LNG외조를 구성하는 샌드위치 콘크리트 패널의 충돌거동해석

이 계 희^{1*}

¹목포해양대학교 해양·플랜트건설공학과

Collision Behaviors Analysis of Sandwich Concrete Panel for Outer Shell of LNG Tank

Gye Hee Lee^{1*}

¹Dept of Ocean & Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 58628, Korea

Abstract

In this study, the collision analysis of SCP(Sandwich Concrete Panel) composing the outer tank of LNG storage was performed and its collision behavior was analyzed. For the same collision energy value proposed in BS7777 code, the collision conditions are composed by using two types of missiles and various collision speeds. Nonlinear dynamic analysis models were constructed to perform numerical analysis on the various collision conditions. Also, the collision behavior was analyzed assuming that the second collision with the same collision energy occurs at the same point after the first collision. As a result of the analysis, it was found that with smaller missile and low collision speed had caused larger deformation. The collision energy dissipated in ratio of about 6:4 in the outer steel plate and the inner filling concrete. In the results of double collision analysis, the final collisional deformation was dominated by the size of the second missile, and the amount of deformation due to the second collision was smaller than that of the first collision because of the membrane behavior of the steel plates. In the offset double collision cases, the largest deformation occurs at the secondary collision point regardless of the offset distance.

Keywords : outer tank of lng storage, sandwich concrete panel, nonlinear dynamic collision analysis, dissipation of collision energy, secondary collision, collision deformation

1. 서 론

극저온의 액체로 보관되는 액화천연가스(LNG)의 저장시설은 다양한 내외부 하중을 지지하도록 설계시공 된다. 이 중 저온의 액체와 직접 접촉하는 내조는 니켈 특수강으로 시공되고 내조를 외부하중으로부터 보호하는 외조는 콘크리트 구조물로 시공되는 것이 일반적인 LNG저장시설의 구조이다. 이중 콘크리트로 구성되는 외조를 효율적으로 시공하기 위하여 다양한 기술이 개발되고 있다. 이 중 시공성이 좋고 구조적 성능이 우수한 샌드위치 콘크리트 패널(sandwich concrete panel: SCP)을 이용하여 외조를 구성하려는 기술이 연구되고 있다(HHI, 2015). SCP를 이용하여 외조를 구성하는 경우 다양한 하중에 의한 거동이 평가되어야 하며 그 중 비산물이나 낙하물에 대해서

내조를 보호하기 위해 외부충돌에 대한 거동도 평가되어야 한다.

SCP의 충돌하중에 대한 거동은 충전콘크리트의 재료적 특성에 크게 의존하므로 충전콘크리트의 특성을 고려한 연구들이 진행되었다(Sohel and Liew, 2014; Thai and Kim, 2015; OECD, 2014). 이 들 연구에서는 충전 콘크리트의 재료적 특징과 함께 콘크리트를 구속하는 내외부 강판과 전단 연결재의 기계적인 결합이 충돌강도에 미치는 영향을 평가하고 이를 실험결과를 통하여 검증하였다.

구조물의 설계기준 중 탱크에 작용하는 충돌하중은 수직방향 낙하와 수평방향의 충돌로 구분되고 일반적으로 낙하충돌보다는 횡방향으로 가해지는 충돌하중이 크게 설정된다(DNV, 2011). 이러한 충돌하중에 대한 프리스트레스외조의 거동해석에 대한 연구가 진행되었다(Lee *et al.*, 2014; Jiang and Chorzepa,

* Corresponding author:

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

Received October 24 2017; Revised November 12 2017;

Accepted November 13 2017

© 2017 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.

2014; Sadiq *et al.*, 2014). 내외부에 강판으로 보강된 원통형구조물의 충돌해석은 해중터널에 대하여 수행된 경우가 있다 (Hong and Lee, 2014). 이와 같은 연구들에서 수행된 결과들은 모두 단일한 콘크리트 구조물에 대한 충돌해석으로 SCP를 조립해 구성된 원통형 구조물에 대한 충돌해석과의 차이가 존재한다.

본 논문에서는 LNG탱크의 외조를 구성하기 위하여 개발된 SCP의 충돌거동을 분석하기 위하여 비선형 충돌해석모델을 유한요소법을 이용하여 구축하고 다양한 충돌조건에 따른 거동을 평가하였다. 이 연구에서 얻어진 방법론과 거동 특성은 이후 이루어질 충돌실험과 안전성 인증에 사용될 것이다.

