

비선형 규칙과 조건에서 기존 케이슨 방파제에 신규 케이슨 추가설치에 따른 케이슨들 간의 상호작용 영향 평가

Interaction Effect between Caissons by Installation of New Caisson on Existing Caisson Breakwater in Second Order Stokes Wave Condition

박민수*
Min Su Park*

요 지 : 기존 케이슨 방파제의 구조적 안정성을 높이기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 본 연구에서는 신규 케이슨이 추가로 설치되는 경우 입사하는 파랑과 구조물 간의 상호작용 영향에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 분석하기 위해 상용프로그램인 ANSYS AQWA를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 우선 주파수 영역에서 구조물에 작용하는 파력을 계산하여 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 주기(주파수)별로 분석하였다. 그리고 특이한 파력분포 특성이 발생하는 주파수에 대해서는 시간영역 수치해석을 통해 개별 케이슨에 작용하는 동적파력 특성은 케이슨 간의 거리변화에 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 파와 구조물간의 상호작용, 케이슨, 파력, 시간이력 해석, ANSYS AQWA

Abstract : In order to increase the structural stability of existing caisson breakwater, the design and the construction is carried out by installation of new caissons on the back or the front of old caissons. In this study, we use the ANSYS AQWA program to analyze the wave forces acting on individual caisson according to effects of wave structure interaction when new caissons are additionally installed on existing caisson breakwater. Firstly, the wave force characteristics acting on the individual caisson were analyzed for each period (frequency) in the frequency domain. In time domain analysis, the dynamic wave force characteristics were strongly influenced by the distance between caissons on the frequency at which the unusual distribution of wave forces occurs.

Keywords : wave structure interaction, caisson, wave force, time response analysis, ANSYS AQWA

1. 서 론

지구온난화로 인한 해수면 상승과 더불어 케이슨 방파제의 설계파도 상향됨에 따라 기존 사각형 케이슨 방파제의 활동 및 전도 등에 대한 안정성을 향상시키기 위해 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 설계 및 시공사례가 발생되고 있다. 하지만, 현재 이러한 케이슨의 설계는 정립된 방법이 없어 설계자의 판단에 따라 다양하게 수행되고 있어, 신규 케이슨 추가 설치에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성 및 주요 고려사항 등에 대한 데이터 제공이 필요하다.

Park(2019, 2020a)은 다수의 원형케이슨으로 구성된 기존 방파제 후면에 신규 원형케이슨이 추가로 설치될 경우 입사하는 파랑과 구조물 간의 상호작용에 의해 각 원형케이슨에

작용하는 파력 특성을 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 이용하여 분석하였다. 수치해석결과 기존 원형케이슨 후면에 신규 원형케이슨을 추가로 설치한 2열 원형케이슨 방파제인 경우 첫 번째 피크점(파력이 급격히 증가하다가 떨어지는 포인트)과 마지막 피크점 사이에 원형케이슨의 개수증가에 따라 피크점이 추가로 발생하였으며, 입파사의 주기가 짧은 단파에서는 파력이 서서히 증가하지만 주기가 긴 장파에서는 파력이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 특정 주기에서 전면에 위치한 원형케이슨들과 후면에 위치한 원형케이슨들 사이에 파랑이 증폭되는 중폭파(Standing wave) 현상이 발생하였으며 이로 인해 케이슨 저면에 작용하는 양압력 분포가 삼각형 분포가 아닌 전혀 다른 형태를 보여주었다.

다수의 케이슨과 케이슨 사이에 유체가 존재하는 기존 연

*한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원(Corresponding author: 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)

구로는 주로 유공방파제에 대한 연구들(Tanimoto et al. (1992), Tanimoto and Takahashi(1994), Ojima et al.(1994), Sankarbabu et al.(2007, 2008), Cho(2004))이 있으나 이는 1열로 배치된 케이슨들이고, 유체가 닫힌 영역이 케이슨과 연결된 내부에 존재하는 경우로 개별 케이슨과 케이슨 사이에 유체가 존재하는 본 연구의 대상구조물과는 다소 차이가 있다. 2열 배치된 원형케이슨에 대한 연구가 Park(2020b)에 의해 수행되었으나 주파수영역 수치해석만을 통해 케이슨에 작용하는 파력 특성을 나타내었다. 케이슨들이 1열로 배치될 경우에는 항만 및 어항 설계기준 또는 기존의 주파수영역에서의 최대 파력만을 이용해 설계가 가능하지만 기존 케이슨에 추가로 케이슨이 설치되어 두 케이슨 사이에 유체가 존재할 경우에는 입사하는 파랑과 케이슨들 간의 상호작용 영향에 의해 각 케이슨이 개별 거동을 하게 되므로 주파수영역 수치해석과 더불어 시간영역에서 각 케이슨의 동적거동에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력특성을 수치해석을 통해 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 사각형 케이슨 방파제의 안정성을 향상시키기 위해 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하는 경우 입사하는 파랑과 구조물간의 상호작용 영향을 분석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS AQWA를 이용하여 수치해석을 수행하였다. ANSYS AQWA는 포텐셜이론 기반

의 수치해석 프로그램으로 월파 및 와류에 따른 에너지 손실 효과는 고려되지 못하지만, 입사하는 파랑과 다수 구조물 간의 상호작용 및 구조물의 동적거동을 주파수영역과 시간영역에서 시뮬레이션이 가능한 장점이 있다. 우선 주파수영역 수치해석을 통해 상호작용 영향에 의해 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 주변 케이슨들 간의 간격변화와 앞뒤 케이슨 간의 거리변화에 따라 분석하였다. 주파수 영역 수치해석 결과를 바탕으로 파력 특성이 크게 변화하거나 케이슨의 안정성에 영향을 줄 수 있는 특정 주파수에 대해서는 입사하는 파랑을 비선형 규칙파 조건(Second order Stokes wave)으로 설정한 시간이력 수치해석을 통해 구조물의 동적거동에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력특성을 면밀히 분석하였다.

2. 수치해석 조건 설정

사각형 케이슨 추가 설치에 따른 입사하는 파랑과 케이슨 간의 상호작용 영향에 의한 개별 케이슨에 작용하는 파력특성을 주파수영역과 시간영역 수치해석을 통해 분석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS AQWA를 이용하였다. ANSYS AQWA는 파도, 바람, 조류 등의 영향으로 인한 해양구조물의 동적거동을 시뮬레이션 하는 프로그램으로, FPSO(Floating Production Storage and Offloading systems), 반잠수식 시추선, TLP

