

기존 케이슨방파제에 신규 케이슨 추가설치 시 댐핑존 영향에 따른 유체와 케이슨들간의 상호작용 평가

Interaction Analysis between Waves and Caissons by Damping Zone Effect for Installing New Caisson on Old Caisson Breakwater

박민수* · 김영택** · 박상기*** · 민지영****

Min Su Park*, Young Taek Kim**, Sangki Park*** and Jiyoung Min****

요지 : 기존 케이슨방파제의 전면 또는 후면에 추가로 케이슨을 설치하여 구조물의 안정성을 향상시키기 위한 설계 및 시공사례가 수행되고 있다. 기존 케이슨과 신규 케이슨사이에 존재하는 유체의 공진으로 구조물에 작용하는 파력이 과도하게 해석되는 현상이 포텐셜이론 기반의 수치해석에서 발생된다. 본 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS AQWA에서 제공되는 댐핑존 옵션을 이용하여 입사하는 파랑과 케이슨들간의 상호작용 영향에 의해 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 분석하였다. 공진이 발생되는 유체에 댐핑존을 적용하여 댐핑계수 변화에 따른 케이슨에 작용하는 파력을 도출하였다. 또한 전후 케이슨간의 간격 및 좌우 케이슨간의 간격 변화에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 주파수영역 수치해석을 통해 검토하였다.

핵심용어 : 파와 구조물간의 상호작용, 케이슨 방파제, 댐핑존, 파력, ANSYS AQWA

Abstract : The design and construction are carried out to improve the structural stability of caisson breakwaters by installing new caissons on the front or rear of old caissons. The wave forces acting on caisson are excessively calculated by the resonance of fluid existing between the old caisson and the new caisson in the numerical analysis using potential flow. In this study, we used the damping zone option in ANSYS AQWA program to analyze the wave forces acting on individual caissons according to the interaction effects between the incident wave and the caisson. By applying the damping zone option to the fluid in which resonance occurs, the wave forces acting on individual caissons were calculated by the change of damping factor. In addition, the wave force characteristics acting on individual caissons were analyzed for the different distances between caissons in the frequency domain analysis.

Keywords : wave structure interaction, caisson breakwater, damping zone, wave force, ANSYS AQWA

1. 서 론

지구온난화 및 이상기후 현상 등에 의한 해수면 상승과 더불어 케이슨방파제에 작용하는 파력이 이전 설계에 사용된 설계파 조건보다 상향됨에 따라 기존에 설치된 케이슨방파제의 안정성에 문제가 발생되고 있다. 이에 대한 해결방안으로 기존 케이슨방파제의 전면 또는 후면에 추가로 케이슨을 설치하여 기존 케이슨방파제를 보강하는 설계 및 시공사례가 수행되고 있으나, 현재 이러한 설계에 대한 기준이 없어 설계

자의 판단에 따라 다양하게 진행되고 있다. 따라서 기존 케이슨방파제의 안정성을 향상시키기 위해 추가로 케이슨이 설치되는 경우 구조물에 작용하는 파력 특성 및 주요 고려사항 등에 대한 데이터 확보가 필요하다.

다수의 원형 케이슨으로 구성된 기존 방파제 후면에 신규 원형 케이슨이 추가로 설치될 경우 입사하는 파랑과 원형 케이슨간의 상호작용 영향에 따른 개별 원형 케이슨에 작용하는 파력 특성이 고유함수전개법(Eigefunction expansion method)을 이용하여 분석되었다(Park, 2019, 2020a). 수치해석 결과

* 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원(Corresponding author: Min Su Park, Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0289, Fax: +82-31-910-0121, mspark@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원(Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

*** 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원(Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**** 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원(Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

기존 원형 케이슨 후면에 신규 원형 케이슨이 추가로 설치될 경우 첫 번째 피크점(파력이 급격히 증가했다가 감소하는 점)과 마지막 피크점 사이에 원형 케이슨의 개수 증가와 더불어 피크점의 개수도 같이 증가되었으며, 특정 주기에서는 유체의 공진으로 전면에 위치한 원형 케이슨과 후면에 위치한 원형 케이슨 사이에 파랑이 증폭되는 중복파(Standing wave) 현상이 발생되었다. 또한 Park(2020b)은 원형 케이슨 사이의 간격이 있는 경우 좁아진 틈으로 유속이 빨라지면서 유체입자가 물체 표면에서 떨어져 나가는 박리(Separation)현상이 생기고 박리점 이후 역압력 경사에 의한 역방향 속도로 후면에 소용돌이 형태의 복잡한 와류가 발생되어 입사 에너지가 손실되는 효과를 반영하기 위해 원형 케이슨 사이에 투과성판(Porous plate)을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 이와 같이 3차원 선형 포텐셜이론 기반의 고유함수전개법에 Darcy 법칙을 적용하여 공극률 계수에 따른 투과성 원기둥에 작용하는 파랑변형 문제를 다룬 논문들로는 Wang and Ren(1994), Williams and Li(2000), Cho(2003, 2004), Sankarbabu et al.(2007, 2008), Park et al.(2010)의 연구들이 있다.

사각형 불투과성 구조물로 구성된 기존 케이슨방파제의 안정성을 향상시키기 위해 케이슨방파제의 전면 또는 후면에 추가로 사각형 케이슨방파제를 설치할 경우 입사하는 파랑과 사각형 케이슨 구조물간의 상호작용 영향에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 Park(2021)은 상용 프로그램인 ANSYS AQWA를 이용하여 시간영역 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과 고유함수전개법을 이용한 불투과성 원형 케이슨방파제와 유사하게 특정 주기에서 유체의 공진으로 전면에 위치한 사각형 케이슨과 후면에 위치한 사각형 케이슨 사이에 파랑이 증폭되는 중복파(Standing wave) 현상이 발생되었다. 또한 시간에 따른 수치해석에서 전면 케이슨에 작용하는 파력과 후면 케이슨에 작용하는 파력이 서로 반대 방향으로 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 포텐셜이론 기반의 수치해석에서는 점성유동(Viscous flow)의 영향이 고려되지 못해 구조물에 작용하는 파력이 과도하게 평가되는 경우가 있는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 구조물들에 의해 둘러싸인 유체 영역에 댐핑존(Damping zone) 영향을 고려한 수치해석들이 Chen(2005), Fournier et al.(2006), Pauw et al.(2007), Bunnik et al.(2009), Watai et al.(2015), Ganesan T and Sen(2016), Chen et al.(2021)에 의해 수행되었다. 하지만 기존 연구들은 서로 인접한 부유 구조물에 관한 것으로 케이슨방파제와 같이 고정식 구조물에 댐핑존 영향을 고려한 연구는 거의 없는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 기존 사각형 케이슨방파제에 추가로 케이슨이 설치될 경우 점성유동의 영향이 고려되지 못해 구조물에 작용하는 파력이 과도하게 평가되는 문제를 최소화하기 위해 케이슨들에 의해 둘러싸인 유체영역에 ANSYS AQWA에서 제공되는 댐핑존 효과를 고려하여 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 면밀하게 분석하였다. ANSYS AQWA는 Cheetham

et al.(2007)에 의해 제안된 댐핑계수(Damping factor) 기반으로 수치해석이 수행되는데, 우선 공진이 발생되는 유체영역에 댐핑존 옵션을 적용하고 댐핑계수 변화에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력을 신출하였다. 또한 항만 및 어항공사 표준시방서에서 제시하는 케이슨 거치 허용오차 기준에 따른 좌우 케이슨간의 간격 변화 및 기존 케이슨의 토우 길이를 고려한 앞뒤 케이슨간의 간격 변화에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 주파수영역 수치해석을 통해 검토하였다.

2. 수치해석 조건 설정

ANSYS AQWA는 파도, 바람, 조류 등의 영향으로 인한 해양구조물의 동적거동을 시뮬레이션하는 프로그램으로, 다수의 구조물이 존재하는 경우 한 구조물의 움직임이 다른 구조물의 움직임에 영향을 줄 수 있으므로 이러한 인접 구조물 사이의 유체 역학적 상호작용 효과를 고려할 수 있고, 최대 50개의 구조물과 50개의 관절 구조로 결합된 해양구조물의 유체 역학적 및 기계적 동적 구성의 모델링이 가능하다. 3차원 포텐셜 이론 기반의 ANSYS AQWA의 기본 속도 포텐셜을 식(1)과 같으며 부유식 구조물뿐만 아니라 방파제와 같이 고정식 구조물에 적용할 수 있다.

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 \phi_R \quad (1)$$

여기서, ϕ_I 는 입사파(Incident wave) 속도 포텐셜, ϕ_D 는 산란파(Diffraction wave) 속도 포텐셜, ϕ_R 는 구조물의 6자유도 운동에 의한 방사파(Radiation wave) 속도 포텐셜을 나타낸다.

또한 포테셜이론 기반의 수치해석에서 점성유동의 효과가 고려되지 못해 인접한 구조물에 의해 둘러싸인 유체영역에서 비정상적인 공진으로 구조물에 작용하는 하중이 과도하게 평가되는 것을 방지하기 위해 식(2)와 같이 공진이 발생되는 유체영역에 댐핑 자유수면 경계조건을 비선형 시간영역 방정식에 적용할 수 있으며, Chen et al.(2021)은 이러한 댐핑존 옵션을 이용하여 다수 부유체간의 간격이 좁은 경우에 대한 수치해석을 수행하였다.

$$\frac{\omega^2}{g}(\alpha_d^2 f_1 - 1)\phi - 2i\frac{\omega^2}{g}\alpha_d f_1 \phi + \frac{\delta\phi}{\delta z} = 0 \text{ where } z = 0 \quad (2)$$

여기서, ω 는 파주파수(Wave frequency), g 는 중력가속도, α_d 는 댐핑계수, f_1 는 구조물간의 간격과 관련된 함수이다.

