

## 부유구조체 형상에 따른 동요감소 특성분석 Characteristic Analysis of Reduced Motion due to the Shape of Floating Structure

이두호\* · 정연주\* · 유영준\* · 박민수\*  
Du Ho Lee\*, Youn Ju Jeong\*, Young Jun You\* and Min Su Park\*

**요지 :** 이전 연구에서는 부유구조체의 동요저감을 위해 폰툰과 반잠수식 부유구조체 형식을 결합하여 하이브리드 부유구조체를 제안한 바 있다. 하이브리드 부유구조체는 입사파랑에 대한 동요감소에는 효과적이었으나 부유구조체에 충분한 부력을 제공할 수 없는 단점이 있었다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 새로운 형식의 콤비네이션 부유구조체를 제안하였다. 입사파랑하중에 대한 부유구조체의 동요감소 효과를 비교하기 위해 폰툰, 콤비네이션 그리고 하이브리드 부유구조체에 대한 수치해석을 동수역학 해석프로그램 ANSYS AQWA를 이용하여 수행하였다. 본 연구에서 제안된 콤비네이션 부유구조체가 다른 부유구조체에 비해 동요감소에 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 콤비네이션 부유구조체는 앞으로 개발될 초대형 부유구조체 건설을 위한 신형식 부유구조체로서 매우 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 부유구조체, 동요, 동수역학 해석, 폰툰, 반잠수식

**Abstract :** In previous study, the hybrid floating structure composed of a pontoon and a semi-submersible was suggested to reduce the motions of floating structure. It was reported that the suggested hybrid floating structure could reduce the motions. However, the hybrid floating structure could not support enough buoyancy. In this study, the combination floating structure is newly suggested to resolve the problem. In order to adopt the shape of floating structures reducing the motions, the hydrodynamic analysis of various floating structures such as the pontoon, the hybrid and the combination of floating structure is carried out through hydrodynamic analysis program ANSYS AQWA. It is found that the combination floating structure is remarkably effective to reduce the motions compared to the other cases. Thus, the suggested combination floating structure may be a useful offshore structure for constructing a very large floating structure.

**Keywords :** floating structure, motion, hydrodynamic analysis, pontoon, semi-submersible

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 해양공간은 무한한 발전 가능성 때문에 많은 관심이 집중되고 있는 추세이다. 과거 해양공간 개발은 연안지역에서 많은 수용용지 확보를 위해서 주로 매립식을 통하여 이루어졌다. 하지만, 매립식은 천연 갯벌과 같은 자연환경의 파괴를 초래하였으며, 새로운 수용용지 개발로 발생하는 이익보다는 자연환경 파괴로 인한 손해가 더 크게 발생되었다. 이로 인해, 새로운 친환경적 개발방법에 대한 필요성이 대두되어 왔으며, 최근에는 대형 부유식 해양구조물을 이용한 항만, 공항, 저장시설 등과 같은 사회 기반시설을 친환경 해양공간으로 창출하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

부유구조체의 구조형식은 Fig. 1과 같이 폰툰(pontoon)과

반잠수식(semi-submersible)으로 구분할 수 있다. 폰툰은 Fig. 1(a)와 같이 단순 박스형 부유구조체이며, 부력 확보가 용이하다. 또한, 내부공간을 저장용도로 활용이 가능하며, 간단한 구조형식 및 경제성 등의 장점 때문에 세계적으로 많이 이용되고 있는 추세이다. 그러나 폰툰은 측면이 외벽으로 폐쇄되어 입사파랑의 충격에너지를 흡수하기 어려우며, 이로 인해 부유구조체의 동요와 각 부재의 단면력이 증가하는 문제점이 있다(Jeong et al., 2011). 다른 구조형식인 반잠수식은 Fig. 1(b)와 같이 에어갭(airgap)이 형성되어 있어 해수의 이동이 가능하여 입사파랑에 의한 동요가 저감되지만, 부력확보를 위해 상대적으로 큰 구조물 높이를 필요로 하여 외해에서 제한적 용도로만 활용되고 있는 실정이다. 따라서, 현재 활용도와 경제성이 높은 폰툰의 문제점을 개선시켜 적용해역을

\*한국건설기술연구원 SOC성능연구소 인프라구조연구실 (Corresponding author : Lee Du Ho, Structural Engineering Research Division, SOC Research Institute Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi 411-712, Korea. Tel.: +82-31-9100-385, Fax: +82-31-9100-121, ldh0067083@kict.re.kr)

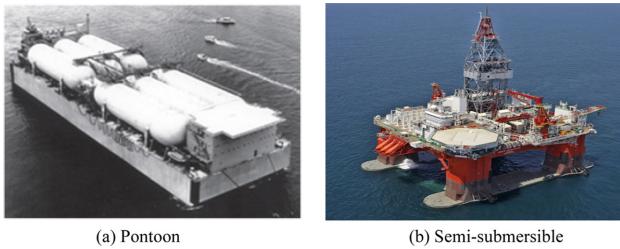


Fig. 1. Typical floating structure images according to structural type.

확대하는 연구들이 활발히 진행 중에 있다.