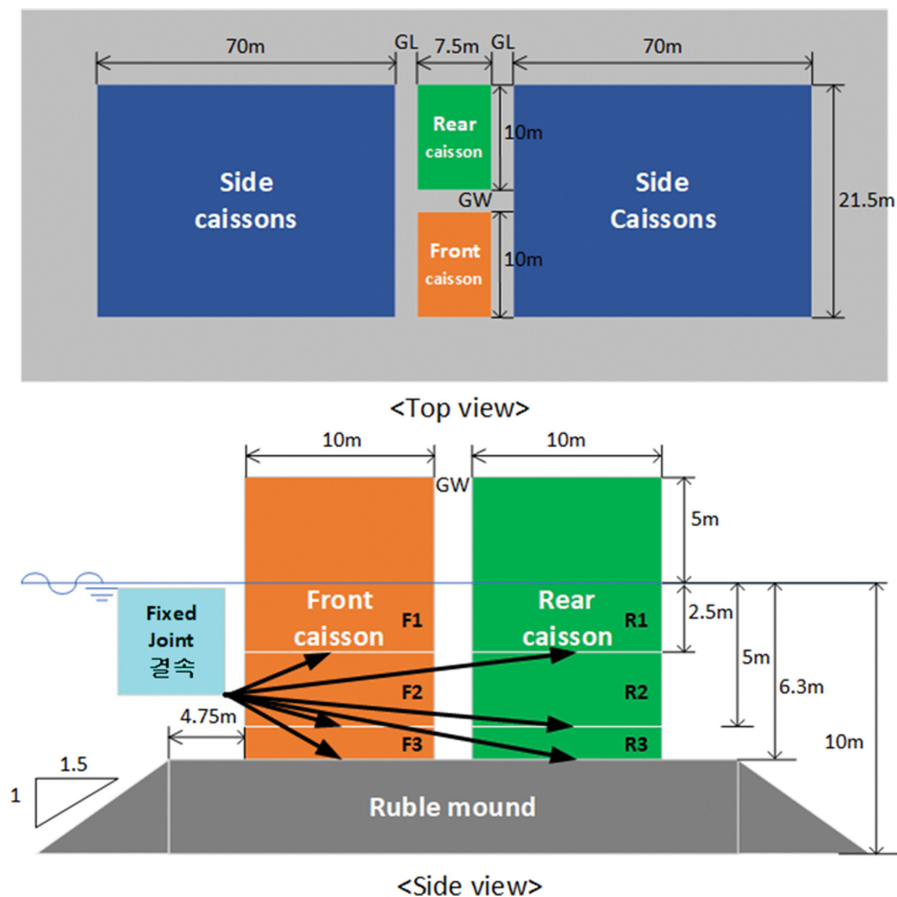
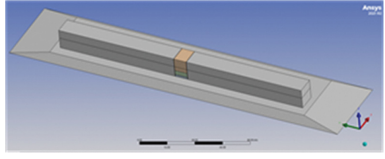
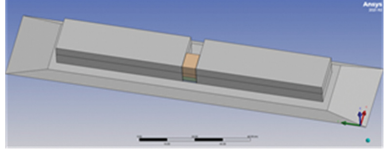
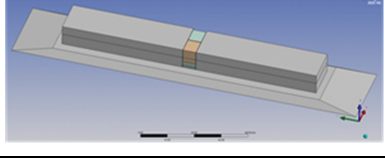
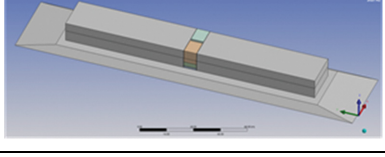


Fig. 1. Definition sketch of numerical model for a rectangular caisson breakwater.

Table 1. Cases of numerical analysis

Case	Name	GL (mm)	GW (mm)	Shape
Single origin	SO-GL125	125	-	
	SO-GL250	250	-	
	SO-GL1000	1000	-	
Single	S-GL125	125	-	
	S-GL250	250	-	
	S-GL1000	1000	-	
Dual 1	D1-GL125	125	250	
	D1-GL250	250	250	
	D1-GL1000	1000	250	
Dual 2	D2-GL125	125	1500	
	D2-GL250	250	1500	
	D2-L1000	1000	1500	

(Tension Leg Platform), 선박, 신재생에너지 시스템, 방파제 등의 구조물에 적용할 수 있다. 또한 다수의 구조물이 존재하는 경우 한 구조물의 움직임이 다른 구조물의 움직임에 영향을 줄 수 있기 때문에 인접한 구조물 사이의 유체 역학적 상호작용을 고려할 수 있고, 최대 50개의 구조물과 50개의 관절 구조로 결합된 해양구조물의 유체 역학적 및 기계적 동적 구성의 모델링이 가능하다.

본 연구에서는 개별 케이슨에 작용하는 파력특성을 유체 역학적 상호작용 및 구조물의 동적 거동 특성을 반영하여 분석하기 위해 사석마운드 및 케이슨들은 강체거동을 하고 콘크리트(단위중량 2.3 ton, 압축강도 41 MPa)로만 구성되었다고 가정하여 Fig. 1과 같이 설정하였다. 수치해석에서 수심에 따른 영향을 검토하기 위해 개별 케이슨을 수심에 따라 3등분(전면 케이슨: F1, F2, F3, 후면 케이슨: R1, R2, R3)하였으며, 주변 케이슨에 의한 상호작용 영향을 최소화해 좌우 및 앞뒤 케이슨 간의 거리변화에 따른 영향을 면밀히 검토하기 위해 주변케이슨을 개별 케이슨 길이보다 10배 정도 길게 설치하였다. 또한 고유함수전개법을 이용한 Park(2019, 2020a)의 연구결과에서 케이슨의 개수가 증가할수록 피크점이 개수도 증가함에 따라 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 명확히 분석하는데 어려움을 줄 수 있기 때문이다. 시간영역에서 케이슨의 동적 거동에 따른 분할된 개별 케이슨에 작용하는 파력은 ANSYS AQWA에서 제공하는 Fixed Joint를 분할된 구조물의 결속조건에 적용하고 Joint에 작용하는 하중으로부터 구조물에 작용하는 파력특성을 분석하였다.

ANSYS AQWA는 격자수의 제한이 있어 본 수치해석에서

는 주변 케이슨과 사석마운드의 격자 사이즈는 1.5 m로 개별 케이슨의 격자 사이즈는 0.5 m로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서 수심은 10 m이고 개별 케이슨은 가로 7.5 m, 세로 10 m, 높이 11.3 m이며 자유 수면을 기준으로 수심 방향으로 전면 케이슨과 후면 케이슨을 2.5 m(F1, R1), 5.0 m(F2, R2), 6.3 m(F3, R3)로 3등분 하였다. 케이슨 추가설치에 따른 상호작용 효과는 좌우 케이슨 간의 간격변화(GL)와 앞뒤 케이슨 간의 거리변화(GW)에 따른 영향을 고려하기 위해 Table 1과 같이 설정하였다. 우선 기존 케이슨 뒷면에 케이슨이 추가로 설치될 경우 추가 설치되는 케이슨의 두께만큼 좌우 케이슨의 두께 변화가 발생되기 때문에 이러한 영향에 따른 전면 케이슨에 작용하는 파력특성을 분석하기 위해 Single origin 케이스와 Single 케이스로 구분하였다. 기존 케이슨의 토우 유무에 따라 추가로 설치되는 케이슨의 앞뒤 거리 변화가 발생되므로 이를 반영하기 위해 앞뒤 케이슨 간의 거리변화(GW)에 따른 개별 케이슨에 작용하는 파력특성은 Dual 1 케이스와 Dual 2 케이스로 구분하여 분석하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

입사하는 파랑의 진행하는 방향에 케이슨이 존재하면 파랑이 그 뒤로 돌아 들어가게 되는 현상을 파랑의 회절(Wave diffraction)이라고, 다수의 구조물이 존재하는 경우 한 구조물의 회절현상이 다른 구조물의 회절현상에도 영향을 주므로 인접한 구조물 사이의 유체 역학적 상호작용 영향 평가는 매우 중요하다. 본 연구에서는 입사하는 파랑과 케이슨 간의 상

