수치해석을 통한 콘크리트 부유구조체 길이에 따른 운동 및 구조성능 검토

이두호^{1)*} · 유영준¹⁾

¹⁾ 한국건설기술연구원 인프라구조연구실

Hydrodynamic Motion and Structural Performance of Concrete Floating Structure by Length Using Numerical Analysis

Du-Ho Lee^{1)*} and Young-Jun You¹⁾

¹⁾Korea Institute of Construction Technology, Structural Engineering Research Division, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT In the present study, numerical analysis was performed for hydrodynamic motion and structural performance on four different concrete floating structures, which have same cross-section but different length. The hydrodynamic analysis of floating structures is carried out using ANSYS AQWA with the different 34 wave load on regular wave period from three seconds to ten seconds in 35 m water depth. In order to evaluate structural performance of floating structures under the critical wave load which obtained from hydrodynamic analysis. The integrated analysis is also carried out through the mapping method, which can directly connect the wave-induced hydraulic pressure obtained from ANSYS AQWA to Finite Element Model in ANSYS Mechanical. As a results of this study, the hydrodynamic motion of floating structures is decreased as the length of structure increased. It means that the effect of wave-structure interaction is strongly dependent on the relationship between a wave period and a length of structure. Moreover, it is found that tension stress on bottom slab of floating structure is occurred by the critical wave load, the sectional force is not influenced by length of a structure.

Keywords : concrete floating structure, hydrodynamic motion, critical wave, structural performance, sectional force

1. 서 론

해상 LNG 터미널, 컨테이너 터미널, 석유생산 및 저장 시설 등과 같은 부유구조체는 파랑으로 인한, 파압 및 충격하중과 같은 험한 해양환경에 지속적으로 노출되어 있다. 이로 인해, 부유구조체는 파랑하중과 같은 해양환경 외력에 걸맞는 설계조건을 만족해야 한다.

또한, 콘크리트 부유구조체는 험한 해양 환경외력을 지탱할 수 있는 구조성능과 더불어 콘크리트라는 재료적 특성으로 인해 부유구조체의 사용기간 중 균열과 같은 영구적 손상을 허용해서는 안된다. 그러므로 부유구조체의 균열 및 파괴를 방지하기 위해서는 외부의 충격 에너지와 변형을 적절히 흡수 할 수 있어야 한다.^{1,2)} 이러한 설계조건을 충족시키기 위해 부유구조체는 해양환경외력인 파랑하중으로 인해 발생하는 휨 모멘트와 충격하중에 의한 전단력을 충분히 지탱할 수 있도록 우수한 구조성

능을 만족해야 한다.

부유구조체의 구조적 성능 검토를 위해서는 해양환경 외력인 파랑하중 하에서 부유구조체의 운동(hydrodynamic motion) 특성과 구조거동으로 인해 발생하는 단면력 검토가 요구된다. 이와 같은, 부유구조체의 구조적 성능의 해석적 검토 및 평가를 위한 운동 특성은 일반적으로 동수역학(hydrodynamic) 해석프로그램 AQWA, WAMIT 등에 의해 평가된다.³⁻⁵⁾ 또한, 기존의 부유구조체의 구조성능 평가는 동수역학해석을 통해 도출되는 RAOs(response amplitude operators)를 기반으로 한 부유구조체의 전반적인 전단력 및 휨모멘트를 구할 수 있다.⁶⁾ 하지만, 부유구조체의 전체적 구조성능 평가와 구조설계를 위해서는 상세한 단면력 검토가 필요하며, 기존의 방법을 활용하기에는 부족하다.

기존 동수역학해석에서는 부유구조체의 거동을 강체거동으로 가정하여 해석이 수행된다. 하지만, 실제 부유구조체의 경우 특성길이(characteristic length, λ_c)보다 큰 대형 부유구조체는 강체거동이 아닌 탄성거동을 나타내므로 동수역학해석에 의한 운동 특성과는 많은 차이를 나타내며, 이로 인해 부유구조체에 발생하는 단면력 조차도 정확도가 떨어지는 문제점이 있다.^{7,8)} 이를 해결하

*Corresponding author E-mail : ldh0067083@kict.re.kr

Received November 6, 2012, Revised March 27, 2013,

Accepted April 12, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

기 위해 특성길이보다 큰 초대형 부유구조체의 탄성거동을 고려하는 파랑운동 해석기법인 유탄성(hydroelastic) 해석 방법이 개발되었고, 유탄성 해석에 대한 연구도 활발히 진행되었다.^{9,10)} 하지만, 현시점까지는 자체 개발 프로그램(In-House Code)에 전적으로 의존하여 범용성이 현격히 떨어지는 실정이다. 그 외에도 동수역학 해석에 의한 실제의 파압 분포를 대신하여 가상의 간략한 파압모델을 이용하여 해석을 수행하는 유사정적해석 방법도 사용되고 있으나,^{11,12)} 구조거동 평가 측면에서 정확도가 떨어지는 문제점이 있다.