폰툰은 기본적으로 파랑하중의 영향이 비교적 작은 만내 또는 항내와 같이 정온화된 해역에서 설치 및 이용이 가능하며, 해역의 정온화를 위해서는 소파제와 같은 구조물이 필요하다. 과거에는 케이슨 등을 이용한 착저식 방파제를 이용하여 정온화한 후 구조물을 설치하는 방향으로 연구가 진행되었다. 하지만, 수심이 깊어질수록 착저식의 시공비 문제가 발생하였다. 또한, 착저식 시공으로 인한 해양 생태계 파괴로 친환경 해양환경 창출과도 멀어지게 되었다. 이로 인해, 해수의 유동이 가능하여 비교적 친환경적인 부유식 방파제 또는 방파제와 일체화된 부유구조체 개발에 대한 연구를 통하여 폰툰의 설치 및 이용을 확대하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 더 나아가 방파제와 같은 소파제 없이 부유구조체 자체의 구조형식의 변형을 통해 부유구조체 동요를 감소 할 수 있는 신형식 부유구조체에 대한 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 개별적으로 설치된 소파제로 인한 부유구조체의 동요저감을 검토하기 위해 Hong et al.(2003)<sup>[9]</sup> 하부가 개방된 고정식 방파제인 해수순환 방파제를 고려하여 초대형 부유구조체의 유단성 응답 해석을 수행하였으며, Hong · Hong(2004)은 공기챔버형 부소파제에 의한 초대형 부유구조체의 응답감소에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 부유구조체와 일체형 방파제를 이용한 부유구조체 응답감소 연구도 국내 · 외에서 활발히 진행되고 있다. Hong et al.(2008)은 공기챔버 시스템의 위치가 초대형 부유구조체의 응답감소에 미치는 영향을 검토하였으며, Takagi et al.(2000)은 단순 박스형 동요저감장치를 제안하여 초대형 부유구조체의 외벽에 설치한 후 실험 및 해석적 연구를 수행하여 구조물의 응답감소를 검토하였다. 또한, Maeda et al.(2001)은 파랑에너지 흡수 장치인 진동수주(oscillating water column) 시스템을 이용하

여 초대형 부유구조체의 동요감소에 대한 연구를 수행하였으며, Takaki et al.(2002)는 몰수관 구조의 소파제를 제안하여 초대형 부유구조체 자체의 구조형식의 변형으로 인해 소파제가 없이 설치 및 이용이 가능한 목적으로 Lee et al.(2012)은 폰툰과 반잠수식을 결합한 하이브리드 부유구조체를 제안하였으며, 특정 파랑하중 하에서 동요감소를 수치해석적으로 검증한 바 있다.

본 연구에서는 Lee et al.(2012)이 제안한 하이브리드 부유구조체의 단점인 부력확보에 대한 보완을 위해 폰툰과 결합한 콤비네이션 부유구조체를 제안하였으며, 동수역학(hydrodynamic) 해석 프로그램 ANSYS AQWA를 이용하여 동요감소 특성을 수치해석적으로 비교분석하였다.

## 2. 동수역학(Hydrodynamic)해석

### 2.1 해석모델

폰툰과 하이브리드 단위모듈 상세는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 폰툰 단위모듈을 나타내며, 상·하부 슬래브의 두께는 0.65 m이고, 내벽의 두께는 0.30 m, 내벽은 10 m 간격으로 설치되어 있다. Fig. 2(b)는 하이브리드 단위모듈을 나타내며, 하이브리드 단위모듈은 실린더 외벽과 슬래브가 결합되어 있는 구조형식을 나타낸다. 상·하 슬래브는 30 m × 30 m × 0.65 m, 실린더 외벽 직경은 20 m, 높이 12.7 m, 두께는 0.5 m이다. 이와 같은 단위모듈이 결합되어 하나의 대형 하이브리드 부유구조체를 형성하게 되며, 각 실린더 외벽 사이에는 폭 10 m의 에어캡이 형성된다.

하이브리드 부유구조체는 콘크리트라는 재료적 특성으로 인해 구조물의 강성확보를 위해서는 각 부재의 두께가 증가되어 구조물의 자중이 증가하게 된다. 또한, 해수의 원활한 유동을 위한 에어캡 확보는 내부 실린더의 직경이 감소되며, 이로 인해 구조물의 부력확보 측면에서 어려움을 나타낸다. 본 연구에서는 하이브리드 부유구조체의 단점을 보완하기 위해 부력확보가 용이한 폰툰과 하이브리드 부유구조체를 결합한 콤비네이션 부유구조체를 제안하였다. 또한, 단면형상이 서로 다른 3가지 부유구조체의 파랑하중에 대한 동요특성을 비교분석하였다. 본 연구에서는 부유식 안벽을 목적으로 하는 콘크리트 부유구조체의 실제 설계를 통하여 도출된 단면 및 부재 치수를 사용하여 해석을 수행하였다(KICT, 2012).

