

경량 부유체의 운동 저감으로 안정성 증가방법에 관한 연구

김선태* · 고재용** · 한유미****

* 목포해양대학교 조선해양공학과 박사과정, ** 목포해양대학교 조선해양공학과 교수,

*** 전남대학교 조선해양공학과 석사과정

Method for Increasing Stability by Reducing the Motion of a Lightweight Floating Body

Seon-Tae Kim* · Jea-Yong Ko** · Yu-mi Han****

* PhD, Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Advisor, Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

*** Master course, Naval Architecture and Ocean Engineering, Jeonnam National University, 59626, Korea

요약 : 해양레저활동 인구증가 및 관련 산업의 급성장으로 인해 레저 선박을 접안하는 계류시설과 부유체를 기반으로 하는 해상부유식 펜션 등 레저시설 수요가 증가하고 있으며, 이러한 연안에서 사용되는 부유체는 대부분 경량 부유체로서 중량이 상대적으로 경량이므로 연안으로 유입되는 파(Wave)와 상재 하중에 의해 쉽게 경사가 발생하여 안정성이 낮아 안전사고가 빈번히 발생하고 있다. 이런 문제점에 대한 해결방안으로 부유체의 운동저감장치를 연구하여 알리고자 한다. 본 연구논문에서는 부유체에 운동저감장치(기압차를 이용한 운동저감장치)를 부착하여 운동저감효과를 부착하지 않은 부유체와 비교하는 방식으로 효과를 분석하였다. 효과분석은 전산해석시험으로 분석하여 부유체의 안정성 증가방법을 연구하고 그 효과를 검증해 보았다. 시험결과 분석결과 기압차를 이용한 운동저감장치를 부착한 부유체가 운동저감장치를 부착하지 않은 부유체보다 파랑에 대한 운동량이 저감되어 부유체의 안정성이 증가된 것으로 분석되었다. 이러한 부유체의 운동저감 장치는 무동력 선박뿐만 아니라 동력선, 반잠수식 선박에서도 유용하게 사용될 것으로 판단되어 다양한 분야에 적용하여 연구를 진행할 계획이다.

핵심용어 : 부유체, 부잔교, 폰툰, 안정성, 운동저감장치, 갑판경사, 계류

Abstract : Demand for leisure facilities such as mooring facilities for berthing leisure vessels and floating pensions based on floating bodies is increasing owing to the rapid growth of the population and related industries for marine leisure activities. Owing to its relatively light weight as a fluid, inclination is easily generated by waves and surcharges flowing to the coast, resulting in frequent safety accidents because of the low stability. As a solution to this problem, a motion reduction device for floating bodies is proposed in this study. The device (motion reduction device based on the air pressure difference) was attached to a floating body and the effect was analyzed by comparing the results with those of a floating body without motion reduction. The effect analysis was further analyzed using a computer analysis test, and the method for increasing the stability of the floating body was studied, and its the effect was verified. Based on the analysis of the test results, the stability of the floating body increased with a motion damping device is higher than that of the floating body without a motion reducing device as the wave momentum reduces, owing to the air pressure difference. Therefore it was concluded that the use of such a device for reducing motion a floating body is useful not only for non-powered ships but also for powered and semi-submersible ships, and further research should be conducted by applying it to various fields.

Key Words : Floating body, Floating pier, Pontoon, Stability, Device for reducing motion, Deck slope, Mooring

* First Author : stace5850@gmail.com, 061-692-4236

† Corresponding Author : yumi3555@naver.com, 061-692-4236

1. 서 론

근래에 들어서 연안 해상공간은 생존을 위한 어업의 장소에서 여가를 즐기는 레저형 해양공간으로 발전되고 있다. 또한, 연안 해상공간은 해상교통 수출입의 물류 역할과 함께 다양한 산업 공간 및 문화공간을 제공하고 있어 선진국의 경우 해상공간을 해상문화복합공간으로 개발하고 있다.

가까운 일본의 경우 1995년부터 메가플로트 공법을 연구하여 초대형 부유식구조물(VLFSs/Very Large Floating Structure)을 활용 해상공항뿐만 아니라 석유비축기지, 해상물류기지, 테마파크 등 다양하게 활용하고 있다(Naver, 2011).

메가플로트 공법에 관한 연구는 활발하게 진행되어 설계 및 부유체의 안정성 확보에 대한 다양한 기술들이 연구개발되고 있다. 국내에도 이러한 메가플로트 공법을 적용한 사례로 2011년 서울반포 한강공원에 설치된 대형 수상 컨벤션 시설인 ‘세빛둥둥섬’과 ‘여주 수상레저 센터’ 등이 있다.

또한, 최근 해양레저인구 및 산업의 발달뿐만 아니라 어업의 규모가 커짐으로 연안의 부유체에 관한 관심이 높아져 연구개발이 활발하게 진행되고 있어 해양수산부에서는 2015년에 「국가 어항 부잔교 시설 설계 지침 및 표준모델 사례, 2015, 해양수산부」를 발간하기도 하였다.

초대형부유식구조물(VLFSs)은 고중량으로 주로 강재와 콘크리트로 제작 및 설치되어 외력과 사용하중에 대하여 저항력이 높아 부유체 안정성 확보가 유리하나 연안에서 사용되는 부유체는 플라스틱, 알루미늄 등과 같이 경량 구조체로서 외력에 대한 안정성이 상대적으로 낮다는 단점이 있다.