2. 해석모델의 구성

2.1 SCP

해석에 고려된 SCP는 폭 4m, 길이 8m이고 두께 0.25m이다. 이 때 길이방향이 외조의 원주방향으로 배치된다(Fig. 1 (a), (b)의 상하방향). 따라서 논문에서 고려된 SCP의 모델링은 이러한 원주방향의 곡률(R=34.175m)을 고려하여 모델링되었다. 충돌하중은 외부에서 작용하므로 하중의 작용방향은 SCP에서 아치효과를 발생시킨다. SCP의 양측은 두께 8mm의

강판으로 구성되었으며 강판으로부터 내부방향으로 지름 19 mm의 Stud가 돌출되어 있다. 이들 Stud는 125mm간격으로 설치되었으며, 내외측의 강판에서 각각의 Stud간격의 중앙으로 엇갈리도록 배치된다. 강판사이에는 콘크리트가 충전되어 일체구조를 이루게 된다.

SCP의 해석모델은 대칭조건을 사용하여 1/4만 모델링되었다. 대칭을 고려할 수 없는 경우는 작성된 1/4모델을 이용하여 전체 모델을 구성하였다. 모델링 범위는 단축방향으로는 SCP의 전폭을 고려하였고 장축방향(외조의 원주방향)으로는 단축방향의 1.5배까지 모델링하였다. 충돌체가 충돌을 일으키는 부분은 평판방향으로 65mm의 격자를 구성하도록 조밀하게 모델링하였고 그 밖의 구간은 이의 두 배 크기의 격자를 구성하여 모델링하였다. 두께 방향으로 내외부 강판의 경우 8mm의 고체요소를 사용하였고 충전콘크리트는 22개의 요소층을 사용하여 모델링하였다. Stud는 충돌부근 인근에서는 격자의 교차점에 보요소로 모델링하였고 다른 부분은 격자의 교차점에서 격자면적에 비례해서 등가의 단면적을 가지도록 모델링하였다(Fig 1(b)). Stud는 내외측의 강판에서 각각 지지되기 때문에 한 쪽 강판에서 지지된 Stud의 단부는 다른 쪽 강판과 절점을 공유하지 않도록 자유돌출조건으로 모델링하였다.

SCP의 해석모델에 사용한 강판재료는 SS400강재의 비선형소성거동재료를 모델링하였으며 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 $D=40.4/\text{sec}$, $n=5$ 를 사용하였다.

두 강판사이의 충전재는 압축강도 30Mpa의 콘크리트로 가정하고 해석모델을 작성하였다. 내부충진콘크리트의 재료모델은 해석에 사용된 프로그램인 ABAQUS6.12의 Concrete damaged plasticity를 사용하였다(Simulia, 2012).

2.2 충돌체

충돌체는 BS-7777의 외조에 대한 충돌조건을 고려하였다 (Lee *et al.*, 2014). 이 기준에서 고려하는 충돌하중은 지름 1m의 충돌체가 50m/s의 속도로 2.5MJ의 충돌에너지를 갖는다. 이러한 충돌조건은 개략적으로 50%의 공극률을 가진 강재 충돌체를 가정한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 충돌체의

Fig. 1 1/4 Collision analysis model of SCP

제원과 충돌속도에 대한 영향을 분석하기 위하여 동일한 충돌 에너지를 갖는 다양한 충돌조건을 가정하였다.

충돌체는 지름 0.4m와 1.0m를 갖는 구형으로 가정하였고 SCP모델과 마찬가지로 대칭조건을 이용하여 모델링하였다. 다만 지름 1.0m의 충돌체에 대해서는 해석모델의 크기를 줄이기 위하여 충돌방향으로 대칭조건을 다시 적용하여 전체의 1/8을 모델링하였다(Fig. 1 (c), (d)).

충돌체의 재료모델은 SCP의 강판과 같이 비선형소성모델을 적용하였다.

3. 수치해석

3.1 단일충돌

대칭조건을 이용하여 모델링된 1/4 SCP해석모델에 다양한 충돌조건을 고려하여 충돌거동을 평가하였다. 충돌체는 앞 절에서 설명한 두 가지 모델을 사용하였고 고려된 충돌속도는 10, 20, 40, 50m/s를 가정하였다. 이러한 충돌조건에 대한 해석경우는 Tabel 1에 정리하였다. 이들 충돌 조건의 충돌 에너지는 2.5MJ로 모두 동일하다.