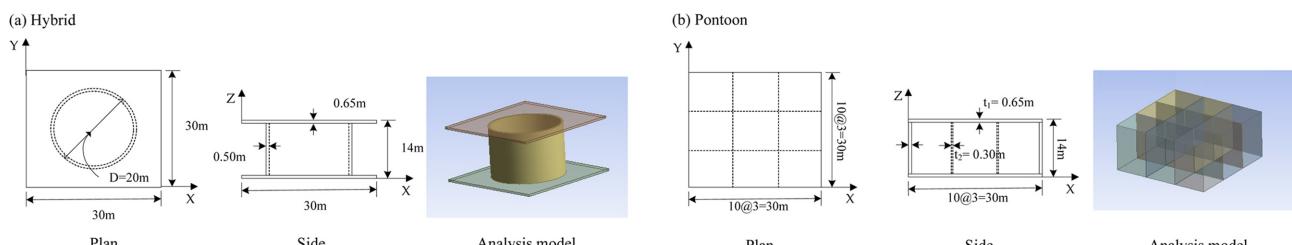
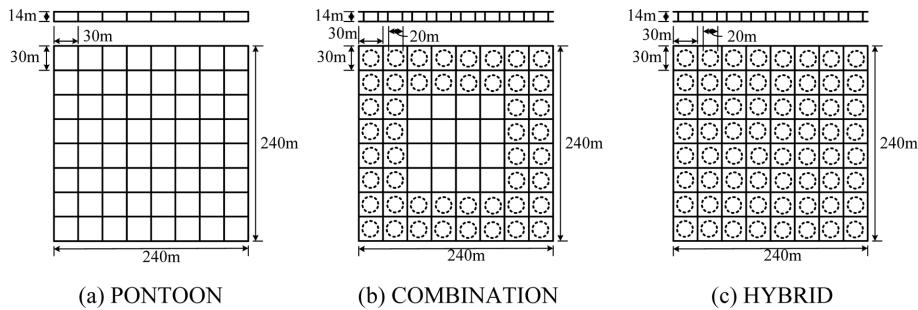


Fig. 2. Shape and dimension of unit module in each large floating structure. Shape and dimension of unit module in each large floating structure.

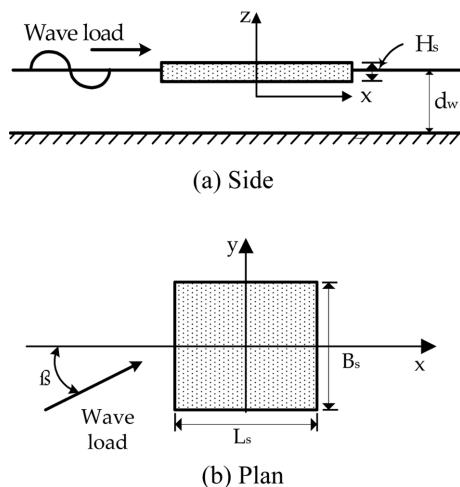


**Fig. 3.** Typical analysis models according to the shape of floating structure.

대상 부유구조체의 크기는 Fig. 3과 같이 240 m(L<sub>s</sub>) × 240 m(B<sub>s</sub>) × 14 m(H<sub>s</sub>)이며, 단면의 형상에 따라 해석모델명은 폰툰, 콤비네이션 및 하이브리드이다. 해석모델의 구성은 2가지 형상의 단위모듈의 배치비율에 따라 설명이 가능하며, (a) 폰툰은 전체(100%)가 폰툰 단위모듈로 형성된 부유구조체, (c)하이브리드는 하이브리드 단위모듈로 전체(100%)가 이루어진 해석모델이다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 콤비네이션 부유구조체는 (b)와 같이 두 가지 단위모듈이 결합된 해석모델이며, 입사파가 전해지는 외곽부(75%)는 하이브리드 단위모듈, 부력확보 및 강성확보를 위해 중앙부(25%)는 폰툰 단위모듈로 형성되어 있다.

## 2.2 수치해석

부유구조체의 동요감소 특성을 검토하기 위해 형상이 서로 다른 3가지 해석모델에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 수치해석 개요는 Fig. 4에 나타내었다. 대상 부유구조체의 설치 해역은 수심( $d_w$ ) 35 m인 비교적 얕은 해역을 대상으로 하였으며, 부유구조체의 흘수(draft)는 11 m이다. 파랑하중 조건은 파랑주기(T) 5초(0.2 Hz) ~ 15초(0.0067 Hz)를 0.003 Hz 간격으로 50등분한 규칙파랑에 대한 수치해석을 수행하였다. 파랑입사각( $\beta$ )은 해석모델이 정방형 구조물임을 감안하여 90°를 제외한 0°, 45° 두 방향을 고려하였으며, 입사각에 따른 부



**Fig. 4.** Definition sketch of the numerical analysis with large floating structure.

유구조체의 동요특성을 비교분석하였다. 또한, 본 연구에서는 부유구조체 자체 구조형식으로 인한 동요특성 및 동요감소 효과를 검토하기 위하여 계류시스템은 적용하지 않았다.

수치해석은 동수역학 해석프로그램 ANSYS AQWA를 이용하여 수행하였으며, ANSYS AQWA는 포텐셜 이론을 기반으로 하여 패널 방식(panel method)으로 수치해석이 수행된다. 해석모델은 3D-shell요소를 이용하여 모델링 하였으며, 각각의 해석모델의 요소수는 수렴성(convergency) 검토후 폰툰 9,701개, 콤비네이션 11,968개, 하이브리드 11,926개로 결정되었다.

## 5. 해석결과 및 고찰

## 5.1 유체동역학적 힘

### 5.1.1 파랑강제력

설치해역에서 발생 가능한 50가지 파랑하중에 대하여 해석 모델의 파랑강제력(excitation force)과 유체동역학적 힘인 부가질량(added mass) 및 방사감쇠(radiation damping)에 대한 검토를 수행하였다. Fig. 5는 파랑 입사각이  $0^\circ$  일 때 파랑주기에 따라 부유구조체에 도입되는 파랑강제력을 나타낸다. 파랑강제력은 구속된 부유구조체에 파가 입사할 때 구조물에 작용하는 힘으로 정의된다(염, 2010). 또한, 파랑입사각에 따른 부유구조체의 동요 중 결정적인 방향인 전후동요(surge), 상하동요(heave) 및 종동요(pitch)에 대한 검토를 수행하였다.