연안에서 주로 사용하는 부유체는 앞에서도 언급한 바와 같이 대부분 경량재를 사용하기 때문에 중량재를 사용하는 부유체보다 파랑에 의한 운동량이 많고 사용하중에 의한 편경사 발생량이 크기 때문에 경량 부유체는 안정성 평가에서 중량 부유체보다 상대적으로 낮게 평가되고 있다. 또한, 공공기관 또는 사용자의 관점에서 비교적 적은 예산이 소요되는 시설을 선호하고 있어 이러한 경량 부유체는 일반적으로 소모성 시설로 인식하기 때문에 안정성이 낮다고 알고 있지만, 복원성을 높이는 방법에 관한 연구는 선박과 초대형 부유식 구조물보다 상대적으로 진행되지 않고 있는 실정이다.

그래서 본 연구에서는 경량부유체의 운동저감효과를 높일 수 있는 장치를 국내외적으로 처음 연구개발하고 운동저감효과를 장치를 구비하지 않은 상태와 비교 연구하였다.

일반적으로 경량 부유체를 사용하는 부잔교 시설은 길이가 강성이 큰 부잔교보다 작은 크기로 설치하고 있어 12m 이상을 넘지 않도록 계획하고 있으며, 시설의 폭은 1.5m에서

10m 이하까지 다양하게 사용되고 있다. 따라서 금번에 연구한 부유체의 규모는 경량 철골구조에 부력재를 갖춘 부유체로 실험을 시행하였다. 이러한 부유체 안정성과 관련 기존의 연구는 많이 있으나, 그중 관련 연구를 다음과 같이 요약해보았다.

Seo et al.(2018)은 길이 15.0m 폭 10.0m의 폰툰형 플랫폼의 설계과정을 연구하고 각 구조부재의 구조설계를 수행하였다. 구조 강도 해석은 유한요소법(Finite Element Method)을 기반으로 탄성 스프링 거동을 고려한 상용 해석 프로그램인 ANSYS Mechanical solver(ANSYS, 2016)를 활용하여 정적 및 동적해석을 수행하여 설계 검토 및 절차에 대해 검토하였다.

Park et al.(2005)는 길이 500m 폭 300m 규모의 부유식 리조트에 대한 상세한 설계절차에 대해 소개하고, 유탄성 응답 해석으로 산출된 결과치를 활용, 각 부재의 구조를 설계하였다. 구조평가를 위해 ANSYS프로그램을 사용하여 동적해석을 수행, 구조설계에 대한 유용성을 검토하였다.

Koh et al.(2013)는 부유식 구조물의 상하동요 안정성을 향상시키는 방법에는 수직운동 감쇠를 위한 감쇠판 또는 Heave Plate 등을 부착하는 여러 방법을 연구하였다.

2. 운동저감장치의 작동원리 설명

본 연구에서 사용하는 장치명은 “기압차를 이용한 운동저감장치”라고 칭하였다. 장치의 구조는 하부가 열려있고 상부는 열고 닫히는 뚜껑형식의 개폐로 구성된 뒤집은 용기와 같은 형상이며, 부유체의 측부에 설치되어 운동 저감 역할을 하게 된다.

작동원리는 Fig. 1과 같이 부유체가 파랑(Wave)와 같은 외력에 의해 수면에서 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 상하운동(Heave) 등 운동을 할 경우 상승하려는 측부에 설치된 장치의 내부에 물기둥을 형성하여 측부의 무게를 증가시켜 상승 높이를 줄이는 작용으로 운동을 저감하는 원리이다.

이때 장치의 상부에 부착된 개폐기는 용기내의 압에 의해 자동으로 개폐작용을 반복하게 된다. 즉 부유체의 측부가 상승할 때 용기내의 물은 아래로 빠지지 못하고 용기내의 기압은 저기압 상태가 되어 주사기 입구를 막고 손잡이를 잡아당길 때 발생하는 내부기압이 형성된다. 반대로 부유체의 측부가 하강할 때는 상대적으로 물의 압력이 상부로 향하게 되어 내부의 공기를 개폐기를 통해 밖으로 밀어내는 역할을 하면서 내부의 기압은 대기압과 같은 상태가되어 내부의 물기둥이 해제되어 물의 중량에 의한 가속도를 줄이게 된다.

경량 부유체의 운동 저감으로 안정성 증가방법에 관한 연구

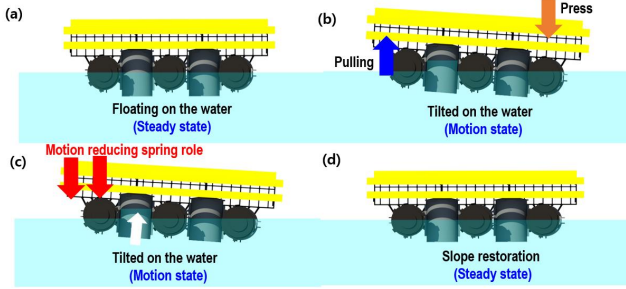


Fig. 1. Mechanism for device of reducing motion.