기존 사각형 케이슨방파제의 안정성을 높이기 위해 케이슨이 추가 설치되는 경우 입사하는 파랑과 케이슨간의 상호작용 영향을 분석하기 위해 사석마운드 및 케이슨들은 강체거동을 하고 콘크리트(단위중량 2.3 ton, 압축강도 41 MPa)로만 구성된다고 가정하여 Fig. 1과 같이 설정하였다. 본 연구에서는 추가로 설치되는 케이슨과 기존 케이슨간의 앞뒤 설치간

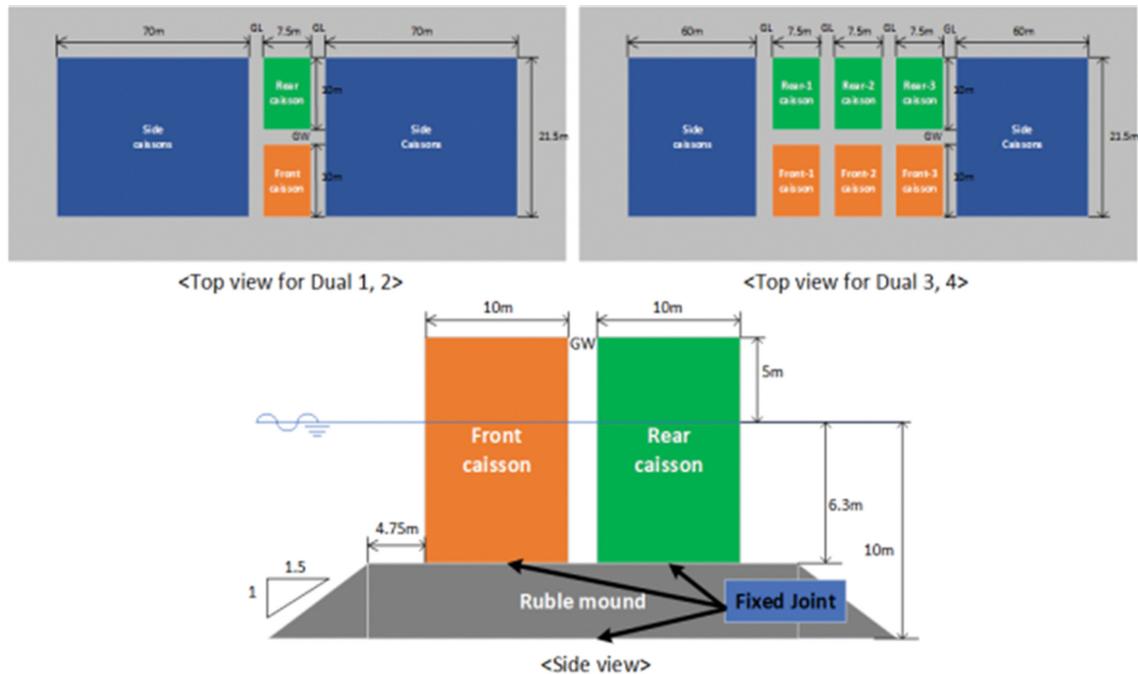


Fig. 1. Definition sketch of numerical model for a rectangular caisson breakwater.

Table 1. Cases of numerical analysis

Case	Name	GL (mm)	GW (mm)	Shape
Dual 1	D1-GW150	100	150	
	D1-GW750	100	750	
	D1-GW1500	100	1500	
Dual 2	D2-GW150	150	150	
	D2-GW750	150	750	
	D2-GW1500	150	1500	
Dual 3	D3-GW150	100	150	
	D3-GW750	100	750	
	D3-GW1500	100	1500	
Dual 4	D4-GW150	150	150	
	D4-GW750	150	750	
	D4-GW1500	150	1500	

격(GL) 및 좌우 케이슨간의 간격(GL) 변화에 따른 영향을 집중적으로 검토하기 위해 좌우에 설치된 케이슨의 길이는 추가로 설치되는 케이슨의 길이보다 약 10배 정도 크게 하였다. 수치해석에서 수심은 10m로 고정하였으며 개별 케이슨은 가로 7.5m, 세로 10m, 높이 11.3m이고, 케이슨 추가 설치에 따른 상호작용 효과는 좌우 케이슨간의 간격 변화(GL)와 앞뒤 케이슨간의 거리변화(GW)에 따른 영향을 고려하기

위해 Table 1과 같이 설정하였다. 이때 좌우 케이슨간의 간격은 항만 및 어항공사 표준시방서에서 케이슨 거치 허용차가 5천톤 미만인 경우 100 mm이고 5천톤 이상인 경우 150 mm이므로 기준에 설치된 케이슨들은 이 기준을 준용하여 설치되었다고 판단하여 이를 적용하였다. 추가로 설치되는 케이슨이 기존 케이슨에 매우 근접하게 설치되는 조건을 반영하기 위해 앞뒤 케이슨간의 거리(GW)를 150 mm로 설

정하였고, 기존 케이슨의 안정성 향상을 위해 설치되는 토우 길이만큼 이격된 상태에서 추가 케이슨이 설치되는 조건을 반영하기 위해 앞뒤간의 거리(GW)를 최대 1,500 mm로 설정하였다.

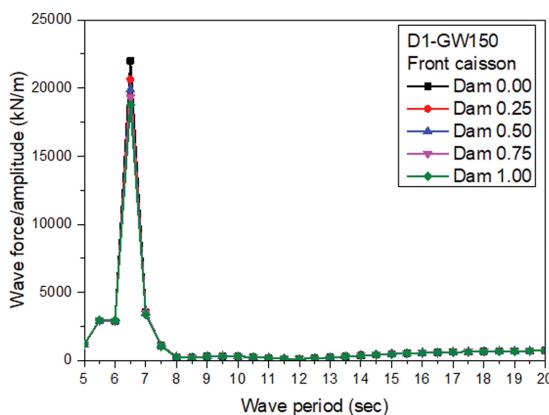
또한 Dual 3과 4 조건에서는 좌우 케이슨 개수 증가에 따른 입사하는 파랑과 다수의 케이슨들간의 상호작용 영향을 고려하였다. ANSYS AQWA는 구조물 메쉬 개수에 제한(최대 60,000 노드, 40,000 요소)이 있어 사석 마운드와 길이가 긴 좌우 케이슨은 최대 메쉬 사이즈를 3.0 m, 개별 케이슨은 0.4 m, 그리고 댐핑존은 앞뒤 케이슨의 길이에 따라 GW150은 0.06 m, GW750은 0.15 m, GW1500은 0.2 m로 설정하여 최대 메쉬 개수 제한 조건에 맞게 조절하여 수치해석을 수행하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

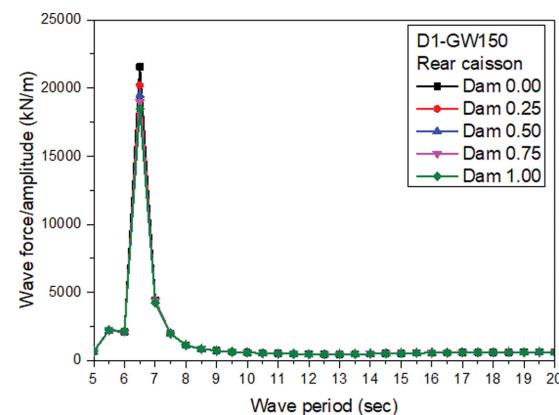
구조물과 구조물이 매우 근접하게 설치될 경우 구조물에 의해 둘러싸인 유체가 특정 주파수에서 공진하는 현상이 발생되는데 포텐셜이론 기반의 수치해석에서는 점성유동의 영향이 고려되지 않아 구조물에 작용하는 하중이 과도하게 산출되는 현상이 발생되므로 이에 대한 해결방안이 필요하다. Fig. 2는 기존 사각형 케이슨 뒤에 신규 케이슨이 매우 근접하게

설치되는 조건(D1-GW150)에서 구조물에 둘러싸인 유체영역에 ANSYS AQWA에서 제공되는 댐핑존 옵션을 반영하여 댐핑계수 변화에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성을 보여주고 있다. Fig. 2에서 가로축은 입사하는 파랑의 주기를 나타내고 있으며, 세로축을 케이슨에 작용하는 파력을 입사하는 파랑의 진폭(=입사파과 파고(H)/2)으로 나눈 값이다. ANSYS AQWA에서 제공되는 댐핑계수 0.0은 댐핑존 옵션이 적용되지 않은 상태이고 댐핑계수 1.0은 최대의 댐핑효과가 반영된 상태를 의미한다. 전면 케이슨과 후면 케이슨에 작용하는 파력은 공진이 발생되는 특정주기를 제외하고는 댐핑계수 변화에 관계없이 거의 유사한 값을 나타내고 있으나, 공진이 발생되는 주기 6.5초에서는 댐핑계수가 증가함에 따라 파력이 감소하는 경향(댐핑계수 0.25 = 6.2% 감소, 댐핑계수 0.5 = 9.5% 감소, 댐핑계수 0.75 = 12.1% 감소, 댐핑계수 1.0 = 14.5% 감소)을 보이고 있다.

