

## 부력을 이용한 연약지반용 방파제의 거동분석

### The behavior of breakwaters utilizing buoyancy for soft ground

윤희석<sup>1)</sup>, Hee-Suk Yun, 장인성<sup>2)</sup>, In-Sung Jang, 권오순<sup>3)</sup>, O-Soon Kwon, 이선재<sup>4)</sup>, Sun-Jae Lee

- <sup>1)</sup> 한국해양연구원 연안개발연구본부 연구원, Researcher, Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute
- <sup>2)</sup> 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute
- <sup>3)</sup> 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원, Principal Researcher, Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute
- <sup>4)</sup> 삼성건설 토목사업본부 차장, Vice-Chief, Civil Engineering Division, SAMSUNG Corporation

**SYNOPSIS** : A series of numerical simulations on the several types of breakwaters on the foundation systems utilizing buoyancy were carried out in plane-strain conditions using the modified Cam-Clay model and the Biot's consolidation theory. Improved foundation system by the replacement of original ground with light weighted material, expandable poly-styrene (called below EPS) and several foundation systems with buoyant cells were used. From the results of numerical simulations we found that the foundation systems utilizing buoyancy are efficient to reduce the maximum consolidation settlements without reducing lateral safety.

**Key words** : soft ground, breakwater, buoyancy, consolidation settlement, lateral displacement

## 1. 서 론

최근 전세계적으로 항만시설과 같은 대형시설 또는 구조물을 연안에 시공하려는 노력이 진행되고 있다. 일반적으로 해양구조물의 주요 하중은 횡방향인 파랑하중이며, 이 횡하중을 지지하기 위하여 중량이 큰 상부구조물을 활용해 왔으나 시공대상지반에 연약지반이 존재하는 경우 지반의 지지력 확보에 문제가 발생할 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 국내에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 지반개량공법을 주로 적용하고 있으나 연약지반층의 두께가 두터운 경우 비용이 지나치게 많이 들고 안정성을 확보하기가 쉽지 않다는 한계를 가지고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 횡방향 하중을 마찰력으로 지지하는 기존의 방식을 개선하는 방법을 사용하거나 기존 공법을 사용하면서 하부 원지반이 지지할 수 있을 정도로 상부 하중을 최소한으로 전달하는 방법을 사용해야 한다.

본 논문에서는 상부 하중을 부력으로 경감시켜 하부지반에 최소한으로 전달하여 지반을 개량하지 않고 사용할 수 있도록 하는 기초시스템을 고안하고 수치해석을 통하여 적용성을 살펴보았다. 적용대상으로는 대표적 해양구조물인 방파제를 사용하였다.

## 2. 부력을 이용한 연약지반용 방파제

### 2.1 기존 방파제

기존의 중력식 방파제는 상부구조물로 중력식 구조물인 케이슨이나, 블록식 구조물 또는 사석재료를 사용하는 경사제를 적용하는 데, 그림 1과 같이 구조체 자중에 의해 발생하는 마찰력을 이용하여 수평 하중을 지지하는 방식을 사용한다. 그러나 대부분의 해안지반이 깊은 심도의 연약지반을 형성하고 있어 상부 구조물의 자중을 지지하기 위하여 DCM, SCP 등 지반개량이 필수적으로 적용되고 있다. 이런 과도한 지반보강으로 인해 환경문제 뿐 만 아니라 재료수급의 문제 등 많은 문제점을 안고 있다.

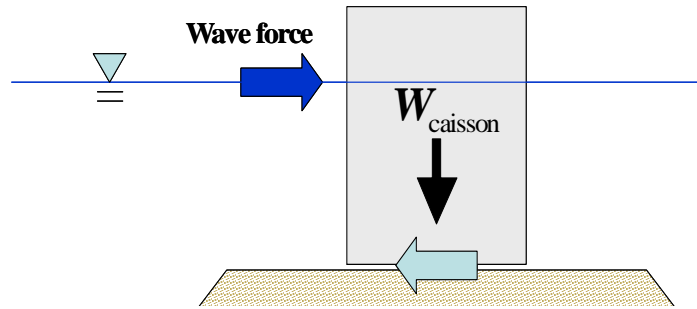


그림 1. 일반적인 중력식 방파제의 지지 매커니즘

그림 2는 단순히 상부 구조물의 단면을 감소시키고 횡방향지지력과 압밀침하를 저감시키기 위하여 지중에 말뚝을 설치한 연약지반용 방파제(구마모토항, 일본)의 사례로 최종적으로 자중을 경감시키지 못해서 압밀침하로 인한 부등침하가 문제가 되었다. 따라서 하부 지반의 잔류침하량을 경감시키기 위하여 상부 구조의 자중을 감소시키기 위한 별도의 장치가 필요하다.

