

Precast Concrete Block 및 Suction pile을 적용한 Jacket 구조물의 진동저감 효과 평가

이 성 진¹ · 경 갑 수^{1*} · 류 성 진¹ · 정 지 영² · 박 진 은¹

¹한국해양대학교 건설공학과, ²씨티씨주식회사

Vibration Reduction Evaluation of Jacket Structure by applying Precast Concrete Block and Suction pile

Sung-Jin Lee¹, Kab-Soo Kyung^{1*}, Seong-Jin Ryu¹, Ji-Young Jeong² and Jin-Eun Park¹

¹Department of Civil Engineering, Korea Maritime & Ocean Univ., Busan, 606-791, Korea

²CTC Co., Ltd., Busan, 601-013, Korea

Abstract

Recently, construction sites of offshore wind power tend to move from shallow water to deep water. From this tendency, the research on the support structure of offshore wind power in deep water will be a key issue. In this study, precast concrete block and suction pile are applied to existing jacket structure. In order to reduce the vibration of this structure, the tuned liquid damper is also applied in the precast concrete block. The applicability of the suggested jacket structure is evaluated by finite element analysis. And the vibration tends to decrease about 5%, when the tuned liquid damper is applied.

Keywords : offshore wind turbine, substructure, jacket structure, suction pile, turned liquid damper

1. 서 론

해상풍력발전 연구는 주로 블레이드, 타워 및 부품 등에 집중되어 있으며, 실제 해상풍력발전의 안전에 큰 비중을 차지하는 지지구조물 분야는 다소 한정되어 있다. 국내의 대표적인 연구로는 Jacket 구조물의 지반 특성과 관련하여 수행된 일부 연구(Kim, 2011) 등이 있다.

한편 전체 해상풍력발전 지지구조물이 차지하는 공사비는 전체 공사비의 약 30%정도이며, 수심 증가에 따라 공사비가 증가하는 경향을 나타낸다. 그리고 해상풍력발전이 여러 가지 자연환경 및 가설공법 등의 설치환경의 원인에 의하여 건설지점이 천해에서 심해로 이동하는 경향을 고려한다면 해상풍력발전 지지구조물의 심해화에 따른 지지구조물에 대한 연구의 중요성은 더욱 증대될 것으로 판단된다.

해상풍력발전을 위한 지지구조물인 Jacket 구조물의 경우

예측하기 어려운 다양한 해상환경 조건하에서 운용되고 있으며, 또한 해상풍력발전의 효율성을 고려하여 발전용량도 2MW에서 5MW 및 7MW로 점차 대형화 추세로 변화되어 가고 있다. 이러한 실정에서 해상풍력발전 지지구조물의 구조적 안전성을 확보하고 경제적 절감을 위한 설계 및 제작 기술개발, 생산공법 등의 관련기술 개발에 대한 요구가 증대되고 있다.

국내의 경우 고정식 Jacket 구조물에 대한 연구가 일부 제한된 범위에서의 연구만이 수행(Kim, 2012; Lee, 2014) 되고 있어 해상풍력발전의 수요증가에 따른 기술적 지원이 충분하게 이루어지고 있지 않은 것이 현재의 실정이다. 그러므로 이러한 시장환경을 극복하기 위해서는 국내 환경특성에 부합하는 Jacket 구조물 형식을 조기에 개발하고, 이에 대한 원천 기술특허 등을 확보하고자 하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4464; E-mail: kyungks@kmou.ac.kr

Received June 19 2015; Revised July 14 2015;

Accepted July 15 2015

©2015 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.

해상풍력 Jacket 구조물은 기본적으로 상부터빈에 의해 발생하는 진동과 하부 지지구조물이 받는 동적하중(파도, 조류, 지진 등)에 의해 진동을 많이 받는 구조물이다. 이러한 Jacket 구조물의 진동저감에 대한 평가는 국내에서는 거의 진행되지 않았다. 기존 구조물의 내진향상을 위한 방법은 부재의 성능개선 및 복구를 통해 구조물의 강도와 연성을 증가시키는 것이다. 최근에는 구조물 진동성능 향상을 위해 진동 제어방식에 기초한 지진격리 및 에너지 소산기술이 연구(Kim, 2004)되고 있다. 또한 Jacket 구조물에서 동적 응력진폭을 15% 감소시키는 경우 공용연수가 2배로 증가될 수 있는 것으로 보고되고 있다(Tabeshpour *et al.*, 2012). 그리고 다른 연구에서는 진동 영향 인자에 대한 파라미터 및 댐퍼의 성능비교에 관한 연구(Ju, 2002; You, 2005)를 수행하였다. 최근에는 해양 Jacket 구조물 응답을 제어하기 위하여 댐퍼를 이용한 수동제어시스템의 효과에 대해서도 연구(Golafshani *et al.*, 2009)가 진행되고 있다. 그러므로 다양한 여러 가지 하중이 작용하는 해양환경에서의 Jacket 구조물의 손상을 감소시키기 위해서는 기존 해양구조물의 동적 응답의 억제를 위한 효율적이고 실용적인 진동제어의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기존의 Jacket 구조물에 Precast Concrete Block(이하 P.C.B.로 표기) 및 Suction pile을 적용한 신형식 Jacket 구조물을 제안하고, 제안된 신형식 Jacket 구조물에 동조액체감쇠기(tuned liquid damper)를 적용하여 대상 구조물에 발생하는 수평변위 저감 효과를 평가하였다.