이 연구에서는 부유구조체의 단면강성이 동일하지만 구조물 길이가 서로 다른 4가지의 부유구조체에 대하여 설계과정에서 핵심적 사항인 운동 특성과 구조거동 특성을 수치해석을 통하여 검토하였다. 수치해석 수행방법은 동수역학해석 프로그램인 ANSYS AQWA를 통하여 파랑하중에 대한 부유구조체의 운동 특성을 검토하였으며, 구조물에 도입되는 파압을 도출하였다. 또한, 도출된 파압을 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS mechanical에 연계하여 파랑하중에 의한 구조거동해석을 통합적으로 수행하였다.

설치해역은 수심(d_w)이 비교적 얇은 연안을 대상으로 다수의 규칙 파랑하중에 대한 수치해석적 검토를 수행하였으며, 부유구조체 길이의 변화에 따른 운동 특성 및 구조성능을 검토하였다. 또한, 다수의 파랑하중에서 부유구조체에 가장 큰 운동을 발생시키는 파랑하중에 대하여 안정성 관점에서 위험 파랑하중을 선정하였으며, 선정된 위험 파랑하중에 대한 구조해석을 통하여 부유구조체의 구조성능을 검토하였다. 또한, 동일 파랑하중 하에서 부유구조체 길이가 구조적 성능에 미치는 영향을 비교분석하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델링

이 연구에서는 단면특성은 동일하나 부유구조체의 길이(L_s)가 서로 다른 4가지 대형 콘크리트 부유구조체를 대상으로 동수역학 해석을 수행하였다. 대상 부유구조체의 해석모델 개요는 Fig. 1에 나타내었으며, (a), (b)는 측면도 및 평면도를 나타낸다. 또한, 콘크리트 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 1(c)와 같이 대상 부유구조체의 폭(B_s)은 10 m이고, 높이(H_s)는 14 m로 4가지 해석모델이 동일하며, 단면체원은 콘크리트 부유구조체 단면 설계체원을 바탕으로 하였다.¹³⁾ 하지만, 부유구조체의 길이(L_s)는 100 m, 200 m, 300 m 및 400 m로 각각 다르며, Table 2에 4가지 해석모델의 상세를 나타내었다. 실제 부유구조체의 설계 및 시공시에는 구조물의 길이가 증가할수록 슬래브의 처짐을 예방 및 축력에 대한 대처를 위해 내벽이 필요하지만, 이 연구에서는 부유구조체의 전체 구조거동

만을 검토하기 때문에 내벽을 무시한 해석을 수행하였다.

대상 부유구조체의 설치해역은 수심(d_w)이 35 m인 비교적 얇은 연안을 배경으로 하였다. 부유구조체에 작용하는 환경외력인 파랑하중의 주기는 설치해역에서 빈번히 발생할 수 있는 파랑주기 3초~10초사이 34개의 규칙파(regular wave)이다. 해석조건의 파랑하중에서 최소 단주기파는 3초이며, 3초는 수심 35 m의 해역에서 약 14.1 m의 파장을 나타낸다. 또한, 최장주기파는 10초이고, 파장은 약 142.5 m이다. 또한, Fig. 1(b)의 파랑 입사각(β)은 0° 일 때만 고려하였으며, 다방향이 아닌 일방향에 대한

Fig. 1 Outline of analysis model

Table 1 Material property

Concrete	Compressive strength (MPa)	40.00
	Tensile strength (MPa)	3.98
	Unit weight (kN/m ³)	24.00
	Young's module (MPa)	33863
	Poissons ratio	0.18
Sea water	Unit weight (kN/m ³)	10.06

Table 2 Analysis model

Remark	Length (L _s) (m)	Breadth (B _s) (m)	Height (H _s) (m)	Draft (d) (m)
FS100	100	10	14	7.7
FS200	200	10	14	7.7
FS300	300	10	14	7.7
FS400	400	10	14	7.7

여 해석을 수행하였다.

부유구조체의 운동 및 단면력 검토를 위하여 동수역학 해석 및 유한요소해석을 수행하였으며, 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 13.0 및 AQWA를 이용하였다. 콘크리트 부유구조체는 3D Shell 요소를 이용하여 모델링하였다. 또한, 이 연구에서는 부유구조체 자체의 운동 특성 및 구조성능 검토를 위하여 부유구조체의 계류시스템은 고려하지 않았다. 또한, 부유구조체의 대표 계류시스템 중 현수선(catenary) 방식은 drift motion을 제어하기 위한 수단이며, 부유구조체의 6자유도 운동에 미치는 영향이 미소한 것을 알고 있다.