파랑(Wave)에 의해 부유체의 기울기가 발생한 경우뿐만 아니라 Fig. 2와 같이 부유체 상부의 편 하중이 발생할 때도 같은 작용을 하고, 편 하중이 시간의 변화에 따라 지속될 경우에도 장치의 작동은 지속되므로 편 하중 발생시 안정성 확보 효과는 수리 저항 방식보다 매우 개선되었다고 판단된다.

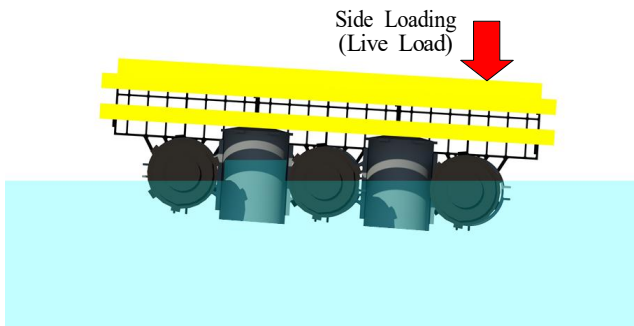


Fig. 2. Formation of a water column on the opposite motion reducing device when an inclination occurs due to the load on one side of floating body.

3. 부유체 모델링

3.1 개발모델선정

Fig. 3은 본 연구논문의 대상인 경량 알루미늄 부유체의 구조를 보여주고 있으며, Table 1에서는 연구 대상의 주요치수를 설명하고 있다. 경량 부유체의 구조체인 알루미늄 프레임은 외부틀 주 구조재와 내부 종횡 방향으로 보강하는 보조 구조재로 구분되며, 상부는 목재데크로 포설되고, 하부 부력재는 EPS 경량 단열재를 콘크리트와 철망으로 피복하여 주/부 구조재에 취부되는 구조체로 구성된다. 그리고 가장 핵심 연구 장치인 외력에 의하여 부유체의 운동량을 감소하는 운동저감장치를 구비한 부유체이다. 운동저감장치는 진공 유동방지장치라고도 명칭 하나 본 논문에서는 운동저감장치로 정리하였다.

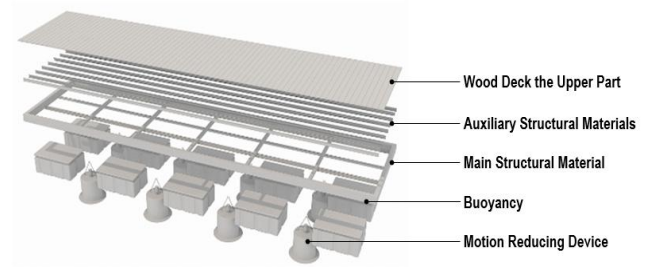


Fig. 3. Layout of lightweight floating body and motion reducing device.

Table 1. Size of test model

Division	Dimensions
LOA	12.0m
Breath	3.0m
Depth	0.686m
Draft	0.3m

Table 1에서 설명한 부유체의 규모는 Fig. 4 평면도와 측면도로 표현할 수 있다.

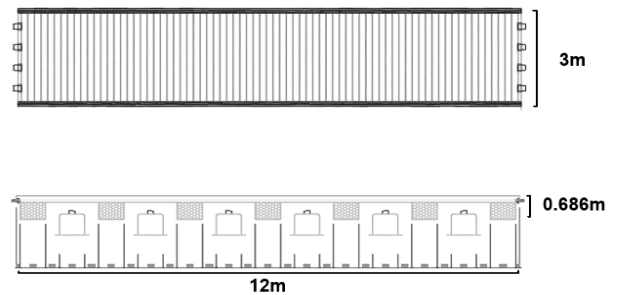


Fig. 4. Plan and side view of lightweight floating body

운동저감장치는 수면 및 부유체 상승 시 상단에 개폐가 가능한 공기통로가 단힘으로 장치 내부에 물을 담고 있는 상태가 되어 무게추 역할을 수행한다. 반대로, 수면 및 부유체 하강 시 장치도 같이 하강할 때에 공기개폐기가 열림으로 진공상태가 해제된다. 즉, 상승 시에는 무게추 역할을 하여 상승 가속도를 줄이지만 하강 시에는 운동저감장치 내부 기압이 대기압과 같아져 내부 수압이 부유체 하강을 가속도에는 영향을 끼치지 않는다. 이러한 반복적인 운동을 수행하며 부유체의 동요를 저감시키는 원리이다. 해당 운동저감장치의 모형과 구성은 Fig. 5로 설명하였다.

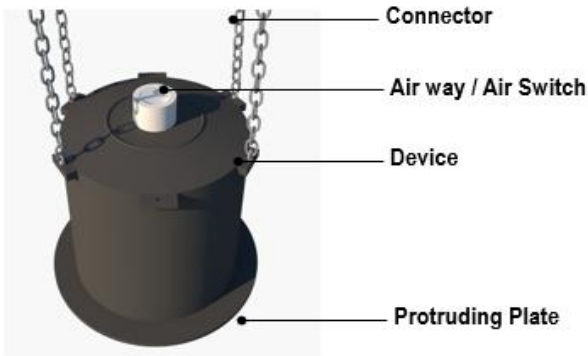


Fig. 5. Schematic of motion reducing device.

3.2 전산 해석 프로그램 소개

본 연구의 실험은 미국 ANSYS, Inc.사에서 개발한 해양 시뮬레이션 프로그램 ANSYS-AQWA를 사용하였으며, 이 프로그램은 주로 부유체의 유체동력학적 거동을 평가하는 해양 시뮬레이션 프로그램이다.