Fig. 3은 Dual 1(GL = 100 mm) 케이스에서 앞뒤 케이슨간의 간격(GW)에 변화가 발생될 경우 댐핑존 옵션 적용 여부에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성을 나타내고 있다. 이때 댐핑효과를 최대화하기 위해 댐핑계수는 1.0을 적용하였다. 앞뒤 간격 변화에 따른 수치해석 조건에서 댐핑계수의 영향은 공진이 발생되는 특정주기 부근에서만 Table 2와 같이 파력이 급격하게 감소하는 경향이 나타나고 그 외 주



(a) Wave force of front caisson



(b) Wave force of rear caisson

Fig. 2. Wave force of D1-GW150 case for various damping factors.

Table 2. Rate (with damping/without damping) of wave force for dual 1 case

D1-GW150			D1-GW750			D1-GW1500		
Period (sec)	Front (wi/wo)	Rear (wi/wo)	Period (sec)	Front (wi/wo)	Rear (wi/wo)	Period (sec)	Front (wi/wo)	Rear (wi/wo)
5.5	1.012	1.015	6.0	1.094	1.094	10.5	0.955	0.908
6.0	1.028	1.030	6.5	1.086	1.120	11.0	0.816	0.786
6.5 (peak)	0.853	0.857	7.0 (peak)	0.962	1.020	11.5 (peak)	0.403	0.392
7.0	0.946	0.957	7.5	0.640	0.728	12.0	0.762	0.748
7.5	0.966	0.992	8.0	0.743	1.020	12.5	1.024	1.010

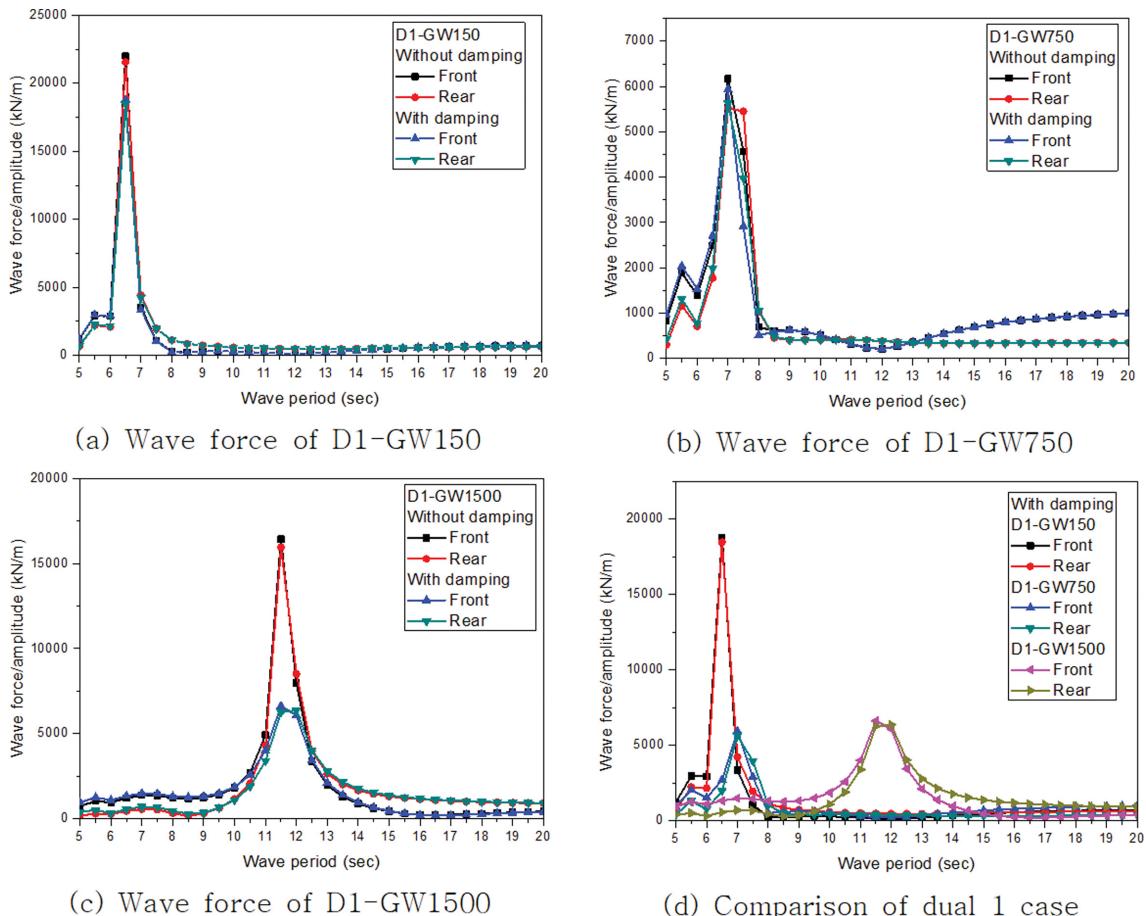


Fig. 3. Comparison of wave force with damping and without damping for dual 1 case.

기에서는 뎁핑계수 적용 여부에 관계없이 유사한 파력 분포 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 특히 주목할 점은 앞뒤 케이슨 간격이 넓을수록 뎁핑계수에 따른 파력 감쇠율이 높게 나타나고 있으며 공진이 발생되는 주기도 길어지고 있다. D1-GW750인 경우를 제외하고는 피크값 발생 전 주기까지는 전면에 위치한 케이슨에 작용하는 파력이 후면에 위치한 케이슨에 작용하는 파력보다 높은 값을 가지지만, 피크값 발생 이후 주기부터는 반대로 후면 케이슨에 작용하는 파력이 높게 나타나고 있다. 앞뒤 케이슨 간격이 750 mm에서는 피크값 발생 이후 주기에서도 입사하는 파랑과 케이슨간의 상호 작용 영향이 크게 발생되어 다른 수치해석 조건들과는 다르게 전면과 후면 케이슨에 작용하는 파력 분포 패턴에 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(d)의 앞뒤 케이슨 간격 변화에 따른 파력 비교를 보면 피크값이 발생되는 주기 부근에서의 파력을 제외하더라도 D1-GW1500 조건에서 전반적으로 개별 케이슨에 작용하는 파력이 다른 조건보다 높게 나타났다. 따라서 케이슨에 작용하는 파력을 감소시켜 구조물의 안정성을 향상시키기 위해서는 앞뒤 케이슨간의 간격을 최소화할 필요가 있다.

Fig. 4는 Dual 1 케이스에서 후면에 추가로 설치되는 케이슨이 없는 조건인 기존 케이슨만 설치된 상황을 D1-Single 조

건으로 설정하여 파력을 계산하고 다시 Dual 1 케이스에서 뎁핑계수가 1.0인 경우 개별 케이슨에 작용하는 파력을 D1-Single 조건에 작용하는 파력으로 나눈 비율을 보여주고 있다. Fig. 4에서 비율이 1.0 이상인 경우는 기존 케이슨에 작용하는 파력보다 높은 파력의 영향을 받는 조건을 의미한다. D1-Single 조건에서 만약 입사하는 파랑과 구조물간의 상호 작용 영향이 없으면 구조물에 작용하는 파력은 일정하게 증가하는 곡선 형태의 파력 분포 특성을 보일 것이지만, 파와 구조물의 상호작용 영향으로 파력 작용 패턴에 변화가 발생되었으며 주기 11.5초에서 최소 파력을 갖는 것을 알 수 있다. Dual 1 케이스에 작용하는 파력을 D1-Single 조건의 파력으로 나눈 비를 보면 D1-GW150과 D1-GW750의 파력값은 차이가 발생되지만 작용 패턴은 유사한 것을 확인할 수 있고 공진이 발생되는 주기 부근을 제외하고는 기존 케이슨(D1-Single)에 작용하는 파력보다 작게 나타나고 있다. 하지만 앞뒤간의 케이슨 간격이 긴 D1-GW1500에서는 전면에 위치한 케이슨에 작용하는 파력은 대체적으로 장주기 14.5초 이상에서 기존 케이슨에 작용하는 파력보다 작고 후면에 위치한 케이슨에 작용하는 파력은 9.5초 이하와 16.0초 이상 주기에서 기존 케이슨에 작용하는 파력보다 작아지는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 케이슨이

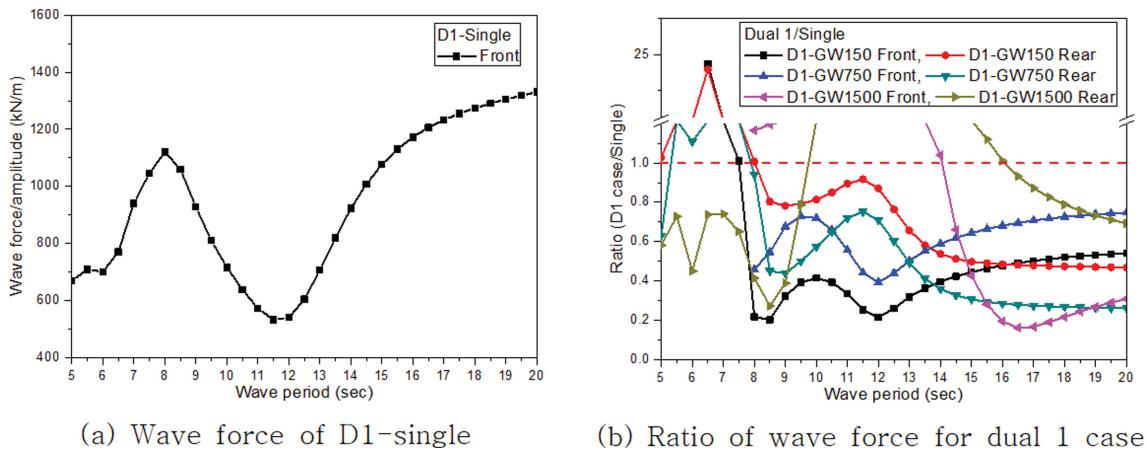


Fig. 4. Comparison of wave force between single and dual 1 case.