2.2 부유구조체의 운동특성 검토

파랑주기 3초~10초의 34가지 파랑하중에 대한 동수역학 해석을 수행하였으며, 파랑 입사각이 0°일 때 부유구조체에 발생하는 6자유도 운동 중 전후동요(surge, x방향), 상하동요(heave, z방향)의 병진운동과 종동요(pitch, ry방향)의 회전운동에 대한 부유구조체의 RAOs를 검토하였다. 또한, 부유구조체에 파랑하중으로 인해 발생하는 파랑기진력(excitation force), 부가질량(added mass), 방사감쇠(radiation damping)에 대한 영향을 검토하였다.

Fig. 2는 길이가 서로 다른 4가지 부유구조체에 도입되는 입사파에 의한 파랑기진력을 나타낸다. 파력은 부유구조체의 운동인 RAOs에 비례한다. 즉, 입사파에 의한 파력이 증가할수록 부유구조체의 응답진폭이 증가한다는 것이다. Fig. 2(a) 전후동요 파랑기진력의 경우는 각각의 해석모델에서 파랑주기가 증가함에 따라 파랑기진력이 증가 및 감소를 반복하는 복잡한 파형 모양을 나타낸다. 모든 해석모델에서 파랑주기와는 일정한 규칙성을 나타내지 않으나, 부유구조체 길이가 증가할수록 파랑기진력 파형의 최대값(peak point)의 갯수가 감소한다. 또한, 파랑주기가 증가할수록 파형모양 그래프의 최대값(peak point)은 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2(b)는 상하동요의 파랑기진력을 나타내며, 전후동요의 파랑기진력에 비해 파랑주기 6초 이상의 장주기파에서는 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 파랑주기가 6초 이하의 단주기파에서는 파력이 0에 가까운 미소한 값을 나타낸다. 또한, 각 해석모델의 결과 그래프는 전후동요와 마찬가지로 일정하게 증가하거나 감소함이 없이 파랑주기가 증가할수록 증가와 감소를 반복하는 파형의 형태를 나타낸다. 파랑주기가 증가할수록 파형 그래프의 최대값이 증가하는 것을 알 수 있다. 파랑주기 8초 이상에서 파랑기진력이 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 파랑주기 3초~10초에서는 해석모델 FS200의 경우에 최대 파랑기진력이 도입되는 것을 알 수 있다.

Fig. 2(c)는 종동요의 파랑기진력 모멘트(moment)를 나타내며, 전후동요와 상하동요 파력의 복합적 영향으로 발생하는 y축을 기준으로 하는 회전운동을 유발하는 파

력 모멘트이다. Fig. 2(c)와 같이 그래프의 전체적 형상은 상하동요의 파랑기진력과 유사한 형상을 나타낸다. 이것은 종동요 파력 모멘트는 전후동요 파랑기진력에 비해 상하동요 파랑기진력의 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 또한, 모든 해석모델이 파랑주기가 증가할수록 그래프 최대값이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 해석모델 FS100과 FS200 경우는 다른 해석모델에 비해 작은 값의 파력 모멘트를 나타내며, 이것은 부유구조체의 길이가 증가할수록 파력모멘트도 증가하는 것으로 판단된다.

파랑하중으로 인해 부유구조체에 발생한 운동으로 발

(a) Surge

(b) Heave

(c) Pitch

Fig. 2 Excitation force

생되는 방사감쇠는 Fig. 3과 같으며, (a)와 (b)는 전후동요와 상하동요일 때 방사감쇠를 각각 나타내었다. Fig. 3(a)는 전후동요의 방사감쇠를 나타낸다. 각각의 해석모델의 경우 전후동요에 대한 수선면적은 모두 일치하는 것을 알 수 있다. 이로 인해, Fig. 3(a)와 같이 부유구조체의 길이와 파랑하중으로 인해 부유구조체에 발생한 운동으로 발생하는 방사감쇠는 Fig. 3과 같으며, (a)와 (b)는 전후동요와 상하동요일 때 방사감쇠를 각각 나타내었다. Fig. 3(a)는 전후동요의 방사감쇠를 나타낸다. 각각의 해석모델의 경우 전후동요에 대한 수선면적은 모두 일치하는 것을 알 수 있다. 이로 인해, Fig. 3(a)와 같이 부유구조체의 길이와는 관계없이 모든 해석모델에서 거의 유사한 감쇠력을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 파랑주기 4초에서 가장 큰 감쇠력을 나타내며, 4초 이후로 파랑주기가 증가할수록 점차 감쇠력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 파랑주기 3초~4초사이의 단주기파에서 감쇠력이 증가되며, 4초 이상의 파랑주기에서는 감쇠력이 감소한다. 또한, 파랑주기 10초이상의 장주기파가 재하될 경우 부유구조체에 감쇠력이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