3.3 실험모델 (Model) 구분

본 연구에서 실험모델은 운동저감장치의 유무 및 고정방식에 따라 A, B, C로 분류하였으며 별도의 운동저감장치를 고려하지 않은 실험모델 A와 운동저감장치를 구비한 실험모델 B, C는 운동저감장치의 고정방식에 따라 Table 2와 같이 구분하였다.

실험모델 B는 부유체 하단에 용접 등을 통해 완전히 고정된 모델을 나타내며, 실험모델 C의 경우 운동저감장치가 부유체 하단에 체인을 통해 고정된(Semi-Fixed) 형태이다. 체인의 경우 압축력에 영향을 받지 않기 때문에 3D 모델링 상 운동저감장치와의 인장력만을 전달하는 스프링을 이용하여 부유체와 연결하였다.

Table 2. Division of test models

Model A	Non-Equipped; Motion Reducing Device
Model B	Equipped; Fixed Motion Reducing Device
Model C	Equipped; Semi-Fixed Motion Reducing Device

실험모델 C의 운동저감장치는 다음 Fig. 6과 같이 모델링 하였으며, 실험모델 B, C의 경우 장치로 인해 상하동요(Heave), 횡동요(Roll), 종동요(Pitch)의 부유체 주요 운동을 제한하였다.

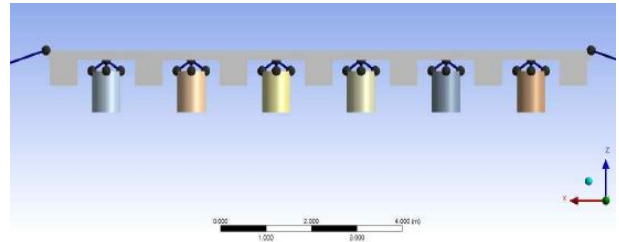


Fig. 6. Computational modeling of motion reducing device.

실험모델에 사용되는 운동저감장치의 효과를 구현하기 위해 실제로 장치에 대한 수조실험을 수행하여 힘과 변위와의 관계를 도출한 후 이를 개별모델에 스프링으로 적용했다. 이때 수조시험의 모습은 Fig. 7과 같다. 운동저감장치의 원리는 비어 있는 용기 내의 기압 차에 의한 물기둥을 형성 후 부유체 상승시 용기 내 물기둥이 상승하려는 부유체의 중량으로 작용해 운동 저감 스프링으로 작용하는 원리이다.

이때 실험모델 B의 경우 운동저감장치가 고정되어있기 때문에 시뮬레이션 상 상방향(Pulling)과 하방향(Press) 스프링을 적용하였고, 실험모델 C의 경우 인장력만을 전달하는 체인으로 연결되어 있으므로 상방향(Pulling) 스프링을 적용하였다. 이를 통해 상방향(Pulling) 하중에 대한 힘-변위 관계는 5.0kN/m이 도출되었으며, 하방향(Press) 하중에 대한 힘-변위 관계는 14.7kN/m의 값이 도출되었다. 운동저감장치의 수조 시험 결과로 상방향(Pulling) 하중과 하방향(Press) 하중에 대한 힘-변위 관계는 아래 그래프 Fig. 8과 Fig. 9로 확인할 수 있다.

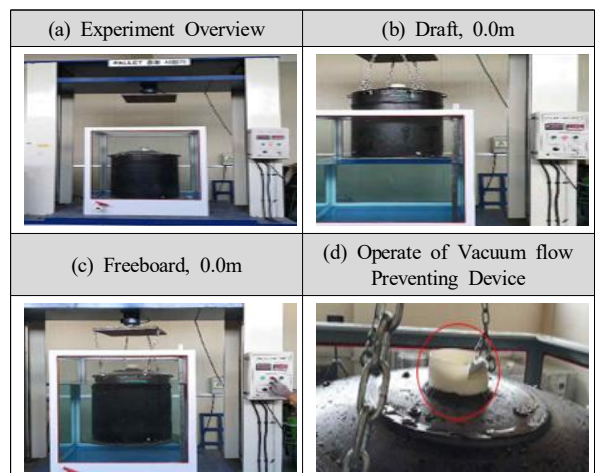


Fig. 7. Water tank test of motion reducing device.

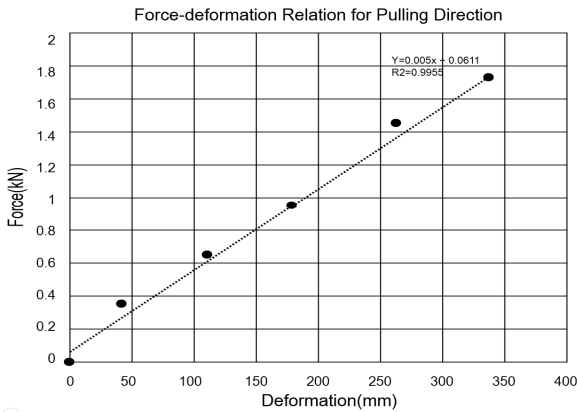


Fig. 8. Graph of pulling direction force and displacement.

