모듈형 LNG 저장탱크 외조를 구성하는 샌드위치 콘크리트 패널의 충돌실험 및 해석

이 계 희^{1*} · 김 언²

¹목포해양대학교 해양건설공학과, ²한국조선해양 시스템안전연구실

Impact Tests and Numerical Simulations of Sandwich Concrete Panels for Modular Outer Shell of LNG Tank

Gye-Hee Lee^{1*} and Eun Kim²

¹Department of Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Korea

²System Safety Lab., Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Seoul, 03058, Korea

Abstract

Tests using a middle velocity propulsion impact machine (MVPI) were performed to verify the impact resistance capability of sandwich concrete panels (SCP) in a modular liquefied natural gas (LNG) outer tank, and numerical models were constructed and analyzed. 2×2 m specimens with plain sectional characteristics and specimens including a joint section were used. A 51 kg missile was accelerated above 45 m/s and impacted to have the design code kinetic energy. Impact tests were performed twice according to the design code and once for the doubled impact speed. The numerical models for simulating impact behaviors were created by LS-DYNA. The external steel plate and filled concrete of the panel were modeled as solid elements, the studs as beam elements, and the steel plates as elasto-plastic material with fractures; the CSCM material model was used for concrete. The front plate deformations demonstrated good agreement with those of other tests. However the rear plate deformations were less. In the doubled speed test for the plain section specimen, the missile punctured both plates; however, the front plate was only fractured in the numerical analysis. The impact energy of the missile was transferred to the filled concrete in the numerical analysis.

Keywords : outer tank of LNG storage, sandwich concrete panel, impact test, nonlinear dynamic impact analysis, dissipation of impact energy

1. 서 론

액화천연가스(LNG)의 저장시설에서 저온의 액체와 직접 접촉하는 내조는 니켈 특수강으로 시공되고 내조를 외부하중으로부터 보호하는 외조는 콘크리트구조물로 시공되는 것이 일반적이다. 이 때 시공성이 좋고 구조적 성능이 우수한 샌드위치 콘크리트 패널(sandwich concrete panel: SCP)을 이용하여 외조를 구성한 경우 이에 작용하는 충돌하중에 대한 연구가 필요하다.

구조물의 충돌저항 능력을 평가하려면 해석에서 얻어진 결과가 실제 충돌거동과 부합하여야 하고 또 보수적인 값을 보여야

한다. 따라서 기존의 연구들에서도 충전콘크리트와 강재의 재료적 특성과 SCP를 구성하는 연결재의 구성특성에 대한 충돌거동을 해석적 방법과 실험적 방법으로 검증하였다(Sohel and Liew, 2014; Thai and Kim 2015; OECD, 2014).

본 논문에서는 모듈형 LNG탱크의 외조를 구성하기 위하여 개발된 SCP(HHI, 2015)의 충돌거동을 분석하기 위하여 중형충돌시험기를 이용하여 충돌시험을 수행하고, 이 결과의 검증을 위한 수치모델을 개발하여 그 해석결과를 검토하였다. 그 결과 얻어진 오차를 분석하고 설계시에 적용할 수 있도록 보수성을 평가하였다. 이 해석모델을 실제 구조물의 설계에 대한 충돌안전성 검토에 사용할 것이다.

* Corresponding author:

Tel: +82-61-240-7340; E-mail: lghlsk@mmu.ac.kr

Received August 28 2019; Revised August 29 2019;

Accepted August 30 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 충돌시험

2.1 시험조건

충돌시험에 사용된 충돌시험기는 극한성능시험센터에 설치된 중속가스건(middle velocity propulsion impact machine)이다(Fig. 1).