2. 대상구조물의 제원

2.1 Jacket 구조물 제원

본 연구의 대상 Jacket 구조물은 5MW급 해상풍력발전

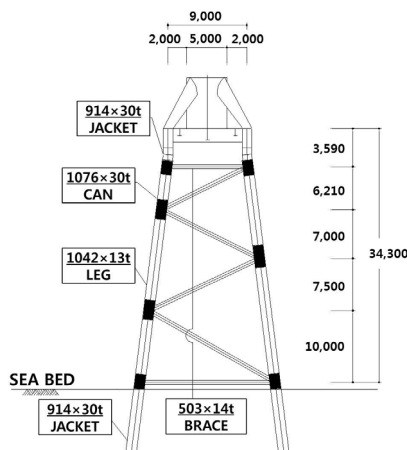


Fig. 1 Dimensions of jacket structure(units:mm)

Table 1 Properties of materials and dimension for jacket structure

Location	Item	Material	Dimension
Jacket	CAN	SM490	Φ1076×30t
	LEG		Φ1042×13t
	BRACE		Φ503×14t
Jacket Pile	PILE		Φ914×30t
Deck Frame	H-BEAM		H-1000×500×25×40
Suction Pile	PILE	STK490	Φ4000×30t

하부구조물로, 대상구조물의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 또한 대상구조물에 대한 단면특성 및 사용강재를 Table 1에 나타내었다.

2.2 P.C.B. 및 Suction pile

Fig. 2에 기존의 Jacket 구조물의 상부 및 하부에 P.C.B. 및 Suction pile을 적용한 신형식 Jacket 구조물을 나타내었다. Fig. 3에 Jacket 구조물 상부에 적용된 P.C.B.의 평면도 및 단면도를 나타내었다. Fig. 3(b) 및 (c)의 P.C.B. 격실 내에 액체를 주입한 것은 4절에서 적용하게 되는 동조액체감쇠기(TLD)의 기능을 설명하기 위한 것이다.

대상구조물에 적용된 Suction pile은 파일 내부의 물이나 공기와 같은 유체를 외부로 배출시킴으로서 발생한 파일 내부와 외부의 압력차를 이용하는 파일이다. Suction pile의 형상은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 일반적으로 음압을 가하기 용이하게 상단부는 밀폐되고 하단부가 열린 컵을 엮어놓은 모양을 하고 있다. Suction pile의 시공은 먼저 Suction pile을 해저면에 안착시키면 기초의 자중에 의하여 파일 하단부가 해저면의 일정 깊이까지 관입되고, 이 상태에서 기초 두부에 설치된 음압 장치를 이용하여 기초 내부의 물을 외부로 배수시킨다(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2011).

Fig. 5에 Jacket 구조물 하부에 적용된 Suction pile의 도면을 나타내었다. Suction pile은 1960년 일본 고베항의

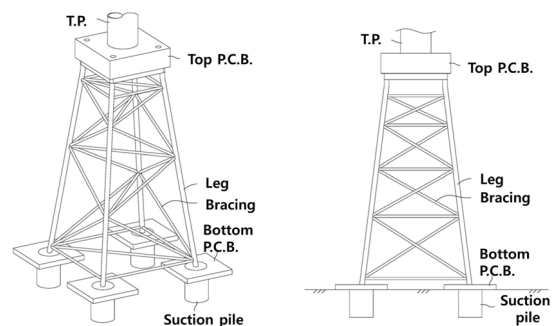


Fig. 2 Geometries of jacket structure

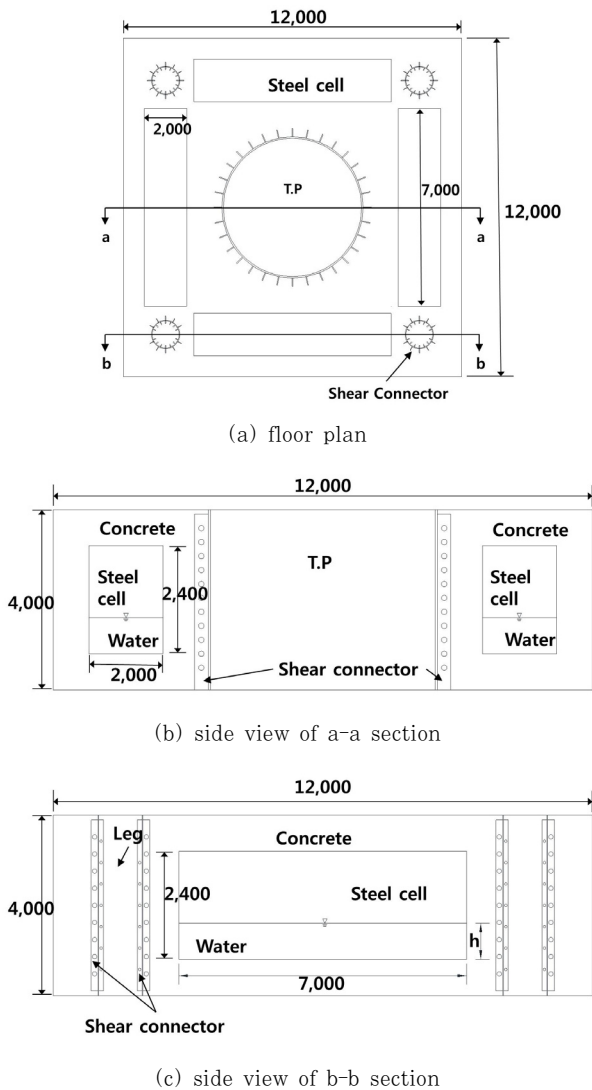


Fig. 3 General view of P.C.B.(units:mm)

