

플로팅 함체의 강성변화에 따른 철골모멘트연성골조의 응답 특성

† 이영욱 · 박정아* · 채지용* · 최지훈**

† 군산대학교 건축공학과 교수, * 군산대학교 건축공학과 박사과정, ** 군산대학교 건축공학과 석사과정

Response Characteristics of the Steel Moment Resisting Frame According to the Stiffness Variation of Pontoon

† Young-Wook Lee · Jeong-Ah Park* · Ji-Yong Chae* · Ji-Hun Choi**

† Department of Architecture and Building Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

요 약 : 플로팅 함체의 강성변화가 상부 철골모멘트연성골조에 미치는 영향을 확인하기 위해 함체의 높이를 1.5m, 2.0m, 2.5m로 변화시키면서 파랑하중 3초에서 15초에 대하여 동적 유체 해석과 그에 따른 파력을 산정하고 정적 구조 해석을 수행하였다. 해석결과, RAO-피치와 상부 골조의 모멘트 증가량이 선형적인 관계이고 함체의 곡률이 구조물의 강성과 반비례함을 확인하였다. 이러한 선형적 결과를 종합하여, 임의의 함체에 대한 상부골조의 해석 결과를 이용하여 함체 높이가 다른 경우에도 상부 골조의 모멘트를 추정하는 절차를 제안하였으며, 추정 결과가 해석결과와 상당히 잘 일치함을 확인하였다.

핵심용어 : 플로팅 함체, 상부 구조물, 강성 변화, 곡률, 철골모멘트연성골조

Abstract : To examine the interaction of the floating pontoon with a steel moment resisting frame, the static structural analysis is carried out, in which the pressure load are calculated from the forgoing fluid dynamic analysis ,varying the period of wave from 3 to 15 second and for 3 cases of depth of pontoon, 1.5, 2.0, 2.5m. As results, it has shown that RAO-pitch has the linear relationship with the increase of moment of the frame and the curvature of pontoon is reversely proportional to the stiffness of pontoon. By synthesizing these results, an estimation method is proposed, which predicts the moment of frame of the different depth of pontoon based on the analysis result of an arbitrary depth of a floating pontoon. The estimation result shows considerably good agreement, compared with the analysis result.

Key words : floating pontoon, superstructure, stiffness variation, curvature, steel moment resisting frame

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 들어 우리나라에서도 새만금 개발사업, 4대강 정비사업, 여수엑스포 등 친수공간을 이용한 플로팅 사업이 증대되고 있다. 또한 서울시에서는 한강 르네상스의 프로젝트 일환으로 반포지구 수상에 다목적 공연장, 문화 체험장, 카페 및 편의 시설 등을 위한 ‘플로팅 아일랜드(floating island)’가 조성되었다(문창호, 2011). 이는 소득 수준의 향상으로 인해 물 가까이에서 여가를 보내고자 하는 욕구가 증대 되고 있기 때문이다. 이러한 플로팅 구조물은 고정하중과 활하중 등의 일반하

중과 함께 바람, 조류, 온도, 변형하중 등을 포함하는 환경하중이 작용되며 계류력, 접안, 충돌력 등의 특수하중이 적용되어야 한다. 이 가운데 환경 하중의 주된 파랑하중은 플로팅 구조물이 설치되는 위치에 의존적이며 플로팅 구조물의 견인에 의한 이동 중에도 작용하므로 파랑하중에 대한 해석은 플

로팅 구조물의 설계에서 필수적으로 수행되어야 한다. 플로팅 구조물의 파랑하중에 의한 해석에 있어서 구조물이 소규모일 경우 탄성변형이 미미하므로 강체(rigid body)로 가정하여도 무방한 반면 구조물이 대형화될 경우 유연성(flexibility)에 의한 탄성변형도 무시할 수 없게 된다. 즉, 플로팅 구조물의 규모는 그 거동을 해석함에 있어서 강체와 탄성체를 구분하는 주요 인자 중 하나로 볼 수 있다(김병완, 2006). 플로팅 구조물의 상부 구조물은 육상의 구조물과는 전혀 다른 기술적인 문체를 가지고 있지만 육상의 구조물과 마찬가지로 사람들이 생활하기 위해 필요한 안전성과 쾌적성이 확보 되어야 한다(해양수산부, 2008). 따라서 본 연구에서는 플로팅 함체의 강성변화와 파도 주기에 따른 플로팅 함체의 변형을 확인하고 이러한 변형이 상부골조에 미치는 응답특성을 검토하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

현재 국내외적으로 플로팅 함체 설계 대안 및 유체력을 고

† 연회원, leeyu@kunsan.ac.kr 063)469-4784

* 연회원, stpja@kunsan.ac.kr 063)469-1956

연회원, luckyc007@hanmail.net 063)469-1956

** 연회원, pig_jj@naver.com 063)469-1956

러한 유탄성응답 해석 등 플로팅 함체에 대한 연구는 많이 진행 되어왔다. 하지만 플로팅 구조물의 상부 구조물과 관련된 연구에서는 개념 설계 및 거주성 평가에 대해서는 진행되었지만 상부 구조물에 대한 연구는 아직도 초기 단계에 있는 실정이며 플로팅 함체의 거동과 상부구조물의 연관성에 관한 연구는 거의 찾아보기 어렵다. 서론에서 언급했듯이 플로팅 구조물은 파랑하중에 의한 영향이 크므로 플로팅 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 함체의 변형이 상부구조물에 주는 영향을 검토 하여야 한다(송화철, 2001).

본 연구에서는 플로팅 함체의 높이 변화에 따라 함체와 철골모멘트연성골조의 상호 작용을 확인하고자 한다.

2. 해석 모델과 방법

2.1 해석 대상 모델

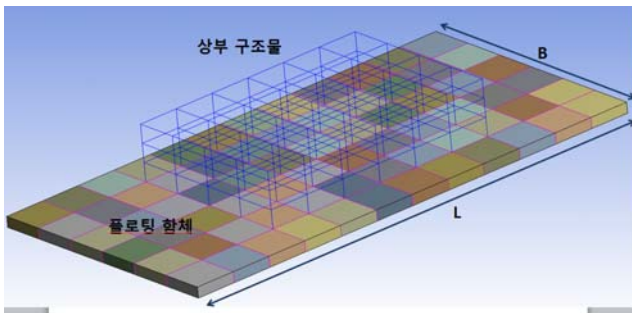


Fig. 1 Analysis model

플로팅 함체 해석 모델은 Fig. 1과 같이 길이 96m, 폭 48m인 콘크리트 구조물이며 8m×8m 모듈 72개로 구성되고 함체의 높이를 1.5m, 2.0m, 2.5m로 변화시켰다. 상부구조물은 철골모멘트연성골조로 기둥 H-310×305×15×20, 보 H-480×300×

11×15를 사용하였고 스패는 8m, 층고는 3.5m인 3층 구조물이다. 적용된 하중은 고정하중 25kN/m, 활하중 15kN/m이며, 파도의 주기는 5~15초까지 2초씩 증가시켰고 수심은 10m, 파향은 함체의 길이방향으로 가정하였다.