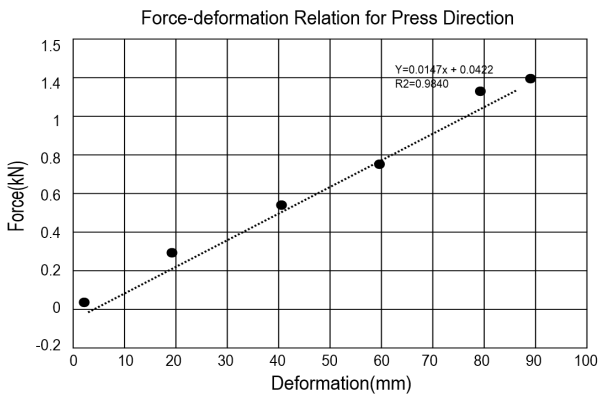


Fig. 9. Graph of press direction force and displacement.

해석 프로그램에서 실험모델 A와 실험모델 B, C의 3D모델링은 다음 Fig. 10과 Fig. 11 같이 모델링 하였다.

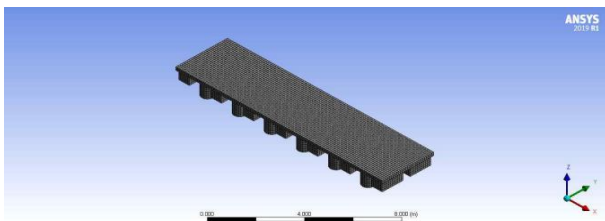


Fig. 10. Modeling of test model A.

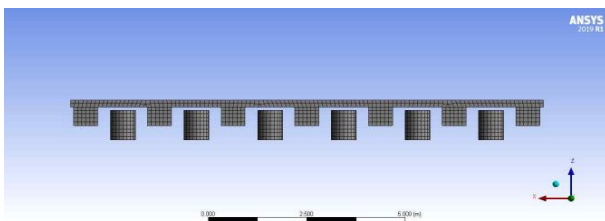


Fig. 11. 10. Modeling of test model B, C.

3.4 실험의 범위

실험범위는 Table 3과 같이 실시하였다.

Table 3. Range of Test

Stability and Slope angle	Normal; stability Normal static of in position and Side position by Slope Angle
Athletic Performance	Dynamic Stability of mooring and Solitary condition

4. 경량 부유체의 실험조건

4.1 환경조건 검토

모델별 부유체의 운동성능 검토는 순수 파랑에 대한 부유체의 운동 응답을 평가하기 위해 평상시 파고 0.3m를 적용하였고, 부유체 안정성 검토는 평상시 및 이상시 파랑, 조류와 바람 등 부유체에 작용할 수 있는 모든 해상환경조건을 고려하였으며 각 조건에 균집하중을 적용하여 경하시와 만재시로 구분 후 최종 해석 조건을 설정하였다.

만재시는 75kg의 성인 20명이 대상 부유체에 탑승하고 있는 상태를 가정하여 균집하중 1.5Ton을 고려한 홀수를 적용해 편 하중 재하시 갑판경사를 검토하기 위해 만재 편하중을 적용한 정적해석을 수행하였다. 이때 요구되는 기준각도는 5.71°이다. 이 값은 항만 및 어항 설계기준·해설(2017, 해양수산부) 중 갑판 경사가 $\tan\alpha=1/10$ 이하인 값에 해당한다.

부유체의 운동은 주로 입사파에 기인하나, 본 연구에서는 부유체의 최대 운동 응답을 유도하기 위하여 조류와 바람을 파랑과 동일한 방향으로 적용하였고, 수심은 5.0m로 평상시와 이상시의 파고 및 바람의 세기는 Table 4와 같다.

Table 4. Wind force and wave height in normal and bad weather

Div	Normal	Bad weather
Wind(m/s)	14m/s	40m/s
Wave(m)	0.3m	0.5m

해상의 불규칙 파랑을 정의하는 파랑 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼(첨두 상승계수 $r=2.14$)을 적용하였다. JONSWAP 스펙트럼은 풍파로 발달한 천해역에 가장 적합한 스펙트럼으로 알려져 있으며 한반도 연안에 대한 연구(Suh, 2010) 에서 한반도 연안의 JONSWAP 스펙트럼에 대한 첨두 상승계수 값을 2.41로 제시한 바 있다.

바람의 세기는 건축구조기준 2009(국토해양부 고시, KBC2009)에서 제안한 지역별 기본 풍속 중 전라북도 군산의 풍속을 적용하였다.

4.2 계류시스템 구성

계류방식은 구조체의 상부 프레임 모서리 4개소에 계류로프를 해저 앵커까지 고정시키는 4점 계류방식으로 가정하고 방향은 구조체의 각 모서리 45° 대각방향으로 향하도록 Fig. 12와 같이 설정하고, 파랑의 방향을 Fig. 13과 같이 다각 방향에서 발생하도록 구성하였다.