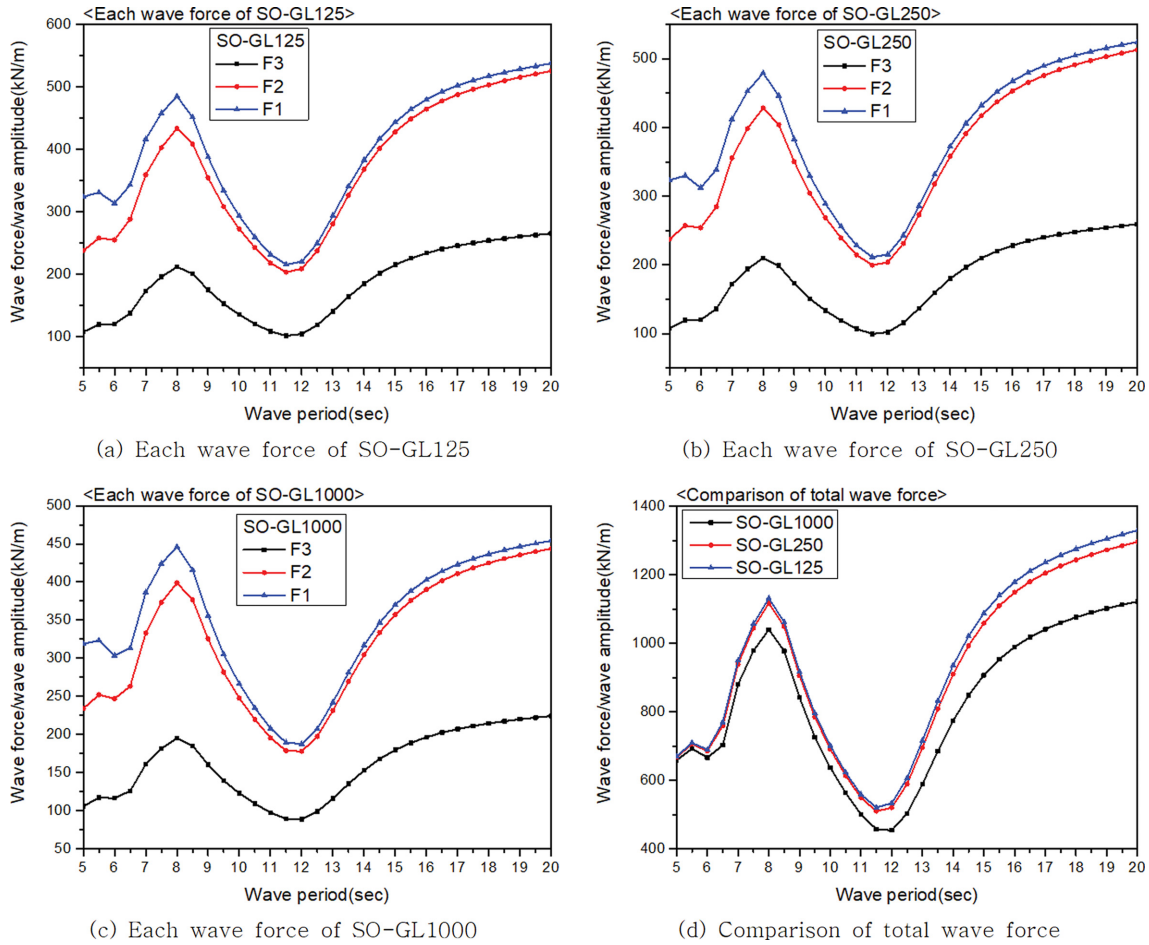


Fig. 2. Wave force of single origin case in frequency domain analysis.

호작용 영향 평가를 주파수영역에서 우선적으로 수행하고 상호작용의 영향이 크게 발생하는 특정 주파수에 대해서는 시간이력 수치해석을 통해 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 면밀하게 검토하였다. 기존 사각형 케이슨 방파제에 케이슨이 추가로 설치되면 기존 케이슨의 앞뒤 거리가 추가로 설치되는 케이슨의 길이만큼 늘어나게 된다. 이러한 경우 좌우 케이슨 방파제의 길이 변화가 기존 케이슨 방파제에 어떠한 영향을 주는지 검토하기 위해 Fig. 2와 3에 주파수 영역에서의 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 나타내었다.

Fig. 2에서 가로축은 입사하는 파랑의 주기를 나타내고 있으며, 세로축을 케이슨에 작용하는 파력을 입사하는 파랑의 진폭(= 입사파 파고(H)/2)으로 나눈 값이다. Fig. 1에 나타난 것처럼 개별 케이슨을 수심방향으로 3등분하고 각 분할된 영역에 작용하는 파력을 좌우 케이슨 간의 간격변화(GL)에 따라 비교하였다. Fig. 2와 3에서 자유수면에 위치한 F1 구조물에 작용하는 파력이 가장 크게 발생되고, F1과 F2 구조물에 작용하는 파력 차이는 주기가 길어질수록 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 입사하는 파랑의 파장이 길어질수록 수심에 따른 물입자의 속도 구배가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 기존 방파제의 경우 좌우 케이슨 간의 간격(GL)이 길어질수록 구조물에 작용하는 파력은 감소하는 경향이 나타났

으나 간격이 125 mm에서 250 mm로 변화하는 경우, 주기 15 초 이하에서는 감소비가 매우 미소하게 나타났다. 이는 좌우 케이슨과의 간격에 따라 이 사이로 빠져가는 유체 속도의 변화가 발생되어 회절현상에 영향을 주기 때문이며, 이 회절 현상은 입사파의 파장과 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있다. 기존 좌우 방파제의 두께 길이가 2배 늘어난 Single 케이슨에서는 기존 방파제인 Single origin 케이스에 비해 주기 6.5 초, 9.0초에서 피크값(파력이 급격히 증가하다가 떨어지는 포인트)이 발생되었고 기존 방파제의 피크값이 발생된 주기 8.0 초에서는 파력이 급격하게 떨어졌다가 다시 증가하는 변곡현상이 발생되었다. 특히 주목할 점은 이 변곡점 주기인 8초보다 큰 주기에서는 좌우 케이슨 간의 간격(GL)이 증가할수록 케이슨에 작용하는 파력이 감소하는 기존 케이슨과 유사한 경향을 보이지만, 8초보다 작은 주기에서는 폭이 증가할수록 파력이 증가하는 반대현상이 발생되었다. Table 2는 좌우 케이슨 간의 간격과 두께를 입사파의 파장으로 나눈 비를 보여주고 있다. Single origin은 SO/L비가 0.1411(8.0초)에서 피크값이, 0.0925(11.5초)에서 변곡현상 발생되어 피크값과 변곡현상이 발생된 SO/L비는 대략 1.52배에 해당된다. Single은 S/L비가 0.3971(6.5초)과 0.2361(9.0초)에서 피크값이 발생되어 두 피크값 간의 S/L비는 약 1.51배이고, 변곡현상은 0.3033