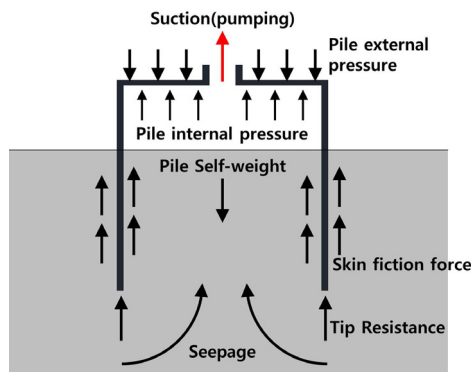
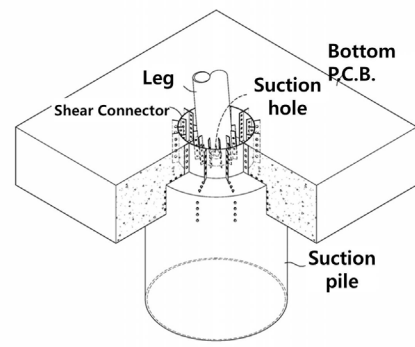
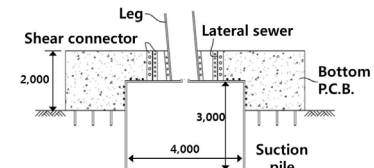
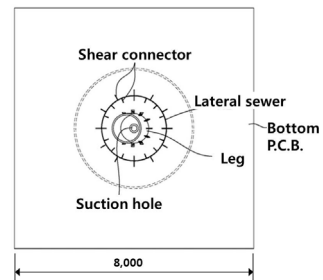


Fig. 4 Principle of suction pile

방과제에 사용된 시공사례가 있고, 유럽에서는 북해의 석유 굴착리그의 기초로 활용되고 있다. Suction pile의 설치 수심은 10m에서 최대 1,600m 정도로 대수심에서도 적용성이 높다.



(a) geometry of suction pile



(b) floor plan and side view section

Fig. 5 General view of suction pile(units:mm)

3. P.C.B.를 적용한 Jacket 구조물

3.1 구조해석 개요

Jacket 구조물의 공용하중에서의 구조거동과 응력분포를 조사하기 위하여 3차원 격자해석을 실시하였다. 해석프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS Civil Lsd+를 사용하였다. 대상구조물의 해석모델을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 Jacket 구조물의 Leg 및 Bracing은 Beam 요소를 사용하였으며, 상하부 P.C.B. 및 Suction pile은 Plate 요소를 사용하여 모델링하였다.

Type A는 일반적인 해상풍력발전 Jacket 구조물과 같이 4단 Bracing을 가지는 Jacket 구조물에 상부는 Steel deck, 하부는 Skirt pile을 적용하였으며, 지지조건은 탄성 스프링을 갖는 구조로 모델링하였다. Type B는 Type A에서의 Skirt pile 대신에 Suction pile을 적용하고, 지지조건은 Suction pile의 선단을 고정으로 적용하는 구조로 모델링하였다. Type C는 상부는 Steel deck 대신에 P.C.B.를 적

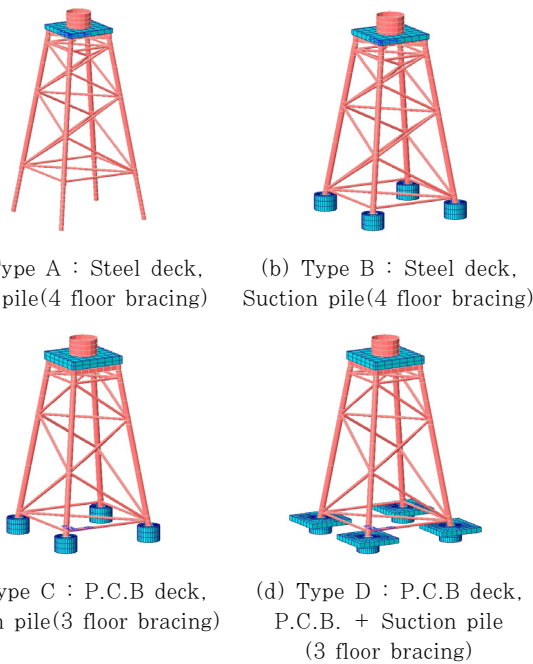


Fig. 6 Structural models

용하고, Bracing은 3단으로 적용한 모델이며, 지지조건은 Type B와 같다. Type D는 Type C에서 하부에 Suction pile과 P.C.B.를 동시에 적용하였으며, 지지조건은 Type C와 동일하나, P.C.B.의 저면마찰력을 고려한 구조로 모델링하였다. Type C, D에서 Bracing 단수를 3단으로 변경한 것은 경제성을 고려한 단면설계를 바탕으로 실시한 것이다.

3.2 적용 하중

공용하중하의 Jacket 구조물의 거동을 평가하기 위하여 대상구조물에 공통으로 적용한 하중은 자중, 활하중, 파력, 풍하중이다. 또한 상부 Tower에서 하부구조에 전달되는 7453kN의 하중을 질량하중으로 치환하여 적용하였다. 여기서 자중은 프로그램 상에서 자동으로 계산되며, 상부구조에서의 활하중은 작업 활하중 등을 고려하여 2.94kN/m²을 적용하였다. 파력은 일반적으로 많이 사용되는 Morison 공식을 적용하여 산정하였으며, 본 절에서는 제안된 구조형식 적정성에 대해 검토하는 것이 목적이므로 파랑하중의 동적특성에 대한 검토는 이루어지지 않았다. 풍하중은 어항 및 항만설계기준(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014)을 참조하여 단면형상에 따라 적용하였다. 그리고 이 연구에서 대상지역은 서남해안 실증단지의 해역조건의 환경하중을 고려하여 계산하였으며, 보다 자세한 내용은 선해연구(Korea Maritime & Ocean University, 2014)를 참조하였다.