상하동요의 방사감쇠는 Fig. 3(b)에 나타내었다. 상하동요의 방사감쇠의 경우 전후동요와는 다르게 파랑주기가 증가할수록 감쇠력이 증가하는 것을 알 수 있다. 파랑주기 5초 이상에서 감쇠력 증가율(감쇠력 증가치/주기)이 증가하는 것을 알 수 있으며, 약 8초에서는 증가율이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 부유구조체의 길이가 증가할수록 감쇠력 증가율의 증가 및 감소가 더 크게 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 부유구조체의 길이가 최소인 해석모델 FS100에서 가장 낮은 감쇠력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 부유구조체의 길이가 증가할수록 감쇠력이 증가하는 것을 알 수 있으며, 부유구조체 길이가 최대인 해석모델 FS400의 경우 다른 해석모델에 비해 파랑주기가 증가할수록 가장 급격하게 감쇠력이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 길이가 길어질수록 상하동요의 수선면적이 증가하며, 이로 인해 감쇠력도 증가하는 것으로 판단된다.

부유구조체의 운동으로 인해 발생하는 부가질량은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 전후동요 부가질량을 나타내며, Fig. 4(b)는 상하동요 부가질량을 나타낸다. Fig. 4(a) 전후동요의 부가질량은 방사감쇠와 같이 부유구조체의 길이에 관계없이 유사한 값을 나타낸다. 이것은 전후동요의 수선면적이 일정하기 때문인 것으로 판단된다. 전후동요의 부가질량의 경우 파랑주기가 7초까지 증가하는 경향을 나타내며, 그 이상의 장주기파에서는 부가질량이 거의 일정하게 유지되거나 감소하는 것을 알 수 있다.

상하동요의 부가질량은 Fig. 4와 같이 가장 단주기인 3초에서 최대값을 나타낸다. 또한, 파랑주기가 증가할수록 부가질량이 감소하는 것을 알 수 있으며, 부가질량의 감

(a) Surge

(b) Heave

Fig. 3 Radiation damping

(a) Surge

(b) Heave

Fig. 4 Added mass

소량은 크지 않다. 또한, 부유구조체의 길이가 증가할수록 부가질량도 증가하고, 파랑주기의 증가에 따른 부가질량 감소량도 증가하는 것을 알 수 있다.

앞에서 나타난 유체동역학적 힘인 파랑기진력, 방사감쇠 및 부가질량을 바탕으로 하여 부유구조체의 운동특성인 RAOs를 검토하였다. 또한, 파랑입사각 0°일 때 부유구조체의 6자유도 운동 중 중요 운동 특성을 나타내는 전후동요(surge), 상하동요(heave) 및 종동요(pitch)에 대하여 운동 특성을 검토하였다. Fig. 5는 대상 부유구조체인 4가지 해석모델의 파랑주기에 따른 전후동요, 상하동요 및 종동요의 RAOs를 나타내었다.

Fig. 5(a)는 전후동요 RAOs를 나타낸다. 4가지 해석모델 모두 파형의 그래프 형상을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 파랑주기가 증가할수록 부유구조체의 응답진폭이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)에서 알 수 있는 것과 같이 전후동요 RAOs의 경우는 부유구조체의 길이가 가장 짧은 해석모델 FS100에서 가장 큰 응답진폭을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, FS100을 제외한 3가지 해석모델의 경우는 파랑주기 6초 이하의 단주기 파랑하중에서 전후동요 응답진폭의 변화가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, 이것은 6초 이하의 단주기파에서는 200 m 이상의 부유구조체의 전후동요 RAOs에 거의 영향이 미치지 않는 것을 알 수 있다. 각각의 해석모델의 3가지 방향에 대하여 최대 응답진폭을 나타내는 파랑주기를 Table 3에 정리하였다. 이 파랑하중은 대상해역인 연안에서 발생하는 규칙파 중에서 부유구조체 운동에 가장 영향을 미치는 위험 파랑하중으로 선정하였으며, 부유구조체의 구조성능 검토를 위한 파랑하중이다.

부유구조체의 상하동요 RAOs는 Fig. 5(b)에 나타내었다. 파랑주기 6초 이하의 단주기파에서 모든 해석모델의 상하동요 응답진폭값이 미소하게 나타나는 것을 알 수 있다. 해석모델 FS100의 경우 파랑주기 6초 이상에서 부유구조체의 운동이 급격히 증가하며, 7초에서 상하동요의 최대값을 나타낸다. 부유구조체 상하동요 RAOs는 구조물의 길이가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 2(b)에서 알 수 있는 것과 같이 상하동요에 대한 파력은 길이차에 상관없이 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 3과 4에서 부유구조체의 길이가 증가할수록 상하동요의 방사감쇠는 증가하고 부가질량도 증가하는 것을 알 수 있으며, 복합적으로 상하동요의 수선면적이 증가하므로 최종적인 운동특성인 상하동요 RAOs가 감소하는 것으로 사료된다.