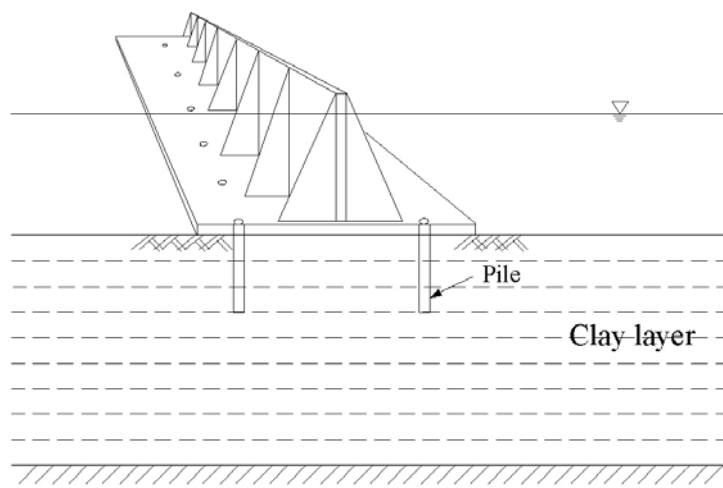


그림 2. 연약지반용 방파제(구마모토항, 일본)

### 2.2 부력식 기초시스템을 이용한 방파제

부력식 기초시스템은 기초시스템에 부력을 증가시켜 전체 구조물의 유효자중을 감소시킴으로서 취약한 연약지반에서 연직지지력을 확보하고자 고안한 것으로 횡방향 지지력을 확보하기 위한 추가적인 구

조를 필요로 한다. 기초 시스템에 부력을 증가시키는 방법으로는 기초 구조물 내에 공기나 경량재로 채워진 부력셀을 설치하는 방법을 사용한다.

부력식 기초시스템을 활용한 방파제는 상부구조물과 하부구조물의 조합을 통해 다양한 형태로 구성할 수 있으나 본 연구에서는 크게 네 가지 타입의 부력을 이용한 연약지반용 방파제를 사용하였으며 각각의 단면을 3.3절에 나타내었다.

### 3. 수치해석

부력식 기초시스템을 적용한 연약지반용 방파제의 현장적용성을 살펴보기 위한 방법으로 수치해석을 이용하였다. 부력을 활용하지 않은 기존 공법으로 시공된 방파제의 거동과 부력식 기초시스템을 적용한 방파제의 연직 및 횡방향 거동을 비교함으로써 부력식 기초시스템을 이용한 연약지반방파제를 평가하여 보았다.

#### 3.1 수치해석모델

수치해석을 위한 지반구성모델로는 점성토지반의 경우에는 등방 경화 탄소성모델인 modified Cam-Clay 모델을 적용하였고, Biot의 이론을 적용한 압밀해석을 수행하였으며 사석이나 퇴적물 모래 등의 구성모델로는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고 경량재료인 EPS와 콘크리트와 지반하부의 사질토층과 암반층은 탄성모델을 사용하여 해석을 실시하였다

#### 3.2 수치해석 입력자료

부력식 기초시스템의 성능평가를 위하여 부산신항만의 서방파제가 위치한 현장의 지반조건과 파랑조건을 수치해석을 위한 입력 자료로 사용하였다.

수치해석 대상지반은 표 1과 같이 12 m의 두께를 갖는 두 개의 점성토층과 3 m의 두께를 갖는 하나의 모래층이 암반층에 얹혀있는 상태이며, 평균해수면은 표 2와 같이 지표로부터 9 m 위치에 형성되어 있다. 부산신항만 서방파제 시공현장의 설계파랑은 표 2에 정리하여 나타내었고, 이 자료들을 Goda 식에 적용하여 파압을 계산하였다.

표 1. 지층구조

구분	층 두께 (m)
점성토 I	12
점성토 II	12
모래	3
암반	-

표 2. 설계 파랑

파고 ( $H_{1/3}$ )	주기 (sec)	파 장 (m)	수 심 (m)
4.5	14	148.07	9

표 3. 구조재료의 물성치

구분	콘크리트	부력셀	암반
탄성계수 ( $E$ , tonf/m <sup>2</sup> )	2,740,030	600	500,000
Poisson 비 ( $\nu$ )	0.167	0.12	0.27
습윤단위중량 ( $\gamma_t$ , tonf/m <sup>3</sup> )	2.45	0.02	2.8
수중단위중량 ( $\gamma_{sub}$ , tonf/m <sup>3</sup> )	2.45	0.02	2.8

각각의 구조재료 및 해석대상지반에 대한 입력값은 부산신항만 방파제 실시설계요약보고서를 참고하여 설정하였으며 사용한 구조재료, 사질토, 점성토의 물성치는 각각 표 4와 표 5에 정리하였다.