이러한 충돌조건에서 얻어진 SCP의 충돌변형의 예는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다. 충돌초기에 충돌점을 중심으로 응력에 의한 충격파가 전달되기 시작되는 모습을 보여주고 있다.

충돌시 시스템의 에너지변화는 Fig. 3에서 보이는 바와 같다. 작은 충돌체(Fig. 3(a))와 표준크기의 충돌체(Fig. 3(b))의 에너지 변화 경향은 유사하게 나타난다. 시스템에 작용하는 에너지는 해석초기에는 모두 충돌체의 운동에너지이다. 충돌이 진행될수록 충돌체의 운동에너지가 SCP의 변형에너지로 전환되면서 감소하는 거동을 보여주고 있다. 운동에너지는 최저점을 지난 후 다시 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이는 충돌체가 반동을 일으키면서 발생하는 현상이다. 따라서 운동에너지의 최저점이 충돌이 종료되는 시점으로 판단할 수 있다. 동일한 운동에너지를 갖는 두 충돌체 중에서 크기가 작은 충돌체의

Fig. 2 1/4 Sequential deformation shapes(pushSQ11)

(a) Small missile($V_i=10\text{m/sec}$)

(b) Standard missile($V_i=10\text{m/sec}$)

Fig. 3 Energy dissipation history curves

Table 1 Analysis cases of single collision

Run case (Abbr..)	Missile radius (m)	Mass density (kg/m^3)	Collision velocity (m/s)
pushSQ11(11)	0.2	1.543E6	10.0
pushSQ12(12)		8.857E5	20.0
pushSQ14(14)		9.643E4	40.0
pushSQ15(15)		6.171E4	50.0
pushSQ21(21)	0.5	1.910E5	10.0
pushSQ12(22)		4.775E4	20.0
pushSQ14(24)		1.194E4	40.0
pushSQ15(25)		7.639E3	50.0

충돌이 지속시간이 긴 것으로 나타났는데 이는 충돌에너지를 소산시키는 면적이 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 기타 변형에너지나 손상에너지의 소산기여는 그다지 크지 않았다.

이 때 소성변형으로 소산시키는 충돌에너지의 상대적인 크기는 Fig. 4에 나타나 있다. 여기서 DE, KE, PE, SE, AE는 각각 손상에너지, 운동에너지, 소성변형에너지, 변형에너지, 가상변형에너지를 의미한다. 소형 충돌체와 표준 충돌체가 50m/s로 충돌하는 경우에서 각 구조요소의 소성에너지 소산비를 나타내었다. SCP에 의해서 소산되는 충돌에너지의 비는 강판과 충전콘크리트 간에 6:4 정도의 비를 보여준다. 콘크리트에 매입되어 있는 Stud의 에너지 소산량은 다른 두 구성요소에 비하여 미미하다. 이러한 소성에너지의 소산비율은 속도가 커질수록 콘크리트의 기여가 증가하는 경향을 보인다.

동일한 충돌에너지를 갖는 충돌체에서 충돌속도에 따른 SCP의 변형량은 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 동일한 속도에서의 변형량은 충돌체가 상대적으로 작은 경우에 더 크게 발생하는데 이것은 충돌에너지를 소산시키는 SCP의 범위가 작기 때문에 발생하는 자명한 현상으로 판단된다. 동일한 크기의

충돌체에서 속도의 변화에 따른 변형의 크기는 속도가 작을수록 커지는데 표준 충돌체의 경우 10m/s의 충돌속도에 대한 변형은 50m/s에 대한 변형에 비하여 약 25%정도 큰 값을 보인다. 이는 변형속도와 SCP의 관성저항에 따른 영향으로 판단된다.

최종변형량에 대하여 충돌중에 발생하는 변형을 정규화한 변위 시간이력을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수

(a) Small missile ($V_i=50\text{m/sec}$)

(b) Standard missile ($V_i=50\text{m/sec}$)

Fig. 4 Energy dissipation of of SCP parts

(a) Small missile

(b) Standard missile

Fig. 5 Deformations at collision center

Fig. 6 Comparison of energy dissipation by normalized time

있듯이 충돌속도가 빠를수록 충돌초기의 변형량은 느린 속도의 충돌에 비해 상대적으로 작은 값을 보인다. 느린 충돌속도에 의한 SCP의 변형은 거의 선형인 형상을 보인다. 이러한 특성 역시 변형속도와 관성저항의 영향을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 중복충돌

외조에 충돌하중이 발생한 경우, 충돌하중에 대한 외조의 손상을 평가하고 이의 보수나 재사용여부를 평가하여야 한다.