Table 2에 나타난 사질토에 대한 지반물성치를 사용하여

Table 2 Physical parameters of ground

	Sandy soil
Saturated unit weight γ_t (kN/m ³)	19.61
Submerged unit weight γ' (kN/m ³)	9.512
Friction angle ϕ'	30
N-value	25
Cohesion c (kN/m ²)	0

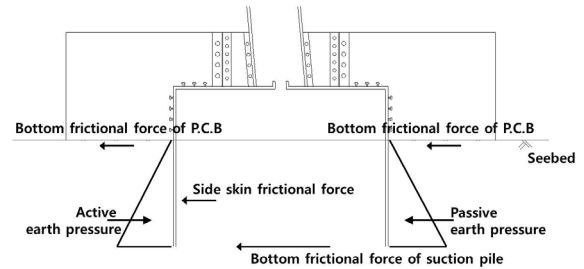


Fig. 7 Loads applied to suction pile

Table 3 Load values applied to the suction pile

Load	Calculated value	
Active earth pressure (P_a)	6.35kN/m ²	
Passive earth pressure (P_p)	57.08kN/m ²	
Horizontal hydraulic	(P_{u1})	292.93kN/m ²
	(P_{u2})	323.23kN/m ²
Ground side friction (P_{sf})	0~6.92kN/m ²	
The bottom friction (P_{bf})	6.92kN/m	

Suction pile에 작용하는 하중을 산정하였다(Japan Bridge Engineering Center, 2005). Fig. 7에 Suction pile에 작용하는 하중인 내외면 주면마찰력, 주동 및 수동토압, 저면마찰력을 나타내었다. 지반물성치를 사용하여 계산된 Suction pile에 작용하는 하중을 Table 3에 나타내었다.

3.2 구조해석 결과

Fig. 6에 제안한 4가지 Jacket 모델에 대하여 구조거동 및 안전성 평가를 실시하였다. 대상구조물의 형상에 따른 구조해석 결과를 Fig. 8 및 Table 4에 나타내었다. 구조해석 결과 각 Type별 T.P.에서의 최대수평변위는 32.9mm, 124.2mm, 133.2mm, 16.7mm로 나타났다. 최대응력 발생 위치는 Jacket 구조물 최하단부 하부 Leg에서 나타났으며 최대응력은 -108.2MPa, -127.8MPa, -136.5MPa, -102.8MPa로 나타났다. 상부 Steel deck인 Type A 및 B에서 최대수평변위 및 응력 차이가 나타나는 것은 하부지지조건과의 차이와 Fig. 7에서 나타낸 Suction pile에 작용하는 하중때문인 것으로 판단된다. 상부 P.C.B.를 적용한 Type C의 경우, Type B에 비하여 변위 및 응력이 증가하였는데, 이는 P.C.B.의 자

Table 4 Results of structure analysis

Type	Max. Horizontal Displacement (mm)	Max. Stress of Leg (MPa)	Max. Stress of Bracing (MPa)
A	32.9	-108.2	-79.8
B	124.2	-127.8	-81.4
C	133.2	-136.5	-88.7
D	16.7	-102.8	-86.5

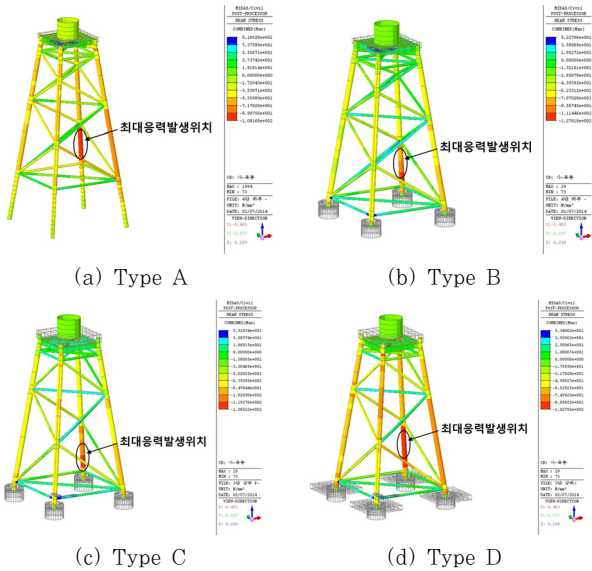


Fig. 8 The max. stress of each structure model

중을 고려하여 Bracing의 개수를 4단에 3단으로 감소시켰기 때문에 증가한 것으로 판단된다. 상부 P.C.B. 및 하부 Suction pile+P.C.B.를 적용한 Type D의 경우, 최대수평 변위 및 최대응력이 가장 작게 나타났으며, 이는 하부 P.C.B.의 지지조건 및 경계조건의 영향인 것으로 판단된다.

P.C.B. 유무에 따른 구조해석 결과, 모든 모델에서 구조적으로 안정한 것으로 나타났으나, 상부 P.C.B. 및 하부 Suction pile+P.C.B.를 적용한 Type D의 경우가 최대수평 변위 및 최대응력이 가장 작게 나타나 가장 효율적인 모델 형상인 것으로 판단된다.

3.3 Suction pile 안전성 검토

Suction pile의 안전성을 검토하기 위하여 Type D 모델의 구조해석 결과를 바탕으로 대상구조물의 지지력을 산정하고, 구조안전성을 평가하였다. Suction pile의 지지력 산정 및 구조안전성은 일본의 Suction 기초의 설계 및 기술매뉴얼에 따라 평가하였다(Japan Bridge Engineering Center, 2005).

해저지반의 근입깊이 안전성(piping)에 관한 검토식은 식 (1)과 같다.

$$F_s = \frac{\gamma_{sub} \cdot z}{(\Delta h - \Delta h_1)\gamma_w} = 1.2 \tag{1}$$

여기서,

$F_s = 1.2$: 안전율

$\gamma' = 9.512$: 흙의 수중단위체적질량(kN/m³)

$\gamma_w = 9.807$: 물의 단위체적중량(kN/m³)

z : 석션 근입깊이(m)

Δh : 석션에 의한 수위저하량(m)

Δh_1 : 석션선단의 수위저하량(m)

$$\Delta h - \Delta h_1 = 1.0$$

식 (1)을 사용하여 소요 근입깊이를 산정하면 $z \geq 1.27m$ 이며, 현재 근입깊이는 $z = 2.0m$ 이므로 해저지반의 근입깊이 안전성은 만족하는 것으로 나타났다.

