



### 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



공학석사 학위논문

침몰선의 해저면 이탈력에 관한  
모형실험 연구

Experimental study on soil breakout force of  
sunken ships

2023년 8월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

김 세 준

# 침몰선의 해저면 이탈력에 관한 모형실험 연구

Experimental study on soil breakout force of  
sunken ships

지도 교수 남 보 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2023년 8월

서울대학교 대학원  
조선해양공학과  
김 세 준

김세준의 공학석사 학위논문을 인준함  
2023년 8월

위 원장 노 명 일 (인)

부위원장 남 보 우 (인)

위 원 김 도 균 (인)

# 초 록

선박의 침몰사고는 인명피해는 물론, 침몰선의 유류 및 기타 오염물질의 유출로 인한 해양오염 등 다양한 2차 사고로 이어질 수 있기 때문에, 신속한 구난 및 인양 작업이 요구된다. 해저면에 침몰된 선박의 인양작업은 침몰선의 해저면 이탈, 수중 인양, 자유수면 통과, 공기 중 인양 단계들로 구분될 수 있으며, 이 중 첫 번째 단계인 해저면 이탈을 안전하게 수행하기 위해서는 적절한 해저면 이탈력을 예측하는 것이 중요하다.

해저면 이탈력은 물체가 해저면을 이탈할 때 해저 저질에 의해 작용하는 힘으로 인양력을 구성하는 주요 성분 중 하나이다. 해저면 이탈력을 평가하기 위하여 Lee(1972)가 제안한 해저면 이탈력 추정식이 가장 널리 활용되고 있으며, 해당 해저면 이탈력 추정식은 단순형상 구조물에 대한 실해역 및 모형실험 데이터를 기반으로 개발되었다. 반면 본 연구에서 고려하고 있는 복잡한 3차원 형상의 선박에 대한 직접적인 적용 가능성에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 침몰선의 해저면 이탈력을 평가할 수 있는 추정식을 개발하고자 일련의 모형실험을 수행하였다. 첫째, 본 연구에서는 대한민국 연안의 해저 저질을 이용하여 다양한 단순형상 구조물에 대한 해저면 이탈력 모형실험을 수행하고, 그 물리적인 특성과 기준의 해저면 이탈력 추정식의 정확도에 대해 검토하였다. 둘째, 선박 형상 구조물에 대한 해저면 이탈력 모형실험을 수행하고, Lee(1972) 추정식에 형상계수를 도입하여 선박 형상에 적용 가능한 수정된 해저면 이탈력 추정식을 제안하였다. 셋째, 다양한 인양작업에서 발생할 수 있는 선박의 침몰 자세와 인양 속도에 대한 추가적인 모형실험을 수행하고, 그 영향에 대해 검토하였다.

주요어 : 해저면 이탈력, 모형실험, 침몰선, 긴급 구난, 인양 작업  
학 번 : 2021-25000

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 사례 .....	3
제 3 절 연구 목표 및 연구 내용 .....	9
제 2 장 연구 방법.....	10
제 1 절 모형실험 설비.....	10
제 2 절 실험 시료.....	12
제 3 절 실험 모델.....	14
제 4 절 신호 처리 .....	18
제 5 절 인양 케이블의 선정 .....	20
제 3 장 모형실험 .....	23
제 1 절 단순형상 구조물.....	23
제 2 절 선박형상 구조물.....	28
제 3 절 모형실험의 분산성 .....	31
제 4 장 결과분석 및 논의 .....	35
제 1 절 물체의 형상의 영향.....	35
제 2 절 침몰 자세의 영향 .....	40
제 3 절 해저 저질의 영향 .....	43
제 4 절 인양 속도의 영향 .....	48
제 5 절 침몰 시간의 영향 .....	52
제 5 장 요약 및 결론 .....	55
참고문헌.....	57
Abstract .....	60

## 표 목차

Table 1.1 Contents of experiment parameters .....	3
Table 1.2 Estimation of bottom breakout force .....	4
Table 2.1 List of experimental equipment .....	11
Table 2.2 Properties of seabed soil.....	12
Table 2.3 Principle parameter of experimental model (Simple shaped) .....	15
Table 2.4 Principle parameter of experimental model (Ship shaped) .....	17
Table 3.1 Soil breakout force of Cube8, D/B≈0.3.....	33
Table 4.1 Shape coefficient of simple shaped model .....	37
Table 4.2 Shape coefficient and Block coefficient of test model .....	39
Table 4.3 Coefficient of determination of experimental results .....	43
Table 4.4 Effect of seabed soil on shape coefficient .....	47
Table 4.5 Lifting speed of prism model and prototype vessel .....	48
Table 4.6 Comparison of lifting speed coefficient .....	51
Table 4.7 Vane shear test results of Torvane.....	53