Table 1 Analysis data

길이, L(m)	96
폭, B(m)	48
흘수, d(m)	1.19, 1.92, 1.25
함체 높이, D(m)	1.5, 2.0, 2.5
주기, (sec)	5~15 (2초간격)
파향	0 (X축의 양의 방향)

함체의 강성과 파도 주기에 따른 모멘트 증가량을 확인하기 위하여 Fig. 2의 보 G1, G2와 기둥 C1, C2를 확인하였다.

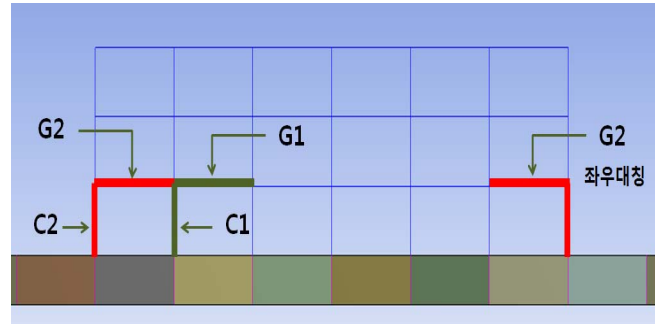


Fig. 2 Positions of column and girder of superstructure for design

2.2 해석 방법

플로팅 구조물의 해석은 동적유체해석(fluid dynamics)과 구조 해석을 상호 연계하여 수행하였다. 해석과정은 구조물의 질량, 관성질량모멘트 및 무게중심(COG) 값을 구조 해석을 통해 구하고, 이 값에 의해 주파수 영역에서의 동적유체해석을 통해 플로팅 구조물에 작용하는 파랑하중의 압력을 구하게 된다. 또한 동적유체해석을 통하여 얻어진 파랑하중의 압력을 유체 절점력의 가중 평균값으로 구조요소의 절점하중을 계산하여 구조 해석을 수행하였다.

3. 동적 유체 해석

3.1 운동 방정식

탄성응답해석법에 의해 구조물의 동적 응답을 해석하기 위해 유체는 비압축성, 비점성, 비회전하며 자유 표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있다고 가정한다. 그리고 선형이론으로 주파수 영역에서의 해석을 하고 각각의 평형 위치에 대한 응답은 미소진폭의 조화진동으로 3차원 해석을 수행한다(C. M. Wang, 2008).

구조물 외부 면에 작용하는 유체 압력은 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합함으로써 식 (1)과 같이 구조 전체에 대한 운동 방정식으로 구할 수 있다.

$$M(s)\ddot{X} + M(a)\dot{X} + C\dot{X} + K(s)X = F^I + F^D \quad (1)$$

여기서, $M(s)$: 질량행렬

$M(a)$: 부가질량행렬

C : 구조감쇠행렬

$K(s)$: 정수압에 의한 복원력 행렬

F^I : 가진력(Froude-krylov force)

F^D : 가진력(Diffraction force)

3.2 RAO 해석

플로팅 구조물의 동적유체해석은 단위 진폭을 갖는 입사파에 대한 함체 변위를 무차원하여 파도주기의 변화에 따른 선체의 응답 변화를 함수로 나타내는 선체 응답 함수(RAO

:Response Amplitude Operator) 해석을 통해 구조물의 수직 변위(heave)와 피치(pitch)에 의한 회전 이 파도의 주기에 따라 어떠한 양상을 나타내는지 확인하기 위해 수행하였으며, 함체의 높이가 2m인 모델을 유체 해석한 함체 수직 변위와 피치 양상은 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다.

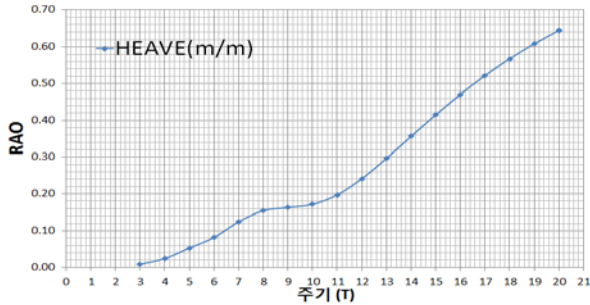


Fig. 3 RAO Heave graph according to the wave period

Fig. 3에서 X축은 파도의 주기, Y축은 RAO 수직 변위를 나타내며 수직 변위와 파도의 주기가 비례 관계에 있음을 알 수 있다.

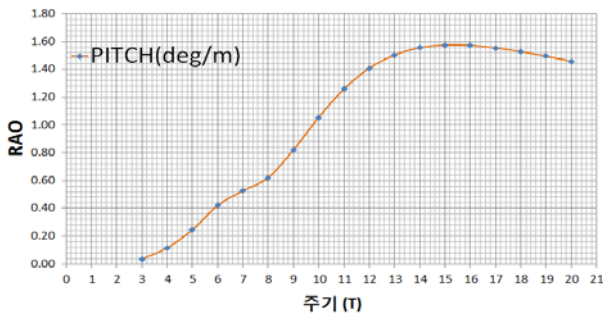


Fig. 4 RAO Pitch graph according to the wave period

Fig. 4에서는 피치에 의한 RAO 값이 파도의 주기가 길어짐에 따라 계속해서 증가하고 약 15초 후부터 RAO-피치가 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 수직 변위는 파도 주기와 비례 관계에 있는 반면 피치는 파도 주기에 비례하지 않음을 알 수 있다. 이러한 피치 양상은 파도 주기 뿐 만 아니라 구조물의 크기 및 형상에 의한 영향을 고려해야 하기 때문이다.

함체 높이가 1.5m, 2.5m 일 때의 RAO-피치는 2.0 m의 경우와 거의 동일하게 나타났다. 최대값 역시 같은 주기에서 발생하며 차이가 거의 없음을 확인하였다.