또한 Suction pile의 지지력은 식 (2)와 같이 계산되어진다.

$$Q_{total} = A_{tip} \cdot q_{tip} + A_{wi} \cdot p_{fi} + A_{wo} \cdot p_{fo} \tag{2}$$

여기서,

$A_{tip} = 0.374m^2$: 석션 선단면적

$A_{wi} = 12.4z(m)$: 지반 중에 있는 석션 내면의 원주면적

$A_{wo} = 12.6z(m)$: 지반 중에 있는 석션 외면의 원주면적

$q_{tip} = \sigma'_{vt} \cdot N_q + \gamma'_t \cdot (b/2) \cdot N_\gamma = 17.878z + 30.4$

단, $\phi = 30^\circ$, $N_q = 18.40$, $N_\gamma = 15.67$: 선단저항력

$p_{fo} = \mu \cdot K_{out} \cdot \sigma'_{vo} = 0.177 + \frac{0.061}{z}$: 외면 주면마찰력

$p_{fi} = \mu \cdot K_{IN} \cdot \sigma'_{vi} = (0.970 - \frac{0.687}{z})[\exp(12.566z) - 1]$

: 내면 주면마찰력

이상과 같이 지지력을 계산하면 $Q_i = 3718kN$ 이며, Type D에 대한 구조해석 결과, 작용 연직반력 $3603kN < Q_i$ 이므로 연직지지력은 안정성을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 허용 연직 및 수평 지지력 또한 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

4. 동조액체감쇠기(TLD)를 적용한 Jacket 구조물

4.1 동조액체감쇠기(TLD) 설계

본 연구에서 제안한 상부 P.C.B. 형상은 Fig. 3에 나타

넌 것과 같이 내부가 각각 격벽식 셸 구조로 되어 있으며, 각각 격벽식 셸에 액체를 채워 넣음으로서 별도의 비용없이 설치가 용이하고, TLD의 효과를 구현할 수 있을 것이라 판단된다. 이에 대상 Jacket 구조물에 TLD를 적용하여 수평 변위 저감 특성을 지지조건 및 TLD 형상비에 대하여 평가하고자 하였다.

동조액체감쇠기(이하 TLD로 표기)는 액체의 출렁임을 이용하여 구조물에 감쇠를 추가하는 장치로, 물탱크의 수평면을 기준으로 수직방향으로 발행한 변위를 원래의 위치로 복원하려는 중력과 액체질량의 조합에 따라 일정한 출렁임을 가지게 된다. 이 출렁임 주기를 구조물의 1차 모드 주기(또는 고유진동수)와 일치시킴으로써 동조질량감쇠기(TMD)와 동일한 원리로 구조물에 유발된 에너지를 흡수한다(Sun, 1992).

TLD의 최적 설계변수를 도출하기 위해서는 설계변수들에 따른 성능변화를 파악하는 것이 중요하다. TLD의 설계변수로는 동조진동수비, 질량비, 감쇠비 등이 있다.

동조진동수비는 구조물의 1차 고유진동수와 동조액체감쇠기의 고유진동수의 비를 나타내며, 식 (3)과 같다.

$$f = \frac{w_d}{w_s} \tag{3}$$

여기서, w_s 는 구조물의 1차 고유진동수이고, w_d 는 TLD의 고유진동수이다. TLD의 고유진동수는 식 (4)를 사용하여 도출하였다.

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh(\pi \Delta)} \tag{4}$$

여기서, g 는 중력가속도, L 은 장변방향의 수조 길이, Δ 는 형상비(h/L)이다.

질량비는 표준모델의 1차 모드 질량과 TLD의 질량의 비를 나타내며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} \tag{5}$$

여기서, m_s 는 구조물의 1차 모드 질량이고, m_d 는 TLD의 질량이다. TLD의 유효질량은 식 (6)을 사용하여 도출하였다.

$$m_n = m_t \left(\frac{\text{Stanh}(2n-1)\pi\Delta}{\pi^3\Delta(2n-1)^3} \right); n = 1, 2, \dots \tag{6}$$

여기서, n 은 출렁임 모드이고, m_n 은 n 차 모드 물질량, m_t 는 액체의 총 질량이다.

감쇠비 및 감쇠는 식 (7) 및 (8)을 사용하여 계산하였다. TLD의 제원은 Fig. 3의 치수를 사용하였다.

$$\zeta_d = \frac{\sqrt{\omega\nu}(1+2\frac{h}{b}+S)}{2\pi\Delta\sqrt{gh}} \tag{7}$$

여기서, ω =각고유진동수(rad/s)

ν =점성계수(m^2/s)

h =물의 높이(m)

b = TLD 폭(m)

$\Delta = \frac{h}{L} = \frac{(m)}{(m)}$

$g=9.806(m/s^2)$

$$c_d = 2\zeta_d\omega_d m_1 \tag{8}$$

여기서, $\zeta_d = TLD$ 감쇠비

$\omega_d = TLD$ 각고유진동수(rad/s)

$m_1 = TLD$ 참여질량(ton)

TLD는 기본적으로 액체의 질량효과를 이용하는 감쇠기이며, 동일 조건에서의 모든 설계절차와 변수 및 제어성능은 TMD와 TLD가 거의 유사하다고 보고되었다(Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2003). 본 연구에서 사용한 MIDAS에서 제공하는 설계요소에는 TLD에 대한 설정이 없기 때문에 TMD 설계요소를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 TLD의 기본 제