Fig. 7 The second collision model

만일 규정된 충돌하중을 경험한 구조물이 동일한 충돌하중에 대해서 안전성을 확보할 수 있다면 규정된 충돌하중이 발생하여 손상이 발생하더라도 구조적 안전성에 대한 보강필요성은 없어진다. 즉 두 충돌이 동일한 지점에 발생할 확률은 공학적으로 무시할 수 있을 정도로 작은 값이므로 이 구조물은 충돌하중에 대해서 보수나 재검토할 필요성이 없어진다. 단 기능성이나 내구성에 대한 보수나 보강은 이 논의의 예외가 된다. 따라서 본 절에서는 이러한 중복충돌중에서 가장 불리한 경우인 동일 지점에 동일한 충돌에너지를 가진 충돌체가 재충돌하는 경우에 대한 충돌해석을 수행하고 이에 대한 거동특성을 분석하였다.

중복충돌의 해석경우는 앞 절에서 수행된 충돌해석중 충돌속도가 50m/s인 경우에 대하여 동일한 혹은 다른 충돌체가 같은 속도로 충돌하는 것을 가정하였다. 각각의 충돌은 모두 동일한 충돌에너지를 갖는 것으로 가정하고 1차충돌과 동일한 위치에 재충돌하는 것을 가정하였다(Fig. 7).

본 논문에서 고려한 해석경우는 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Analysis cases of double collision

Run case (Abbr..)	Collision velocity (m/s)	First collision case	Second collision case
pushSQ115 (115)	50m/s	pushSQ15	pushSQ15
pushSQ125 (125)		pushSQ15	pushSQ25
pushSQ215 (215)		pushSQ25	pushSQ15
pushSQ225 (225)		pushSQ25	pushSQ25

2번에 걸친 충돌과정 전체에 걸친 에너지의 소산이력은 Fig. 8(a)에서 볼 수 있다. 충돌에너지는 2차에 걸쳐 운동 에너지의 형태로 시스템에 도입되고 이는 검은 색의 곡선으로 나타난다. 2차 충돌초기에 보이는 평탄한 선은 충돌체가 SCP와 접촉하기 전까지 비행하는 동안에는 운동에너지를 보존하는 것을 나타낸다. 충돌체가 SCP와 접촉된 이후에는 1차충돌의 경우와 유사하게 대부분의 운동에너지는 SCP의 소성변형의 형태로 전환된다. 이러한 현상은 SCP각 부분에서의 에너지 소산형태에도 동일하게 작용하여 내외부 강판과 내부충진콘크리트가 소산시키는 충돌에너지의 비율도 1, 2차 충돌에 걸쳐 유사하게 유지된다(Fig. 8(b)).

1, 2차 충돌전체에 걸친 충돌중심점의 변위이력은 Fig. 9에서 보이는 바와 같다. 4가지 해석경우에서 특이한 점은 최종 변형량은 1차 충돌시 충돌체와 변형량과는 관계없이 2차충돌체의 크기에 따라 결정되는 경향을 보인다. 1차충돌에서 발생한 변위량과 2차충돌에서 발생한 변위의 양을 비교해 보면 가장 작은 비율로 증가하는 경우는 1차에서 작은 충돌체에 의한 충

(a) Small missile($V_i=10\text{m/sec}$)

(b) Standard missile($V_i=10\text{m/sec}$)

Fig. 8 Energy dissipation of the 1st and 2nd collision

Fig. 9 Deformation of the 1st and 2nd collision

들이 발생하고 2차에서 표준충돌체에 의한 충돌이 일어난 경우로(0.605m/0.463m=1.302) 2차 충돌에 의한 추가적인 변형량은 1차충돌에 의한 변형량의 약 30%정도이다. 반면에 2차충돌에서 가장 큰 변형량을 보이는 경우는 1차충돌에서 표준충돌체에 의한 충돌을 경험하고 2차충돌에서 작은 충돌체에 의한 충돌이 발생하는 경우로(0.701m/0.415m=1.689), 2차 충돌은 1차충돌변형의 약 70%의 추가적인 변형을 발생시킨다.