표 4. 사질토의 물성치

구분	모래	되채움 모래	레벨링 사석	피복석
탄성계수 ( $E$ , tonf/m <sup>2</sup> )	2039	2039	5099	5099
Poisson 비 ( $\nu$ )	0.33	0.33	0.3	0.3
습윤단위중량 ( $\gamma_t$ , tonf/m <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.0	2.0
수중단위중량 ( $\gamma_{sub}$ , tonf/m <sup>3</sup> )	1.8	1.8	1.8	1.8
정지토압계수 ( $K_0$ )	0.5	0.5	0.5	0.5
내부마찰각 ( $\phi$ , °)	31.5	30	35	40
투수계수 (m/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	—	—

표 5. 점성토 층별물성치

구분	Clay 1	Clay 2	비 고
습윤단위중량 ( $\gamma_t$ , tonf/m <sup>3</sup> )	1.558	1.718	
수중단위중량 ( $\gamma_{sub}$ , tonf/m <sup>3</sup> )	1.558	1.718	
압축지수 ( $C_c$ )	0.9	0.6	
재압축지수 ( $C_s$ )	0.09	0.06	$C_s = 1/10 C_c$
탄성계수 ( $E$ , tonf/m <sup>2</sup> )	204	204	
Poisson's 비	0.3	0.3	
Slope of consolidation line, $\lambda$	0.3908	0.2605	
Slope of overconsolidation line, $\kappa$	0.0391	0.0261	
Critical state specific volume, $I'$	4.1306	3.3971	
Slope of critical state line, $M$	0.73	0.73	
비배수전단강도 ( $S_u$ , kgf/cm <sup>2</sup> )	$S_u = 0.0107D + 0.1027$		UU Test
정지토압계수 ( $K_0$ )	0.5	0.5	
투수계수 (m/s)	5×10 <sup>-8</sup>	5×10 <sup>-8</sup>	
과압밀비, OCR	1	1	

### 3.3 수치해석 단면

연약지반에서 적용할 수 있는 부력식 기초시스템을 이용한 방파제의 형식으로 고안된 다음 네 가지 형식에 대한 수치해석을 실시하였다

#### 3.3.1 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제

첫 번째 타입은 기존의 케이슨식 방파제를 기본으로 한 것으로 연약지반을 개량하기위해 부분치환 또는 전체치환을 하는 형식이다.

부력식 기초시스템을 이용한 방파제로는 그림 3과 같이 경량재를 이용하여 연약지반 상부를 부분치환 하는 경량재 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제를 사용하였다. 이 공법은 상부연직하중은 경량재로 발생하는 부력으로 상쇄하고 횡방향 하중은 기초부에 근입된 경량재 치환 기초시스템의 기하학적인 형상으로 지지하도록 하는 방법이다. 경량재가 원 지반의 강성보다 크기 때문에 경량재의 치환정도가 안정성 확보의 기본 변수가 된다. 경량재의 치환 깊이가 깊을수록, 치환 면적이 클수록 횡방향 지지력은 증가하게 된다.

경량재 치환기초를 사용했을 때의 실질적인 성능향상효과를 살펴보기 위해서는 원지반상에 케이슨식 방파제가 설치된 경우에 대한 해석을 실시해야 하나 지반에 파괴가 발생하여 분석이 불가능하였으므로 편의상 모래 치환기초를 사용하여 해석을 실시하였다.

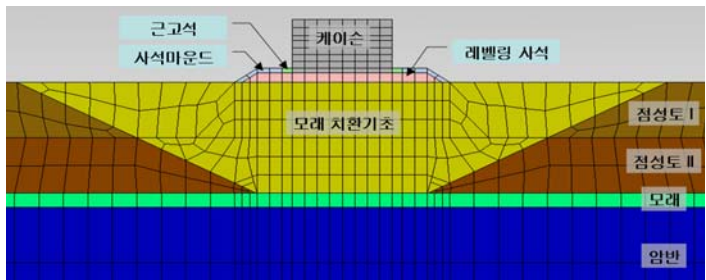
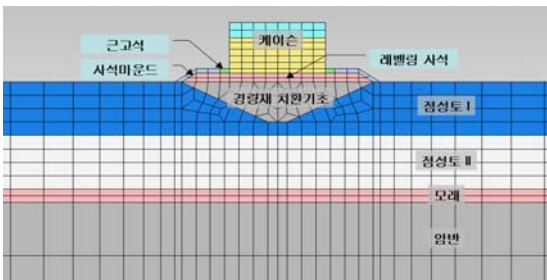


그림 3. 경량재 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제

그림 4. 모래치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제

각 공법을 적용하여 만든 방파제의 제원을 표 6에 정리하여 나타내었다.