4. 구조해석

4.1 해석 조건

플로팅 구조물의 구조 해석은 구조물에 작용하는 파랑하중의 압력을 동적유체해석을 통하여 구하고, 경계 조건은 물 위에 떠있는 구조물의 부재 반력에 영향을 미치지 않도록 작은

스프링 값(Weak spring=100N/m)을 적용하였다.

4.2 함체의 강성변화에 따른 수직 변위

플로팅 함체의 강성변화에 따른 함체의 수직 변위를 파악하기 위해 파도주기 증가에 따른 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 5, 6, 7에 도시하였다.

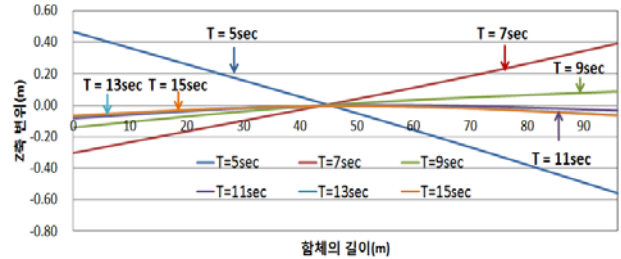


Fig. 5 Vertical displacement(D=1.5m)

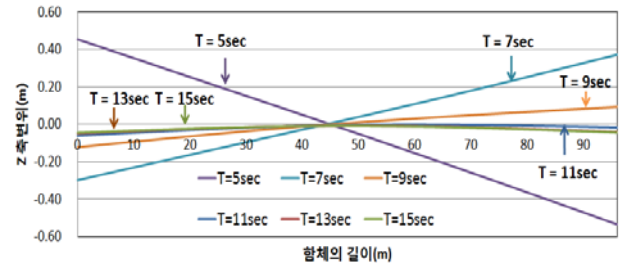


Fig. 6 Vertical displacement(D=2.0m)

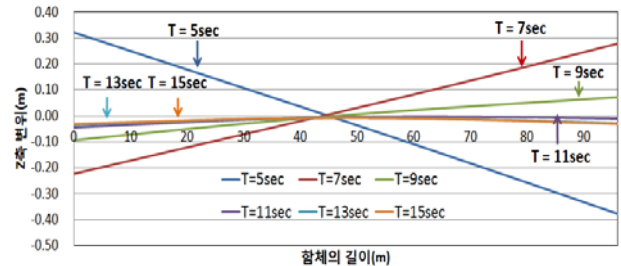


Fig. 7 Vertical displacement(D=2.5m)

Fig. 5, 6, 7을 통해 파도의 주기가 증가하면 함체의 수직 변위는 감소하였고 동일한 주기에서는 함체의 강성이 증가함에 따라 함체의 수직 변위는 작아지는 것을 알 수 있다. 파도 주기가 11초 이상일 경우 플로팅 함체의 변위가 약하게 곡선에 형태를 보이나 강제운동의 영향이 지배적이다.

4.3 위상각(Phase angle)에 따른 함체 수직 변위

파도의 위상각에 따른 플로팅 함체의 수직 변위의 변화를 확인하기 위해 파도의 주기가 9초 일 때 위상각이 0~135°로 변하는 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8에서 도시하였다.

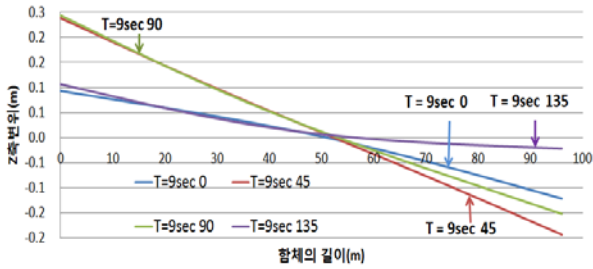


Fig. 8 Vertical displacement graph according to the phase angle

Fig. 8을 통해 위상각이 45°인 경우에 수직 변위차가 가장 크고, 위상각이 135°인 경우 수직 변위차가 가장 작았다. Fig. 8에서는 위상각이 45°인 경우 수직 변위차가 가장 컸지만 각각의 주기의 위상각에 따라서 수직 변위 양상은 달라진다.

4.4 함체의 강성 변화에 따른 상부 골조의 모멘트

1) 보 부재에 대한 모멘트 증가량

플로팅 함체의 높이를 1.5m, 2.0m, 2.5m 로 변화시켜 함체의 강성과 파도 주기 변화에 따른 상부 구조물의 외단부 보 부재 G2에 대한 모멘트 증가량을 확인하였다.

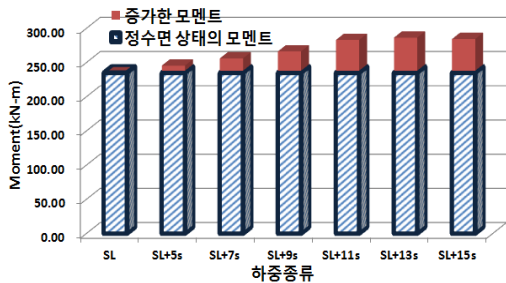


Fig. 9 Moment variation of ext. Girder(D=1.5m)

Fig. 9는 함체의 높이가 1.5m일 때 파도 주기 증가에 따른 모멘트 증가량을 나타낸 그래프이다. 빗금친 부분은 정수면 상태에서의 고정하중과 활하중에 의한 모멘트 값이고, 빗금친 부분 위의 사각형부분은 파도주기 증가에 따른 G2부재의 모멘트 증가량을 나타낸 것이다. 파도의 주기가 증가할수록 G2부재의 모멘트는 비례하여 증가하다 13초 때 감소하였다.

Fig. 10은 함체의 강성 변화에 따른 상부 구조물의 G2부재에 대한 모멘트 증가량을 나타낸 그래프로써 함체의 강성이 커짐에 따라 G2부재의 모멘트 증가량이 작아지는 것을 알 수 있고, 플로팅 함체의 높이가 1.5m인 경우와 2.5m인 경우에 모멘트 증가량은 다르지만 비슷한 양상의 그래프를 나타내고 있다. Table 2에서 보듯이 G1부재에서도 G2부재와 비슷한 양상이 나타났으며 G2부재보다 모멘트 증가량은 작게 나타났다.