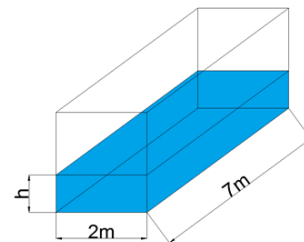


Fig. 9 Dimension of TLD

Table 5 Design value of TLD

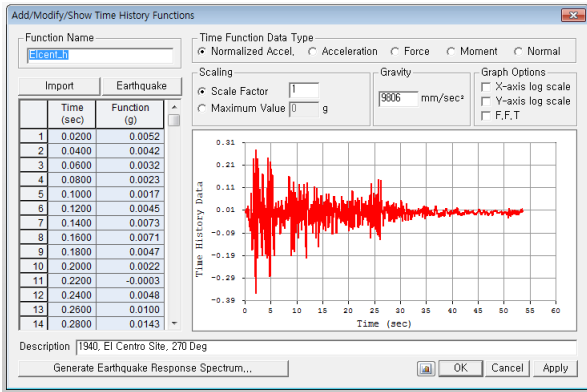
$h(m)$	h/L	μ	ζ_d
0.7	0.1	0.017	0.0025
1.05	0.15	0.026	0.0017
1.47	0.2	0.035	0.0013
2.1	0.3	0.052	0.0009

원을 Fig. 9에, 계산되어진 설계값을 Table 5에 나타내었다.

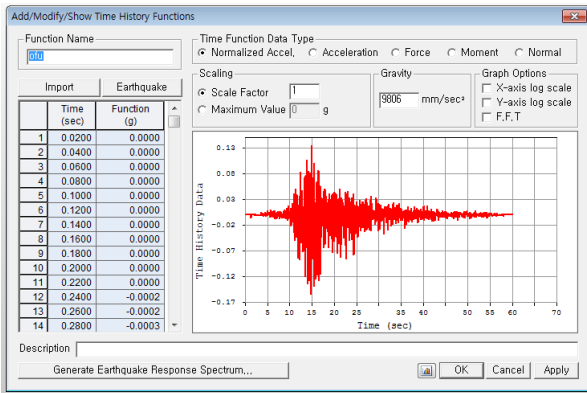
4.2 작용 하중

내진설계시 설계외력으로서의 설계지진동을 설정하여야 한다. 지진발생이 많은 일본의 경우, 지진크기에 따라 지진을 Level 1과 Level 2로 분류하고 각각의 기준에 맞는 내진설계를 실시하도록 하고 있다. 그러나 향후 발생할 지진 특성을 규정하기 힘들기 때문에 과거의 대표적인 특성 지진을 입력하거나 인공지진파를 생성하여야 한다. 이것을 위하여 제시된 대표

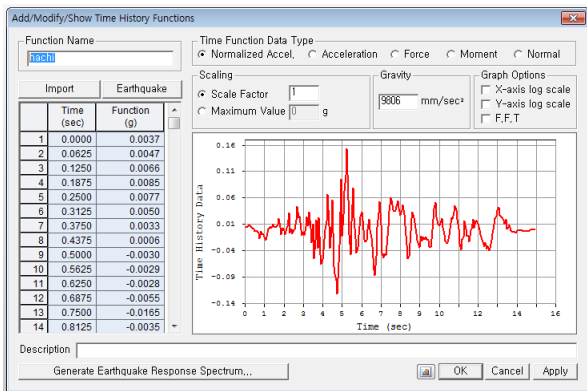
적인 해구형 지진파가 Ofunato 단주기 지진파 및 Hachinohe 장주기 지진파이다. 관측지역의 특성 때문에 주로 지진해일에 대한 강진예측 자료로 사용되고 있으나 우리나라의 항만 및 여항시설의 내진설계 표준서(2005)에서는 인공지진파와 함께 단주기 특성을 나타내는 파에 대해서 Ofunato 지진파를, 장주기 특성을 나타내는 파에 대해서는 Hachinohe파를 사용하도록 권장하고 있다. 따라서 Ofunato시와 Hachinohe시에서 계속된 지진파는 인접해안에서 발생하는 해구형 지진의 특징을 반영한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 동조액체감쇠기의 성능해석을 위해 사용한 가진하중으로 MIDAS에 내장되어 있는 프로그램을 이용하여 생성한 El Centro site 지진파, Ofunato 단주기 및 Hachinohe 장주기 지진파를 사용하였다. Fig. 10에 적용된 지진파를 각각 나타내었다.



(a) El Centro earthquake



(b) Ofunato earthquake

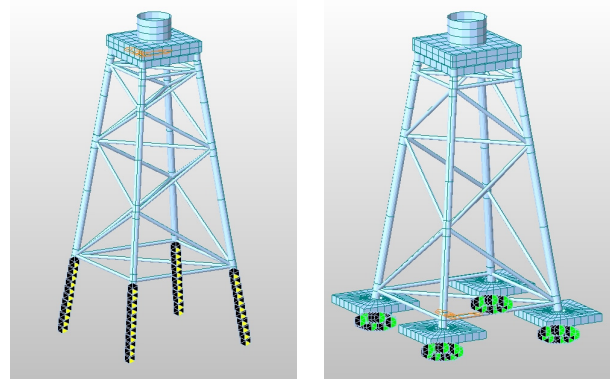


(c) Hachinohe earthquake

Fig. 10 Types of earthquake wave

4.3 해석 모형

지진하중에 대한 Jacket 구조물의 해석 모형은 3.1에서 설명한 바와 같다. 기초지반은 사질토로 가정하고 구조해석을 실시하였다. 하부구조 지지조건에 따른 대상구조물의 3차원 격자해석모형을 Fig. 11에 나타내었다. 여기서 사용된 지반의 체반물성치 및 지지조건은 3절과 동일하게 사용하였다. Fig. 3(b) 및 (c)에 나타낸 바와 같이 TLD 기능은 상부 P.C.B. 내에 적용된다.