## 그림 목차

Figure 1.1 Occurrences of ship sinking accidents in Korea ..	2
Figure 1.2 Schematic diagram of salvage process .....	2
Figure 1.3 Schematic diagram of bearing capacity ( <b>Fq</b> ) .....	6
Figure 2.1 Configuration of experimental setup .....	10
Figure 2.2 Overview of site A and B for seabed soil gathering .....	13
Figure 2.3 Experimental model (Simple shaped) .....	14
Figure 2.4 Experimental model (Ship shaped) .....	16
Figure 2.5 Calibration of loadcell .....	18
Figure 2.6 Example of filtered data .....	19
Figure 2.7 Effect of lifting line .....	20
Figure 2.8 Effect of lifting line (Time series) .....	21
Figure 2.9 Comparison of lifting line .....	22
Figure 3.1 Experimental scene of simple shaped model.....	24
Figure 3.2 Schematic view of soil breakout process of cube25	
Figure 3.3 Experimental results of simple shaped model....	27
Figure 3.4 Experimental scene of ship shaped model.....	29
Figure 3.5 Experimental results and shape coefficient of ship model.....	30
Figure 3.6 Comparison of experimental results with Muga(1968), Liu(1969) and Lee(1972) .....	32
Figure 3.7 Experimental scene of Cube8, D/B≈0.3 with Seabed soil A .....	33
Figure 3.8 Time series of Cube8, D/B≈0.3.....	33
Figure 4.1 Application of shape coefficient( <b>Cs</b> ).....	36
Figure 4.2 Effect of shape coefficient on ship model.....	38
Figure 4.3 Examples for sunken position of ship model .....	40
Figure 4.4 Effect of sunken position of ship model .....	41
Figure 4.5 Bottom breakout scene of sunken ship in trimmed position.....	42
Figure 4.6 Effect of seabed soil .....	44
Figure 4.7 Experimental model and considered Barge in Length of 20m .....	48
Figure 4.8 Effect of lifting speed .....	50

Figure 4.9 Image of Torvane.....	52
Figure 4.10 Vane shear test results of Torvane(Exp. Scene) .....	53
Figure 4.11 Effect of In-situ rest time .....	54

# 1. 서론

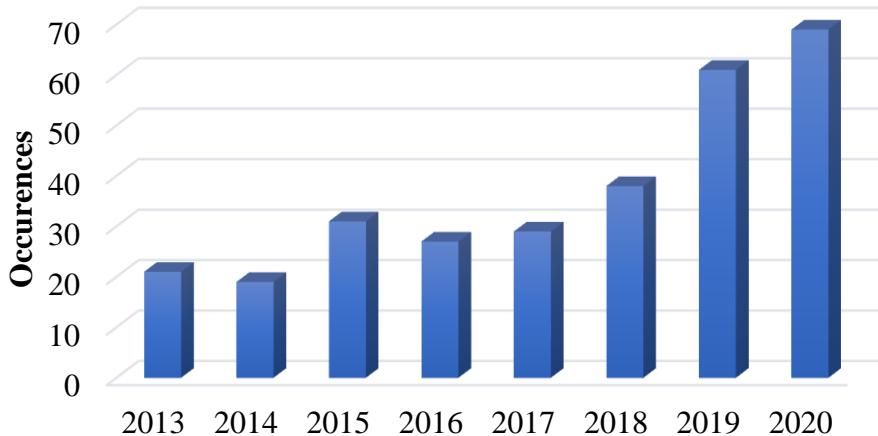
## 1.1 연구 배경

국내 항만의 선석 수는 2021년 해양수산부에서 발표한 항만시설 및 능력현황에 따르면 1961년의 63석에서, 2011년의 822석을 거쳐 2021년에는 1024석까지 증가하며 꾸준한 상승세를 보이고 있으며, 이로 인한 국내 항만을 거치는 물동량은 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 또한 이러한 항만의 물동량 및 하역능력 증가 추세와 함께 국내 연안에서 발생하는 해상 사고 또한 증가하는 추세를 보인다. 최근 대한민국 항만의 물동량 및 하역능력이 증가하면서 국내 연안에서 발생하는 해상 사고 또한 증가하는 추세를 보인다. 해양수산부의 해양수산 통계시스템에 의하면 다양한 해상 사고 중 특히 선박의 침몰사고는 **Figure 1.1**과 같이 2013년 이후 2020년까지 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 선박의 침몰사고는 인명피해는 물론, 침몰선의 유류 및 기타 오염물질의 유출로 인한 해양오염 등 다양한 2차 사고로 이어질 수 있기 때문에, 신속한 구난 및 인양 작업이 요구된다. **Figure 1.2**는 해상 크레인을 이용한 침몰선의 인양 과정을 도시한 그림이다.