Fig. 1 Middle velocity propulsion impact machine (Seoul National University, 2018)

시험에 사용된 시험체는 가로, 세로 각 2m의 크기이고 두께는 일반부 단면을 기준으로 콘크리트 188mm, 강판 각 6mm, 총 두께 200mm로 실구조물의 SCP 두께인 250mm보다 축소

(a) Plain section specimen

(b) Joint section specimen

Fig. 2 The specimens prepared for impact test (EPTC, 2019)

되어 제작되었다. 일반부단면 시험체는 전면과 후면의 철판에 직경 13mm의 전단연결재를 용접으로 연결하였다. 연결부단면 시험체는 중앙부에 위치한 연결부 방향으로 두께 13mm, 폭 310mm의 철판으로 보강하고, 이 부분에 지름 19mm의 전단 연결재를 125mm간격으로 배치하였다. 연결부단면 시험체의 충전콘크리트는 실제 건설되는 구조물의 조건을 반영할 수 있도록 연결부에 간극이 발생하도록 분리 타설하였다(Fig. 2). 두 종류의 시험체 모두 전면과 후면의 강판을 조립하면 양쪽에 동일한 간격으로 배치된 전단연결재가 서로 엇갈려서 분포하도록 배치되었다. 시험체 제작에 사용된 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 이 중 콘크리트의 물성치는 압축강도를 시험한 결과 원래 계획보다 큰 값을 보였다.

시험체는 일반부단면 시험체 3개, 연결부단면 시험체 3개를 제작하였다(Table 2). 설계기준(CEN, 2006)에 제시된 충돌 에너지를 가지도록 질량 51kg인 강재 충돌체를 시험체의 중앙에 45m/s의 속도로 충돌시켰고자 하였으나 실제 시험에서는 계획보다 큰 속도로 충돌되었다. 2종의 시험체에 대해서 2회의 충돌시험을 실시하고 극한거동을 검토하기 위하여 속도를 2배로 증가시켜 추가로 실험을 실시하였다(Table 2).

Table 1 Materials properties of specimens

	Name	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Concrete	-	-	35*
Plate	S460	< 460	540 to 700
Stud	A320	< 725	< 860

* 48MPa in compressive test

Table 2 Test cases and the center deformations

Test case	Section	Impact speed (m/s)	Front dent (mm)	Rear bump (mm)
#1	Plain	53.6	21.0	8.1
#2	Joint	55.7	20.9	7.3
#3	Plain	52.1	17.0	9.2
#4	Joint	56.5	20.7	5.0
#5	Joint	104.0	44.3	26.5
#6	Plain	104.2	Nailed(285mm)	

2.2 시험결과

충돌체가 충돌한 전면부와 후면의 중앙부에서의 변형을 계측하였다. 이 결과는 Table 2에 정리하였다. 충돌이 발생한 전면에는 충돌체에 의한 함몰변형만 발생하였다(Fig. 3(a)). 후면에서 발생하는 변위는 전면부와 같이 충돌부에 변형이

집중되는 형상이 아니라 시험체 전면에 걸쳐서 완만하게 변위가 분포되는 형상을 보였다. 하지만 속도를 2배로 증가시켜 일반 부단면 시험체에 충돌시킨 Test#6의 경우에는 충돌체가 시험체의 전면강판을 뚫고 들어가 박히고 후면에서는 충돌부의 철판이 파괴되고 내부의 부재와 재료가 파출되는 거동을 보였다. 하지만 충돌체가 시험체를 관통하지는 않았다(Fig. 3(b)).

충돌시험결과 얻어진 변형은 약간 일관성이 결여된 경향을 보인다. 일반부단면 시험체에 대한 충돌시험의 경우(Test#1, #3, #6), 전면의 변위는 큰 편차를 보인다. 특히 Test#3의 경우는 거의 동일한 조건에서 수행된 Test#1에 비해 약 20% 정도 작은 값을 보인다. 반면 후면 변위의 경우 전면변위에 비하여 작은 오차를 보이기는 하나 Test#1의 전면변위와 대소

관계가 역전된 값을 보여주고 있다. 연결부단면 시험체의 경우에는 전면에서는 일정한 변형량을 보이지만 후면에서는 큰 오차를 보이고 있다. 일반단면 시험체와 연결단면 시험체를 비교해 보면 강판으로 추가 보강된 연결부 시험체의 강도가 크게 나타나는 것이 타당하므로 전면부의 변위를 비교해 볼 때 연결부보다 작은 변형값을 보이는 Test#3의 결과는 다른 시험에 비하여 신뢰성이 떨어지는 것으로 판단된다. 따라서 Test#1, #2를 신뢰성있는 시험결과로 보고 이를 기준으로 수치해석을 수행하였다.