표 6. 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제의 제원

		경량재 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제	모래 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제
치환 기초시스템	치환 깊이	9 m	24 m
	치환 하부 폭	4 m	34 m
	치환 기울기	2:1	2:1
상부 구조물	케이슨 높이	11.5 m	
	케이슨 폭	20 m	
	케이슨 자중(net)	223.5 tonf	
	케이슨과 레벨링 사석과의 마찰계수	0.6	
	레벨링 사석층 두께	2 m	
	피복석 두께	1 m	
성토기울기		1.5:1	

### 3.3.2 지중벽 연약지반방과제

두 번째 타입은 기존에 해양연구원에서 개발한 바 있는 지중벽을 이용한 연약지반방과제를 사용하였다. 이 공법은 상부구조물의 단면을 감소시켜서 연직하중을 감소시키고 횡방향하중의 경우에는 지중벽으로 지지하는 방법을 사용한다.

본 논문에서는 동일한 구조물에 부력셀을 설치하지 않은 경우(그림 5)와 설치한 경우(그림 6)에 대해 각각 거동을 평가하였다.

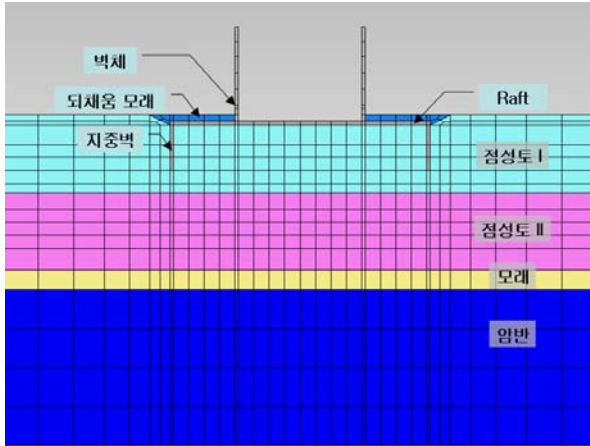


그림 5. 부력셀을 설치하지 않은 지중벽 연약지반방과제

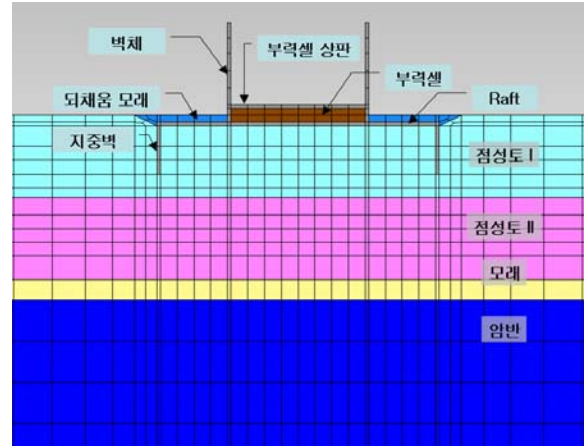


그림 6. 부력셀을 설치한 지중벽 연약지반방과제의

각 공법을 적용하여 만든 방과제의 제원을 표 7에 정리하여 나타내었다.

표 7. 지중벽 연약지반방과제의 제원

	부력셀을 설치하지 않은 지중벽 연약지반방과제	부력셀을 설치한 지중벽 연약지반방과제
부력셀 상판 두께	0 m	0.5 m
부력셀 두께	0 m	2 m
벽체상단 높이	지표로부터 13.5 m	
벽체 두께	0.5 m	
Raft 폭	40 m	
Raft 두께	0.6 m	
지중벽 길이	40 m	
지중벽 두께	0.5 m	
되채움 모래 기울기	2:1	
근입깊이	1.6 m	

### 3.3.3 Piled raft 연약지반방파제

세 번째 타입은 두 번째 타입과 같은 상부구조물을 이용하고 하부구조물인 지중벽을 말뚝으로 대치한 Piled raft 연약지반방파제를 사용하였다. 이를 사용한다. 이 공법은 상부구조물의 단면을 감소시켜서 연직하중을 감소시키고 횡방향하중의 경우에는 지중벽으로 지지하는 방법을 사용한다.

본 논문에서는 동일한 구조물에 부력셀을 설치하지 않은 경우(그림 7)와 설치한 경우(그림 8)에 대해 각각 거동을 평가하였다.