(a) Skirt pile

(b) Suction pile

Fig. 11 Structure model by boundary condition

4.4 지반지지조건에 따른 구조해석 결과

하부지지조건이 Skirt pile인 경우의 TLD 유무에 따른 각 지진하중에 대한 T.P.(Transition Piece)에서의 변위를 Table 6에 나타내었다. 하부지지구조가 Suction pile인 경우의 TLD 유무에 따른 각 지진하중에 대한 T.P.에서의 수평변위를 Table 7에 나타내었다.

Table 6 Displacement of T.P.(Skirt pile, units:mm)

Displ.	El Centro		Ofunato		Hachinohe	
	No TLD	TLD	No TLD	TLD	No TLD	TLD
Max	97.1	92.4	20.2	20.4	38.9	40.4
Min	-90.4	-89.5	-23.5	-25.1	-47.7	-43.5
Range	187.5	181.9	43.7	45.5	86.6	83.9

Table 7 Displacement of T.P.(Suction pile, units:mm)

Displ.	El Centro		Ofunato		Hachinohe	
	No TLD	TLD	No TLD	TLD	No TLD	TLD
Max	47.4	41.6	18.3	15.0	36.5	37.8
Min	-43.6	-40.2	-18.2	-19.6	-46.2	-41.7
Range	91.1	81.7	36.5	34.7	82.7	79.6

Skirt 및 Suction pile의 변위 분석결과, Skirt 및 Suction pile의 지지구조에 대하여 Jacket 구조물 모두 TLD 설치에 따라 T.P.에서의 변위가 저감되는 것으로 나타났다. Suction pile의 경우에는 모든 지진하중에서 TLD를 적용함에 따라 T.P.에서의 변위가 저감되는 것으로 나타났다. 또한 하부지지구조로 Skirt보다 Suction pile을 적용한 경우에 모든 지진하중에서 T.P.에서의 변위의 저감 폭이 큰 것으로 나타났다. 이로부터 TLD 설치에 따른 진동제어 능력은 하부구조의 지지조건에 의존하는 것을 알 수 있었으며, 또한 Suction pile의 경우가 진동제어 효과가 큰 것으로 나타났다. 이에 TLD 형상비에 따른 구조해석에서는 본 연구에서 제안한 Suction pile을 적용한 구조모델만을 사용하여 구조해석을 실시하였다.

4.5 TLD 형상비에 따른 구조해석

본 절에서는 Fig. 11(b) Suction pile Jacket 구조물을 대상으로 TLD의 형상비(h/L)에 따른 Suction pile Jacket 구조물의 수평력 저감 특성을 평가하기 위하여 구조해석을 실시하였다. Fig. 9 및 Table 5에 나타난 바와 같이 형상비(h/L)에서 L은 구조물 크기에 대한 고정값이며, 매개변수는 물의 채움정도인 h이다.

Table 5에 나타난 바와 같이 매개변수로 적용한 형상비는 0.10, 0.15, 0.20 및 0.30이며, 각 형상비에 따른 구조해석을 실시하고, TLD가 적용되지 않은 Suction pile과의 비교를 통하여 수평력 저감 특성을 평가하였다. TLD의 성능해석을 위해 사용한 가진하중은 4.2절의 지진하중과 같다.

Fig. 12에 각 지진하중이 작용하는 경우 TLD 형상비에 따른 구조해석 변위 결과를 나타내었다. TLD 형상비에 따른 T.P.에서의 변위를 분석한 결과, El Centro 지진하중이 작

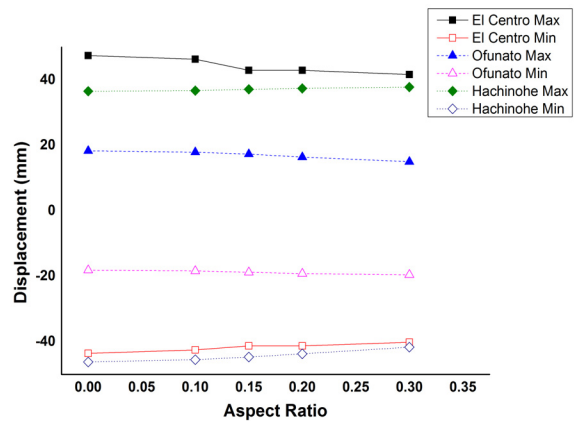


Fig. 12 Displacement by each earthquake

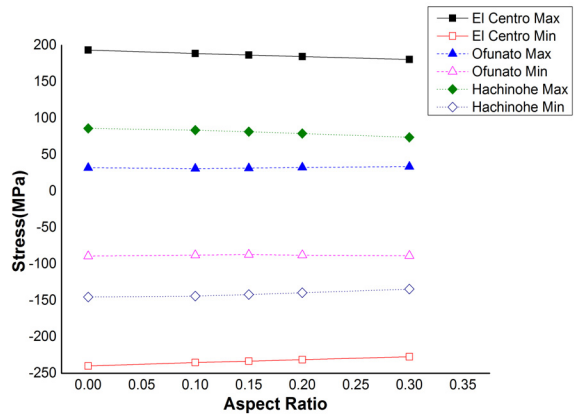


Fig. 13 Max. & Min. stress by each earthquake

용하는 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.10일 경우 약 3%, TLD 형상비가 0.30일 경우 약 10%까지 변위가 저감되는 것으로 나타났다. Ofunato 단주기 지진하중 및 Hachinohe 장주기 지진하중이 작용하는 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.30일 경우 약 5% 및 4%의 변위가 저감되는 것으로 나타났다.

Fig. 13에 각 지진하중이 작용하는 경우 TLD 형상비에 따른 구조해석 응력 결과를 나타내었다. TLD 형상비에 따른 Leg에서의 최대 및 최소 응력을 분석한 결과, El Centro 지진하중이 작용하는 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.10인 경우 약 3%, TLD 형상비가 0.30인 경우 약 7%까지 응력이 저감되는 것으로 나타났다. 최소응력의 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.10인 경우 약 2%, TLD 형상비가 0.30인 경우 약 5%까지 응력이 저감되는 것으로 나타났다.