3. 수치해석

3.1 모델링

충돌시험을 수치해석하기 위한 해석모델은 고체요소와 보요소를 이용하여 작성되었다. 전후면의 강판과 충전콘크리트, 충돌체는 고체요소로 모델링되었고, 전단연결재는 보요소로 모델링되었다. 해석에 사용된 프로그램은 LS-DYNA R10.1.0(LSTC, 2017)이다. 해석모델의 형상은 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. 요소망의 조밀성에 대한 수렴성해석을 수행하여 일관된 해석결과를 보이는 것을 확인하고 해석을 수행하였다. 수치해석 사용된 모델은 절점 약 16만개, 고체요소 약 15만개, 보요소 약 1.4만개로 구성되었다.

(a) Front plate of Test#1

(b) Rear plate of Test#6(detail in box)

Fig. 3 Deformation of plates after impact tests (EPTC, 2019)

Fig. 4 Mesh of analysis model(plate, studs, concrete and combined mesh from upper-left corner clockwise, respectively)

Fig. 5 Detail element mesh of joint section

연결단면 시험체를 나타내는 모델에서는 내부 충전콘크리트의 간극을 모델링하기 위하여 요소망이 분리되도록 모델링하고 이 부분에서 접촉에 의한 구조거동이 일어나도록 모델링하였다 (Fig. 5). 해석시 모델의 외부표면에 일반적인 접촉이 발생하도록 하였기 때문에 이 부분은 변형에 의해서 발생하는 접촉에 의해서 힘이 전달된다. 이 때 고려된 간극은 0.2mm이다.

해석에 사용된 재료모델은 강재의 경우 등방운동경화모델 (isotropic and kinematic hardening plasticity model, *MAT_PLASTIC_KINEMATIC)을 사용하였으며 충돌속도에 따른 변형속도의 영향을 다음과 같이 고려하였다.

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 동적응력(dynamic flow stress), σ_0 는 정적응력 (static flow stress), $\dot{\epsilon}_{pl}$ 은 변형속도이고 D , n 은 재료에 따르는 상수들이다. 본 연구에서는 $D=40.0\text{sec}$, $n=5$ 를 사용하였다.

콘크리트의 경우 *MAT_CSCM재료 모델을 사용하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 기준 강도는 시험체의 설계시 35 MPa를 목표하였으나 실제로는 이보다 큰 48MPa로 측정되었으므로 48MPa를 기준으로 상하 10MPa의 변동을 고려하여 38MPa, 48MPa, 58MPa의 3가지의 재료로 모델링하고 각각의 응답을 산정하였다.

기타 충돌조건은 신뢰성있는 시험결과라고 추정된 Test# 1, 2의 시험조건을 따라서 부여하였다.

3.2 해석결과

이러한 충돌조건에서 얻어진 SCP의 충돌변형의 분포는 예는 Fig. 6에서 보이는 바와 같다. 전면부의 변형은 중앙부의 충돌점에 집중되는 형상을 보여주고 있고 후면부에서의 변위는 전면부에 비하여 넓게 퍼진 모습을 보여주고 있다. 일반단면을 가진 시험체는 양방향으로 대칭적이고 연속적인 변위형상을 보이나 연결부의 단면은 연결부와 평행한 방향으로 변위의 띠가 발생하고 있다. 이는 연결단면부 시험체의 보강에 의한 강도차이와 충전콘크리트의 간극의 영향으로 판단된다. 하지만 전체적인 변형응답은 충돌이 발생하는 중앙부에 집중되었고 후면의 변위는 분포되어 나타난다. 이러한 경향은 충전콘크리트의 압축강도변화에도 큰 변동없이 동일한 경향을 보였다.