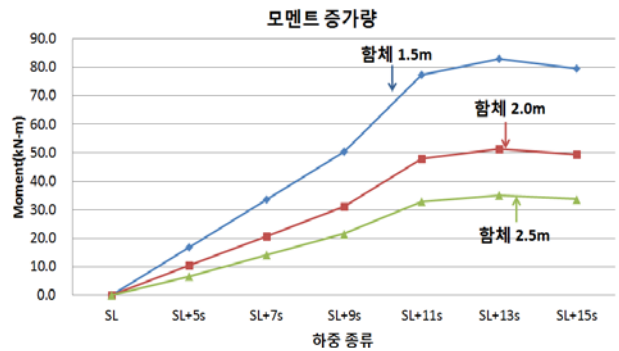


Fig. 10 Moment variation of ext. Girder

Fig. 4와 Fig. 10을 비교하여 보면 최대값을 보이는 주기는 일치하지 않았으나 그래프의 값이 증가하다 감소하는 양상이 비슷함을 알 수 있다.

2) 기둥 부재에 대한 모멘트 증가량

함체의 강성 및 파도주기 변화에 따른 상부구조물의 외부기둥 C2부재에 대한 모멘트 증가량을 확인하였다.

Table 2 Moment variation of G1, G2 according to the increasing stiffness of concrete pontoon

	보 부재	SL	SL (WL=5s)	SL+WL (7s)	SL+WL (9s)	SL+WL (11s)	SL+WL (13s)	SL+WL (15s)
함체 1.5 m	G1(kN·m)	223.0	234.4	240.8	247.1	262.1	265.2	263.4
	G2(kN·m)	235.6	252.5	269.1	285.8	313.0	318.5	315.1
	최대곡률($\times 10^{-5} rad/m$)		-2.75	-4.50	-4.68	-7.06	-7.53	-7.20
함체 2.0 m	G1(kN·m)	222.6	229.6	233.6	237.6	246.8	248.7	247.6
	G2(kN·m)	235.6	246.0	256.4	266.7	283.5	286.9	284.9
	최대곡률($\times 10^{-5} rad/m$)		-1.75	-2.75	-2.90	-4.39	-4.68	-4.47
함체 2.5 m	G1(kN·m)	223.0	227.1	231.0	233.0	239.2	240.5	239.7
	G2(kN·m)	235.2	241.7	249.2	256.7	268.1	270.3	268.9
	최대곡률($\times 10^{-5} rad/m$)		-1.00	-1.50	-1.98	-2.96	-3.16	-3.01

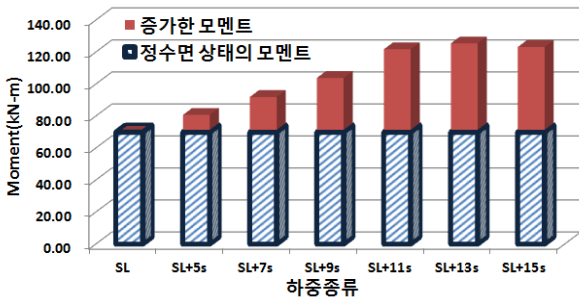


Fig. 11 Moment variation of Ext. column(D=1.5m)

Fig. 11은 함체의 높이가 1.5m일 때 C2부재의 모멘트는 앞서 확인한 G2부재와 같이 파도주기가 증가할수록 비례하여 증가하나 13초 이후에는 감소하였다.

Fig. 12는 함체의 강성변화에 따른 C2부재에 대한 모멘트 증가량을 나타낸 그래프로써 함체의 강성이 커짐에 따라 C2부재의 모멘트 증가량은 작아지며 Fig. 10에서 살펴본 보 G2부재의 모멘트 증가량 변화양상과 유사함을 알 수 있다.

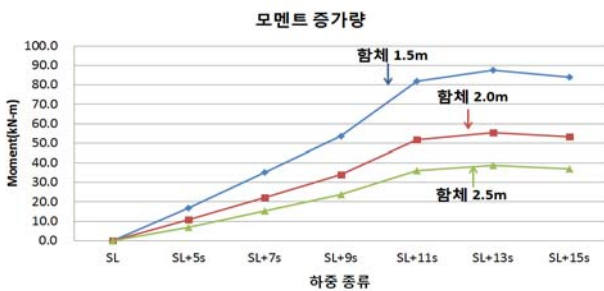


Fig. 12 Moment variation of ext. Column

Table 3은 강성변화에 따른 C1, C2부재의 모멘트 증가량을 나타내며, 서로 비슷한 양상을 보이나 C2부재의 모멘트 증가량이 C1부재에 보다 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

3) 기둥 부재에 대한 축력 증가량

축력과 모멘트를 동시에 전달해야 되는 기둥 부재에 대해 함체의 강성과 파도주기 변화에 따른 기둥 부재 축력의 증가량을 확인하고자 한다.

Table 4는 함체의 강성과 파도주기 변화에 따른 C1, C2부재의 축력을 나타내며, 이 중 함체의 높이가 1.5m인 경우에 대한 축력의 증가량을 Fig. 13에 도시하였다. Fig. 13과 Fig. 11을 비교해 보면 Fig. 11에서 파도주기 증가에 따라 기둥 부재 모멘트는 증가하였으나 Fig. 13에서 기둥의 축력은 증가하지 않았다.

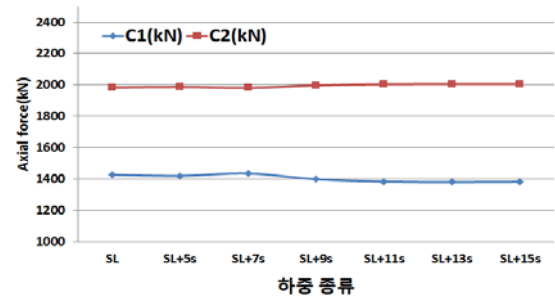


Fig. 13 Axial force variation of ext. Column(D=1.5m)

Table 4와 Fig. 13을 분석한 결과 함체의 강성 및 파도주기는 기둥의 축력 변화에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Table 3 Moment variation of C1, C2 according to the increasing stiffness of concrete pontoon

	기둥 부재	SL	SL+WL (5s)	SL+WL (7s)	SL+WL (9s)	SL+WL (11s)	SL+WL (13s)	SL+WL (15s)
함체 1.5 m	C1(kN-m)	4.2	21.1	33.1	45.2	69.2	74.1	71.6
	C2(kN-m)	69.9	86.8	105.1	123.4	151.8	157.5	153.9
함체 2.0 m	C1(kN-m)	4.2	15.0	23.0	30.4	45.7	48.8	47.0
	C2(kN-m)	69.9	80.7	92.0	103.8	121.7	125.4	123.2
함체 2.5 m	C1(kN-m)	4.0	11.1	17.0	22.8	33.31	35.4	34.1
	C2(kN-m)	70.0	76.8	85.4	93.8	106.1	108.6	107.0