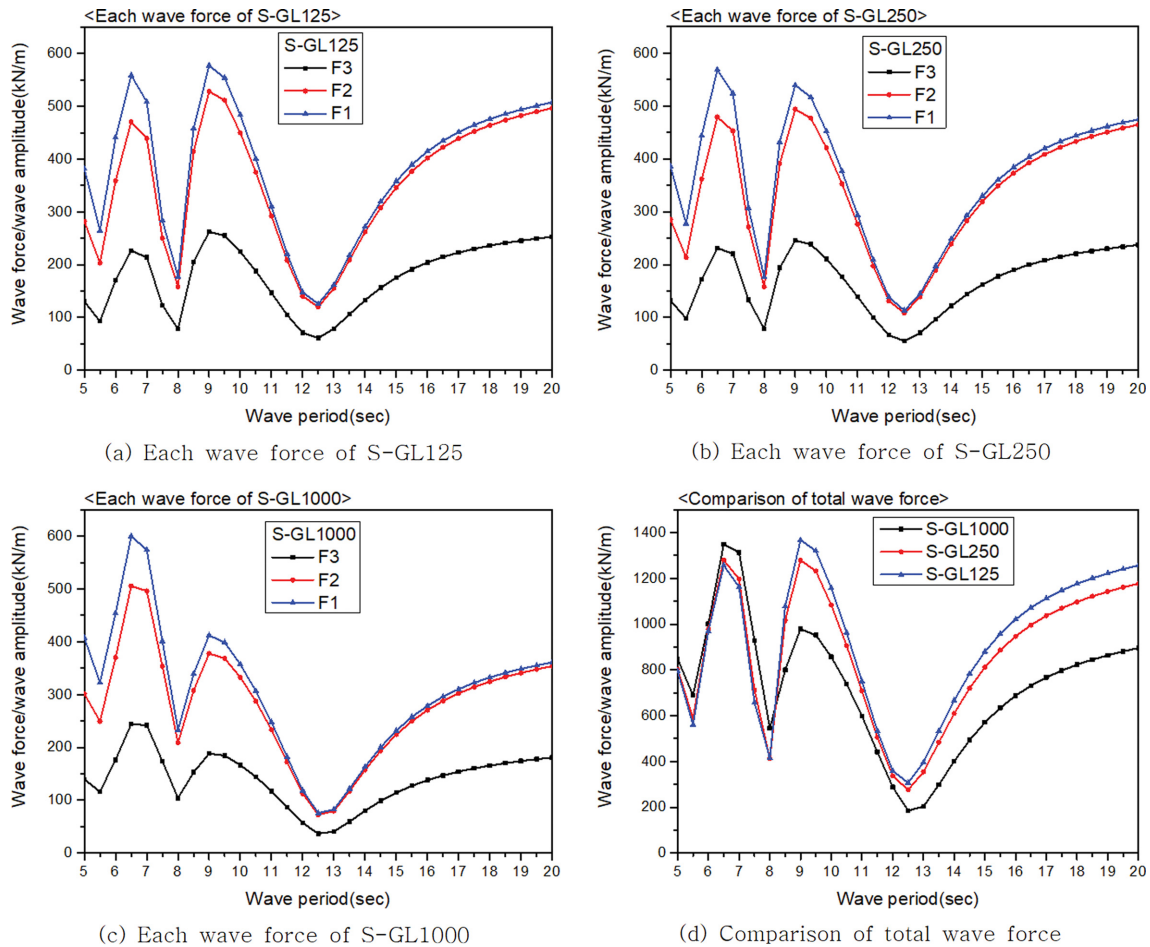


Fig. 3. Wave force of single case in frequency domain analysis.

Table 2. Comparison of ratio with wave length for single origin and single case

Wave condition (sec)	Wave length (m, L)	Ratio (GL/L)	Thickness ratio (SO/L)	Thickness ratio (S/L)
T = 6.5	54.149	0.0023	0.1847	0.3971
		0.0046		
		0.0185		
T = 8.0	70.883	0.0018	0.1411	0.3033
		0.0035		
		0.0141		
T = 9.0	81.710	0.0015	0.1224	0.2361
		0.0031		
		0.0122		
T = 11.5	108.083	0.0012	0.0925	0.1989
		0.0023		
		0.0093		

(8.0초)에서 나타나 첫 번째 피크값과의 S/L비는 약 1.31배, 두 번째 피크값과는 약 1.15배이다. 즉, 추가로 케이슨이 설치되어 기존 케이슨의 앞뒤 길이가 길어지면 입사하는 파랑과 길어진 케이슨 간의 상호작용에 의해 기존 케이슨에 작용하는 파력이 증가하고 주기에 따른 파력작용 패턴도 바뀌게 된다. 또한 일반적인 케이슨의 설계파랑 조건(태풍 등)인 주기 13초 이상에서는 Single Origin 케이스 보다 Single 케이스에서

케이슨에 작용하는 파력이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

주파수영역 수치해석에서 피크 파력이 발생된 주기 6.5초, 8.0초, 9.0초와 Single origin 케이스 및 Single 케이스에서 유사한 파력특성 경향을 나타내는 주기 11.5초에 대한 시간 이력 수치해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 수치해석에 적용된 수심 10 m에서는 선형보다는 비선형성 규칙파의 영향이 강하므로 이를 반영하기 위해 Second order Stokes wave를

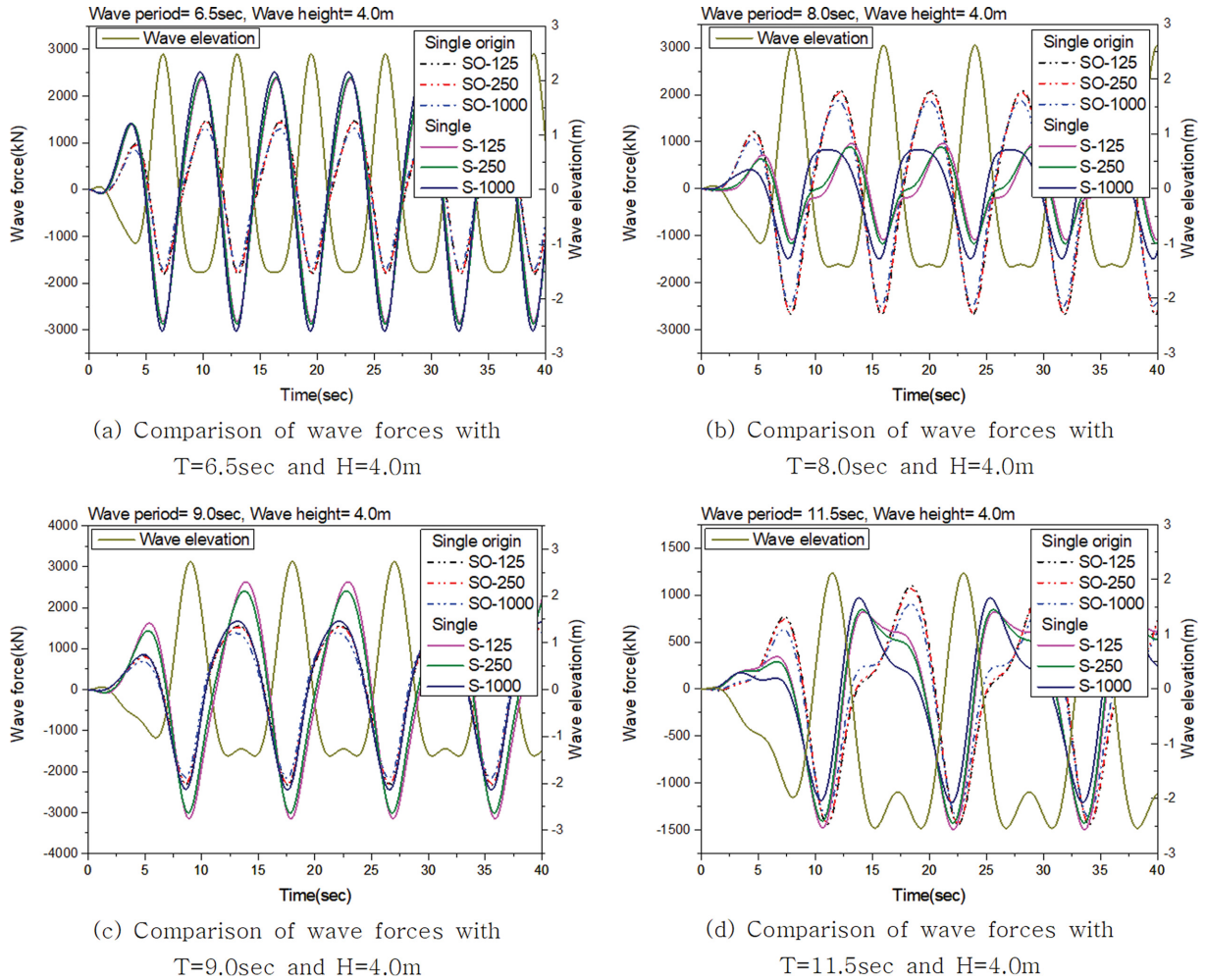


Fig. 4. Comparison of wave force between single origin and single in time domain analysis.

적용하였으며 본 연구에서 사용된 ANSYS AQWA는 포텐셜 이론 기반의 해석 프로그램으로 구조물에 작용하는 파력은 파고에 비례적으로 증가하고 적용된 파고가 3등분한 케이스 상부 구조물의 면적 F1 지역에 작용될 수 있도록 하기 위해 파고를 4.0m로 설정하였다. 또한 시간에 따른 구조물에 작용하는 입사 파랑과 구조물에 작용하는 파력 특성을 상세히 검토하기 위해 전면 케이스의 중앙에서 해수면과 접하는 위치에서의 파랑 높이(Wave surface elevation)도 같이 나타내었다.

