Shup and Park, Tae-Hyo, "Analysis of Containment Building Subjected to a Large Aircraft Impact using a Hydrocode", *KSCE*, 31(5A), 369-378, (2011)
- [10] Livemore Software Technology Corporation (LSTC), *LS-DYNA Keyword Users Manual Version 971*, Livemore, California, May., LS-DYNA 971 manual
- [11] "Impact of flying objects on the tank - BS 7777 : Part 1", (1993)
- [12] 신현목, "프리스트레스 콘크리트", 동명사, (2008)
- [13] Kim, Ho-Jin, Nam, Jin-Won, Kim, Sung-Bae, Kim, Jang-Ho, Byun, Keun-Joo, "Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load", *KCI*, 19(2), 241~250, (2007)