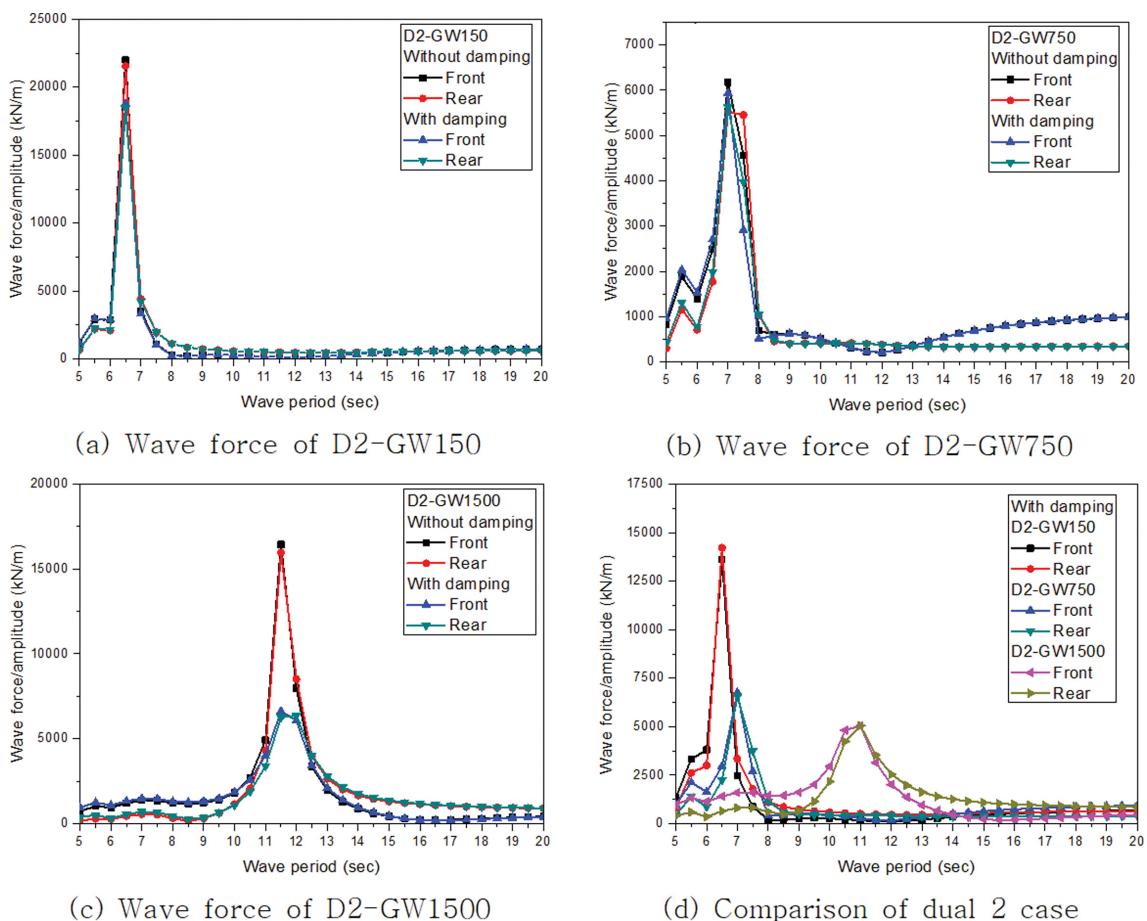


Fig. 5. Comparison of wave force with damping and without damping for dual 2 case.

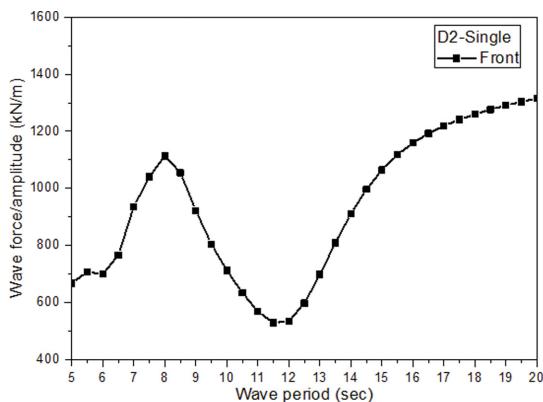
설치되는 경우 앞뒤 케이슨간의 간격 변화에 따라 구조물에 작용하는 파력 분포 패턴에 일정한 규칙성 없이 다양한 형태를 보여주고 있어 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

5천톤 이상의 케이슨 거치 허용오차(150 mm)를 반영한 Dual 2 케이슨 조건에서 댐핑계수 적용 유무에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 앞뒤 케이슨간의 간격 변화에 따라 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. 5천톤 미만의 거치 허

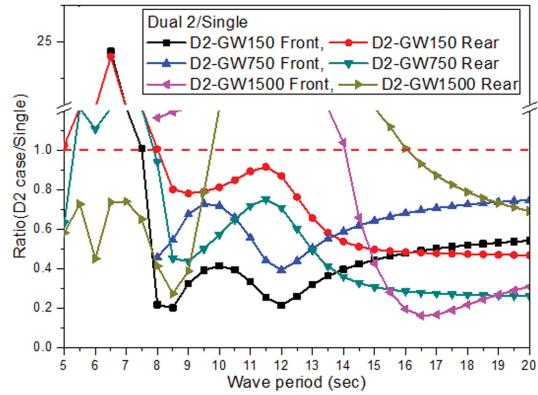
용오차(100 mm)를 반영한 Dual 1 케이스와 유사하게 공진이 발생되는 주기 부근에서만 댐핑계수 영향으로 구조물에 작용하는 파력이 감소하고 앞뒤 케이슨간의 간격이 멀어질수록 감소율이 높게 나타났다. 좌우 케이슨간의 간격이 50 mm 늘어난 변화에 따른 피크파력 발생 주기 부근에서의 최대 감소율을 살펴보면 D2-GW150에서는 감소율이 증가했지만, 그 외 조건에서는 감소율이 낮게 나타났고 D2-GW1500에서는 피크 발생주기가 0.5초 짧아졌다.

Table 3. Rate (with damping/without damping) of wave force for dual 2 case

D2-GW150			D2-GW750			D2-GW1500		
Period (sec)	Front (wi/wo)	Rear (wi/wo)	Period (sec)	Front (wi/wo)	Rear (wi/wo)	Period (sec)	Front (wi/wo)	Rear (wi/wo)
5.5	1.010	1.011	6.0	1.088	1.095	10.0	0.927	0.880
6.0	1.026	1.028	6.5	1.079	1.110	10.5	0.569	0.545
6.5 (peak)	0.734	0.737	7.0 (peak)	0.859	0.905	11.0 (peak)	0.559	0.541
7.0	0.964	0.974	7.5	0.696	0.777	11.5	0.909	0.889
7.5	0.972	0.995	8.0	0.726	1.010	12.0	0.997	0.983



(a) Wave force of D2-single



(b) Ratio of wave force for dual 2 case

Fig. 6. Comparison of wave force between single and dual 2 case.

Fig. 6은 기존 케이슨(D2-Single)에 작용하는 파력을 산출하고 뎁핑계수 1.0이 적용된 Dual 2 케이스에서 개별 케이슨에 작용하는 파력을 D2-Single로 나눈 비율을 보여주고 있다. Dual 2 케이스의 파력 작용 패턴은 Dual 1 케이스와 유사한 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다.