Single origin 케이스인 경우 9.0초 이하의 주기에서는 규칙적인 Sine 곡선 형태의 파력이 케이스에 작용하지만 주기 11.5초에서는 전혀 다른 형태의 파력작용 특성을 보이고 있다. Single 케이스에서는 파력 피크점이 발생된 주기 6.5초와 9.0초에서는 규칙적인 Sine 곡선이지만 8.0초와 11.5초에서는 다른 형태를 나타내고 있다. 이는 단주기에서는 입사파의 선형성(First order 성분)이 강하고 장주기로 갈수록 비선형성(Second order 성분)의 영향이 크게 발생되기 때문이다. 따라서 주기가 길어짐에 따라 전면케이스에 작용하는 파 높이의 파봉과 파골사이에서 생성되는 중간 파 높이가 증가하는 현상에 의해 Single origin과 Single 케이스의 주기 11.5초에서

파력 특성이 크게 변화한 것이며, Single 케이스의 주기 8.0초에서 파력 특성이 달라진 것은 주파수영역 수치해석결과에서 알 수 있듯이 파력이 감소하다 다시 증가하는 변곡점으로서 이 주기에서 입사하는 파랑과 케이스 간에 상호작용으로 비선형성이 강하게 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 5는 기존 케이스 뒤에 신규케이스가 매우 근접하게 설치되는 조건을 반영하기 위해 앞뒤 케이스 간의 거리(GW)를 250 mm로 설정한 Dual 1 케이스에 대한 주파수영역에서의 수치해석 결과를 보여주고 있다. 케이스 간의 간격(GL)이 가장 긴 GL = 1,000에서 피크 파력이 가장 작게 나타났으며 간격이 가장 짧은 GL = 125보다는 GL = 250에서 가장 높은 피크값의 파력이 발생되었다. 또한 간격 변화에 관계없이 유사한 주기 대략 6.5초에서 피크값이 발생되는 것을 확인 할 수 있다. Table 3은 좌우(GL) 및 앞뒤(GW) 케이스 간의 간격을 피크값이 발생된 주기 및 그 외 주기에서의 입사파 파장에 대한 비를 보여주고 있으나, 각 변수들과 입사파 파장과의 특정한 관계가 발생되지 않고 있다. 이는 앞뒤 케이스의 간격이 좁은 경우 케이스 사이에 존재하는 유체의 고유주파수는 좌우 케이스의 간격변화로 의한 유체입자 속도에 큰 영향을

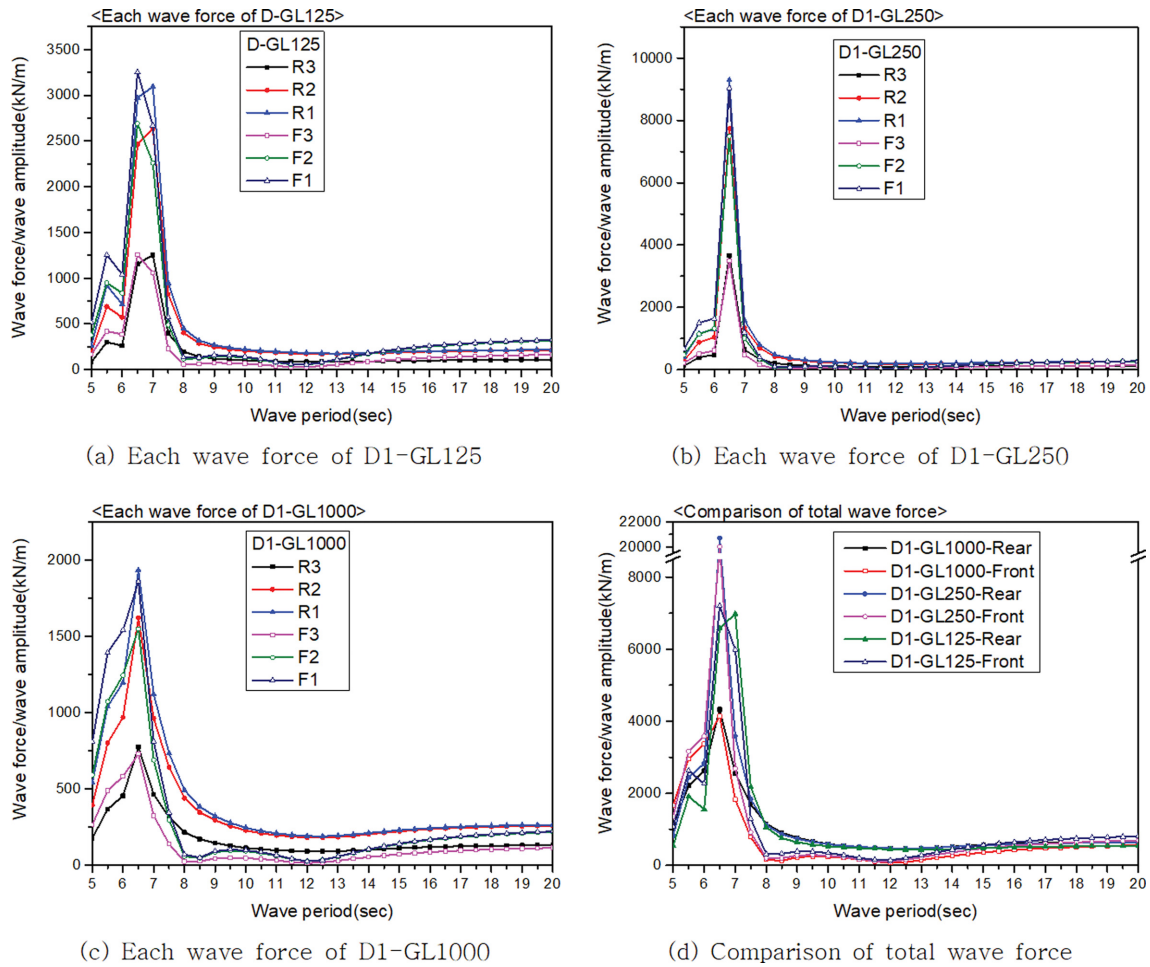


Fig. 5. Wave force of dual 1 case in frequency domain analysis.

Table 3. Comparison of ratio with wave length for dual 1 case

Wave condition (sec)	Wave length (m, L)	Ratio (GW/L)	Ratio (GL/L)	Ratio (GL/GW)
T = 6.5	54.149	0.0046	0.0023	0.50
			0.0046	1.00
			0.0185	4.00
T = 7.0	59.807	0.0042	0.0021	0.50
			0.0042	1.00
			0.0167	4.00
T = 7.5	65.381	0.0038	0.0019	0.50
			0.0038	1.00
			0.0153	4.00
T = 9.5	87.052	0.0029	0.0014	0.50
			0.0029	1.00
			0.0115	4.00
T = 11.5	108.083	0.0023	0.0012	0.50
			0.0023	1.00
			0.0093	4.00
T = 13.5	128.752	0.0019	0.0010	0.50
			0.0019	1.00
			0.0078	4.00

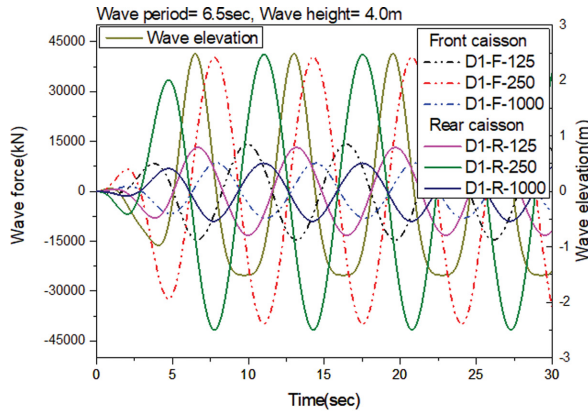
받지 않으며, 이로 인해 입사하는 파랑과 케이슨간의 상호작용에 의해 발생하는 중복파(Standing wave)는 유사한 주기에