Fig. 10 Reaction forces in collisions

표준충돌체에 의한 2차충돌은 1차충돌 변형량의 43%의 추가 변형을 발생시킨다(0.593m/0.415m=1.429). 모든 경우에 있어서 2차 충돌에 의해서 발생하는 변형은 1차충돌에 의한 변형량에 비해 작은 값을 나타낸다. 이는 SCP에서 주요 에너지 소산기구인 강판의 변형이 강판에 수직인 방향으로 작용하는 충돌력에 의하여 발생하지만 2차 충돌에서는 이미 발생한 변형에 의하여 강판의 변형에 막거동의 영향이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 분석된다.

이러한 분석은 충돌시 발생하는 충돌력의 형상차이에서 추가적으로 검증된다. Fig. 10에서 1차와 2차충돌에 있어서 충돌력의 시간이력은 충돌체의 운동에너지의 변화로부터 충돌체가 받는 반력(=충돌력)을 산정한 그래프이다(Lee and Hong, 2011). 이 그래프에서 1차충돌시 충돌체가 받는 반력은 충돌이 발생하는 동안 거의 일정한 값을 보이는 경향을 보인다. 하지만 2차충돌의 경우에는 초기에 큰 충돌력을 보이고 이 크기가 급속히 줄어드는 삼각형 형상을 보인다. 이는 SCP구조가 휨이나 전단에 비하여 상대적으로 강성이 큰 막거동에 의해서 충돌력을 소산시키는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 충돌초기에 큰 충돌력의 영향으로 충돌시간은 2차충돌이 1차충돌에 비하여 2/3정도 짧게 나타난다.

3.3 이격 중복충돌

앞 절에서 수행했던 1, 2차의 충돌은 동일한 지점에 다시 충돌하는 상황을 가정한 것이나 실제로 동일한 지점에 연속적으로 충돌하는 것은 현실적으로 일어나기 어렵다. 실제적으로 가정할 수 있는 충돌은 1차충돌 지점 인근에 재충돌이 발생하는 경우이다. 동일한 지점의 중복충돌해석에서 살펴본 바와 같이 1차충돌의 변형량이 2차충돌에 의한 변형량보다 크므로 1차충돌점을 벗어나 발생하는 2차충돌에 의한 변형이 1차충돌시 발생한 변형과 중복되는 경우 동일지점의 중복충돌시의 변형량

Table 3 Analysis cases of double collision

Run case	First collision case	Second collision case	Offset (m)
pushSQ31	pushSQ25	pushSQ25	0.50
pushSQ32			1.00
pushSQ33			0.25

Fig. 11 Offset collision

보다 클 가능성이 있다. 이를 검증하기 위해서 이격되어 발생하는 두 충돌변형의 중복된 변형량과 동일한 지점에 발생하는

Fig. 12 Deformations of offset collision

두 충돌변형량을 비교하였다.

해석조건은 표준충돌체가 연속적으로 충돌하는 것을 가정하였으며 1차충돌의 중심부로부터 이격거리에 따라 해석을 수행하였다. 이러한 해석조건들은 Table 3에서 보이는 바와 같다.

2차충돌이 1차충돌 위치에서 이격되어 일어나므로 기존의 1/4모델에서 적용되었던 대칭성을 사용할 수 없으므로 1/4모델에 기초하여 전체모델을 작성하였다(Fig. 11(a)).

충돌해석은 1/4모델과 유사한 방법으로 이루어졌으며 최종 변형형상은 Fig. 11(b)에서 보이는 바와 같다. 이 그림에서 1차충돌과 2차충돌시 충돌체에 의해 함몰된 변형형상이 명확히 나타난다.

1차충돌의 중심부에서 0.25m 이격된 지점의 1, 2차 충돌에 따른 변형이력을 Fig. 12(a)에 나타냈다. 1차충돌에 의해서는 동일한 변위이력을 보이고 2차 충돌에 따른 변위는 1차 충돌의 중심으로부터 이격거리에 반비례하는 최대변형이력을 보였다. 이격거리가 0.25m인 경우 2차충돌의 중심부에 얻어진 변위 이력을 Fig. 12(b)에 나타내었다. 1차충돌에 의해서 생긴 2차충돌의 중심점에서의 변형은 1차충돌의 중심점에서의 이격거리에 반비례하나 2차충돌에 의해 발생한 변형이 추가되면