Table 4 Axial Force variation of C1, C2 according to the increasing stiffness of concrete pontoon

	기둥 부재	SL	SL+WL (5s)	SL+WL (7s)	SL+WL (9s)	SL+WL (11s)	SL+WL (13s)	SL+WL (15s)
함체 1.5 m	C1(kN)	1983	1987	1981	1997	2004	2006	2005
	C2(kN)	1427	1420	1435	1398	1383	1380	1382
함체 2.0 m	C1(kN)	1982	1985	1980	1990	1994	1995	1995
	C2(kN)	1428	1423	1431	1409	1400	1398	1400
함체 2.5 m	C1(kN)	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981
	C2(kN)	1426	1424	1428	1414	1408	1407	1407

5. 해석 결과 분석

5.1 함체강성 변화에 따른 함체곡률과 상부 골조의 모멘트

플로팅 함체의 강성변화에 따른 함체의 곡률 변화를 검토하기 위해 파도주기가 9초인 경우에 대한 함체의 곡률을 확인한 후 Fig. 14에 도시하였다.

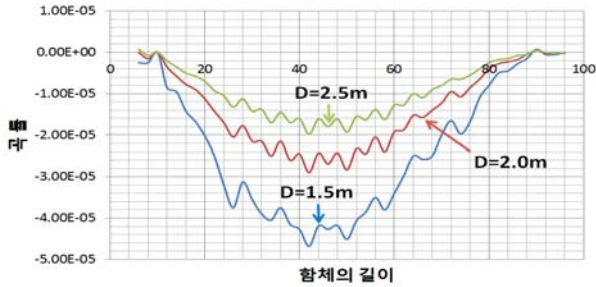


Fig. 14 Curvature according to the variation of stiffness

Fig. 14에서 볼 수 있듯이 함체의 강성이 커질수록 함체의 최대 곡률은 감소한다. Table 2와 Table 3을 살펴보면 파도주기가 9초인 경우 뿐 아니라 모든 주기에서 함체의 강성이 커짐에 따라 함체의 최대 곡률이 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 동일한 질량에 대하여 함체의 강성이 증가하는 경우 동적유체해석에 의한 파랑하중의 압력은 일정하므로, 함체의 변형은 작게 발생하여 최대 곡률이 작아지므로 상부 구조물의 모멘트 증가량에 미치는 영향이 감소하게 된다.

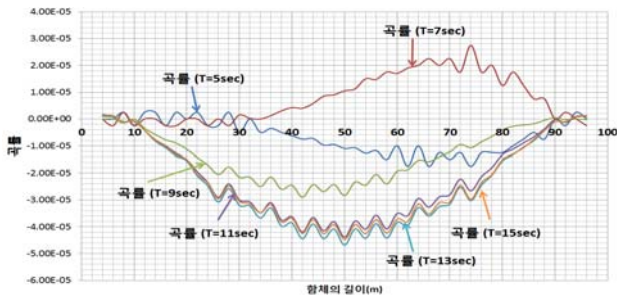


Fig. 15 Curvature according to the increasing wave period

Fig. 15에 함체의 높이가 2.0m인 경우 파도주기에 따른 함체의 곡률 변화를 도시하였다. 단, 파도의 위상각은 0°의 경우이다. Table 2와 3에서 함체 높이가 2.0m일 경우의 보, 기둥의 모멘트 증가량을 Fig. 15와 비교하면, 함체의 곡률이 최대인 주기에서 보와 기둥의 모멘트 증가량 또한 최대가 됨을 볼 수 있다. 이로써 플로팅 함체의 곡률이 상부구조물의 모멘트와 비례적인 관계임을 알 수 있다.

Fig. 16은 주기가 9초인 경우 함체의 강성변화에 따른 보 G2부재의 모멘트와 함체의 최대 곡률을 비교한 그래프로써 함체의 강성이 커짐에 따라 G2부재의 모멘트와 함체의 최대 곡률이 반비례하는 것을 알 수 있다.

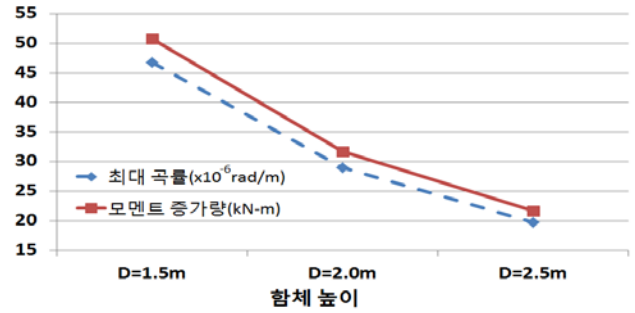


Fig. 16 Curvature and moment according to the variation of stiffness

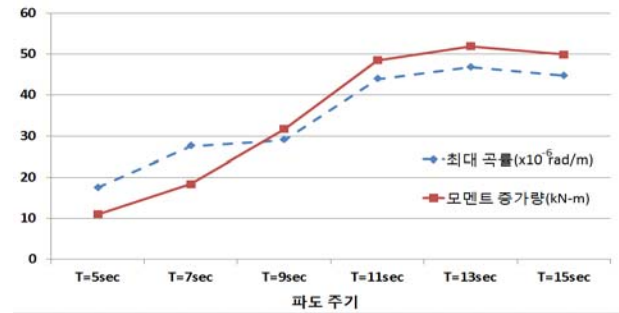


Fig. 17 Curvature and moment according to the increasing wave period

Fig. 17은 함체의 높이가 2.0m 일 때 파도주기에 따른 G2부재의 모멘트 증가량과 최대 곡률을 비교한 그래프로써 파도주기가 길어짐에 따라 모멘트 증가량과 최대 곡률이 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

5.2 위상각에 따른 함체의 곡률과 상부 구조물 모멘트 분석

위상각의 변화에 따른 함체의 곡률과 상부 구조물 G1, G2 부재의 모멘트 변화를 Fig. 18과 Fig. 19에 도시하였다.