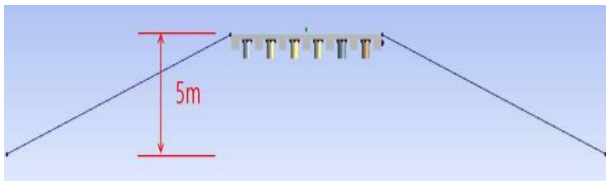
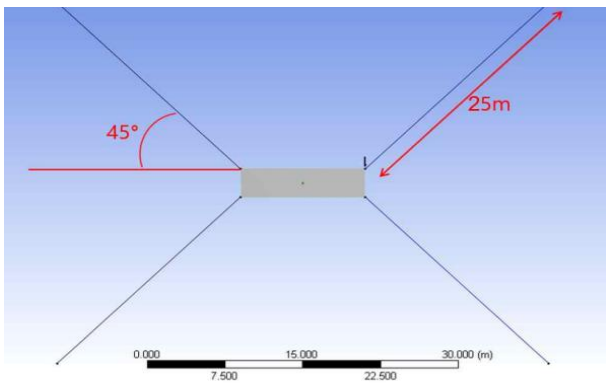


Fig. 12. Mooring system of floating body.

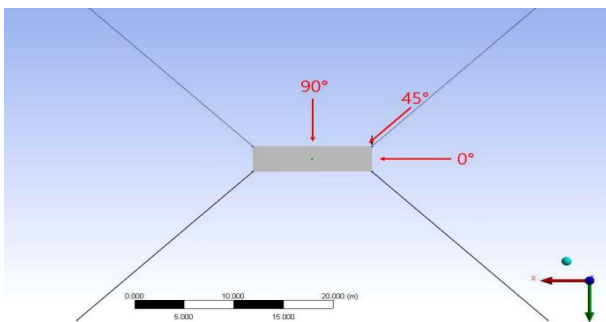


Fig. 13. Wind and wave direction for analysis.

4.3 각 상태 및 모델별 실험조건

각 상태 및 모델별 실험조건은 다음 표와 같다. Table 2의 실험모델을 각각 단독상태, 계류상태로 구분하였고, 단독상태의 경우 파랑, 바람 및 조류의 방향을 0°~180° 사이에서 5

개로 나누어 적용하였기 때문에 정상시와 이상시를 고려하여 모델별 10개의 조건을 Table 5~Table 10과 같이 구성하였고, 이때 실험조건별 모델별 명칭은 A1~A10, B1~B10, C1~C10으로 구분하였다.

계류상태의 경우 해석시간을 고려하여 파랑, 바람 및 조류의 방향을 0°~90° 사이에서 3개로 나누어 적용하였다. 또한, 정상시와 이상시를 고려하여 각 모델별 6개의 실험조건으로 구성하였으며, 단독상태와의 구분을 위해 실험조건 명칭 앞에 M(Mooring)을 추가하였다.

Table 5. Model A without mooring

CASE NO.	Wave			Wind		Tide current	
	H (m)	T (sec)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)
A1~A5 (Normal)	0.3	2.11	0	15.0	0	0.5	0
45			45				
90			90				
A6~A10 (Abnormal)	0.5	2.73	135	40.0	135	0.5	135
180			180				

Table 6. Model B without mooring

CASE NO.	Wave			Wind		Tide current	
	H (m)	T (sec)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)
B1~B5 (Normal)	0.3	2.11	0	15.0	0	0.5	0
45			45				
90			90				
B6~B10 (Abnormal)	0.5	2.73	135	40.0	135	0.5	135
180			180				

Table 7. Model C without mooring

CASE NO.	Wave			Wind		Tide current	
	H (m)	T (sec)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)
C1~C5 (Normal)	0.3	2.11	0	15.0	0	0.5	0
45			45				
90			90				
C6~C10 (Abnormal)	0.5	2.73	135	40.0	135	0.5	135
180			180				

Table 8. Model A with mooring

CASE NO.	Wave			Wind		Tide current	
	H (m)	T (sec)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)
MA1~ MA3 (Normal)	0.3	2.11	0 45	15.0	0 45	0.5	0 45
MA6~ MA8 (Abnormal)	0.5	2.73	90	40.0	90	0.5	90

Table 9. Model B with mooring

CASE NO.	Wave			Wind		Tide current	
	H (m)	T (sec)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)
MB1~ MB3 (Normal)	0.3	2.11	0 45	15.0	0 45	0.5	0 45
MB6~ MB8 (Abnormal)	0.5	2.73	90	40.0	90	0.5	90

Table 10. Model C with mooring

CASE NO.	Wave			Wind		Tide current	
	H (m)	T (sec)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)	V (m/s)	Dir (°)
MC1~ MC3 (Normal)	0.3	2.11	0 45	15.0	0 45	0.5	0 45
MC6~ MC8 (Abnormal)	0.5	2.73	90	40.0	90	0.5	90

5. 실험결과

5.1 복원성 실험결과

부유체의 복원성 검토는 ‘국토해양부고시 제2009-590호 선박복원성기준, 제7장 부유식 해상구조물의 복원성 기준’에 따라 검토하였다. 수조 실험결과 및 동적동요량 시뮬레이션 결과, 실험모델 B와 C의 운동저감장치에 의한 동요량 감소가 분명히 나타나므로 가장 악조건이라 판단되는 운동저감장치를 구비하지 않은 실험모델 A만 검토하였다. 그 결

과 실험모델 A의 해수유입각은 14°로 계산되었고, 경사 우력정(Wind Heeling Arm) 산정을 위한 적용풍속은 36m/s로 결정했다. 계산에 사용된 흘수는 0.3m, 건현은 0.386m이며 GM은 1.7m로 계산되어 0보다 커야 하는 기준을 충족한 값을 산출했다.