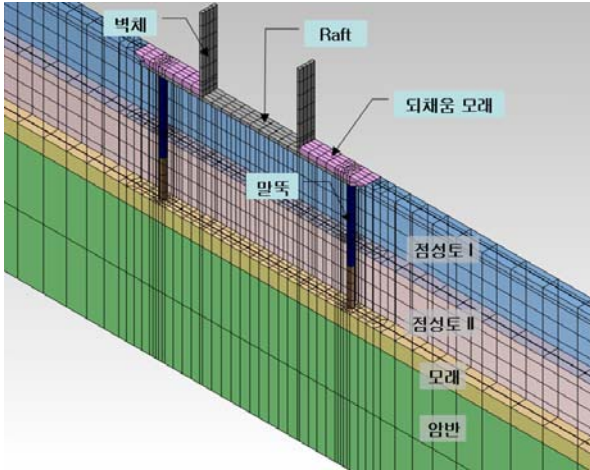


그림 7. 부력셀을 설치하지 않은 Piled Raft 연약지반방파제

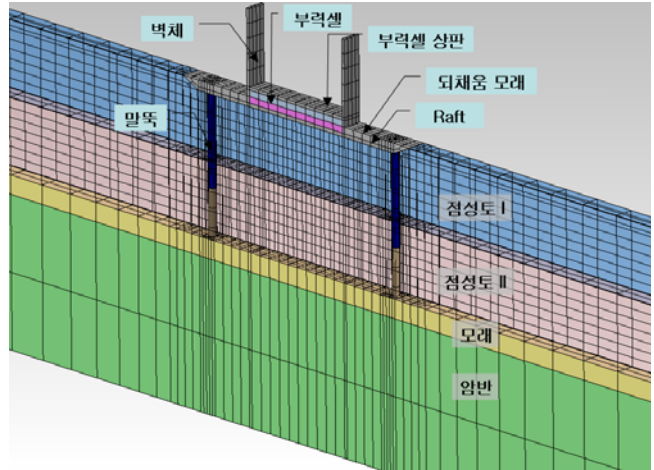


그림 8. 부력셀을 설치한 Piled Raft 연약지반방파제의

각 공법을 적용하여 만든 방파제의 제원을 표 8에 정리하여 나타내었다.

표 8. Piled Raft 연약지반방파제의 제원

	부력셀을 설치하지 않은 Piled Raft 연약지반방파제	부력셀을 설치한 Piled Raft 연약지반방파제
부력셀 상판 두께	0 m	0.5 m
부력셀 두께	0 m	2 m
벽체상단 높이	지표로부터 13.5 m	
벽체 두께	0.5 m	
Raft 폭	40 m	
Raft 두께	0.6 m	
말뚝 길이	15 m	
말뚝 직경	1.2 m	
말뚝 간격	3 m	
되채움 모래 기울기	2:1	
근입깊이	1.6 m	

### 3.3.4 석선파일(suction pile) 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제

네 번째 타입은 상부구조물로는 케이슨을 사용하고 기초시스템으로 석선파일을 이용한 형태이다.

본 논문에서는 부력셀을 설치한 경우에는 충분한 부력을 확보하기 위하여 부력셀을 설치하지 않은 경우(그림 9)에 비해 그림 10과 같이 석선파일 상판을 넓게 확장하여 부력셀을 설치하였다.

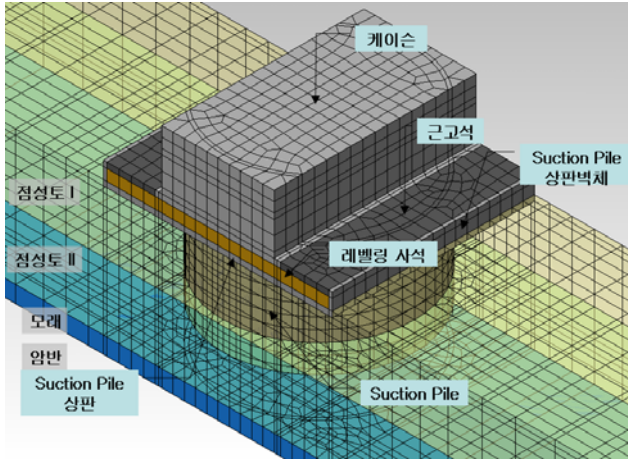


그림 9. 부력셀을 설치하지 않은 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제

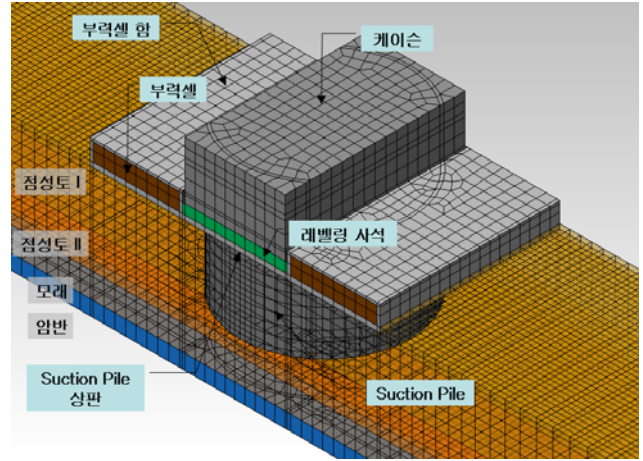


그림 10. 부력셀을 설치한 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제

각 공법을 적용하여 만든 방파제의 제원을 표 9에 정리하여 나타내었다.