Fig. 5(a)는 전후동요 파랑강제력을 나타내며, 각각의 해석 모델에서 상이한 파랑강제력이 도입되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 파랑주기 전반적으로 폰툰에서 가장 큰 파랑강제력이 발생하는 것을 알 수 있다. 폰툰은 파랑주기가 증가할수록 파랑강제력이 증가하며 파랑주기 약 11.3초 이상에서 동일한 파랑강제력으로 수렴 또는 감소하는 것을 알 수 있다. 콤비네이션과 하이브리드는 파랑주기에 따라 파랑강제력의 편차가 크게 나타난다. 콤비네이션은 파랑주기 약 9.0초와 15.0초에서 다른 타입에 비해 더 큰 파랑강제력이 도입되지만, 파랑주기 전반적으로는 최소 파랑강제력이 도입되는 것을 알 수 있다. 특히, 9.5~13.4초에서는 전후동요의 파랑강제력이 매우 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 상하동요 파랑강제력을 나타낸다. Fig. 5(b)에서 알 수 있는 것과 같이 하이브리드에서 매우 큰 파랑강제

력이 도입되는 것을 알 수 있으며, 파랑주기 약 14.4초에서 최대 파랑강제력을 나타낸다. 하이브리드는 전체가 하이브리드 단위모듈로 형성되어 에어캡을 통한 부유체 내부의 해수 유동량이 가장 큰 해석모델이다. 이로 인해, 실린더 사이의 해수유동에 따른 파와 구조물 상호작용(interaction)의 영향이 가장 크게 발생하여 상하동요 파랑강제력이 특정주기에서 급격히 증가되는 것으로 판단된다. 폰툰은 파랑주기에 따라 상하동요 파랑강제력이 미소하게 증가하는 선형분포를 나타낸다. 콤비네이션은 전반적으로 폰툰과 유사한 크기의 상하동요 파랑강제력이 도입되는 것을 알 수 있다. 또한, 파랑주기 약 9.1초 일 때 최대 파랑강제력을 나타내지만, 하이브리드에 비해 미소한 값을 나타낸다.

Fig. 5(c)는 각 해석모델의 종동요 파랑강제력을 나타내며, 상하동요와 같이 하이브리드에서 비교적 큰 파랑강제력이 도입되는 것을 알 수 있다. 또한, 하이브리드는 파랑주기 약 12.5초 이상에서 증가폭이 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 파랑주기 13.9초에서 최대 파랑강제력을 나타낸다. 콤비네이션은 약 13.9초에서 최대값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안된 부유구조체는 구조물 높이보다 하부슬래브 면적이 매우 크기 때문에 전후동요에 의해 상하동요 파랑강제력에 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 종동요 파랑강제력은 상하동요 파랑강제력의 분포와 다소 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

파랑입사각이  $45^\circ$ 일 때 파랑하중에 따른 각각의 해석모델에 도입되는 파랑강제력은 Fig. 6에 나타내었으며, Fig. 6(a)는 전후동요 파랑강제력을 나타낸다. 폰툰은 파랑입사각이  $0^\circ$  일 때 선형분포와는 상이한 파력분포를 나타내며, 파랑주기

가 증가할수록 피크값(peak point)이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 파랑주기가 약 8.4초 이하에서 다른 해석모델에 비해 큰 전후동요 파랑강제력을 나타낸다. 콤비네이션은 약 8.4초 이하에서 다른 해석모델에 비해 작은 전후동요 파랑강제력을 나타내며, 그 이상에서는 다른 해석모델에 비해 파랑강제력 증가하는 것을 알 수 있다. 하이브리드는 파랑주기 전반적으로 가장 작은 전후동요 파랑강제력이 도입되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 콤비네이션은 하이브리드와 다르게 중앙부 폰툰모듈로 인해 유동해수의 흐름이 방해되므로 전후동요 파랑강제력이 증가되는 것으로 판단된다.

입사각이  $45^\circ$ 일 때 상하동요 파랑강제력은 Fig. 6(b)에 나타내었으며, 하이브리드를 제외한 2가지 해석모델은 전체적으로 미소한 파랑강제력을 나타낸다. 폰툰에서 가장 미소한 파랑강제력이 도입되며, 파랑주기가 증가할수록 파랑강제력이 선형으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 콤비네이션의 경우 파랑주기 약 13.9초에서 최대값을 나타내며, 파랑주기 약 10~12초에서는 상하동요 파랑강제력이 급속히 감소하는 것을 알 수 있다. 하이브리드는 약 13.3초에서 상하동요 파랑강제력이 급격히 증가하였다. 이와 같은 해석결과는 장주기 파일 때 에어캡을 통한 해수의 유동 때문에 발생하는 실린더 외벽과 입사파의 상호작용으로 인해 상하동요 파랑강제력이 급격히 증가되는 것으로 판단된다.