실험모델 A 부유체 실험결과는 Fig. 14와 Table 11과 같다.

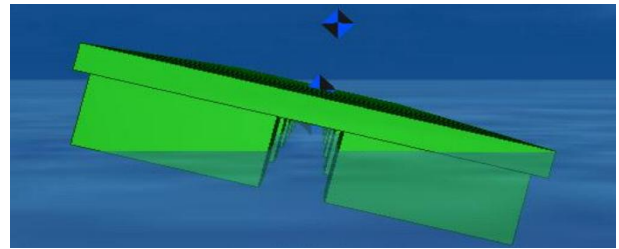


Fig. 14. Test result of Flooding angle : Test model A.

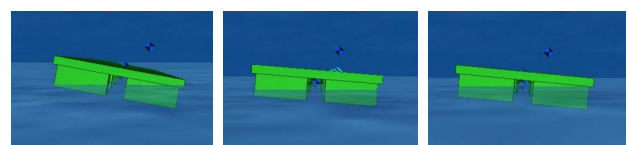
Table 11. Test result of Stability : Test model A

Load Case	Depth (m)	Free Board (m)	Static Stability	Dynamic Stability	
			GM>0	Area Ratio	
				Seawater Inflow Angle	Secondary Intersection
Full Load	0.3	0.386	1.7> 0.0	3.06 (14°) >1.4	1.95 (29°) >1.4

5.2 모델별 경사도 실험결과

모델별 경사도 실험을 위해 하중조건은 만재시 정위치와 편현위치 구분하였으며, “알기쉬운 항만설계기준 핸드북, 2011”에 의하면 정적 안정성 검토 기준의 경우 GM은 0 이상, 갑판경사각은 5.71° 미만이어야 한다.

실험결과, 실험모델 A의 경우 Fig. 15와 Table 12 같이 편현위치에서 갑판경사가 5.71°를 넘어 기준을 만족하지 못하였고, 실험모델 B, C는 Fig. 15와 Table 13 그리고 Table 14 같이 구비된 운동저감장치의 효과로 인해 정적 안정성이 증가한 것으로 확인되었다.



Model A Model B Model C

Fig. 15. Comparison of Test models deck slope.

Table 12. Test result of deck slope : Test model A

Load Case	Depth (m)	Free Board (m)	Static Stability	
			GM>0 (m)	Slope Angle (°)
Full Load (in Position)	0.3	0.386	1.7>0.0	0.00<5.71
Full Load (Side position)	0.29	0.396	3.36>0.0	10.48<5.71 (N.G)

Table 13. Test result of deck slope : Test model B

Load Case	Depth (m)	Free Board (m)	Static Stability	
			GM>0 (m)	Slope Angle (°)
Full Load (in Position)	0.24	0.446	1.6>0.0	0.00<5.71
Full Load (Side position)	0.26	0.426	2.51>0.0	4.62<5.71 (O.K)

Table 14. Test result of deck slope : Test model C

Load Case	Depth (m)	Free Board (m)	Static Stability	
			GM>0 (m)	Slope Angle (°)
Full Load (in Position)	0.33	0.356	1.59>0.0	0.00<5.71
Full Load (Side position)	0.36	0.326	2.73>0.0	5.56<5.71 (O.K)

5.3 단독상태 동적동요량 실험결과

단독상태 대상 부유체의 평상시(파고 0.3m) 및 이상시(파고 0.5m) 실험조건에 대하여 6차 유도 최대 동적동요량 결과는 아래 Table 15에 정리하였으며, 실험결과 실험모델 B, C의 경우 모든 기준을 만족하였으나 실험모델 A의 경우 이상시 90° 조건에서 횡 요동량(Roll)이 5.71°를 초과해 기준을 만족하지 못하였다.

5.4 계류상태 동적동요량 실험결과

계류상태 부유체의 평상시와 이상시 실험조건 관련 Heave, Roll, Pitch에 대한 동적동요량의 결과는 Table 16과 같으며, 단독상태와는 달리 모든 실험모델이 동요량 기준치를 만족하였고 실험모델 A에서 최대 5.793kN의 동적계류장력이 개선되었음을 확인할 수 있다.

Table 15. Test result without mooring condition : Maximum movement

Model	Wave (m)	Maximum Dynamic Movement			
		Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	
A	Normal	0.3	0.182	4.862	1.998
	Abnormal	0.5	0.353	6.350	3.445
B	Normal	0.3	0.100	2.844	1.090
	Abnormal	0.5	0.236	4.481	2.339
C	Normal	0.3	0.120	3.490	1.348
	Abnormal	0.5	0.274	5.240	2.692
Against a A (%)	Normal	Model B	54.8	58.5	54.6
		Model C	65.6	71.8	67.5
	Abnormal	Model B	66.7	70.6	67.9
		Model C	77.4	82.5	78.1

Table 16. Test result with mooring condition : Maximum movement

Model	Wave (m)	Maximum Dynamic Movement			
		Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	
A	Normal	0.3	0.171	4.305	1.893
	Abnormal	0.5	0.334	5.537	3.205
B	Normal	0.3	0.104	2.847	1.140
	Abnormal	0.5	0.242	3.483	2.151
C	Normal	0.3	0.129	3.438	1.404
	Abnormal	0.5	0.275	4.316	2.529
Against a A (%)	Normal	Model B	60.9	66.1	60.2
		Model C	75.8	79.9	74.2
	Abnormal	Model B	72.5	62.9	67.1
		Model C	82.6	77.9	78.9

5.5 실증시험

기압차를 이용한 운동저감장치를 구비한 경량부유체의 실제적용성을 판단하기 위해 해상에서 Fig. 16과 같이 실제 부유식 구조물에 실증해보았다.