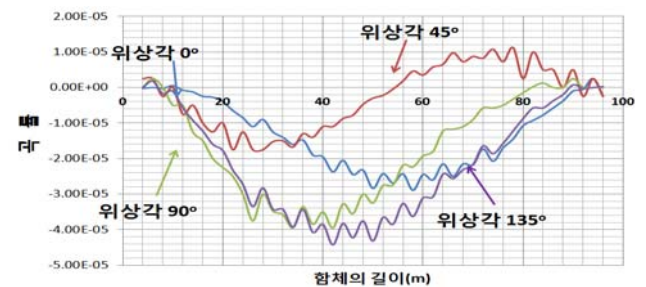


Fig. 18 Curvature graph according to the phase angle

Fig. 18은 함체 높이가 2.0m이고, 파도주기가 9초인 경우 위상각에 따른 함체의 곡률을 나타낸 그래프이다. 위상각이 135°일 때 곡률 값이 가장 크게 나타났고 45°일 때로 가장 작게 나타났다.

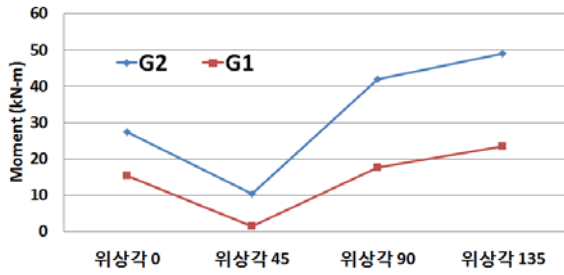


Fig. 19 Moment variation of G1, G2 according to the phase angle

Fig. 19는 Fig. 18의 동일한 모델에 대하여 위상각에 따른 보 G1, G2부재의 모멘트 증가량을 나타낸 그래프로써 위상각이 135°일 때 G1, G2부재의 모멘트가 가장 크고 45°일 때 가장 작게 나타났다.

Fig. 18과 Fig. 19를 비교해 보면 파도의 위상각에 따라 함체 곡률이 최대인 지점에서 보 G1, G2부재의 모멘트가 최대가 된다. 즉, 함체의 곡률과 보의 모멘트가 비례하는 것을 알 수 있다.

5.3 상관관계 분석

함체의 강성 변화에 따라 함체의 곡률과 상부 구조물 보와 기둥의 모멘트 관계를 확인하기 위해 파도주기와 위상각 변화에 따른 해석 결과를 Fig. 20 과 Fig. 21에 도시하였다.

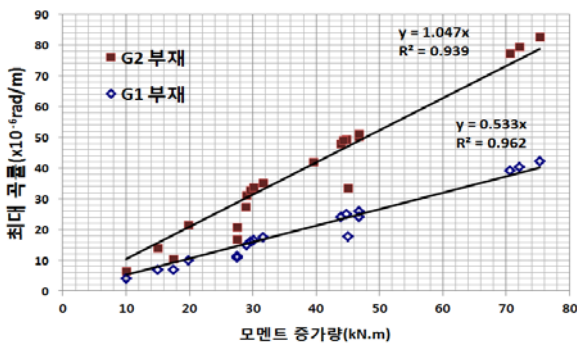


Fig. 20 Curvature and G1, G2 moment correlations

Fig. 20은 Table 2의 함체높이에 따른 함체의 최대 곡률, 상부 구조물의 G1, G2부재의 모멘트 증가량과 Fig. 18과 Fig. 19의 위상각의 따른 함체 최대 곡률과 보 G1, G2부재 모멘트 증가량을 모두 포함하여 나타낸 그래프이다. 직선은 원점을 지나도록 회귀분석한 것이다. G1과 G2 모두 선형적인 관계를 보여주고 있다. G1과 G2의 추세선의 R-제곱근의 값이 1에 근사한 각각 0.96, 0.94이다. R-제곱값은 결정계수로서 1에 가까울수록 신뢰 할 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 21은 Table 3의 함체높이에 따른 함체의 최대 곡률, 상부 구조물 C1, C2부재 모멘트 증가량과 위상각의 따른 함체 최대 곡률과 기둥 C1, C2부재 모멘트 증가량을 모두 포함하여

나타낸 그래프이다. Fig. 20과 같이 C1과 C2일 때 모두 두 인자간의 약간의 오차는 있으나 선형적인 관계에 있음을 알 수 있다. 또한 추세선의 R-제곱근의 값이 C1과 C2의 경우 각각 0.94, 0.93이 나왔다.

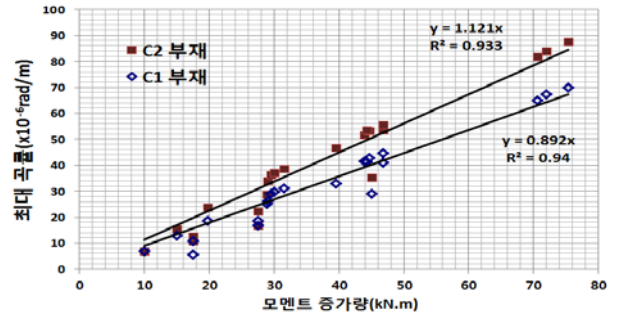


Fig. 21 Curvature and C1, C2 moment correlations

파도주기 변화에 따른 RAO-피치와 함체의 높이변화에 따른 보 G2부재의 모멘트 증가량에 대한 상관관계를 파악하기 위해 Fig. 4의 파도주기 증가에 따른 RAO-피치와 함체 높이 변화에 따른 G2부재의 모멘트 증가량과의 관계를 Fig. 22에 도시하였다.

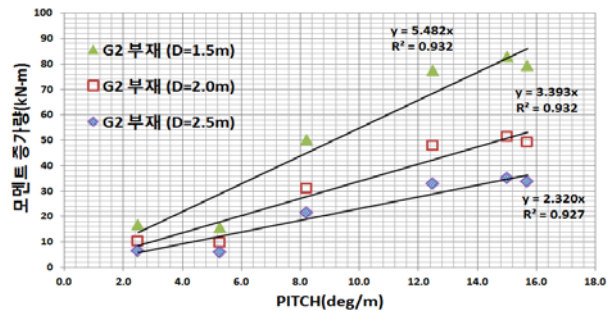


Fig. 22 PITCH and ext. Girder correlations

함체의 높이 1.5m, 2.0m, 2.5m의 R-제곱근 값이 0.932, 0.932, 0.927로 산정되어 RAO-피치와 함체 높이에 따른 G2부재의 모멘트 증가량 또한 선형적인 관계도가 높음을 알 수 있다.