부유구조체의 회전운동이며, 부유구조체의 상하슬래브에 발생하는 휨응력에 직접적인 영향인 종동요 RAOs는 Fig. 5(c)에 나타내었다. 부유구조체의 길이가 길어질수록 RAOs가 작은값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)와 같이 해석모델 FS100 일 때 다른 해석모델에 비해 파랑주기 7초 이상부터 매우 큰 회전운동을 나타낸다. 또한, 파랑주기 8.20초에서 종동요 RAOs의 최대값을 나타

내며, 그 이후 파랑주기가 증가할수록 점차 종동요 응답진폭은 감소하는 것을 알 수 있다. 해석모델 FS300과 FS400의 경우는 미소한 종동요 RAOs를 나타낸다. 이것은 전후동요 및 상하동요의 RAOs와 같이 부유구조체의

(a) Surge

(b) Heave

(c) Pitch

Fig. 5 RAOs of analysis model

Table 3 Critical wave

Model	Wave period		
	Surge	Heave	Pitch
FS100	9.85s	7.02s	8.20s
FS200	9.85s	7.02s	8.20s
FS300	9.23s	7.37s	7.02s
FS400	8.68s	8.68s	7.02s

길이가 증가할수록 파랑운동 영향이 감소하며, 이로 인해 중동요 RAOs도 미소한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

지금까지 파랑주기 3초~10초의 파랑하중에 대한 부유구조체의 운동 특성을 검토하였다. 또한, 각 방향의 운동에서 가장 큰 응답진폭을 나타내는 파랑주기를 구하였으며, 이와 같은 파랑하중을 위험 파랑하중으로 선정하였다. 즉, Table 3과 같이 하나의 해석모델인 부유구조체에 3가지의 위험 파랑하중을 선정하였으며, 선정된 위험 파랑하중에 대한 부유구조체의 구조성능 검토를 수행하였다. 부유구조체의 구조성능검토는 선정된 3가지 위험 파랑하중에 대하여 각각 위상각에 따른 파압을 외력으로 매핑(mapping)하여 부유구조체의 하부슬래브에 발생하는 단면력인 휨응력검토를 수행하였다.

2.3 부유구조체의 구조성능 검토

2.3.1 파랑운동-구조거동 통합해석

이 연구에서 수행된 AQWA-ANSYS 연계에 의한 파랑하중을 받는 부유구조체의 파랑운동-구조거동 통합해석 흐름도는 Fig. 6에 나타내었다. 1단계에서는, 대상 부유구조체의 구조해석 모델링을 실시한다. 구조해석 모델링은 부유구조체를 구성하는 부재를 포함한다. 구조해석 모델링을 바탕으로 구조해석 메쉬(mesh)를 생성하고 질량(mass), 관성(inertia) 등 부유구조체의 물리적 정보를 생성한다.

2단계에서는, 동수역학(hydrodynamic) 해석을 위한 모델링을 실시한다. 수면 위·아래의 요소를 나누어 수면 아래의 회절요소(diffraction element)를 생성한다. 1단계의 구조해석 모델로부터 생성된 관성, 질량 등의 부유구조체에 대한 물리적 정보를 추가한다. 동수역학해석에서 파랑하중에 따른 부유구조체의 파압은 관성력과 균형이

맞아야 하고 해석 모델의 관성력은 질량행렬과 관성행렬을 기준으로 계산되므로, 동수역학해석 모델과 구조해석 모델 사이의 질량과 관성을 일치시켜주는 것이 중요하다. 3단계에서는 2단계에서의 동수역학해석 모델과 입력된 파랑하중에 대해 동수역학 해석을 수행하고, 해석 결과인 부유구조체 운동과 파압 분포를 산출한다.

4단계에서는 3단계 동수역학 해석으로부터 산출된 파압을 1단계에서 생성된 구조해석 모델에 외적하중으로 작용시키는 파압 매핑(mapping)을 수행한다. 이 연구에서의 파압 매핑은 ANSYS Inc.에서 제공하는 workbench 인터페이스를 이용하여 정확하고 효율적으로 수행되었다. 5단계에서는 4단계에서 외적하중으로 작용된 파압에 대해 부유구조체의 구조해석을 실시하고, 파랑하중하에서의 부재별 단면력을 산출한다.

2.3.2 부유구조체의 단면력 검토

콘크리트 부유구조체의 경우 콘크리트 재료적 특성으로 인해 부유구조체에 발생하는 단면력 검토는 하나의 중요사안이라고 말할 수 있다. 부유구조체의 단면력 발생으로 인한 균열의 발생은 안전성(safety) 및 사용성(serviceability)에 큰 영향을 미치기 때문이다. 이로 인해 이 연구에서는 재하되는 파랑하중으로 인해 발생하는 파압을 외력으로 한 부유구조체의 정적구조해석을 수행하였으며, 부유구조체의 단면력을 검토하였다. 해양환경조건에 노출된 콘크리트 부유구조체의 경우 모든 위치에서 균열이 위험하지만, 특히 수중에 잠겨있는 홀수 이하의 구조물인 하부슬래브 및 외벽의 성능 및 균열 검토는 필히 이루어져야 한다. 콘크리트 성능 및 균열에 직접적으로 영향을 주는 단면력인 휨응력에 대한 검토가 필요한 이유이기도 하다.