Ofunato 단주기 지진하중이 작용하는 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.10일 경우 약 3% 저감하였으나, TLD 형상비가 0.30일 경우 약 5%의 응력이 증가되는 것

로 나타났다.

Hachinohe 장주기 지진하중이 작용하는 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.30일 경우 약 14%까지 응력이 저감되는 것으로 나타났다. 최소응력의 경우, TLD가 없는 경우보다 TLD 형상비가 0.30일 경우 약 7%까지 응력이 저감되는 것으로 나타났다.

이상의 연구결과, P.C.B. 상부데크에 Suction pile의 하부구조를 갖는 Jacket 구조물에 P.C.B. 격실구조 내부에 TLD를 적용한 경우, TLD 형상에 따라 약간 차이는 있으나 약 5%정도의 변위 저감 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 Jacket 구조물에 P.C.B. 및 Suction pile을 적용한 새로운 Jacket 구조물을 제안하였으며, 구조해석 및 지지력 검토를 실시하여 안전성을 평가하였다. 또한 제안된 구조물에 TLD를 적용하여 해상 Jacket 구조물에서의 진동저감 효과를 평가하였다.

- (1) 제안된 다양한 형식의 Jacket 구조물의 거동 평가 결과, P.C.B. 및 Suction pile을 적용한 Type D의 경우가 최대 변위 및 응력이 가장 작게 나타나 제안한 4가지 경우 중에 가장 효율적인 모델인 것으로 판단된다. 또한 Suction pile에 대한 지지력 검토 결과, 충분히 안전성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.
- (2) 상부 P.C.B. 격실 내부에 TLD를 적용하여 진동저감 효과를 평가한 결과, 설계기준에서 제시하고 있는 각 지진하중 모두에 대해서 약 5%의 저감효과를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 다른 진동저감 장치들에 비해 설치가 간편하고 경제적인 TLD의 적용성을 고려하였을 시 매우 효과적인 것으로 판단된다.

향후, 제안된 모델의 개발을 위해 실제 설치위치에서의 설계조건 및 연결부 등에 대한 상세구조해석 등이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

Golafshani, A.A., Tabeshpour, M.R., Komachi,

Y. (2009) FEMA Approaches in Seismic Assessment of Jacket Platforms(Case Study: Ressalat Jacket of Persian Gulf), *J. Constr. Steel Res.*, 65(10), pp.1979~1986.

Japan Bridge Engineering Center (2005) *Design and Construction Manuals for Skirt/Suction Foundation Structures*, Japan

Ju, Y.K. (2002) An Experimental Evaluation of Fundamental frequency and Damping Ratio for Tuned Liquid Damper Considering Blocks on Wall, *J. Arch. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 18(2), pp.35~44.

Kim, C.M. (2012) *A Study on the Ultimate State Analysis of Offshore Jacket Structure*, Hanyang University.

Kim, J.M., Lee, G.W. (2004) Vibration Control of Offshore Platform using Tuned Mass Damper, *J. Korean Soc. Steel Constr.*, 16(1), pp.73~79.

Kim, K.D., Chol, D.H., Sim, J., Kim, K.C. (2011) Development and Design of Offshore Wind Turbine Support Structures, *Mag. Korean Soc. Civil Eng.*, 59(5), pp.28~37.

Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (2003) *Development of Vibration Reduction Technique using Tuned Liquid Control Device for Existing Residential Buildings*.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2011) *Development of Novel Technologies for Low-Cost and High-Efficiency Suction Piles*.

Korea Maritime & Ocean University (2014) *The Study on Development of Offshore Jacket Structure using PC House Type*.

Lee, S.H. (2014) *Reliability-based Design Optimization of a Jacket Support Structure of an Offshore Wind Turbine*, Hanyang University.

Ministry of Oceans and Fisheries (2014) *Harbor and Fishery Design Criteria*.

Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (2005) *Seismic Design Standard of the Harbor and Fishing Port Facilities*.

Sun, L.M., Fujino, Y., Pacheco, B.M., Isobe, M. (1989) Nonlinear Waves and Dynamic Pressures in Rectangular Tuned Liquid Damper(TLD), *Struct. Eng. & Earthq. Eng.*

Tabeshpour, M.R., Golafshani, A.A., Komachi, Y. (2012) Assessment and Rehabilitation of Jacket

Platforms Earthquake-Resistant Structures-Design,
Assessment and Rehabilitation.
You, K.P. (2005) The Vibration Performance Experi-

ment of Tuned Liquid Damper and Tuned Liquid
Column Damper, *J. Arch. Inst. Korea Struct. &
Constr.*, 21(5), pp.19~26.

요 지

해상풍력발전의 건설이 여러 가지 환경 및 가설공법 등의 설치환경 등의 원인에 의하여 건설지점이 천해에서 심해로 이동하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향 속에 해상풍력발전 지지구조물의 심해화에 따른 지지구조물에 대한 연구는 중요성이 더욱 증대될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 기존의 Jacket 구조물에 대하여 Precast Concrete Block 및 Suction pile을 적용한 Jacket 구조물을 제안하고 이에 대하여 구조해석 및 안전성 평가를 실시하였다. 또한 제안된 구조물에 동조액체감쇠기를 적용하여 구조물 진동성능 향상을 도모하고자 하였다. 연구결과, 제안된 신형식 Jacket 구조물은 충분한 안전성을 가지고 있는 것으로 평가되었으며, 동조액체감쇠기를 적용하였을 경우, 약 5%의 진동저감 효과가 있는 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 해상풍력발전, 하부지지구조물, 자켓 구조물, 석션파일, 동조액체감쇠기