종동요 파랑강제력은 Fig. 7(c)에 나타내었으며, 모든 해석모델은 약 8.5초 이하에서 미소한 종동요 파랑강제력을 나타낸다. 하이브리드는 약 12.5초 이상에서 파랑강제력이 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 폰툰은 다른 해석모델에 비해 작은 파랑강제력이 도입되는 것을 알 수 있다. 이와 같은

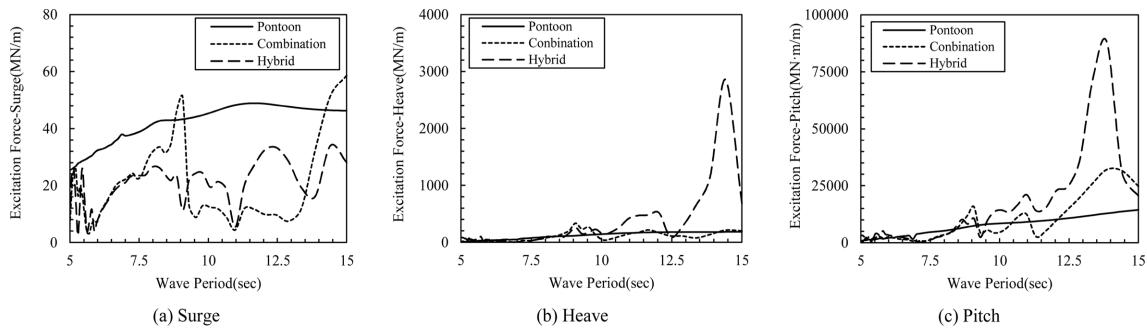


Fig. 5. Comparison of excitation force at each floating structure due to incidence wave angle  $0^\circ$ .

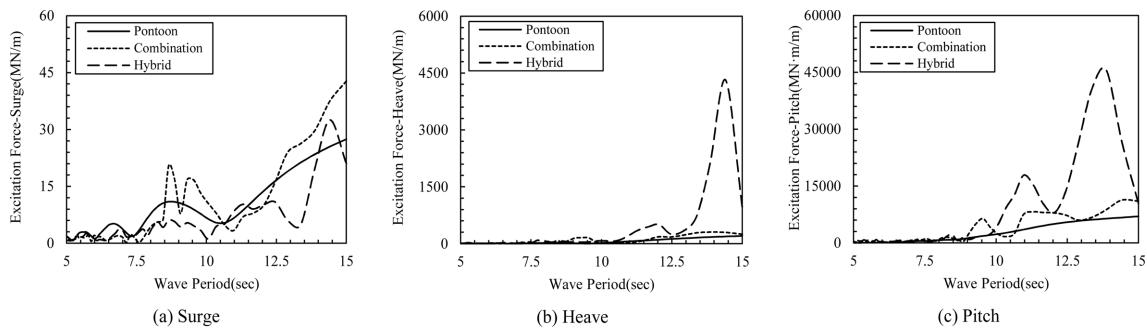


Fig. 6. Comparison of excitation force at each floating structure due to incidence wave angle  $45^\circ$ .

결과를 종합할 때 하이브리드 단위모듈은 상하동요와 종동요 파랑강제력만을 검토하였을 때 단점을 나타낸다.

### 5.1.2 부가질량

부가질량은 구조물의 가속도에 비례하는 힘이며, 구조물의 가속운동에 의하여 구조물 주위에 있는 유체 입자에 유기되는 가속도에 의해 발생된다(Yum, 2010). 파랑주기에 따른 각각의 해석모델에 발생하는 부가질량은 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7(a)는 파랑주기에 따른 전후동요의 부가질량을 나타내며, 폰툰의 경우 전반적으로 다른 해석모델에 비해 작은 부가질량이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 파랑주기 증가 할수록 부가질량이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 콤비네이션은 파랑주기 약 9.3초에서 최대값을 나타낸다. 하이브리드는 파랑주기 전반적으로 2가지 해석모델에 비해 큰 부가질량이 발생하며, 또한, 파랑주기 5.8초 이하의 단주기 파에서는 작은 주기 변화에서도 부가질량의 차이가 크게 나타난다.

Fig. 7(b)는 상하동요에 따른 부가질량을 나타낸다. 하이브리드는 파랑주기 약 13.8초 이후에 급격히 감소하여 음(-)의 부가질량이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 파랑주기가 증가하여 파장이 길어 질 경우 원형 실린더에 회절(Diffraction)되는 파가 실린더 앞에서는 양의 부가질량을 나타내지고 실린더 뒤에서는 음의 부가질량이 나타나기 때문인

것으로 판단되며, 이와 같은 급격한 변화는 하이브리드 해석 모델의 동요검토 시 공진 영향에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 폰툰과 콤비네이션은 파랑주기 전반적으로 하이브리드에 비해 미소한 부가질량을 나타낸다.

### 5.1.3 방사감쇠

파랑하중으로 인해 생성되는 유체동역학적 힘 중에서 부유구조체의 운동에너지를 감소시키는 방사감쇠력에 대한 검토를 수행하였다(Yum, 2010). Fig. 8은 각 해석모델에서 발생하는 전후동요와 상하동요의 감쇠력을 나타낸다.

Fig. 8(a)는 전후동요의 감쇠력을 나타내며, 전반적으로 폰툰에서 다른 해석모델에 비해 큰 감쇠력을 나타내는 것을 알 수 있다. 폰툰의 경우 파랑주기 약 7.5초에서 최대 감쇠력을 나타내며, 7.5초 이하에서 파랑주기가 증가할수록 감쇠력도 증가하는 것을 알 수 있다. 콤비네이션은 약 7.0초 이하에서 감쇠력의 변화가 크게 나타나며, 약 9.3~13.3초에서는 감쇠력이 하이브리드에 비해 작게 나타나지만, 13.3초 이상에서는 파랑주기가 증가할수록 감쇠력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 상하동요에 대한 감쇠력을 나타내며, 폰툰과 콤비네이션의 경우 하이브리드에 비해 미소한 감쇠력이 발생하는 것을 알 수 있다. 하이브리드는 파랑주기 약 12.9초까지는 일정한 값을 나타내지만, 12.9초 이상에서 감쇠력이 급격히 증가한다. 하지만, 파랑주기 13.8초에서 급속히 감소하