좌우 케이슨간의 간격(GL)변화에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성을 면밀하게 검토하기 위해 Fig. 7에 Dual 1과 Dual 2 케이스의 비교값을 나타내었다. 기존 케이슨(Single) 조건인 경우 좌우 케이슨간의 길이 50 mm가 늘어남에 따라 주기 15.0초 이상의 주기에서 파력 차이가 미소하게 발생되지만, 그 외 주기에서는 거의 파력 차이가 없었다. 하지만 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 케이슨이 설치된 Dual 1과 Dual 2 케이스에서는 전면 케이슨과 후면 케이슨에 작용하는 파력에 변화가 발생되었으며, 특히 앞뒤 케이슨간의 거리가 긴 D2-GW1500인 경우 좌우 케이슨간의 거리가 멀어짐에 따라 피크값 발생 주기가 짧아지는 경향을 나타내었다. Dual 1 케이스에서 개별 케이슨에 작용하는 파력값을 Dual 2 케이스의 파력값으로 나눈 비율을 나타내는 Fig. 7(d)를 보면 앞뒤 케이슨간의 간격이 좁은 GW150과 GW750 조건에서 주기 9.0초 이상부터는 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성이 매우 유사하고 전면 케이슨에 작용하는 파력이 Dual 1 케이스가 Dual 2 케이스보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 좌우 케이슨간의 간격이 넓어짐에 따

라 케이슨 사이로 들어오는 입사 파랑의 양이 증가하여 전면 케이슨에 작용하는 파력은 감소하고 후면 케이슨에 작용하는 파력이 증가하였기 때문으로 판단된다. 앞뒤 케이슨간의 간격이 매우 긴 GW1500에서는 주기 11.0초를 기준으로 파력 분포 특성에 매우 큰 변화 발생되는 것을 볼 수 있으며 주기 11.0초보다 긴 주기에서는 Dual 1 케이스의 파력이 매우 높게 나타나 최대 3.0배 이상 차이가 발생되었다. 즉, 개별 케이슨의 좌우 길이 7.5 m 대비 늘어난 좌우 간격 50 mm는 매우 작은 값이지만 이러한 작은 변화에 대해서도 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성에는 매우 큰 변화가 발생될 수 있어 기존 케이슨의 전면 또는 후면에 케이슨을 추가로 설치하여 보강하는 경우에는 세밀한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 태풍 등의 극한 파랑조건의 해양파 주기가 장주기인 점을 감안할 때 좌우 및 앞뒤 케이슨간의 간격은 최소화하는 것이 구조물의 안정성을 향상시키는데 도움을 줄 수 있다.

구조물과 구조물 사이 공간으로 입사하는 파랑이 들어오게 되면 파랑의 회절(Wave diffraction)이 발생되고, 다수의 구조물이 존재하는 경우 한 구조물의 회절현상이 다른 구조물의 회절현상에도 영향을 주므로 인접한 구조물들 사이에서 발생되는 파와 구조물간의 상호작용 영향 평가는 매우 중요하다. Fig. 8과 Table 4는 Dual 1 조건에서 좌우 케이슨 개수가 증가하였을 경우 뎁핑계수 적용 여부에 따른 개별 케이슨에 작

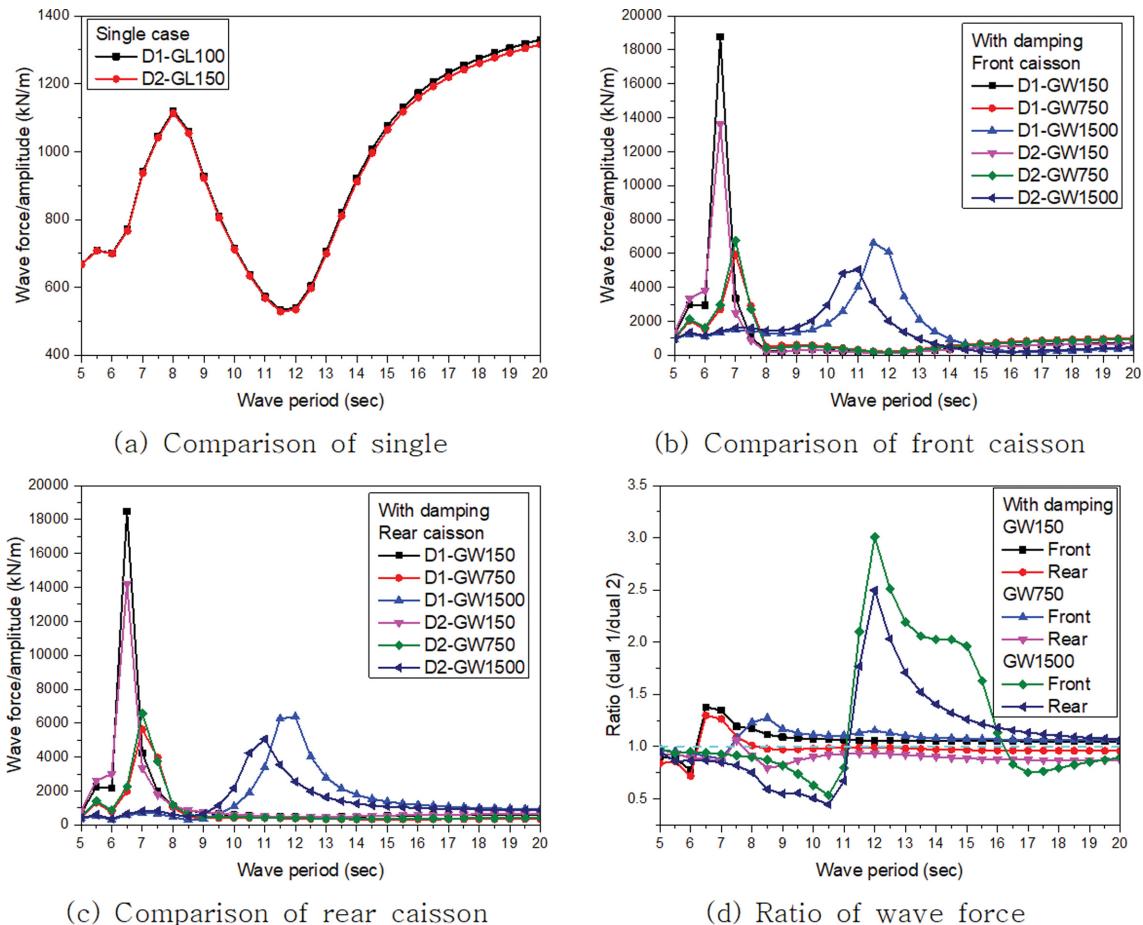


Fig. 7. Comparison of wave force between dual 1 and dual 2 case.

Table 4. Rate (with damping/without damping) of wave force for dual 3 case

D3-GW150			D3-GW750			D3-GW1500		
Period (sec)	Front 2 (wi/wo)	Rear 2 (wi/wo)	Period (sec)	Front 2 (wi/wo)	Rear 2 (wi/wo)	Period (sec)	Front 2 (wi/wo)	Rear 2 (wi/wo)
6.5	1.017	1.025	8.5	1.126	1.147	16.0	0.769	0.744
7.0	1.006	1.018	9.0	1.153	1.002	16.5	0.622	0.593
7.5 (peak)	0.956	0.948	9.5 (peak)	0.387	0.358	17.0 (peak)	0.696	0.642
8.0	0.978	0.988	10.0	0.894	0.832	17.5	1.296	1.185
8.5	1.070	1.007	10.5	0.985	0.937	18.0	1.469	1.313

용하는 파력 분포 특성을 보여주고 있다. Dual 3 케이스도 Dual 1 케이스와 유사하게 공진이 발생되는 주기 부근에서만 댐핑계수 영향으로 파력이 감소하였으며, D3-GW750인 조건을 제외하고는 피크값 발생 전에는 전면 케이슨에 작용하는 파력이 높지만 피크값 발생 이후부터는 후면 케이슨에 작용하는 파력이 높게 나타나고 있다. 특히 한 점은 좌우 케이슨 개수가 증가함에 따라 피크값 발생 주기가 길어졌으며(GW150: 6.5초에서 7.5초, GW750: 7.0초에서 9.5초, GW1500: 11.5초에서 17.0초) 댐핑계수 영향에 따른 최대 감쇠율은 D3-GW750 조건에서 가장 높게 나타났다.

Fig. 9는 기존 케이슨(D3-Single)에 작용하는 파력을 산출하고 댐핑계수 1.0 \circ 적용된 Dual 3 케이스에서 개별 케이슨에 작용하는 파력을 D3-Single로 나눈 비율을 보여주고 있다. D3-Single 조건에서 좌우 케이슨 증가에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향으로 전면 케이슨 2번에 작용하는 파력 분포 패턴에 변화가 발생되었으며 주로 주기 13.0초 이하에서 상호작용 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Dual 3 케이스의 파력을 D3-Single 조건으로 나눈 비율을 보면 Dual 1 케이스에서는 D1-GW150과 D1-GW750 \circ 유사한 파력 분포 패턴을 보였으나 Dual 3에서는 전혀 다른 분포 패턴을 나