앞에서 각 해석모델의 전후동요, 상하동요 및 중동요 RAOs를 각각 검토하였으며, 각 운동 특성에서 최대값을 나타내는 파랑주기를 위험 파랑하중을 선정하였다. 또한, Table 3과 같이 하나의 해석모델에 각각 3가지의 위험 파랑하중을 선정하였다. 위험 파랑하중 재하로 인해 부유구조체에 도입되는 파압을 통합해석 과정을 통하여 구조거동해석을 수행하였다. 구조거동해석의 경우 동수역학해석과는 다른 정적하중해석이다. 파랑하중과 같은 시간에 따른 동적하중을 정적하중으로 표현하기 위해서는 파랑하중의 각 위상각(phase angle)에서의 파압을 도출한 후 개별적으로 해석을 수행하여야 한다. 조금은 복잡한 해석 과정이지만, 더 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 위상각을 작게 나누어 해석을 수행하여야 한다.

이 연구에서는 Fig. 7과 같은 규칙 사인파의 위상각 $0 \sim \pi$ 를 8등분 하여 22.5° 로 나누어 파압을 매핑하였으며, 위상각 $\pi \sim 2\pi$ 의 파압은 $0 \sim \pi$ 로 인해 발생하는 파압과 방향만 반대이며 같은 값을 나타낸다. 이로 인해 Fig. 7에 나타난 위상각에 대해서만 단면력을 도출한 후, 부호가 반대인 단면력을 함께 검토하였다. 또한, 파랑하중으로

Fig. 6 Integrated analysis of hydrodynamic motion and structural behavior

도입되는 파압을 검토하기 위해서는 Fig. 7의 파고(H_w)가 필요하며, 파고는 유의파고($H_{1/3}$)를 3.0 m로 하는 설계파고(H_D) 5.4 m로 하였다.

Fig. 8은 부유구조체의 길이가 100 m인 해석모델 FS100의 위험 파랑하중에 따른 하부슬래브 단면력 분포를 나타내었으며, 각각의 위험파랑하중에 대하여 8개의 위상각 중 최대 단면력이 발생하는 하나의 위상각에 대한 단면력을 그래프에 나타내었다. 부유구조체의 길이를 나타내는 x축은 구조물 전체 길이로 나뉘서 무차원화 하였으며, 이것은 각각의 해석모델의 경우 길이가 일정하지 않으므로 무차원화하여 비교분석이 쉽게 하였다. Fig. 8은 3가지 위험 파랑하중으로 발생하는 하부슬래브의 휨응력 분포이며, Fig. 8과 같이 부유구조체의 선수부 및 선미부 10% 지점에서 최대의 단면력이 발생한다. 파랑주기 8.20초의 경우 선수부에서 최대의 인장응력이 발생하며, 그 크기는 부유구조체의 재료적 특성인 콘크리트 인장강도보다 작은 약 1 MPa의 인장응력이 발생한다. 또한, 부유구조체의 양단부를 제외한 모든 부분에서는 0에 가까운 단면력이 발생한다. 이와 같이 해석모델 FS100의 경우는 부유구조체의 양단부의 휨모멘트의 크기를 낮추는 연결시스템 및 보강으로 인한 조치가 필요할 것으로 사료되며, 이로 인해 부유구조체 중앙부에서는 더욱 경제적인 설계가 이루어질 것으로 판단된다.

해석모델 FS200의 위험 파랑주기 8.20초, 7.02초 및 9.85초에 대한 단면력 분포는 Fig. 9와 같다. 파랑주기 9.85초의 경우 부유구조체 하부슬래브에서 최대 인장응력이 발생하며, 그 크기는 다른 파랑주기에 의해 발생하는 인장응력의 약 4배 이상의 인장응력이 부유구조체의

Fig. 7 Wave phase angle

중앙부(50% 지점)에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 구조거동의 형상은 호깅모멘트에 의한 거동형상과 유사한 것을 알 수 있다. 이와 같은 구조거동으로 인한 단면력 감소를 위해서는 200 m의 부유구조체의 접합형식을 강체결합이 아닌 50%지점에 힌지결합으로 하여 휨모멘트의 집중을 예방하므로 중앙부에서 단면력을 감소할 수 있을 것으로 사료된다. 파랑주기 8.20초의 경우는 부유구조체의 50% 지점을 변곡점으로 하여 인장/압축의 단면력이 발생하는 것을 알 수 있다. 파랑주기 8.20초와 7.02초의 최대 인장응력은 비슷한 크기를 나타내고, 그 크기도 인장강도에 비해 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