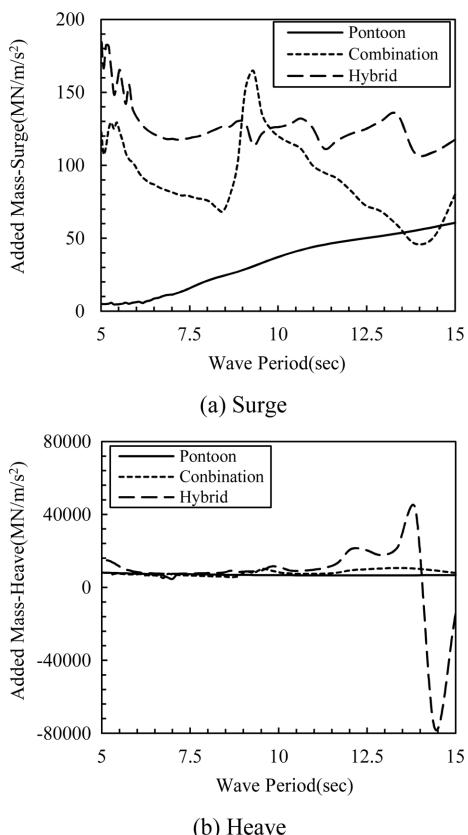


Fig. 7. Comparison of added mass at each floating structure due to regular wave.

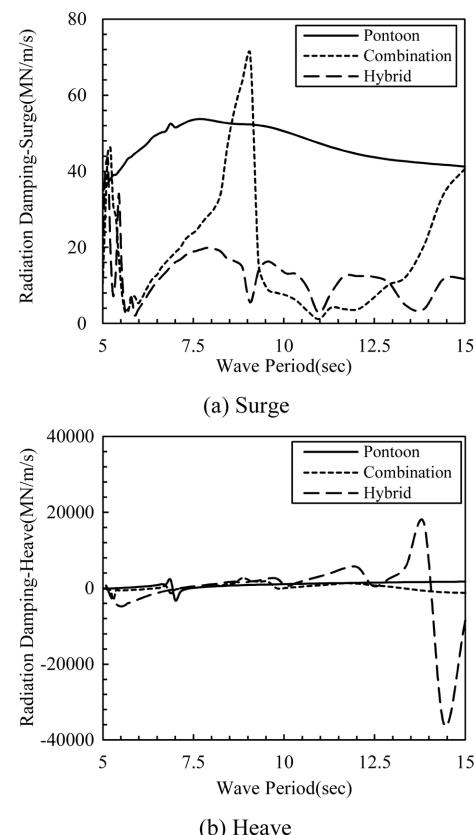


Fig. 8. Comparison of radiation damping at each floating structure due to regular wave.

여 음(-)의 감쇠력을 나타낸다. 이와 같은 감쇠력 특성은 앞에서 상하동요 부가질량에 대한 해석결과와 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

## 5.2 응답진폭 검토

부유구조체의 동요특성은 해석모델에 발생하는 응답진폭(response amplitude operators, RAOs)을 비교하여 검토하였다. 입사각이  $0^\circ$ 일 때 부유구조체에 발생하는 동요특성은 Fig. 9에 나타내었다. 폰툰은 파랑주기 약 12.5초까지 응답진폭이 증가하며, 12.5초에서 최대 전후동요가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 콤비네이션은 파랑주기 약 8.6초에서 첫 번째 피크값을 나타낸 후 파랑주기가 증가할수록 응답진폭이 감소되는 것을 알 수 있다. 또한, 약 13.7초 이후에는 응답진폭이 급격히 증가하게 되며, 15초에서 최대 전후동요를 나타낸다. 하이브리드는 파랑주기 약 12.0초에서 최대응답진폭을 나타내며, 약 12초 이상에서 응답진폭이 감소되는 것을 알 수 있다.

부유구조체 전후동요 특성은 파랑주기 약 9.1~13.8초에서 콤비네이션의 응답진폭이 가장 크게 나타나며, 폰툰에 비해 동요감소 효과가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 하이브리드 단위모듈로 형성된 콤비네이션과 하이브리드의 경우 에어캡으로 인해 전후동요 파력을 받는 단면저감이 저감되므로, 폰툰에 비해 응답진폭이 감소되는 것으로 판단된다.

파랑입사각이  $0^\circ$ 일 때 파랑주기에 따른 부유구조체의 상하동요는 Fig. 9(b)에 나타내었다. 파랑주기가 증가할수록 각 해석모델의 응답진폭이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 폰툰은 선형분포를 나타내며, 콤비네이션과 하이브리드는 복잡한 동요 분포를 나타낸다. 콤비네이션은 파랑주기 약 8.1~9.5초에서 다른 해석모델에 비해 큰 상하동요가 발생하며, 약 8.9초에서 첫 번째 피크값을 나타낸다. 또한, 입사파랑의 주기가 증가할수록 피크값이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다.