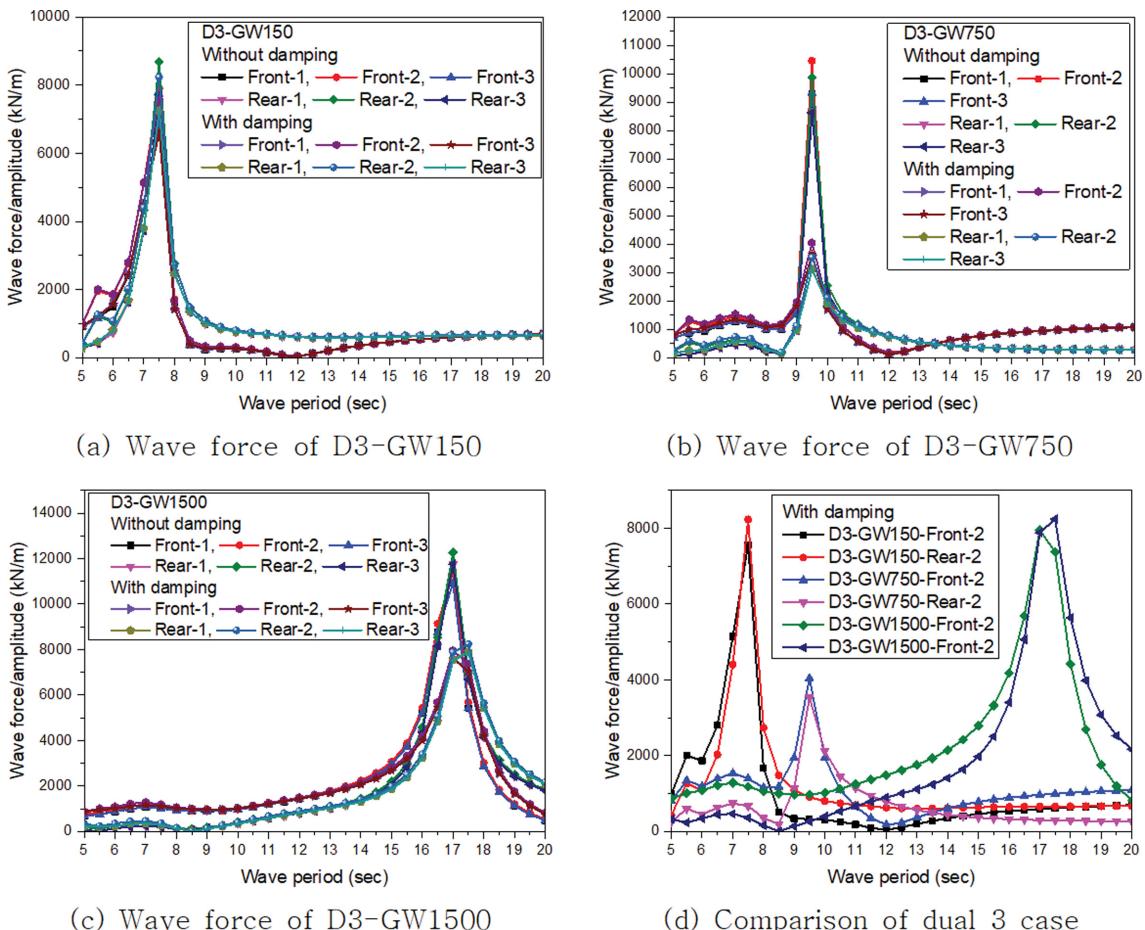


Fig. 8. Comparison of wave force with damping and without damping for dual 3 case.

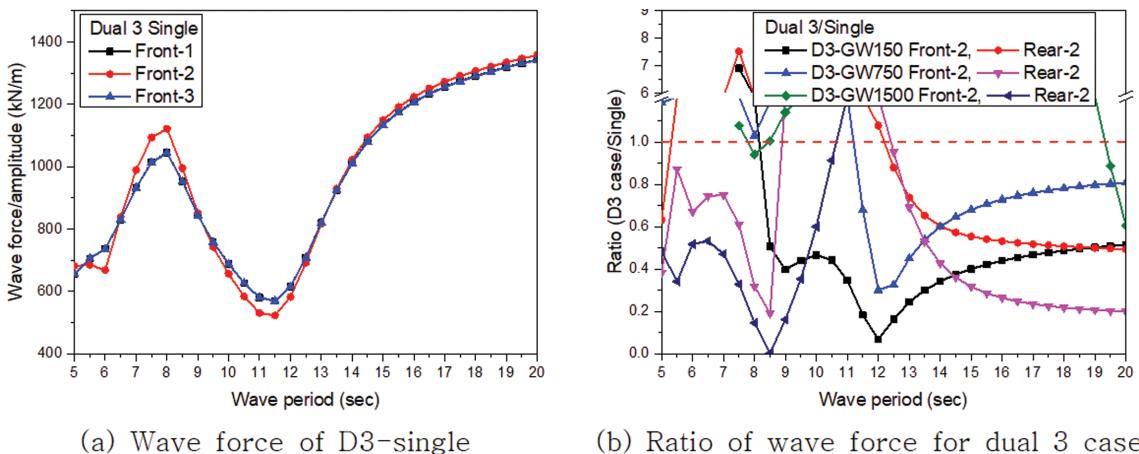
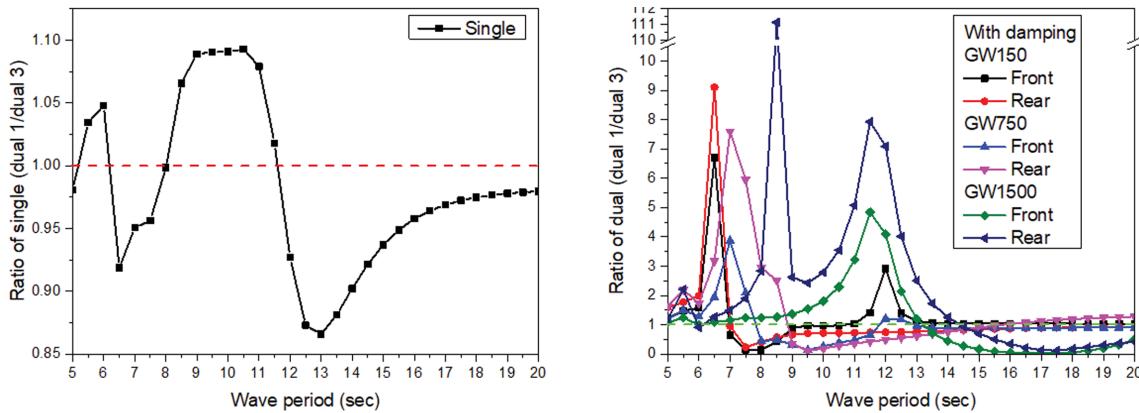


Fig. 9. Comparison of wave force between single and dual 3 case.

타내고 있다. 또한 앞뒤 케이슨 간의 간격 변화에 따라 구조물에 작용하는 파력에 매우 큰 차이가 발생되고 D3-GW1500 조건에서는 검토된 대부분의 주기에서 1.0 이상의 값을 나타내어 기존 케이슨보다 구조물의 안정성이 더 감소하는 것을 알 수 있다.

좌우 케이슨 증가에 따른 좌우 구조물간의 상호작용 영향을 면밀히 검토하기 위해 Fig. 10에 Dual 1 케이스의 파력을

을 Dual 3 케이스의 파력으로 나눈 비율을 나타내었다. Single인 경우 두 케이슨간의 상호작용 영향이 미소하게 발생되지만 구조물의 개수 증가는 구조물에 작용하는 파력 분포 패턴에 변화를 주는 것을 알 수 있다. 기존 케이슨에 추가로 케이슨이 설치된 Dual 케이스에서는 좌우 케이슨 개수 증가에 따라 좌우 구조물간의 상호작용 영향이 매우 크게 발생되고 있으며 앞뒤 케이슨간의 간격 변화에 따라 다양한 패



(a) Ratio of wave force for single case

Fig. 10. Comparison of wave force between dual 1 and dual 3 case.

(b) Ratio of wave force for dual case

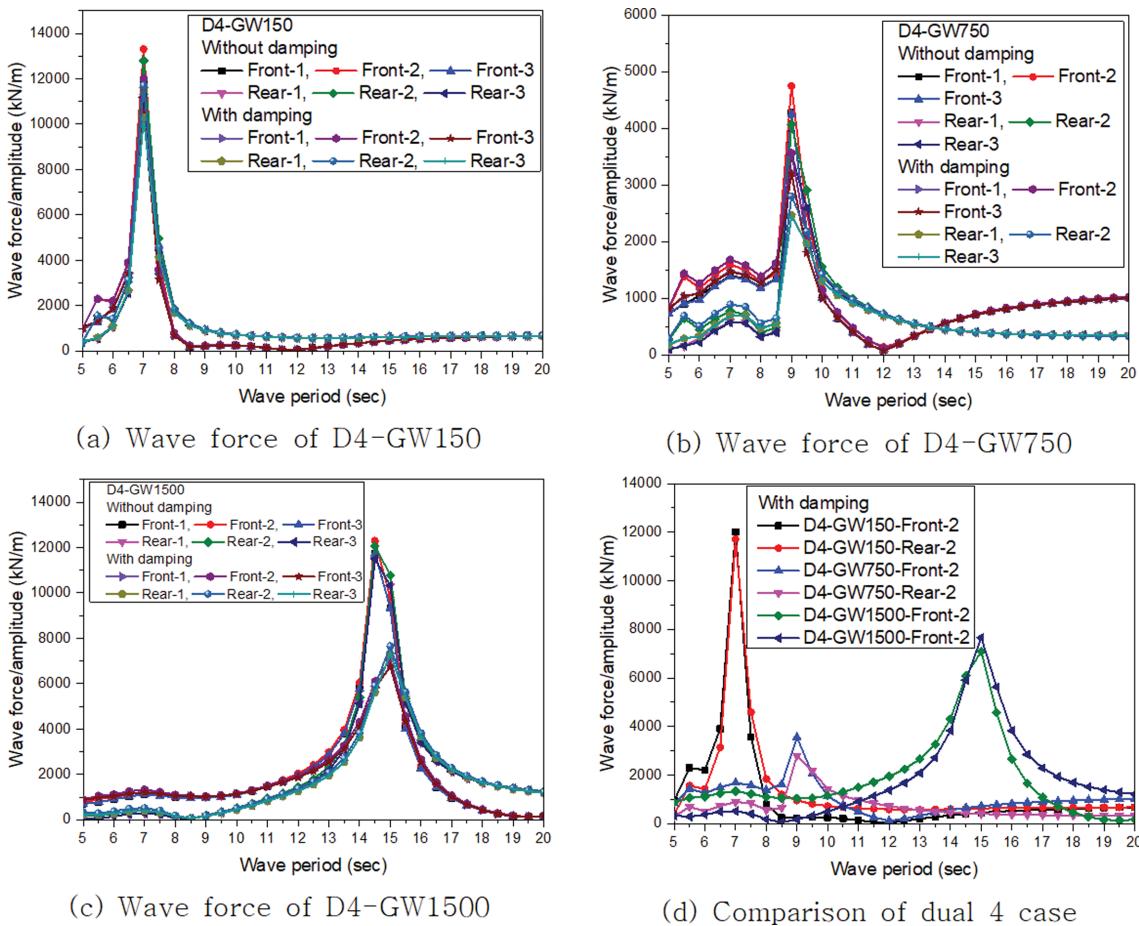


Fig. 11. Comparison of wave force with damping and without damping for dual 4 case.