서 발생된다. Park(2019, 2020a)의 기존 연구내용과 동일하게 피크값이 발생되기 이전 주기까지는 전면 케이슨에 작용

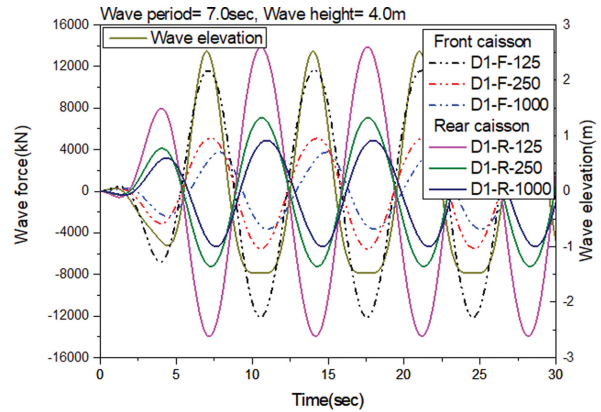
하는 파력이 후면 케이슨에 작용하는 파력보다 높으나 피크 값 발생 이후 주기부터는 반대로 후면 케이슨에 작용하는 파력이 전면 케이슨에 작용하는 파력보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이상기후 현상으로 기존 방파제의 설계파랑이 상승함에 따라 기존 방파제의 안정성을 향상시키기 위해 추가로 신규 케이슨을 설치하는데 실제 설계파랑 조건(태풍 등)인 장

파(주기 13초 이상)에 대해 생각해 보면 구조물에 작용하는 파력이 기존 케이슨에 작용하는 파력보다 감소하는 경향을 보이고 있지만 단주기의 피크값이 발생하는 중복파에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

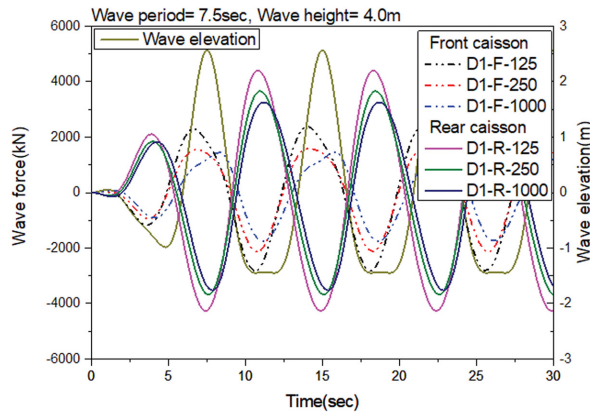
초기 케이슨 방파제 설계 시에는 하나의 케이슨에 작용하는 외력에 대해서만 검토되지만, 기존 케이슨의 안정성을 향



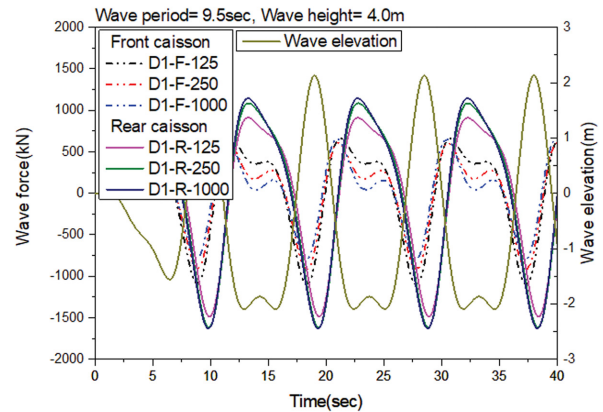
(a) Comparison of wave forces with $T=6.5\text{sec}$ and $H=4.0\text{m}$



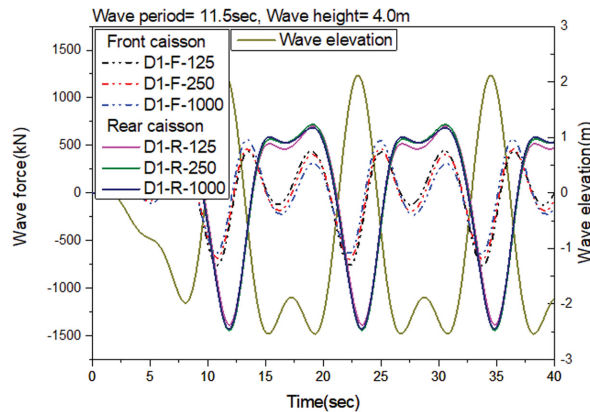
(b) Comparison of wave forces with $T=7.0\text{sec}$ and $H=4.0\text{m}$



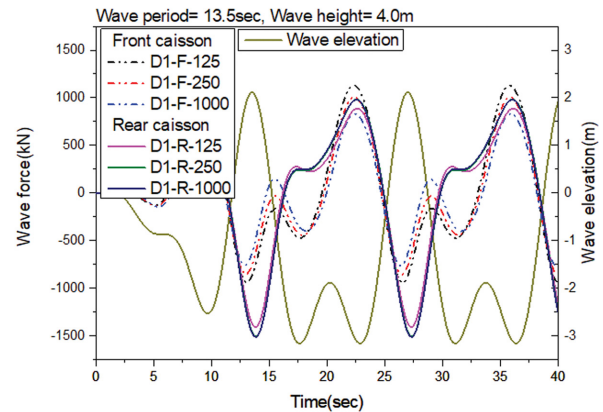
(c) Comparison of wave forces with $T=7.5\text{sec}$ and $H=4.0\text{m}$



(d) Comparison of wave forces with $T=9.5\text{sec}$ and $H=4.0\text{m}$



(e) Comparison of wave forces with $T=11.5\text{sec}$ and $H=4.0\text{m}$



(f) Comparison of wave forces with $T=13.5\text{sec}$ and $H=4.0\text{m}$

Fig. 6. Comparison of wave force between front and rear caisson for dual 1 case in time domain analysis.

상시킴을 위해 추가로 케이슨을 설치하는 경우에는 전면 케이슨에 작용하는 파력과 후면 케이슨에 작용하는 파력의 크기가 다르고, 입사하는 파랑에 대해 두 케이슨의 동적거동이 상이할 수 있다. 즉, 케이슨을 추가로 설치할 경우 기존 케이슨과 추가 설치된 케이슨 간의 결합(일체화 방안)에 대한 추가적인 고민이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 판단 근거를 제공하고자 시간이력 수치해석을 통해 전면 케이슨에 작용하는 파력 특성과 후면 케이슨에 작용하는 파력 특성을 분석하였다. Fig. 6은 피크파력이 발생된 주기 6.5초 및 7.0초 외 7.5초, 9.5초, 11.5초, 13.5초에서 파고 4.0 m로 설정한 비선형 규칙파(Second order Stokes wave) 조건에서의 시간이력 수치해석 결과를 보여주고 있다. 주기 7.5초 이하에서는 각 케이슨에 작용하는 파력이 규칙적인 Sine 곡선 형태를 나타내고 있으나, 전면에 작용하는 파력과 후면에 작용하는 파력의 부호가 반대인 것을 확인할 수 있다. 즉 전면 케이슨과 후면 케이슨의 거동 방향이 서로 반대여서 상치 콘크리트를 개별로 설치할 경우 두 케이슨간의 일체 거동은 기대할 수 없고, 만일 일체 거동을 원한다면 기존 케이슨의 상치 콘크리트를 철거 후 추가로 설치되는 케이슨의 상치 콘크리트와 일체로 설치하여야 한다. 주기 9.5초 이상에서는 각

케이슨에 작용하는 파력 특성이 주기별로 다른 패턴을 보이고 있으며, 전면에 작용하는 파력과 후면에 작용하는 파력 분포 곡선은 시간에 따라 동일한 방향(부호)을 향하기도 하고 다른 방향을 나타내기도 하고 있다. 또한 전면과 후면 케이슨에 작용하는 파력 차이는 7.5초 주기이하 케이스 보다는 상당히 작게 발생되었다. 주기 9.5초 이상의 주기에서도 전면 케이슨에 작용하는 파력 특성과 후면에 작용하는 파력 특성의 작용 패턴이 다르므로 두 케이슨의 일체거동을 위해서는 전면 케이슨의 상치 콘크리트를 철거 후 추가 설치되는 케이슨의 상치 콘크리트와 일체로 설치해야 기존 케이슨과 추가로 설치되는 케이슨간의 일체거동이 가능할 것으로 판단된다.