부유구조체 상하동요 결과는 파랑주기 약 12.0초 이하에서 모든 해석모델이 유사한 크기의 응답진폭이 발생된다. 콤비네이션과 하이브리드는 특정 주기에서 폰툰에 비해 큰 응답진폭을 나타내지만, 12.0초 이상에서 폰툰에 비하여 동요감소가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 콤비네이션은 파랑주기 약 13.4초 이상에서 해석모델 중 가장 작은 응답진폭을 나타내며, 상하동요 저감을 확인할 수 있다. 이와 같은 운동저감

은 실린더 외벽과 해수의 상호작용으로 인해 발생하는 것으로 사료된다. 또한, 콤비네이션은 약 13.4초 이상에서는 하이브리드보다 응답진폭이 감소되며, 이것은 내부에 유입되는 해수의 유동과정에서 중앙폰툰 모듈에 부딪히며 발생하는 산란 및 반사의 영향으로 인해 상하동요가 감소되는 것으로 사료된다.

부유구조체의 종동요 응답진폭은 Fig. 9(c)에 나타내었다. 폰툰은 상하동요와 동일하게 파랑주기가 증가할수록 종동요가 증가되는 것을 알 수 있다. 또한, 파랑주기 15초일 때 최대 응답진폭을 나타낸다. 콤비네이션은 약 8.8초에서 첫 번째 피크값이 나타나며, 전반적으로 다른 해석모델에 비해 응답진폭이 감소되는 것을 알 수 있다. 하지만, 파랑주기 약 11.3초 이상에서 응답진폭이 증가하여 동요 감소폭이 감소되는 것을 알 수 있다.

부유구조체의 종동요 특성은 전반적으로 콤비네이션과 하이브리드에서 동요가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 파랑주기의 중간영역에서는 콤비네이션의 종동요 응답진폭의 감소가 증가되며, 파랑주기 13.8초 이상에서 동요감소가 더 증가될 것으로 판단된다.

입사각이  $45^\circ$ 일 때 각각 해석모델에서 발생하는 동요특성을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 각 해석모델에 발생하는 전후동요 응답진폭을 나타낸다. 폰툰은 파랑주기가 증가할수록 응답진폭이 증가되는 것을 알 수 있다. 또한, 파랑주기 12.5초 이상일 때 응답진폭이 급격히 증가되는 것을 확인할 수 있다. 콤비네이션은 파랑주기가 증가할수록 응답진폭이 증가되며, 파랑주기 15초 일 때 최대 전후동요를 나타낸다. 하이브리드는 10초 이상의 파랑하중에서 응답진폭이 점차 크게 증가하게 되며, 파랑주기 15초에서 최대 응답진폭을 나타낸다.

전후동요 특성은 파랑주기 약 10.7초 이하에서 콤비네이션과 하이브리드는 폰툰에 비해 전후동요가 감소되는 것을 알 수 있다. 파랑주기 약 12.0초 이상일 때 하이브리드에서 가장 작은 동요특성을 나타내며, 약 13.4초에서 전후동요가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 콤비네이션은 약 12초 이상에서 전후동요가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 폰툰에 비해 전후동요가 증가되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 입사각이  $45^\circ$ 일 경우 콤비네이션의 경우 중앙의 폰툰 단위모듈

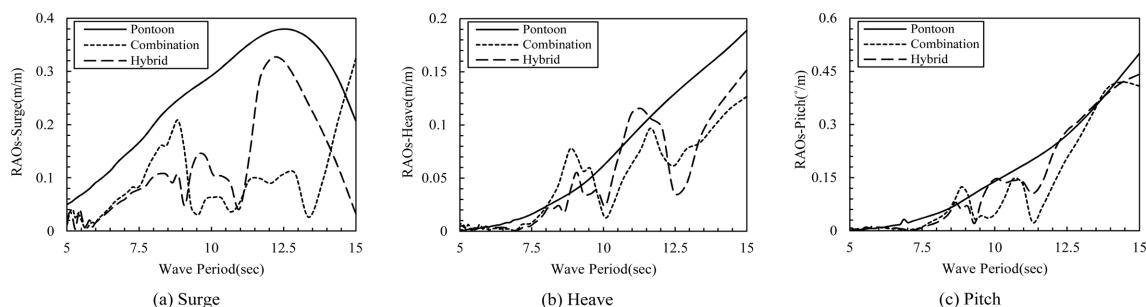


Fig. 9. Comparison of RAOs at each floating structure due to incidence wave angle  $0^\circ$ .

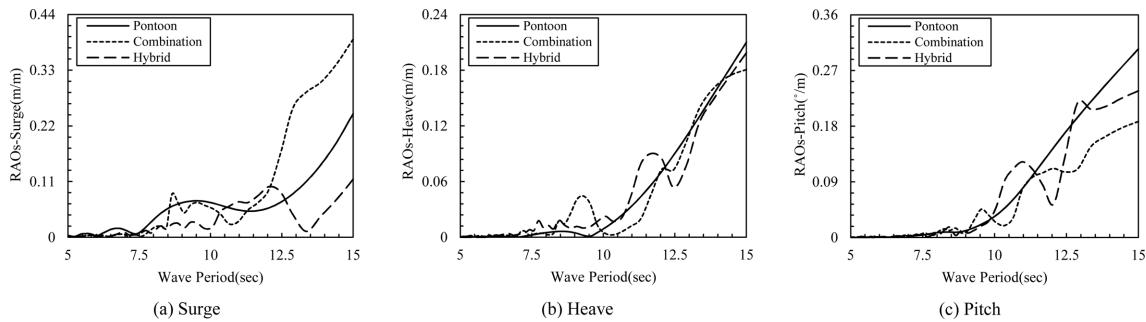


Fig. 10. Comparison of RAOs at each floating structure due to incidence wave angle 45°.