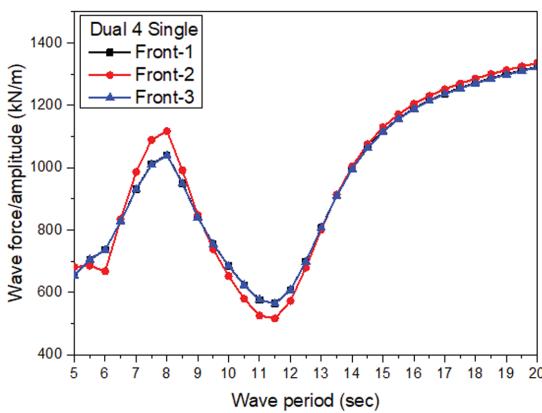
던을 보이고 있다. 특히 앞뒤 케이슨간의 거리가 가장 긴 GW1500에서는 계산된 전 주기에서 가장 큰 변화가 발생되어 최대 110배의 차이가 나타났다. 그 이유는 Fig. 3(c)의 Dual 1 조건과 Fig. 8(c)의 Dual 3 조건에서 후면 케이슨에 작용하는 파력을 살펴보면 Dual 3 조건은 주기 8.5초에서 최소의 파력값(2.62 kN/m^0) 발생하지만 Dual 1 조건에서는 파력값이 289 kN/m 것을 확인할 수 있다. GW150과 GW750

조건인 경우 주기 10초 이상에서 비율이 1.0에 근접하는 경향을 보임으로써 케이슨 개수 증가에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향을 최소화하기 위해서는 케이슨과 케이슨의 간격을 최대한 줄이는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

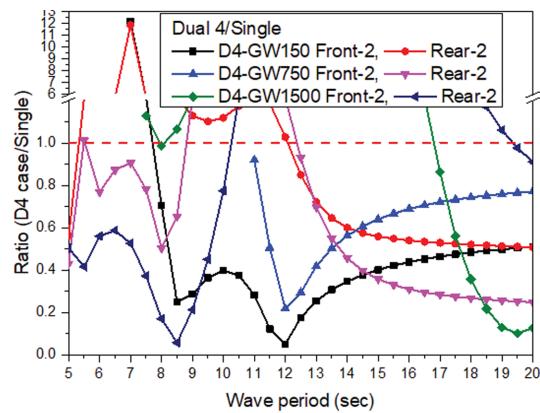
Dual 2 조건에서 좌우 케이슨의 개수가 증가한 Dual 4 케이스에 댐핑계수 적용 유무에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 앞뒤 케이슨간의 간격 변화에 따라 Fig. 11과

Table 5. Rate (with damping/without damping) of wave force for dual 4 case

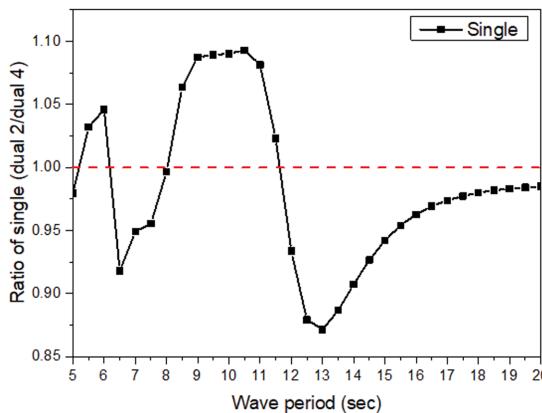
D4-GW150			D4-GW750			D4-GW1500		
Period (sec)	Front 2 (wi/wo)	Rear 2 (wi/wo)	Period (sec)	Front 2 (wi/wo)	Rear 2 (wi/wo)	Period (sec)	Front 2 (wi/wo)	Rear 2 (wi/wo)
6.0	1.018	1.025	8.0	1.073	1.412	13.5	0.828	0.829
6.5	1.024	1.033	8.5	1.124	1.335	14.0	0.713	0.710
7.0 (peak)	0.903	0.915	9.0 (peak)	0.750	0.688	14.5 (peak)	0.496	0.490
7.5	0.903	0.925	9.5	0.822	0.751	15.0	0.724	0.710
8.0	0.962	0.987	10.0	0.978	0.916	15.5	1.079	1.053



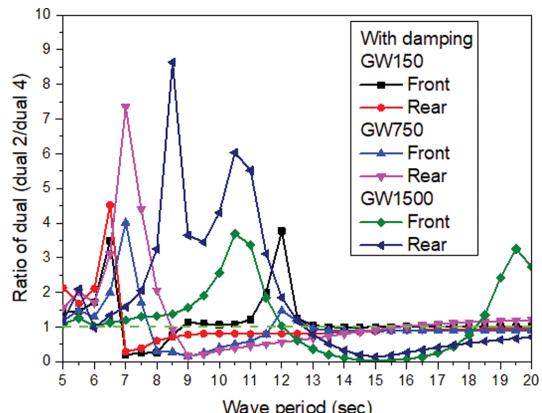
(a) Wave force of D4-single



(b) Ratio of wave force for dual 4 case

Fig. 12. Comparison of wave force between single and dual 4 case.

(a) Ratio of wave force for single case



(b) Ratio of wave force for dual case

Fig. 13. Comparison of wave force between dual 2 and dual 4 case.

Table 5에 나타내었다. 공진이 발생되는 주기 부근에서만 댐핑계수 영향으로 구조물에 작용하는 파력이 감소하고 앞뒤 케이슨간의 간격이 멀어질수록 최대 감소율이 높게 나타났다. Dual 3 케이스 대비 50 mm 늘어난 좌우 케이슨간의 간격 변화로 인해 파크 발생 주기에도 변화(GW150: 7.5초에서 7.0초, GW750: 9.5초에서 9.0초, GW1500: 17.0초에서 14.5초)가 발생되었는데 Dual 3 케이스보다 주기가 짧아진 것을 알 수 있다. 또한 기존 케이슨(D4-Single)에 작용하는

파력을 산출하고 댐핑계수 1.0^o 적용된 Dual 4 케이스의 개별 케이슨에 작용하는 파력을 D4-Single로 나눈 비율을 보여주는 Fig. 12를 보면 Dual 4 케이스의 파력 작용 패턴은 Dual 3 케이스와 유사한 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 13의 좌우 케이슨 증가에 따른 파와 구조물간의 상호작용 영향은 Single 조건에서는 Dual 3 케이스와 매우 유사한 패턴을 보이고 있으나 Dual 조건에서는 다른 패턴을 나타내고 있어 파와 구조물간의 상호작용 효과는