실제 설치된 부유체의 초기복원성을 검측결과 Table 17과 같이 초기복원효과가 6.23으로 특수선(다동선)의 GoM기준 0.15보다 40배 이상 높게 분석되어 효과가 향상된 것으로 판단된다.

Table 17. Test of initial stability with sample product (field test)

Test	Stability Test(GoM)			Note
	Standard	Non Loaded	Full Loaded	
Result	over 0.15	7.526	6.233	Multihulls Type
		O.K	O.K	



Fig. 16. Test of initial stability on the sea

6. 결론

경량 부유체에 운동저감장치를 구비 하도록 하여 정적, 동적 안정성에 대하여 장치를 구비 하지 않은 부유체와 비교 실험으로 안정성 증대 방법을 검토해 보았다. 본 연구에서 소개한 운동저감장치는 기압차에 의해 발생한 물기둥을 이용한 운동저감장치로, 그 효과가 다음과 같이 상당히 우수한 것으로 실험을 통해 확인되었다.

실험결과를 살펴보면 부유체의 기본적인 복원성은 모든 경우 해당 기준을 만족하였으나, 경사도 검토결과 장치를 미구비한 실험모델 A는 편향 위치에서 갑판경사가 5.71° 이상으로 기준을 만족하지 못하고 장치를 구비한 실험모델 B, C는 기준을 만족하였다.

이는 실험모델 B, C에 구비된 운동저감장치의 스프링 효과로 횡요동(Roll)를 감소시켜 부유체의 갑판경사가 5.71°이하로 기준을 만족하게 하였다. 부유체에 대한 유체동역학적 해석 결과 운동저감장치를 구비한 부유체의 경우 그렇지 않은 부유체에 비해 단독상태에서는 25.0%에서 최대 36.2%, 계류상태에서는 20.2%에서 최대 37.6%의 운동성능 개선 효과가 확인되었다.

또한, 정적 안정성 검토에서 편위치 재하시 갑판의 경사가 장치를 구비한 부유체가 미구비 부유체보다 2배 이상 줄어든 것으로 확인된다. 이것은 부유체를 이용하는 사용자의 안전성을 더욱 확보하여 해양 안전사고 발생률을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 실제 부유식 구조물에서 장치를 구비한 부유체의 초기복원성을 검토 결과 특수선박 다동선의 기준인 GoM 0.15보다 훨씬 높은 복원성능을 확인할 수 있었다.

앞으로 기압 차를 이용한 운동저감장치의 응용 분야는 매우 많을 것으로 판단되고, 특히 해양탐사선이나 시추선과 같은 반잠수선에 효과적으로 응용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구를 기반으로 부유체의 운동량 저감을 통해 파의 투과율을 최소화하여 파의 투과율을 현저하게 저감 할 수 있는 부유식 방파제에 대한 연구를 계속 이어갈 계획이다.

감사의 글

학위과정과 학술 게재 등 한없이 부족한 저에게 많은 도움을 주신 분들과 지도해주신 분들께 작은 지면을 빌려 감사의 마음을 전하고자 합니다.

바쁘신 와중에도 논문을 면밀히 검토하여 주신 고 교수님의 은혜에 감사드리며 본 논문의 연구를 도와준 한유미, 누이엔지니어이티 한민 대표님, (주)블루오션테크 임직원분들께도 고마움을 전합니다.

References

- [1] Naver(2011), Mega-Float; Very Large Floating Structure, <http://blog.naver.com/rits/146543442>(2011)
- [2] Koh, H. J., J. R. Kim, and I. H. Choi(2013), Model test for heave motion reduction of a circular cylinder by a damping plate. *Journal of ocean Engineering and technology*, 27(4), pp. 76-82.
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, Standard of Ship Stability; Chapter 7. Standard of Floating Maritime Structure Stability.
- [4] Ministry of Oceans and Fisheries, 2015, National Fishing port Floating pier Design Guidelines and Standard Model design ; Condition of using for Floating pier(2015) p. 39.
- [5] Ministry of Oceans and Fisheries, 2017, Port and Fishing Port Design Standard Commentary ; Marina KDS 64 70 00(2017) Chapter 4, pp. 15-16.
- [6] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2019), Korean Building Code; Standard of Building Structure Design Load, Table 5.5-1 Base wind velocity of Local Area in Korea (건축구조기준; 건축설계하중기준, Table 5.5-1 지역별 기본풍속), p. 41.
- [7] Suh, K. D.(2010), Some statistical characteristics of large deepwater waves around the Korean Peninsula, *Costal Engineering* 57(2010) pp. 375-384.

- [8] Korea Port Association Editorial Department(2011), Port Design Criteria Handbook (알기쉬운 항만설계기준 핸드북), Korea Ports & Harbours Association, pp. 8-52.

Received : 2023. 03. 21.

Revised : 2023. 05. 04. (1st)
 : 2023. 05. 12. (2nd)

Accepted : 2023. 06. 27.