이와는 관계없이 충돌이 일어난 지점의 변형이 가장 큰 값을 보여 변형이력 곡선이 서로 교차하는 현상을 보인다. 즉 최대 변형은 이격거리에 관계없이 항상 2차충돌의 중심점에서 발생한다. 이러한 현상은 2차충돌의 중심점이 다른 경우에도 모두 동일한 현상을 보였다. 2차충돌이 중심점에서 변위를 비교하면 2차충돌이 발생하는 경우 1차충돌과 동일지점에 발생하는 경우가 가장 큰 변형을 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 LNG저장탱크의 외조를 구성하는 SCP에 대한 충돌해석을 다양한 충돌조건에 대하여 수행하였다. 설계기준에 제시된 충돌에너지를 가지도록 2개의 충돌체와 4개의 충돌속도에 대한 충돌조건을 구성하고 이에 대한 충돌거동을 분석하였다. 충돌지점 혹은 인접 지점에 중복충돌이 발생하는 경우의 충돌거동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가정된 단면에 대해서 충돌에너지는 강판과 충전콘크리트가 약 6:4의 비율로 분담한다. 낮은 충돌속도에서는 강판의 에너지 소산비율이 증가한다. 단 Stud의 에너지 소산량은 미미하다.
- 2) 동일한 충돌에너지를 가진 충돌에서 충돌체의 크기가 작을수록, 충돌속도가 낮을수록 변형은 크게 나타난다.
- 3) 동일한 충돌지점에 2차충돌이 발생하는 경우 설계기준의 충돌조건에서는 2차충돌에 의한 추가 변형량은 1차충돌 변형량의 43% 수준으로 나타났다. 이러한 거동은 1차충돌에 비해 막거동의 영향이 증가하기 때문인 것으로 분석됐다.
- 4) 1차충돌의 충돌중심과 이격한 곳에 발생하는 2차충돌의 최대변형은 2차변형의 중심점에서 발생한다. 1차충돌의 중심점에 2차 충돌이 발생하는 경우에 가장 큰 변형이 발생한다.

감사의 글

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

References

- DNV (2011) Safety Principles and Arrangements, DNV-OS-A101, DET NORSKE VERITAS.
- Hong, K.Y., Lee, G.H. (2014) Collision Analysis of Submerged Floating Tunnel by Underwater Navigating Vessel, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(5), pp.369~377.(in Korean)
- Hyundai Heavy Industry (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., Hong, K.Y. (2011) A Study for the Evaluation of Ship Collision Forces for the Design of Bridge Pier I : Mean Collision Force, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 31(3A), pp.119~206.(in Korean)
- Lee, S.W., Jun, H.Y., Kim, J.J., Kim, J.H., Lee, K.W. (2014) Analysis Evaluation of Impact Behavior of 270,000kL LNG Storage Outer Tank from Prestress Force Loss, *KIGAS*, 18(1), pp.31~40.(in Korean)
- 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, pp.653~667.
- Simulia Co. (2012) ABAQUS Analysis User's Manual, Simulia.
- Sohel, K.M.A., Liew, J.Y.R. (2014) Behavior of Steel-Concrete-Steel Sandwichslabs 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

본 연구에서는 LNG 저장시설의 외조를 구성하는 SCP(sandwich concrete panel)에 대한 충돌해석을 수행하고 그 거동을 분석하였다. 설계기준 중 하나인 BS7777에서 제시하는 충돌에너지와 동일한 값을 갖도록 두 종류의 충돌체와 다양한 충돌 속도를 이용하여 충돌조건을 구성하고 이에 대한 비선형동적 해석모델을 구성하여 설정된 충돌조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 또한 1차 충돌 후에 동일한 지점에 같은 충돌에너지를 가진 2차 충돌이 일어나는 것을 가정하여 충돌거동을 분석하였다. 해석결과 동일한 충돌에너지를 갖는 충돌에서 충돌체의 크기가 작고, 충돌속도가 작을수록 큰 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 충돌에너지는 외측강판과 내부 충진콘트리트가 6:4정도의 비율로 소산시키는 것으로 나타났다. 중복충돌해석에서는 2차 충돌체의 크기에 따라 최종충돌변형이 지배되는 것으로 나타났고 2차 충돌에 의한 변형량은 1차 충돌에 비하여 적은 값을 나타냈는데 이는 강판의 막거동 때문인 것으로 분석되었다. 이격된 중복충돌에서는 이격위치와 관계없이 2차 충돌점에서 가장 큰 변형이 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : LNG 저장시설 외조, SCP, 비선형 동적 충돌해석, 충돌에너지소산, 2차 충돌, 충돌변형량