표 9. 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제의 제원

	부력셀을 설치하지 않은 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제	부력셀을 설치한 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제
석선파일 상판 폭	40.7 m	58 m
부력셀 폭	0 m	17.3 m × 2
부력셀 두께	0 m	3.5 m
부력셀 상판두께	0 m	0.5 m
케이슨 상단 높이	지표로부터 13.5 m	
케이슨 자중 (net)	220.85 tonf	
레벨링 사석 두께	2 m	
석선파일 길이	17 m	
석선파일 직경	34 m	
석선파일 상판 폭	0.6 m	
석선파일 상판 두께	1 m	
석선파일 벽체 두께	0.6 m	
근입깊이	1 m	



## 4. 해석결과

각 단면에 대한 해석결과는 방파제 상단을 기준으로 살펴보았다.

치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제에 대한 수치해석을 실시한 결과 그림 11, 12와 같은 압밀 곡선과 하중-변위곡선을 얻을 수 있었다. 경량재 치환기초를 사용하였을 때 연약지반 전체를 치환한 모래로 치환한 경우에 비해 연직 및 횡방향 변위 모두 크게 발생하는 것으로 나타났으나 비용측면에 살펴볼 때 충분한 의미가 있는 것으로 판단된다. 경량재의 경우 잘 다져진 모래지반에 비해 강성이 떨어지기 때문에 횡방향 지지력의 확보에 다소 어려움이 있으나 횡방향 지지력보다 과도한 압밀침하량이 우려되는 경우 충분히 적용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

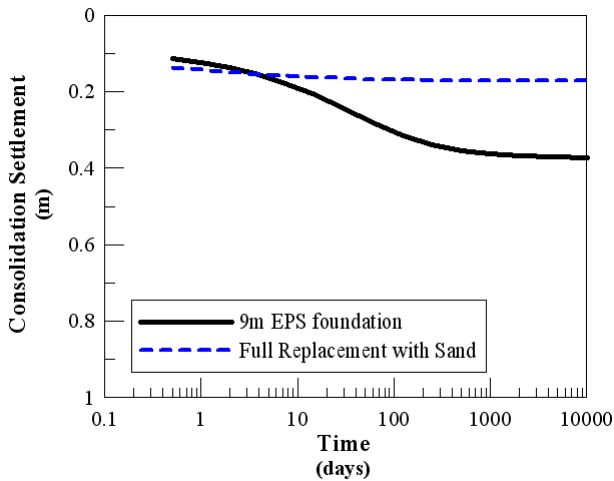


그림 11. 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제의 압밀곡선의 비교 (9m 경량재 치환 기초 vs. 모래 치환기초)

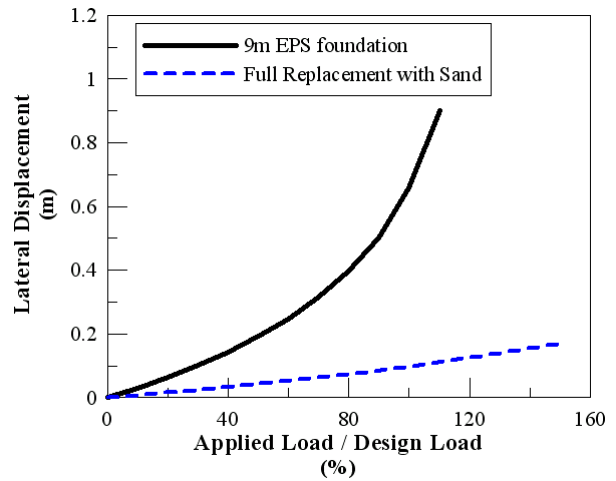


그림 12. 치환 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제의 하중-변위곡선의 비교 (9m 경량재 치환기초 vs. 모래 치환기초)

지중벽을 이용한 연약지반방파제를 해석한 결과를 그림 13과 14에 도시하였다. 그림 13을 보면 알 수 있듯이 동일한 단면을 가진 방파제에 부력셀을 설치한 경우 압밀침하량을 절반 이하로 줄일 수 있으면서도 그림 14와 같이 횡방향 지지력은 거의 동일한 것으로 나타나 압밀침하량이 과도하게 발생할 것이 예상되는 지반에 부력셀을 설치하여 활용하는 것이 유용함을 확인할 수 있었다.