이 해수의 유동을 방해하여 Fig. 6(a)와 같이 전후동요 파력이 증가되기 때문이다.

각 해석모델의 상하동요 응답진폭은 Fig. 10(b)에 나타내었으며, 모든 해석모델에서 유사한 응답진폭 분포를 나타낸다. 폰툰은 파랑주기 약 9.5초 이하에서 미소한 응답진폭을 나타내며, 9.5초 이상의 파랑하중에서는 응답진폭이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 콤비네이션과 하이브리드도 폰툰과 동일하게 파랑주기가 증가할수록 상하동요가 증가되는 것을 확인할 수 있다.

입사각이 45°일 때 상하동요 특성은 파랑주기 12.5초 이하의 파랑하중에서는 콤비네이션과 하이브리드의 동요가 더 크게 나타내는 것을 알 수 있으며, 12.5 초 이상의 장주기파가 재하 될 경우 상하동요의 응답진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 하이브리드의 경우 파랑주기 14.4초 이상에서는 동요특성이 더 감소될 것으로 판단된다.

Fig. 10(c)는 입사각이 45°일 때 부유구조체 종동요 응답진폭을 검토하였다. 폰툰의 경우 약 10.0초 이하의 파랑하중에서 미소한 종동요 응답진폭을 나타내며, 10초 이상에서는 파랑주기가 증가할수록 응답진폭이 급격히 증가하는 선형 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 콤비네이션과 하이브리드의 경우에도 폰툰과 유사하게 파랑주기 증가할수록 응답진폭이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 콤비네이션은 파랑주기 10.0초 이상에서는 다른 해석모델에 비해 작은 응답진폭을 나타내며, 종동요가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 파랑주기가 점차 증가할수록 응답진폭의 감소가 증가하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 부유구조체의 동요감소 특성에 대한 수치해석적 연구를 위하여 형상이 서로 다른 3가지 부유구조체에 대하여 연구를 수행하였다. 대상 부유구조체의 설치해역에서 발생 가능한 50가지의 규칙 파랑하중에 대하여 동요특성을 검토하였다. 먼저, 다양한 파랑하중으로 인해 부유구조체의 동요를 발생시키는 유체동역학적 인자인 파랑강제력, 부가질량, 방사감쇠를 검토하였으며, 다음으로 각각의 부유구조체의 동요특성을 비교분석하였다.

해석결과를 종합해 볼 때, 콤비네이션의 경우 입사각이 0°와 45°에서 폰툰 및 하이브리드에 비교하여 동요가 전반적으로 감소하는 것을 알 수 있었으며, 특히, 상하동요 및 종동요에서 확실한 동요감소를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 파랑주기 10초 이상에서 그 효과가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구의 해석결과를 바탕으로 방파제와 같은 소파제가 없이 부유구조체 자체 구조형식의 변형으로 인한 동요감소 기술은 앞으로의 친환경, 경제적 해양공간 창출의 목적을 달성하는 기술로 발전될 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서는 부유구조체의 동요와 안정성을 위주로 검토하였다만, 향후에는 파압감소에 대한 검토를 수행하여 구조성능과 안전성적인 측면에서 구조부재의 단면력에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “하이브리드 부유구조체 구조시스템 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Hong, D.C., Hong, S.Y. (2004). Reduction of hydroelastic Response of a VLFS by an OWC-type floating breakwater. Proceedings of the Annual Autumn Conf. of the Society of Naval Architects of Korea, 769-774.
- Hong, S.Y., Choi, Y.R., Hong, S.W. (2003). Analysis of hydroelastic response of a pontoon-thpe structure considering effect of wave breaker with underwater opening. Journal of The Society of Naval Architects of Korea, 40(5), 53-59.
- Hong, S.Y., Kyoung, J.H., Kim, B.W. (2008). Hydroelastic Analysis of Pontoon Type VLFS Considering the Location and Shape of OWC Chamber. Journal of The Korean Society of Ocean Engineers, 22(1), 22-29.
- Jeong, Y.J., and You, Y.J. (2011). Experimental study for wave-induced Hydraulic Pressure subjected to Bottom of Floating Structures. IEEE-OCEANS, Santander, Spain.

- KICT (2012). Development of structural system of hybrid floating structure.
- Lee, D.H., Jeong, Y.J., Park, M.S. (2012). Reduced motion effect of hybrid floating structure. Proceeding of Conf. The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 1895-1898.
- Maeda, H., Rheem, C., K., Washio, Y. and Osawa, H. (2001) Reduction effects of hydroelastic responses on a very large floating structure with wave energy absorption devices using OWC system. Proceedings of 20<sup>th</sup> Intl. Conf. on offshore mechanics and arctic engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 1-9.
- Takagi, K., Shimada, K., Ikebuchi, T., (2000). An anti-motion device for a very large floating structure. Journal of Marine Structure, 13, 421-436.
- Takaki, M., Imai, Y. and Lee, S., M. (2002). Reduction effect of a submerged-plate toward wave excitation forces acting on a very large floating structure. Proceedings of 12<sup>th</sup> Intl. offshore and polar engrg. conf. , Kitakyushu, Japan, 26-31.
- Yum, D.J. (2010). Dynamics of marine structures, Ulasm University.

---

원고접수일: 2013년 6월 10일

수정본채택: 2013년 10월 22일(1차)

2013년 11월 5일(2차)

제재확정일: 2013년 12월 3일