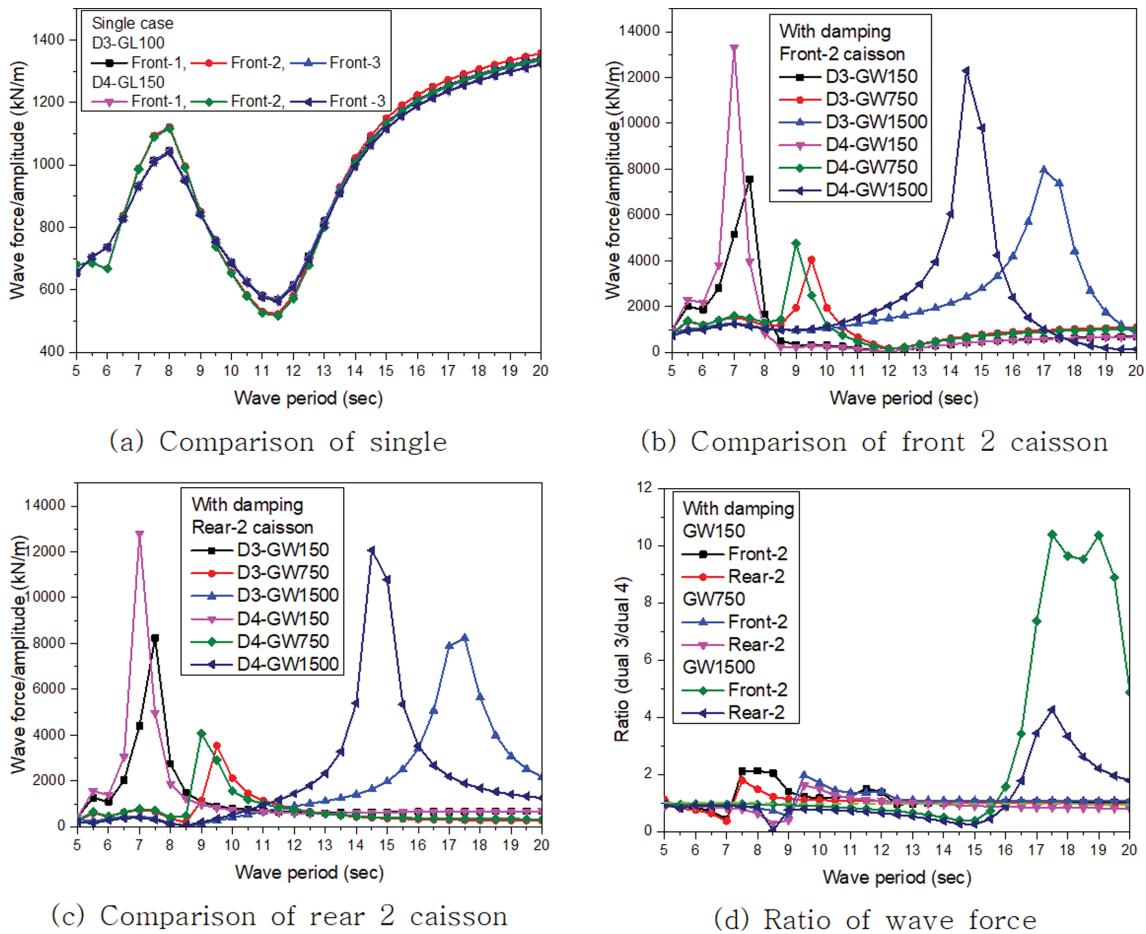


Fig. 14. Comparison of wave force between dual 3 and dual 4 case.

좌우 케이슨간의 간격 변화에 매우 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Dual 3과 Dual 4 케이스에서 좌우 케이슨간의 간격(GL) 변화에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성을 Fig. 14에 나타내었다. 기존 케이슨(Single) 조건인 경우 주기 15.0초 이상에서 파력 차이가 미소하게 발생되었으나 그 외 주기에서는 거의 차이가 없었다. 하지만 Dual 케이스에서는 좌우 케이슨의 간격 50 mm 변화로 인해 전면 케이슨과 후면 케이슨에 작용하는 파력 분포 패턴에 변화가 발생되고 공진발생 주기도 Dual 3 케이스보다 짧아졌다. Fig. 14(d)를 보면 앞뒤 케이슨간의 간격이 좁은 GW150과 GW750 조건에서 주기 13.0초 이상부터는 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성이 매우 유사하고 1.0에 근접하는 것을 알 수 있다. 앞뒤 케이슨간의 간격이 매우 긴 GW1500에서는 주기 16.0초를 기준으로 파력 분포 특성이 매우 큰 변화 발생되는데 Dual 3 케이스의 파력이 매우 높게 나타나 최대 10.0배 이상 차이가 발생되었다. 따라서 기존 케이슨의 전면 또는 후면에 케이슨을 추가로 설치하여 보강하는 경우 좌우 케이슨의 개수 및 간격 변화가 구조물에 작용하는 하중에 매우 큰 변화를 줄 수 있으므로 다양한 조건에 대한 엄밀한 검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 케이슨의 전면 또는 후면에 추가로 케이슨이 설치될 경우 특정 주기에서 유체의 공진으로 구조물에 작용하는 파력이 과도하게 평가되는 문제점을 해결하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS AQWA에서 제공되는 댐핑존 옵션을 적용한 주파수영역 수치해석을 통해 개별 케이슨에 작용하는 파력 분포 특성을 분석하였다. 댐핑존을 적용하였을 경우 공진이 발생되는 특정주기 부근에서 댐핑계수가 증가함에 따라 구조물에 작용하는 파력이 감소하는 경향이 나타났고 그 외 주기에서는 댐핑계수 변화에 관계없이 거의 유사한 파력값이 산출되었다. 앞뒤 케이슨의 간격이 GW750인 경우를 제외하고는 피크값 발생 전까지는 전면 케이슨에 작용하는 파력이 후면 케이슨에 작용하는 파력보다 높지만, 피크값 발생 이후부터는 반대로 후면 케이슨의 파력이 높게 나타났다. 좌우 케이슨간의 길이 50 mm가 늘어남에 따라 케이슨간의 간격이 좁은 GW150과 GW750 조건에서 주기 9.0초 이상부터는 파력 분포 특성이 유사하였으나, 간격이 긴 GW1500에서는 파력 분포 특성에 큰 변화 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 개별 케이슨의 좌우 길이 7.5 m 대비 늘어난 좌우 간격 50 mm는 매우 작은 값이지만 이러한 작은 변화가

케이슨에 작용하는 파력 분포 특성에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 좌우 케이슨 개수가 증가함에 따라 파와 구조물간의 상호작용 영향이 매우 크게 나타났으며 앞뒤 케이슨간의 간격 변화에 따라 다양한 패턴을 보였다. 특히 앞뒤 케이슨간의 거리가 긴 GW1500에서는 계산된 전 주기에서 가장 큰 변화가 발생되고 파력이 매우 높게 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 케이슨을 추가로 설치하여 보강하는 경우 케이슨의 개수 및 간격 변화가 구조물에 작용하는 하중에 매우 큰 영향을 주므로 이에 대한 염밀한 검토가 필요하다. 실제 설계파랑은 파고가 매우 높아 윈파 및 유체 점성에 의한 에너지 손실 효과 등의 다양한 변수가 발생될 수 있지만 본 연구에서 사용된 ANSYS AQWA는 포텐셜이론 기반의 해석 프로그램으로 이와 같은 모든 영향은 고려되지 못하였다. 하지만, 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 경우 발생될 수 있는 문제점 및 주요 고려사항 등을 제시하였으며, 향후 수리모형실험을 통해 본 연구에서 고려되지 못한 영향에 대한 분석이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 안전한 항만 구축 및 관리기술 개발사업인 “재해 안전항만 구축 기술개발(20180323)” 과제 및 ICT 기반 항만 인프라 스마트 재해 대응 기술개발 사업인 “항만 인프라 재해 및 노후화 대응 스마트 유지보수 기술개발(20210659)” 과제를 통해 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bunnik, T., Pauw, W. and Voogt, A. (2009). Hydrodynamic Analysis for Side by Side Offloading, In 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan.
- Cheetham, P., Du, S., May, R. and Smith, S. (2007). Hydrodynamic analysis of ships side by side in waves. International Aerospace CFD Conference, Paris, France.
- Chen, X.B. (2005). Hydrodynamic Analysis for Offshore LNG Terminals, Proceeding of the 2nd International Workshop on Applied Offshore Hydrodynamics, Rio De Janeiro, Brazil.
- Chen, M., Guo, H., Wang, R., Tao, R. and Cheng, N. (2021). Effect of gap resonance on the hydrodynamics and dynamics of a multi-module floating system with narrow gaps. Journal of Marine Science and Engineering, 9(11), 1-29.
- Cho, I.H. (2003). Wave control by an array of N bottom mounted porous cylinders. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 15(4), 232-241 (in Korean).
- Cho, I.H. (2004). Wave Control by an array of porous dual cylindrical structures. Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(5), 7-14 (in Korean).
- Fournier, J.R., Naciri, M. and Chen, X.B. (2006). Hydrodynamics of Two Side by Side Vessels Experiments and Numerical Simulations, In 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA.
- Pauw, W.H., Huijsmans, R.H.M. and Voogt, A. (2007). Advances in the Hydrodynamics of Side by Side Moored Vessels, In 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA, 597-603.
- Park, M.S. (2019). Characteristics of wave forces by installation of new circular caisson on the back of old circular caisson. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(6), 395-402 (in Korean).
- Park, M.S. (2020). Wave structure interaction by installation of new circular caissons on old circular caisson breakwater. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 32(5), 307-321 (in Korean).
- Park, M.S. (2020). Characteristics of wave on circular breakwater of double array by various porous coefficients among circular caissons. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 32(6), 420-433 (in Korean).
- Park, M.S. (2021). Interaction effect between caissons by installation of new caisson on existing caisson breakwater in second order stokes wave condition. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 33(6), 345-356 (in Korean).
- Park, M.S., Koo, W.C. and Choi, Y.R. (2010). Hydrodynamic interaction with an array of porous circular cylinders. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2, 146-154.
- Sankarbabu, K., Sannasiraj, S.A. and Sundar, V. (2007). Interaction of regular waves with a group of dual porous circular cylinders. Applied Ocean Research, 29, 180-190.
- Sankarbabu, K., Sannasiraj, S.A. and Sundar, V. (2008). Hydrodynamic performance of a dual cylindrical caisson breakwater. Coastal Engineering, 55, 431-446.
- Ganesan T, S. and Sen, D. (2016). Time domain simulation of side by side floating bodies using A 3D numerical wave tank approach. Applied Ocean Research, 58, 189-217.
- Wang, K.H. and Ren, X. (1994). Wave interaction with a concentric porous cylinder system. Ocean Engineering, 21(4), 343-360.
- Watai, R., Dinoi, P., Ruggeri, F., Souto-Iglesias. and Simos, A. (2015). Rankine time domain method with application to side by side gap flow modeling. Applied Ocean Research, 50, 69-90.
- Williams, A.N. and Li, W. (2000). Water wave interaction with an array of bottom-mounted surface-piercing porous cylinders. Ocean Engineering, 27, 840-866.

Received 28 September, 2022

1st Revised 18 October, 2022

2nd Revised 21 October, 2022

3rd Revised 21 October, 2022

Accepted 24 October, 2022