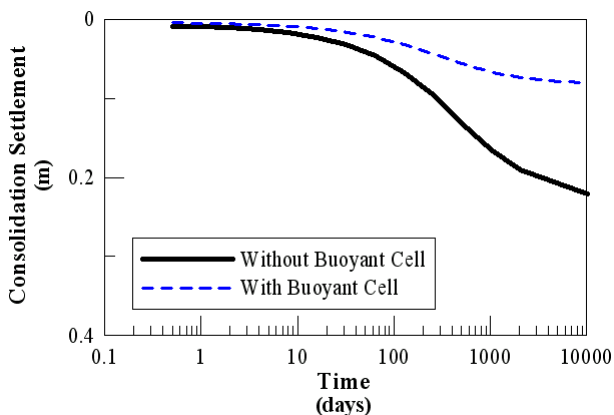


그림 13. 지중벽을 이용한 연약지반방파제의 압밀 곡선의 비교 (부력셀을 설치하지 않은 경우 vs. 부력셀을 설치한 경우)

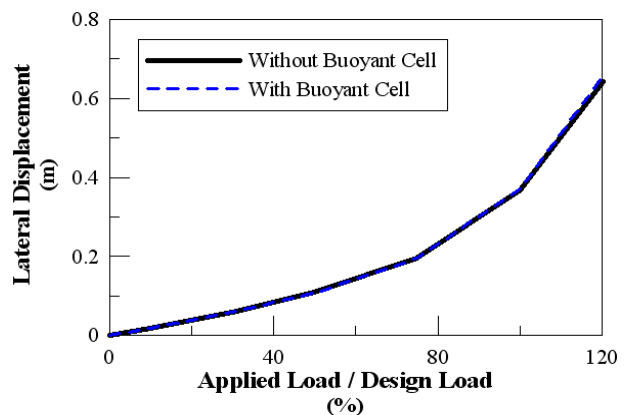


그림 14. 지중벽을 이용한 연약지반방파제의 하중-변위곡선의 비교 (부력셀을 설치하지 않은 경우 vs. 부력셀을 설치한 경우)

Piled Raft 기초시스템을 이용한 연약지반방파제를 해석한 결과를 그림 15와 16에 도시하였다. 그림을 보면 동일한 단면을 가진 방파제에 부력셀을 설치한 경우 압밀침하량은 절반 이하로 줄일 수 있으면서도(그림 15) 횡방향 지지력은 거의 동일한 것으로 나타나(그림 16) 압밀침하량이 과도하게 발생할 것이 예상되는 지반에 부력셀을 설치하여 활용하는 것이 유용함을 확인할 수 있었다.

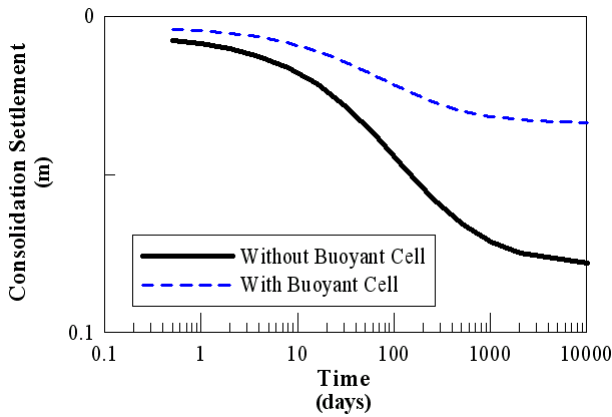


그림 15. Piled raft 기초시스템을 이용한 연약지반 방파제의 압밀곡선의 비교 (부력셀을 설치하지 않은 경우 vs. 부력셀을 설치한 경우)

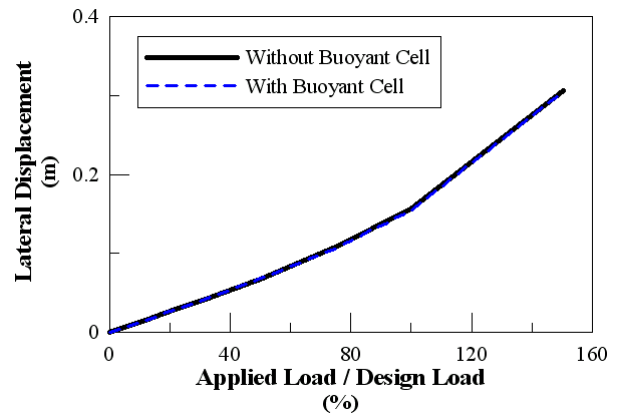


그림 16. Piled raft 기초시스템을 이용한 연약지반방파제의 하중-변위곡선의 비교 (부력셀을 설치하지 않은 경우 vs. 부력셀을 설치한 경우)