Fig. 6 Deformation distribution from analyses(left: front side, right: rear side, $f_{ck}=48\text{MPa}$)

충전콘크리트의 압축강도가 48MPa인 경우, 일반단면부 모델(A#1)과 연결단면부 모델(A#2)의 충돌해석시 전후면 강판의 충돌점과 충돌체의 변위와 속도의 시간이력을 시험체 별로 Fig. 7, 8에 나타내었다. 변위시간이력의 경우 충돌초기에 최대 변위에 도달하였다가 진동하면서 최종변위로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 시험체 전체의 휨에 대한 탄성변형으로 추정된다. 충돌체는 최대 변위시점 이후 일정한 속도로 반동하는 것을 나타내고 전면과 후면의 강판은 진동하면서 최종값에 수렴한다. 이들 시험체의 속도응답은 충돌체와 거의 유사한 크기의 값을 보이나 Fig. 7(b), 8(b)에서 보이듯이 상대적으로 강성이 큰 연결단면부 시험체는 최대속도에 도달하는 시점이

(a) Displacement

(b) Velocity

Fig. 7 Center responses of plain section model
(A#1, $f_{ck}=48\text{MPa}$)

상대적으로 낮고 그 최대값도 전면보다 작은 것을 알 수 있다. 충돌체의 속도 이력은 연결부단면 시험체에서 반동이 일반단면부 시험체에 비해 빨리 일어나는 것을 나타낸다. 두 시험체 모두 2ms 이내에 반동이 발생하여 충돌이 종료되고 시험체가 자유진동하는 거동을 보여준다.

해석이 종료되는 시점인 10ms에서 충전콘크리트의 강성에 따른 전면과 후면강판에서의 변위를 Table 3에 나타내었다. 비교의 기준이 된 시험결과는 앞 절에서 언급했듯이 신뢰성이 높다고 판단된 Test#1, #2를 사용하였다. 해석결과는 연결단면부 시험체가 일반단면부 시험체보다 큰 강성을 보여 전면과 후면에서 모두 작은 변위를 나타내는 것을 나타내고 있다. 충전콘크리트의 강도가 증가하여도 이 경향은 그대로 유지된다. 강도에 전후면 변위도 영향은 마찬가지로 감소한다. 전면부에서 변위값은 충전콘크리트의 강도에 따라 감소하는 경향을 보이나 시험체의 강도(48MPa)에 해당하는 해석결과에서는 비교적 정확한 변위값(오차 4.3%)을 산정할 수 있었다. 그러나 전면과 후면의 변위차는 시험결과에 비해서 크게 발생한다. 이는

(a) Displacement

(b) Velocity

Fig. 8 Center responses of joint section model
(A#2, $f_{ck}=48\text{MPa}$)

Table 3 Analysis cases and the center deformations

	Imp. speed (m/s)	Front dent (mm)	Rear bump (mm)	Diff. disp. (mm)	f_{ck} (MPa)
Test#1	53.6	21.0	8.1	12.9	48**
Test#2	55.7	20.9	7.3	13.6	
A#1*	53.6	23.4	17.5	5.9	38
A#2	55.7	19.9	11.3	8.6	
A#1	53.6	21.9	16.1	5.8	48
A#2	55.7	18.5	10.3	8.2	
A#1	53.6	19.7	15.5	4.2	58
A#2	55.7	15.5	9.5	6.0	

* "A" means analysis, number means the corresponding test.

** Value from uniaxial compressive test

후면부의 변형이 전면부에 비하여 작게 평가되는 결과에 기인한 것이다. 이러한 전면부와 후면부의 변위차는 충전콘크리트의 강도가 커질수록 작아지는 경향을 보이고 있다.

전면부와 후면부의 변형의 차가 작은 것은 충돌이 발생하는 전면부의 변형의 영향이 후면으로 전달하는 정도가 작은 것으로

해석할 수 있고, 이는 재료의 포아슨비가 작아지는 경우의 응답과 유사하다. 또는 충전콘크리트가 충분한 강도를 발현하도록 제작되었던 것을 가정하면 일반적인 콘크리트와 크게 다른 포아슨비를 가지지 않을 것을 판단할 수 있으므로 밀집한 전단 연결재등의 영향으로 시험체의 제작과정에서 이 부분에 대한 콘크리트의 충전상태가 완벽하지 않아서 발생하는 거동일 것으로 추정한다.