부유구조체의 길이가 300 m인 해석모델 FS300의 하부슬래브 단면력은 Fig. 10에 나타내었다. 파랑주기 9.23초에서 가장 큰 단면력이 발생하는 것을 확인 하였다. 부유구조체의 30% 및 70% 지점에서 큰 인장응력이 발생하며, 30% 지점에서 약 1.98 MPa의 최대인장응력이 발생한다. 파랑주기 7.37초의 경우는 포물선 형태의 인장응력이 발생하며, 최대 약 0.97 MPa의 인장응력이 발생한다. 가장 파랑주기가 짧은 7.02초의 경우는 위의 두가지 파랑하중 결과에 비해 미소한 인장응력인 약 0.4 MPa가 발생한다. 또한, 부유구조체의 전구간에 걸쳐 유사한 크기의 인장응력을 발생하며, 70% 지점 부터는 미소한 압축응력이 발생한다.

Fig. 9 Sectional stress of FS200 bottom slab

Fig. 8 Sectional stress of FS100 bottom slab

Fig. 10 Sectional stress of FS300 bottom slab

해석모델 FS400의 하부슬래브 단면력은 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11과 같이 2가지 파랑하중에 부유구조체의 전구간에 걸쳐 인장거동을 나타내는 것을 알 수 있으며, 파랑주기 8.68초일 때 부유구조체 50% 지점에서 약 2 MPa의 최대인장응력이 발생한다. 또한, 파랑주기 7.02초의 경우는 부유구조체의 40% 지점에서 최대값을 나타내며, 약 0.6 MPa인 것을 알 수 있다.

2.3.3 부유구조체 길이에 따른 단면력 검토

위험 파랑하중에 따른 각각의 해석모델에 발생하는 단면력을 검토하였으며, 동일한 파랑하중에 대한 부유구조체의 길이의 영향을 검토하였다. Fig. 12는 파랑주기 7.02초의 위상각 0°인 경우에 부유구조체의 길이의 변화에 따른 단면력 변화를 비교분석하였다. 파랑주기 7.02초의 파장은 76.5 m 이다.

Fig. 12와 같이 해석모델 FS100의 경우 선수부 및 선미부에서 약 0.30 MPa 최대의 인장응력이 발생하며, 다른 구간에서는 0.20 MPa 미만의 압축응력이 발생한다. 해석모델 FS200은 부유구조체 50%지점에서 약 0.5 MPa 최대 인장응력이 발생한다. 또한, 부유구조체의 전구간에 걸쳐 인장거동을 보이거나, 양단부에서 압축응력이 발생한다. 해석모델 FS300과 FS400의 경우는 부유구조체 전구간이 압축거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 해석모델 FS300

Fig. 11 Sectional stress of FS400 bottom slab

Fig. 12 Sectional stress by structure length

의 경우 선수부에서 약 0.4 MPa의 압축응력을 나타내며, 해석모델 FS400은 부유구조체 40% 지점에서 약 0.6 MPa의 압축응력이 발생한다. 이와 같은 해석 결과를 바탕으로 할 때, 부유구조체의 길이와 단면력은 상관성을 나타내지 않으며, 발생하는 단면력 또한 콘크리트 인장강도에 못미치는 미소한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

이 연구에서는 부유구조체의 연결부를 고려하지 않았으며, 전 구간이 강체연결 된 하나의 구조물로 보고 해석을 수행하였다. 하지만, 현실에서는 부유구조체의 길이가 길어질수록 접합부가 형성되어야하며, 접합부의 특성으로 인해 부유구조체의 거동도 많은 영향을 받을 것으로 판단된다. 앞으로 여러 가지 접합부 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