함체의 강성과 곡률과의 관계를 확인하기 위해 Fig. 23에 함체의 강성비의 역수와 곡률비의 관계를 도시하였다. 함체의 강성은 Fig. 1과 같은 함체의 길이방향의 양단부를 단순보와 같이 구속한 구조해석 모델로 지지조건을 변경하고 중앙에 단위하중을 작용하였을 때 중앙점에서의 수직 변위값의 역수로 취하였다. Table 5와 같이 함체의 높이가 1.5m인 경우, 함체만의 휨강성에 비하여 상부골조가 있는 강성은 15.7%가 증가하고, 2m의 경우는 9.4% 증가하고 2.5m의 경우는 6.2%로 증가하였다. Table 5의 강성비는 1.5m의 함체를 기준으로 한 상대 강성비로 2.0m 인 경우 1.79, 2.5m 인 경우 2.81로 산정되었다.

Table 5 Bending stiffness of pontoon and frame

함체 높이 D(m)	(1) = 함체만 있는 경우 강성 (kN/m)	(2) = 함체 + 상부골조 강성 (kN/m)	(3) = $\frac{(2)}{(1)} - 1$ (%)	(4) = (2)열의 강성비
1.5	1.51E+04	1.75E+04	15.7%	0.596
2.0	2.68E+04	2.93E+04	9.4%	1.000
2.5	4.18E+04	4.44E+04	6.2%	1.516

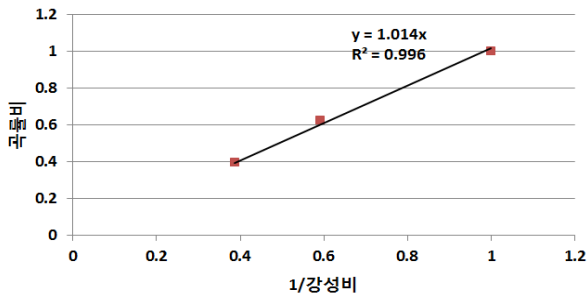


Fig. 23 Stiffness ratio and curvature ratio correlations

Fig. 23에서 함체 1.5m, 2.0m, 2.5m의 강성비가 1.0, 1.69, 2.98로 계산되어 이 값들을 역수로 취하고, Table 2에서 함체 높이와 파도 주기 증가에 따른 함체 곡률비의 평균값을 구하여 두 인자간의 상관관계를 나타냈다. Fig. 23에서 보듯이 함체 높이에 따른 강성비의 역수와 곡률비가 선형적인 관계에 있음을 알 수 있고 R-제곱근의 값이 1의 근사한 0.996으로 나타났다.

따라서 플로팅 구조물 설계시 일반적인 범위의 함체의 높이와 파랑주기의 범위에서 함체의 강성비의 역수는 곡률과 선형의 관계를 나타내고 있으며, 곡률과 상부골조의 모멘트의 증가량도 역시 높은 선형 비례의 관계를 보이고 있다.

5.4 분석결과의 설계 적용

플로팅 구조물 해석은 구조물의 크기 및 높이, 파도 주기, 위상각 등 여러 인자들을 고려하여 3장의 유동체 해석과 4장의 구조해석을 수행하여야 하기 때문에 많은 시간이 소요된다. 앞 절의 상관관계 분석 결과, 함체높이에 따른 상부 구조물 보와 기둥 부재의 모멘트 증가량, RAO-피치 그리고 함체의 강성비의 관계가 선형적임을 알았다. 이러한 선형 관계 특성을 이용하여 파도주기와 플로팅 함체 높이 변화에 따라 모든 해석을 수행 하지 않고서도, 함체의 강성이 다른 상부골조의 모멘트를 다음과 같이 추정할 수 있다.

단계 1. 기준 구조물의 RAO-피치, 정적하중의 모멘트 $M_{r,s}$, 각 주기별 동적하중에 의한 모멘트 $M_{r,T}$, 구조물의 휨강성 K_f 을 구한다.

단계 2. 기준 구조물의 최대 RAO-피치에서의 각 부재 그룹별 $m_e = (\text{모멘트증가량}/\text{RAO-피치})$ 를 구한다. 여기서 e 는 부재 그룹을 나타내는 것으로 외부보, 내부보, 외부기둥, 내부

기둥과 같이 동일한 하중패턴을 받는 그룹을 의미한다.

단계 3. 구하고자 하는 구조체의 휨강성 K_f 을 구하고 강성비 r_k 를 식 (2)와 같이 계산한다.

$$r_k = K_f / K_r \tag{2}$$

단계 4. 구하고자 하는 구조체의 RAO-피치(단, 함체의 높이만 증가하는 경우에 RAO-피치는 거의 유사하므로 기준 구조물의 값을 그대로 사용 가능함)를 이용하여 구하고자 하는 주기별 구조체의 각 부재의 예측 모멘트 $pM_{e,T}$ 는 식 (3)과 같다.

$$pM_{e,T} = M_{r,s} + m_e (\text{해당주기 RAO-피치}) / r_k \tag{3}$$

이러한 추정식과 그에 따른 절차의 정확도를 다음과 같이 검증하였다. 함체 높이 2.0m 일 때를 기준으로 하여 함체의 높이가 1.5m와 2.5m로 변할 때 각 부재의 모멘트를 예측하여 Table 6과 Table 7에 나타내었다. 그림 4에서 기준 모델 함체 높이 2.0m의 RAO-피치 최대값이 주기 15초에서 발생하였으므로 이 주기 15초에 대한 각 부재별 모멘트 증가량(Table 2와 Table 3 참조)을 산정하였다. 예를 들어, G2부재의 $m_e = (284.9 - 235.6) / 15.7 = 3.1$ 과 같다.

Table 6에서 함체의 높이가 1.5m로 변화할 때의 각 부재의 모멘트 증가량을 추정된 값과 구조 해석에 의해 계산된 모멘트 증가량 값과의 오차를 정리하였다. 단, 사용한 함체의 강성비 r_k 는 Table 5의 값을 사용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 RAO-피치는 함체높이 2.0m의 값을 이용하였다. G1와 G2보의 경우 오차율이 5.4% 이내로 나타나 매우 정확함을 알 수 있었다. 외부 기둥 C2의 경우는 최대 오차율이 10.4%이고, 내부 기둥 C1의 경우는 17.2%로 더 크게 나타났다. 그러나 내부 기둥은 모멘트가 크게 작용하지 않는 부재이므로 단면의 크기를 결정하는 요인이 수직 축하중임을 감안하면 오차율 17.2%는 큰 문제가 되지 않는다.