본 연구에서 사용된 수치해석모델은 실제 거동에 비하여 후면부의 변위를 크게 산정하였다. 하지만 이는 내부 저장조를 보호하는 탱크외벽의 역할을 고려하여 볼 때 보수적인 해석 결과를 보이는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서 기술된 해석모델은 실제 설계시에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

충돌속도를 배가시켜 일반단면부 시험체에 충돌시킨 Test #6에 대한 해석(A#6)으로 얻은 변위의 형상은 Fig. 9에서 보이는 바와 같다. 충돌이 발생한 전면부의 강판은 파단에 도달하여 펀칭파괴되었고, 충전콘크리트 내부로 함입되었다. 하지만 후면부의 강판은 파단을 일으키지 않고 변형만 발생하였다.

Fig. 9 Deformation of plates from analysis(A#6)

충돌이 발생하는 동안 전면, 후면 강판과 충돌체의 변위 및 속도거동은 Fig. 10에서 보이는 바와 같다. 관입이 발생하지 않은 A#1, #2와 유사하게 2ms 이내에 충돌이 종료되고 충돌체가 반동되는 현상을 보여주고 있다.

해석이 종료되는 시점에서 운동에너지를 제외하고 구조물의 내부로 전이된 에너지의 비교를 충전콘크리트의 압축강도가 48MPa인 경우에 대하여 Table 4에 나타내었다. 내부에너지에는 소성변형에너지, 변형에너지, 마찰에너지 등으로 소산된 에너지를 나타내지만 소성변형에너지가 가장 큰 부분을 차지한다. 충돌에너지는 주로 전후면의 강판과 콘크리트로 전이되는데 이 때 콘크리트로 전이된 비율이 강판에 의해서 전이된 비율보다 월등하게 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 유사한 해석을 수행했던 연구결과(Lee, 2017)과 상이한 결과를 보여주고 있다. 이 연구에서 나타난 에너지의 소산비율은 강판과

(a) Displacement

(b) Velocity

Fig. 10 Center responses of plain section model(A#6)

Table 4 Transferred energy to structure(in kJ)

	A#1	A#2
Internal energy(IE)	66.4(100%)	69.5(100%)
IE of plates	11.1(16.7%)	22.4(32.2%)
IE of concrete	55.3(83.3%)	44.5(64.0%)
IE of studs	0.05(0.0%)	0.049(0.7%)
IE of missile	0.06(0.0%)	2.16(3.1%)

콘크리트가 약 2:1의 비율로 본 연구에서 수행된 에너지 전이 비율과는 반대의 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상의 원인으로서는 두 해석의 충돌에너지의 차이와 충돌체의 크기로 추정할 수 있다. 기존의 해석에서 충돌에너지는 2.5MJ로 본 연구의 대상인 충돌에 비해 약 400배 정도의 충돌에너지를 갖는다. 또한 충돌체의 지름이 1,000mm로 본 연구에서 사용된 충돌체의 지름(150mm)에 비하여 상대적으로 크고 충전콘크리트의 강도(35MPa)도 본 연구에서 수행된 해석모델에서 사용된 값의 73%이다. 기존 연구에서 사용되었던 SCP의 두께가 250mm로 본 연구의 해석대상인 SCP보다 25% 두꺼우나 충돌체의 운동에너지가 광범위한 영역에서 강판의 소성변형을 일으켰고 상대적으로 콘크리트의 강성기여도가 작아 본 연구과

상이한 에너지소산비율이 발생한 것으로 추정될 수 있다. 충돌 에너지의 크기와 SCP에서 강판과 콘크리트의 에너지 소산비율의 관계는 추가적인 연구로 규명되어야 할 부분으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 모듈형 LNG저장탱크의 외조를 구성하는 SCP에 대한 충돌시험을 수행하고 수치해석을 수행하여 이를 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 중속충돌기로 일반단면부 시험체 3개와 연결단면부 시험체 3개에 대하여 약 50m/s, 100m/s로 충돌시험을 수행하고 중앙부의 변형을 계측하였다. 일반단면부 시험체에 2배속 충돌한 경우를 제외하고는 모두 전면부에 함몰변형이 발생하였으나 후면의 변위는 크기 않았다.
- (2) 수치해석모델을 이용하여 충돌시험과 동일한 조건의 해석을 수행한 결과 충돌이 발생한 전면부의 변형은 비교적 정확하게 산정하였으나 후면부의 변위는 과다 평가되었다. 오차의 원인으로 시험체의 충전상태를 추정하였다.
- (3) 수치해석모델에서 충돌에너지는 강판보다 충전콘크리트에 더 많이 전이되었다. 이는 충돌에너지가 큰 이전의 연구결과와 다른 특성을 보인다.
- (4) 본 해석에서 작성된 수치해석모델은 보수적인 결과를 보이므로 실제 설계시에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2017R1D1A1B03030253).