석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제를 해석한 결과를 그림 17과 18에 도시하였다. 그림을 보면 방파제에 부력셀을 설치한 경우의 압밀침하량이 설치하지 않은 경우에 발생하는 압밀침하량의 60%만 발생하는 것으로 나타났으나(그림 17) 횡방향 하중에 대한 지지력은 다소 감소하는 것으로 나타났다(그림 18). 이 결과는 주어진 현장조건에 최적화한 단면에 적용한 것이 아니므로 적절한 설계가 이루어진다면 횡방향 지지력을 확보하면서도 압밀침하량을 대폭 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

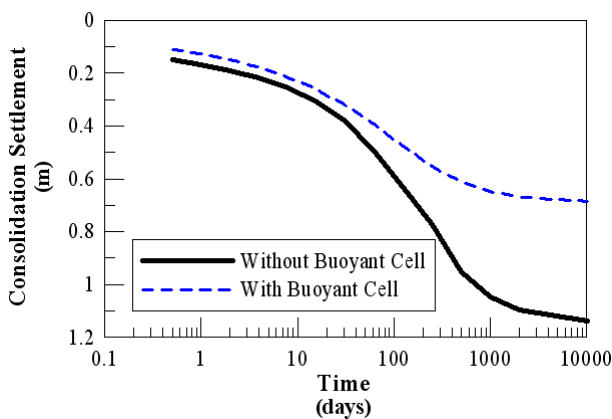


그림 17. 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제의 압밀곡선의 비교 (부력셀을 설치하지 않은 경우 vs. 부력셀을 설치한 경우)

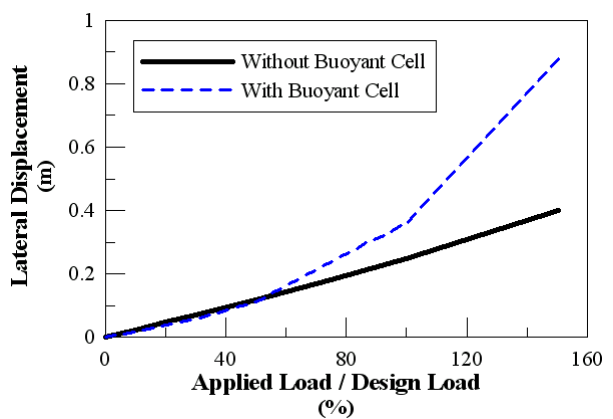


그림 18. 석선파일 기초시스템을 이용한 케이슨식 방파제의 압밀곡선의 비교 (부력셀을 설치하지 않은 경우 vs. 부력셀을 설치한 경우)

## 5. 결론

부력식 기초를 이용한 방파제에 대한 수치해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 경량재 치환 기초시스템은 부분치환만으로 압밀침하량을 크게 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 모래 등에 비해 강성이 부족하므로 횡방향 하중이 비교적 작지만 압밀침하량이 커서 문제가 될

수 있는 현장에서 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 지중벽, 말뚝, 석션파일 등의 구조물을 이용하여 횡방향 지지력을 확보하는 방파제의 경우 부력셀을 설치하여 사용하는 경우 횡방향 지지력에 대한 큰 손실 없이 압밀침하량을 크게 감소시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 부력식 기초시스템을 이용한 방파제를 과도한 압밀침하량이 발생할 우려가 있는 현장에서의 대책방안으로 충분히 적용가능하다는 것을 확인시켜준다.

## 감사의 글

이 연구는 삼성건설의 “대수심/대심도 연약지반상 대형 해양구조물의 신개념 부력식기초 실용화 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S. R., and Taylor, R. J.(2000), "Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases", *Journal of Marine Structures*, No.13, pp.367~382.
2. Biot, M.A. (1941), "General theory of three-dimensional consolidation", *Journal of Applied Physics*, 12, pp.155~164.
3. Colliat, J. L., Boisard, P., Andersen, K., and Schroeder, K. (1995), "Caisson Foundations as Alternative Anchors for Permanent Mooring of a Process Barge Offshore Congo", *Proc of Offshore Technology Conference*, OTC7797, pp.919~929.
4. Schofield, A. N. and Wroth, C. P.(1968), *Critical state soil mechanics*, McGraw-Hill, New York.
5. Tjelta, T. I., Aas, P. M., Hermstad, J., and Naes, E. (1990). "The Skirt Piled Gulfaks C Platform Installation", *Proc. of the 22nd Offshore Technology Conf.*, Paper No. OTC6473..