3. 결 론

이 연구에서는 길이가 서로 다른 4개의 부유구조체에 대해서 수심이 35 m 설치해역에서 파랑주기 3초~10초의 34가지 파랑하중에 대한 운동특성을 검토하였으며, 부유구조체의 길이에 따른 영향을 검토하였다. 또한, 다수의 파랑하중을 통해 얻어진 운동 특성 중 부유구조체의 운동에 큰 영향을 미치는 위험 파랑하중을 선정하였다. 선정된 위험 파랑하중에 대한 부유구조체의 구조성능 검토를 수행하였으며, 부유구조체의 길이의 변화가 부유구조체의 단면력에 미치는 영향도 검토하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부유구조체에 가해지는 파랑하중으로 인해 도입되는 파력은 구조물의 길이에 대한 영향은 거의 없었으며, 종동요의 파력 모멘트는 길이가 증가할수록 파력도 증가하는 것을 알 수 있다.
- 2) 방사감쇠 및 부가 질량은 전후동요에 따라 수선면이 일정한 특성으로 인해 각각의 해석모델에서 거의 유사한 값을 나타내며, 상하동요의 경우는 부유구조체 길이가 증가할수록 수선면이 점차 증가하는 특성으로 인해 방사감쇠와 부가질량은 점차 증가하는 것을 알 수 있다.
- 3) 부유구조체의 운동 특성인 RAOs는 부유구조체의 길이가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있으며, 파랑주기가 증가할수록 또한 증가하는 것을 알 수 있다.
- 4) 각 방향에 대하여 부유구조체에서 가장 큰 운동을 발생시키는 위험 파랑하중에 따른 하부슬래브의 단면력을 검토하였으며, 하부슬래브에 발생하는 인장응력은 콘크리트 인장강도보다 작은 값을 나타내었다.
- 5) 동일한 파랑하중에 대하여 부유구조체 길이의 변화에 따른 단면력 분포는 상관성을 나타내지 않았다.
- 6) 이 연구에서는 강체연결 된 하나의 구조물로 보고 해석을 수행하였으나, 앞으로 여러 가지 접합부 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “콘크리트 부유체의 효율적 모듈 접합기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Link, R. A. and Elwi, A. E. “Composite Concrete-Steel Plate Walls: Analysis and Behavior,” *Journal of Structural Engineering* ASCE, 1995, Vol. 121, pp. 260-271.
2. Lanquetin, B., Collet, P., and Esteve, J., “Structural Integrity Management for a Large Prestressed Concrete Floating Production Unit,” *26th International Conference on Offshore, Mechanics and Arctic Engineering*, SanDiego, 2007, pp. 1-12.
3. Clauss, G. F., Sprenger, F., Testa, D., Hoon, S., and Huhn, R., “Motion Behaviour of a New Offshore LNG Transfer System at Harsh Operational Conditions,” *28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, USA, 2009, pp. 385-939.
4. Cheetham, P., Du, S., May, R., and Smith, S. “Hydrodynamic Analysis of Ship Side by Side in Waves,” *International Aerospace CFD Conference*, Paris, France, 2007.
5. Palo, P., “Mobile Offshore Base: Hydrodynamic Adv Ancements and Remaining Challenges,” *Marine Structures*, 2005, pp. 133-147.
6. *ANSYS AQWA User's Manual*, ANSYS Inc 2010, 84 pp.
7. Thanh, N. H., Noh, H. C., Kim, S. E., and Na, S. W., “Estimation of the Design Member Forces in Very Large Floating Structure due to Wave Loads,” *Journal of The Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 6A, 2007, pp. 641-650.
8. Zi, G. S., Kim, J. G., Lee, S. O., and Lee, P. S., “Development of a Design Chart for the Initial Design Stage of Very Large Floating Structures,” *Journal of The Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 3B, 2010, pp. 315-324.
9. Hong, S. Y., *Design Manual for Very Large Floating Structure*, KORDI, 2007, 280 pp.
10. Kim, K. T., “Hydroelastic Analysis of Three Dimensional Floating Structures,” MS. C. Thesis, KAIST, Korea, 2007, 55 pp.
11. Allen, E., Dees, D., Hicks, S., Hollibaugh, R., Martin, T., and Starling, T., “Design of Floating Production Storage and Offloading Vessel for Offshore Indonesia,” Final Report, Texas A&M University, Texas, 2006, 88 pp.
12. Jeong, Y. J., Cho, J. Y., You, Y. J., and Na, S. W., “Stability and Wave-Induced Bending Moment for Design of Offshore Floating Terminal,” *9th Pacific Structural Steel Conference*, Beijing, 2010, pp. 369-374.
13. Korea Institute of Construction Technology, *Development of Application Technology for Concrete Floating Structure*, Korea, 2010, 457 pp.

요 약 이 연구에서는 부유구조체의 단면특성은 동일하지만, 길이가 서로 다른 4가지의 대형 콘크리트 부유구조체에 대하여 운동 특성 및 구조성능의 해석적 연구를 수행하였다. 부유구조체 설치해역은 수심이 35 m인 연안을 대상으로 하였으며, 설치해역에서 발생할 수 있는 파랑주기 3초~10초 34개 규칙 파랑하중을 적용하였다. ANSYS-AQWA를 통하여 부유구조체의 동수역학 해석을 수행하였으며, 운동 특성을 검토하였다. 또한, 34개 파랑하중에서 부유구조체에 최대 응답진폭을 나타내는 위험 파랑하중을 선정하였으며, 선정된 위험파랑하중으로 인해 부유구조체에 도입되는 파압을 도출하였다. 위험 파랑하중으로 인해 도출된 파압을 부유구조체에 매핑(mapping)하여 구조성능을 검토하였다. 해석 결과를 종합해볼 때, 부유구조체의 길이가 증가할수록 부유구조체의 운동이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 부유구조체와 파랑하중의 상호작용의 효과는 파랑주기와 구조물 길이에 지배적인 것으로 사료된다. 또한, 위험 파랑하중으로 인해 부유구조체의 하부슬래브는 인장응력이 발생하며, 부유구조체 길이는 단면력에 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 콘크리트 부유구조체, 운동특성, 위험 파랑하중, 구조성능, 단면력