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 13IFIP-C113546-01).

본 연구의 일부는 극한성능시험센터(Extreme Performance Testing Center, EPTC)에서 수행되었음.

References

- European Committee for Standardization(CEN)** (2006) Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between 0°C and -165°C. General, BS EN 14620-1:2006.
- Extreme Performance Testing Center(EPTC)** (2019) Report of SCP Impact Test using Middle Velocity Propulsion Impact Machine.
- Hyundai Heavy Industry(HHI)** (2015) General Approval of 60K HMLST, Structure Research Dep. HHI.
- Jiang, H., Chorzepa, M.G.** (2014) Aircraft Impact Analysis of Nuclear Safety-Related Concrete Structures: A Review, *Eng. Fail. Anal.*, 46, pp.118~133.
- Lee, G.H.** (2017) Collision Behaviors Analysis of Sandwich Concrete Panel for Outer Shell of LNG Tank, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(6), pp.485~493.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC)** (2017) LS-DYNA User's Manual Ver. R10.1.
- OECD** (2014) Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS2012) :Final Report, OECD.
- Sadiq, M., Yun, Z.X., Rong, P.** (2014) Simulation Analysis of Impact Tests of Steel Plate Reinforced Concrete and Reinforced Concrete Slabs Against Aircraft Impact and Its Validation with Experimental Results, *Nucl. Eng. & Des.*, 273(1), pp.653~667.
- Seoul National University** (2018) Extreme Performance Testing Center (EPTC), Brochure for Extreme Performance Testing Center (EPTC), <http://www.koced.or.kr>.
- Sohel, M.A., Liew, Y.R.** (2014) Behavior of Steel-Concrete-Steel Sandwich Slabs Subject to Impact Load, *J. Constr. Steel Res.*, 100, pp.163~175.
- Thai, D.K., Kim, S.E.** (2015) Failure Analysis of UHPFRC Panels Subjected to Aircraft Engine Model Impact, *Eng. Fail. Anal.*, 57, pp.88~104.

요 지

모듈형 LNG Tank의 외조를 구성하는 SCP(sandwich concrete panel)에 대해서 중속충돌시험기로 충돌시험을 수행하고 이에 대한 수치해석을 수행하였다. 충돌시험에 사용된 시험체는 가로세로 각각 2m로 외조의 일반단면과 연결부단면의 특성을 가지도록 제작하였다. 51kg의 탄자를 설계기준에 규정된 충돌에너지를 갖도록 중속충돌시험기로 45m/sec로 이상의 속도로 가속하여 충돌시켰다. 이런 충돌시험을 두 차례 반복하고 시험체의 극한능력을 평가하기 위하여 충돌속도를 2배로 하여 충돌시켰다. 충돌시험의 수치해석 모델은 LS-DYNA를 이용하여 수행되었다. 외측의 강판과 그 사이의 충전콘크리트를 고체요소로 모델링하고 전단연결재는 보요소를 이용하여 모델링하였다. 강재의 재료모델은 탄소성 및 파단거동을 고려하였으며 콘크리트의 재료는 CSCM재료로 모델링하였다. 해석에서 전면부의 충돌변형은 시험에서 얻어진 변형과 유사한 값을 얻었으나 후면부의 변형은 시험결과와 다소 작은 값을 보였다. 일반부 단면에 대한 2배속 충돌시험에서는 전후면의 강판이 파손되었으나 해석결과에서는 전면부의 강판만 파손되었다. 수치해석에서 충돌에너지는 주로 충전 콘크리트로 전이되었는데 이는 이전 연구에서 보였던 고에너지 가진 충돌의 경우와 다른 경향이다. 작성된 모델은 구조적으로 보수적인 결과를 보이므로 실제 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : LNG 저장시설 외조, 샌드위치 콘크리트 패널, 충돌시험, 비선형 동적 충돌해석, 충돌에너지소산