기존 케이슨 구조물은 안정성을 향상시키기 위해 케이슨 하부에 토우가 설치되어 있어 신규 케이슨을 추가로 설치할 경우 이 토우길이 만큼 기존 케이슨과 신규 케이슨 간의 간격이 발생하게 된다. 이러한 토우 길이에 따른 영향을 검토하기 위해 전면 케이슨과 후면 케이슨 간의 앞뒤 거리(GW)를 1,500 mm로 설정한 Dual 2 케이슨에 대한 주파수영역 수치해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 좌우 케이슨 간의 간격(GL)이 증가할수록 파력 피크점의 발생주기가 단주기 쪽에서 발생되고 파력 피크값도 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

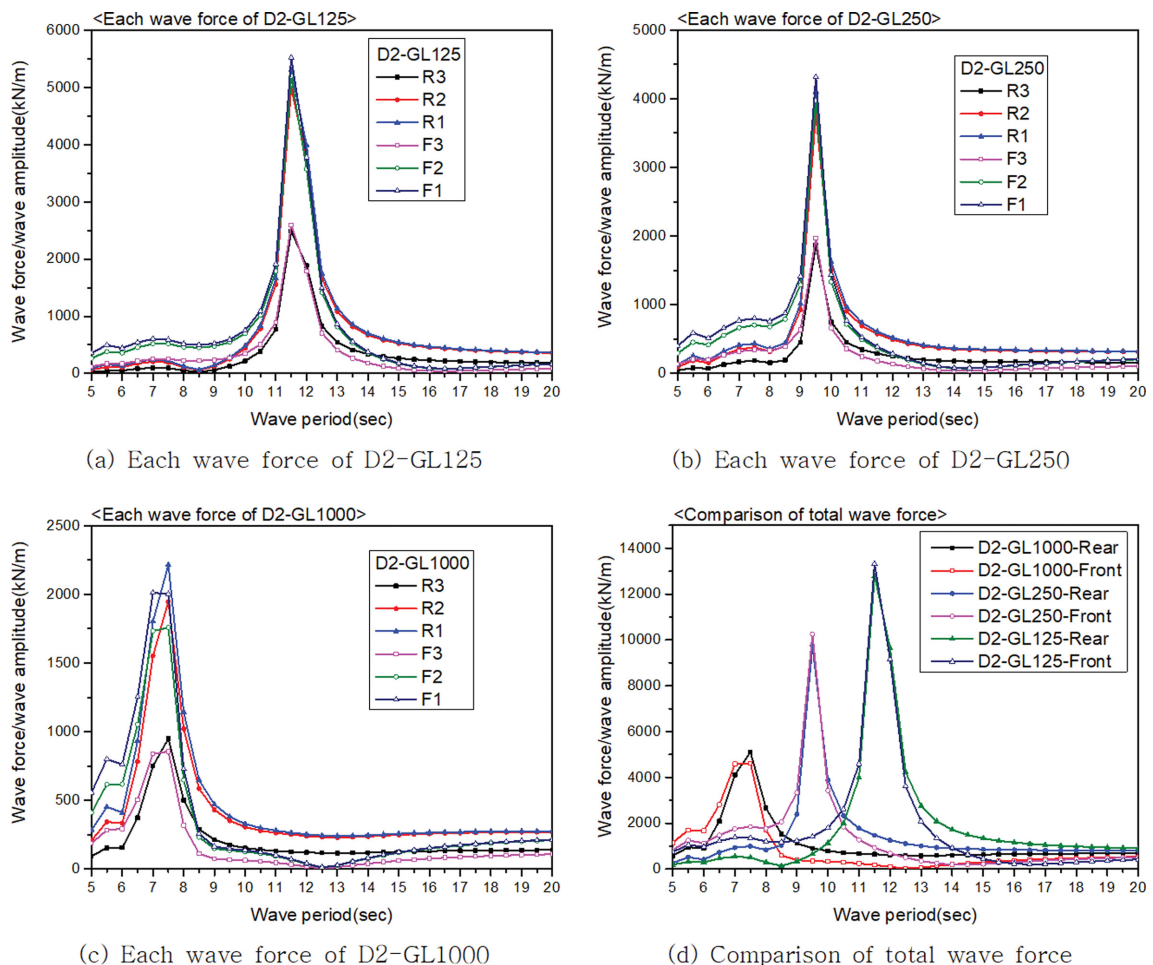
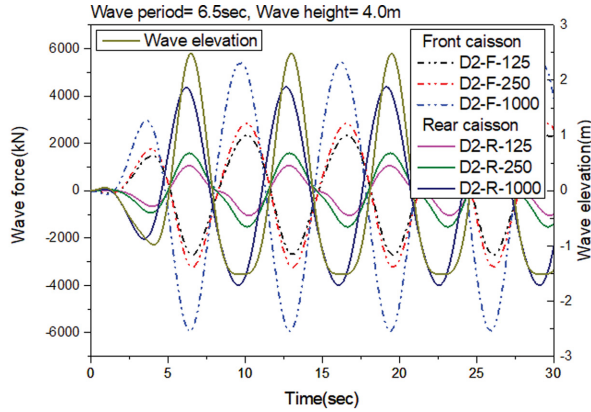


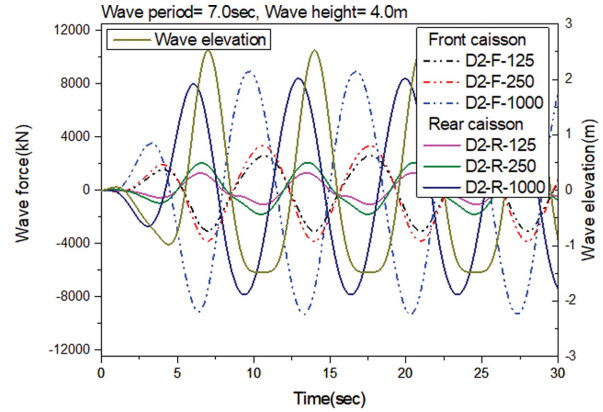
Fig. 7. Wave force of dual 2 case in frequency domain analysis.

특히 주목할 점은 전면 케이슨과 후면 케이슨 간의 거리(GW)가 좁은 경우(Dual 1 케이슨)에는 좌우 케이슨의 간격(GL) 변화에 관계없이 피크점이 유사한 주기에서 발생되었으나, 거리(GW)가 증가한 Dual 2 케이스에서는 좌우 케이슨 간의 간격(GL) 변화에 따라 피크점의 발생주기에 변화가 발생되었

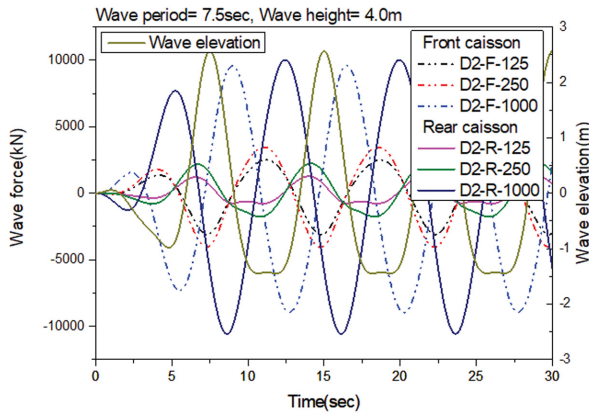
다. 이는 전면 케이슨과 후면 케이슨 간의 거리(GW)가 증가함에 따라 두 케이슨 사이에 존재하는 유체의 양이 증가하고 좌우 케이슨과의 간격 변화에 따라 내부로 들어오는 유체의 속도에 의해 내부 유체의 고유주파수가 들어오는 유체의 주파수와 일치되면서 수면이 상하로 진동하는 중복파(Standing



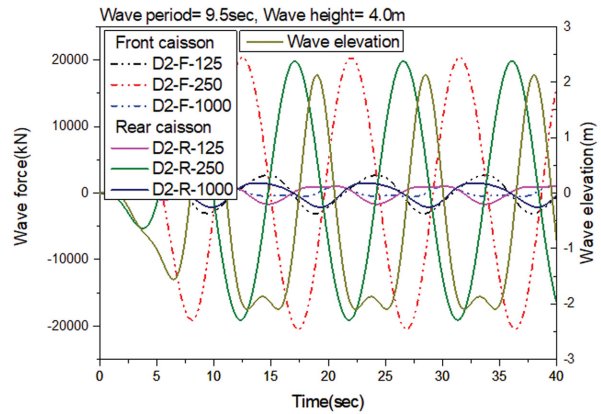
(a) Comparison of wave forces with
T=6.5sec and H=4.0m