Table 7은 함체의 높이가 2.5m로 변화할 때의 각 부재의 모멘트 증가량을 추정된 값으로 Table 6과 거의 비슷한 양상을 나타내었다. 보의 경우 최대 오차율은 3.3%로 나타나 매우 정확함을 알 수 있었다. 외부 기둥 C2의 경우는 최대 오차율이 9.9%이고, 내부 기둥 C1의 경우는 24.6%로 더 크게 나타났다.

제안된 추정방법을 이용하여 함체 높이가 다른 경우에 상부골조 각 부재의 모멘트를 Table 6과 Table 7에서 추정하고 비교한 결과, 보의 경우는 거의 해석값과 일치하였다. 외부기둥의 경우에 최대오차율이 10% 정도로 나타나, 보의 경우보다는 정확도가 떨어지지만 적절하게 예측함을 알 수 있었다. 내부기둥의 경우는 최대오차율이 25% 정도로 크게 발생하였으나, 내부 기둥에 발생하는 모멘트의 크기가 설계에 반영이 되지 않을 정도로 적기 때문에 오차율이 크게 문제가 되지 않는다. 참고로 축력은 정적하중의 값이 동적해석의 경우에도 크게 변화하지 않았음을 Fig. 14에서 이미 확인하였다. 따라서 제안된 상부골조의 모멘트를 추정하는 방법을 이용하여, 함체의 높이가 변화하는 경우에도 상부골조의 모멘트를 빠르고 정확하게

예측할 수 있다.

Table 6 Comparison of prediction with analysis for D=1.5m

	주기별 각 부재 모멘트 증가량 예측값			
	7sec	9sec	11sec	13sec
G1(kN·m)	237.1	244.9	256.4	263.1
G2(kN·m)	263.4	278.8	301.4	314.6
C1(kN·m)	28.4	41.7	61.4	72.8
C2(kN·m)	100.0	116.6	141.1	155.3
해석값 대비 예측값의 오차율				
G1(kN·m)	1.5%	0.9%	3.3%	0.1%
G2(kN·m)	2.1%	2.5%	5.4%	0.2%
C1(kN·m)	14.1%	7.7%	17.2%	1.7%
C2(kN·m)	4.9%	5.5%	10.4%	0.9%

Table 7 Comparison of prediction with analysis for D=2.5m

	주기별 각 부재 모멘트 증가량 예측값			
	7sec	9sec	11sec	13sec
G1(kN·m)	228.1	231.2	235.7	238.4
G2(kN·m)	246.5	252.6	261.5	266.7
C1(kN·m)	13.7	18.9	26.7	31.2
C2(kN·m)	81.7	88.3	97.9	103.5
해석값 대비 예측값의 오차율				
G1(kN·m)	1.2%	0.8%	2.0%	0.6%
G2(kN·m)	1.1%	1.6%	3.3%	0.8%
C1(kN·m)	19.4%	16.9%	24.6%	8.6%
C2(kN·m)	4.3%	5.9%	9.9%	3.3%

6. 결론

본 연구는 플로팅 함체와 철골모멘트연성골조의 상호 작용에 따른 골조의 응답특성을 확인하기 위한 것으로 동적유체해석과 구조 해석을 통하여 플로팅 함체의 높이를 1.5, 2.0, 2.5 m로 변화시키면서 파도주기 3초에서 15초까지 상부 골조의 부재에 발생하는 모멘트의 변화량을 고찰하였으며 그 결과는 다음과 같다.

파도의 위상각과 주기에 따라 플로팅 함체에 발생하는 수직 변위와 변형을 분석한 결과, 함체의 곡률이 상부 골조의 외부 및 내부의 보와 기둥의 모멘트 증가량과 선형적인 비례관계임을 확인하였다. 그러나 기둥에 있어서 함체 곡률의 변화에 따른 축력의 변화량이 거의 발생하지 않았다.

RAO-피치 그래프와 상부 골조의 모멘트 증가량 그래프가 선형적인 관계임을 볼 수 있었으며, 피치가 최대로 발생하는 파도 주기에서 상부골조의 모멘트 증가량이 최대로 나타났다

이러한 선형의 결과를 분석 종합하여, 임의의 함체높이를 기준 모델로 하고 이 기준 모델의 해석 결과를 이용하여 함체

높이가 다른 경우에도 상부 골조의 모멘트를 추정하는 절차를 제안하였다. 추정을 위한 변수로는 함체의 강성비와 RAO-피치를 이용하였다. 추정결과를 해석결과와 비교하였을 때 보의 경우에 최대 오차율이 5.4%, 외부기둥은 10.4% 이내로 해석값과 일치함을 볼 수 있었다. 내부기둥의 경우에는 최대 오차율이 24.6%로 크게 발생하였으나, 내부 기둥에 발생하는 모멘트의 크기가 설계에 반영이 되지 않을 정도로 적기 때문에 오차율이 크게 문제가 되지 않는다.

따라서 제안된 함체 상부골조의 모멘트를 추정하는 방법을 이용하면, 함체의 높이가 다른 경우에 추가해석을 수행하지 않고서도 상부골조의 모멘트를 신속하게 예측할 수 있다. 플로팅 구조물 해석은 구조물의 크기 및 높이, 파도 주기, 위상각 등 여러 인자들을 고려하여 유동체 해석, 그로부터 파력을 구하여 구조해석을 수행하므로 많은 시간이 소요되나, 초기설계시 본 연구의 추정방법을 이용하여 해석 시간을 단축할 수 있다.

후 기

본 논문은 2010년 국토해양부 기술연구개발의 지역기술 혁신 사업 (과제번호 : 10 지역기술혁신 B01)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김병완 외 4인(2006), “과량하중을 받는 부유체의 강성에 따른 응답 고찰”, 한국전산구조공학회 정기학술대회 논문집, pp.941~948
- [2] 문창호(2011), “플로팅 호텔의 건축계획에 대한 사례연구”, 한국해양학회 제35권 6호, pp.515~522
- [3] 송화철(2001), “과량하중을 받는 초대형 부유식 구조물 상부구조체의 정적해석법”, 한국강구조학회지, 제 13권 4호, pp.49~56
- [4] 해양수산부(2008), 초대형 부유식 해상구조물 기술개발 최종연구보고서, UCPM0139A-37-2
- [5] Wang, C. M. Watanabe, E. Utsunomiya T. (2008), Very Large Floating Structures, Talyor and Francis, pp.21~24

원고접수일 : 2012년 2월 15일

심사완료일 : 2012년 4월 18일

원고채택일 : 2012년 4월 18일