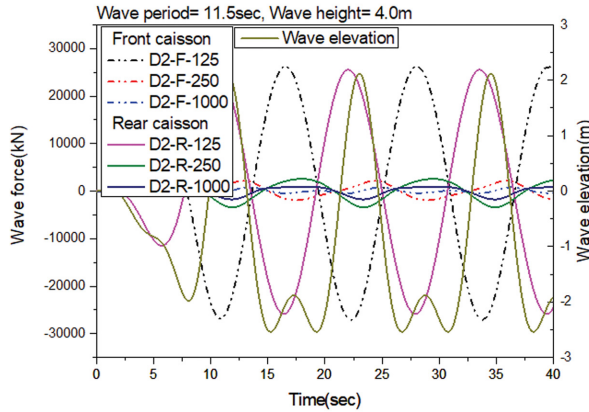
(b) Comparison of wave forces with
T=7.0sec and H=4.0m



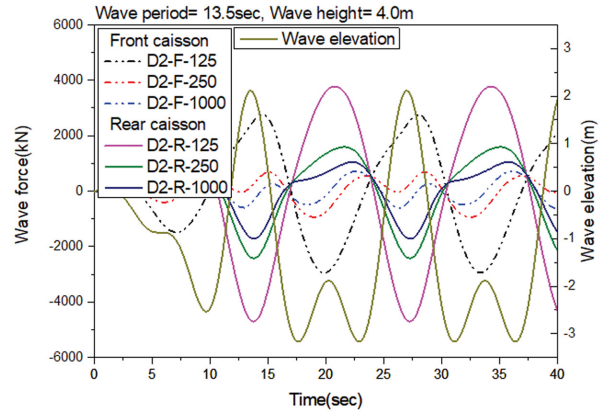
(c) Comparison of wave forces with
T=7.5sec and H=4.0m



(d) Comparison of wave forces with
T=9.5sec and H=4.0m



(e) Comparison of wave forces with
T=11.5sec and H=4.0m



(f) Comparison of wave forces with
T=13.5sec and H=4.0m

Fig. 8. Comparison of wave force between front and rear caisson for dual 2 case in time domain analysis.

wave)가 발생되기 때문이다. 이러한 현상은 입사파의 주파수와 OWC 파력발전장치 내 유체의 고유주파수가 일치되어 수면이 상하로 진동하는 Cho and Kim(2020)의 결과 및 입사파의 주파수와 단차진 유체의 고유주파수가 일치되어 Helmholtz 공진이 발생하는 Park(2020a)의 결과에서도 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 Dual 2 케이슨 주파수영역 수치해석에서 피크파력이 발생된 주기 6.5초, 7.5초, 9.5초, 11.5초와 유사한 파력 분포 특성을 보이는 13.5초에서 파고 4.0 m로 설정한 비선형 규칙파(Second order Stokes wave) 조건에서의 시간이력 수치해석 결과를 보여주고 있다. 검토된 전 주기에 대해 각 케이슨에 작용하는 파력이 거의 규칙적인 Sine 곡선 형태를 나타내고 있고, 앞뒤 케이슨의 간격이 큰 경우에는 입사하는 파랑이 전면 케이슨을 통과하면서 발생하는 회절 현상에 의해 전면 케이슨 뒤편에서 발생하는 역압력이 증가하여 후면 케이슨을 잡아당기는 현상으로 전면에 작용하는 파력과 후면에 작용하는 파력의 부호가 반대로 나타나는 것을 확인할 수 있다. Dual 1 케이슨의 주기 7.5초 이하 조건과 유사하게 전면 케이슨과 후면케이슨의 거동 방향이 서로 반대여서 상치 콘크리트를 개별로 설치할 경우 두 케이슨간의 일체 거동은 발생되지 않고, 전면 케이슨과 후면 케이슨에 작용하는 파력 차이도 매우 크게 발생되고 있어 전면 케이슨의 상치 콘크리트와 후면 케이슨의 상치 콘크리트를 일체로 설치하지 않을 경우 구조물의 구조적인 문제뿐만 아니라 안정성에도 상당한 문제가 발생할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 기존 케이슨 방파제의 안정성을 향상시킬 경우 입사하는 파랑과 구조물 간의 상호작용 영향에 의해 개별 케이슨에 작용하는 파력 특성을 상용프로그램인 ANSYS AQWA를 이용하여 주파수영역과 시간영역 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

추가로 케이슨이 설치되어 좌우 케이슨의 두께가 길어질 경우(Single 케이슨) 상호작용 영향에 의해 단주기에서는 기존 케이슨에 작용하는 파력이 증가하였고, 주기에 따른 파력작용 패턴도 바뀌게 되었다. 기존 케이슨 뒤에 신규 케이슨이 매우 근접하게 설치될 경우(Dual 1 케이슨) 중복파(Standing wave)의 주기는 좌우 케이슨 간의 간격(GL) 변화에 큰 영향을 받지 않았고, 피크값이 발생되기 이전 주기까지는 전면케이슨에 작용하는 파력이 후면 케이슨에 작용하는 파력보다 높으나 피크값 이후부터는 반대 현상이 발생되었다. 케이슨에 작용하는 동적 파력은 주기 7.5초 이하에서는 규칙적인 Sine 곡선 형태를 가지나, 주기 9.5초 이상에서는 비선형성의 Second order 성분의 영향으로 주기별로 다른 패턴을 나타내었다. 기존 케이슨의 토우길이를 고려한 Dual 2 케이슨에서는 전면 케이슨과 후면 케이슨사이에 존재하는 유체는 좌우

케이슨간의 간격(GL) 변화에 따라 내부로 들어오는 유체의 속도에 의해 유체의 고유주파수가 민감하게 바뀌는 현상이 발생되었다. 또한 Dual 1 케이슨과 유사하게 전면 케이슨과 후면 케이슨의 거동 방향이 서로 반대이고 파력 차이도 크게 발생되어 케이슨의 구조적 안전성 및 안정성을 확보하기 위해서는 전면 케이슨의 상치 콘크리트와 후면 케이슨의 상치 콘크리트를 일체로 설치하여야 할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 신규 케이슨을 기존 케이슨 전면 또는 후면에 추가로 설치하여 보강하는 경우에 발생할 수 있는 문제점 및 주요사항 등을 제시하였으나, 향후 수리모형실험을 통해 본 연구에서 고려되지 못한 월파 및 와류에 따른 에너지 손실 영향에 대한 분석이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 안전한 항만 구축 및 관리기술 개발사업인 “재해안전항만 구축 기술개발(20180323)” 과제를 통해 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 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).
- Cho, I.H. and Kim, J. (2020). Correlation of reflection coefficient and extracted efficiency of an oscillating water column device in front of a seawall. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32, 242-251 (in Korean).
- Ojima, R., Owaki, T., Yamagata, N. and Komoto, Y. (1994). Field Sliding Test of Double Cylinder Caisson Breakwater. *Proceedings of International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction*, Japan, 691-706.
- 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. (2020a). 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. (2020b). Characteristics of wave by additional installation of porous dual circular caissons on the existing breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(6), 396-410 (in Korean).
- 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.

Tanimoto, K., Hiroshi, E. and Takahashi, S. (1992). Field Experiments on a Dual Cylindrical Caisson Breakwater. Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering, Italy, 1625-1638.

Tanimoto, K. and Takahashi, S. (1994). Japanese Experiences on Composite Breakwaters. Proceedings of International Workshop

on Wave Barriers in Deepwaters, Japan, 1-24.

Received 9 November, 2021

Revised 10 December, 2021

Accepted 21 December, 2021