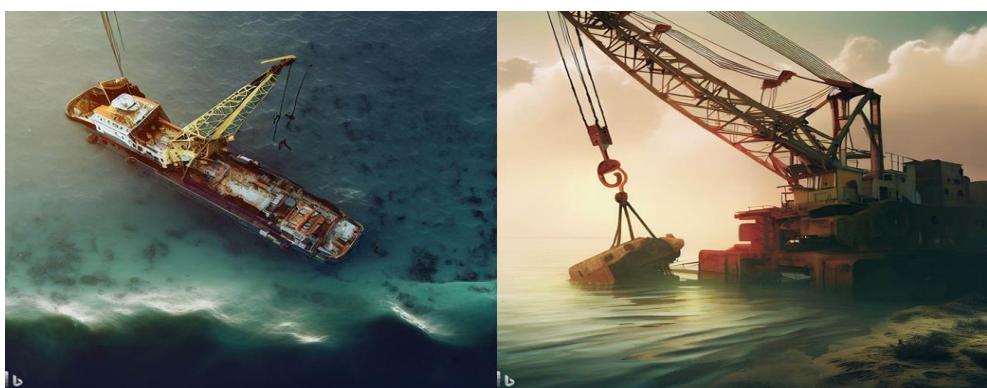
해저면에 침몰된 선박의 인양작업은 침몰선의 연직방향 위치에 따라 해저면 이탈, 수중 인양, 자유수면 통과, 공기 중 인양 등으로 구분될 수 있다. 이때 해저면 이탈력은 물체가 해저면을 이탈할 때 해저 저질에 의해 작용하는 힘으로 인양력을 구성하는 주요 성분 중 하나이다. 해저면 이탈력은 물체의 침강조건 및 해저 저질의 특성에 따라 높은 변동성을 가진다. 그러므로 침몰선 사고 직후 해저면 이탈력을 정확하게 추정해야 안전하고 신속한 인양작업을 보장할 수 있다.

해저면 이탈력을 평가하기 위하여 가장 널리 활용되는 방법으로 Lee(1972)가 제안한 해저면 이탈력 추정식이 있다.

그러나 해당 추정식은 단순한 형상을 가지는 물체에 대한 실험결과를 기반으로 개발된 추정식이기 때문에, 침몰선 인양문제에 적용하기 위해서는 선박 형상의 구조물에 대한 적용 가능성을 검토할 필요가 있다. 아울러 Lee(1972)의 추정식은 단순히 침강비에 대한 함수로 구성되어 있기 때문에, 인양 물체의 형상 및 자세, 인양 속도 등의 실제 인양 작업 요소에 대한 정교한 고려가 어렵다는 한계점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 선박을 포함한 다양한 형상의 물체에 대해 다양한 인양 조건을 고려한 모형실험을 수행하고, 이를 기반으로 침몰선에 적용 가능한 수정된 해저면 이탈력 추정식을 개발하고자 한다.



**Figure 1.1 Occurrences of ship sinking accidents in Korea**



**Figure 1.2 Schematic diagram of salvage process**

## 1.2 연구 사례

### 1.2.1 해저면 이탈력에 관한 실험적 연구

해저면 이탈력에 관한 대표적인 실험 연구로는 Muga(1968)와 Liu(1969)의 연구가 있다. Muga(1968)는 단순형상 구조물에 대해 해저면 이탈력을 측정하기 위한 실해역 실증(San Francisco Bay)을 수행하고, 단순형상 구조물의 해저면 이탈력에 관한 단순한 추정식을 제안하였다. 해당 연구의 실험에 이용된 단순형상 구조물로는 콘크리트로 제작된 원기둥, 직육면체, 정육면체, 구 등이 포함되었다. 또한 Liu(1969)는 Muga(1968)에서 이용된 것과 유사한 단순형상 구조물을 이용해 Gulf of Mexico에서의 실해역 실증 및 Seal Beach, Mugu Lagoon의 해저 저질을 이용해 모형실험을 수행하였다.

Lee(2014)는 단순형상 및 선박 형상 구조물에 대한 실험실 단위의 모형실험과 실해역 실증을 수행하였으며, 대한민국 연안의 세가지 해저 저질을 이용해 해저 저질의 영향을 검토하였다. 다만 해당 연구에서는 실험 모델의 형상 및 해저 저질에 따라 인양력의 차이가 발생할 수 있음을 보여주었지만, 이를 정량적으로 반영한 해저면 이탈력의 추정식을 제안하지는 않았다. **Table 1.1**은 선행연구와 본 연구의 실험에서 고려한 대표적인 변수들을 비교한 내용과 같다.

**Table 1.1 Contents of experiment parameters**

	Simple shaped	Ship shaped	Effect of Soil	Lifting Speed	Sinking Position
Muga	○	×	×	×	×
Liu	○	×	○	×	×
Lee	○	○	○	×	×
Present	○	○	○	○	○

### 1.2.2 해저면 이탈력 추정식 및 이를 활용한 연구

Lee(1972)는 Muga(1969) 및 Liu(1969)의 단순형상 구조물을 이용한 해저면 이탈력 측정에 관한 실험 결과를 활용하여 식 1.1의 해저면 이탈력 추정식을 제안하였다. 해당 해저면 이탈력 추정식은 물체의 폭 대비 침강 ( $D/B$ )에 대한 무차원 해저면 이탈력의 관계를 나타낸다. 해당 추정식은 해저면 이탈력( $F_b$ )을 물체에 작용하는 해저면 지지력( $F_q$ )으로 나눈 형태로 무차원화를 수행하였다.

$$F_b/F_q = (1 - 0.97e^{-2.75D/B}) \quad (1.1)$$

이후 식 1.1의 해저면 이탈력 추정식은 다른 연구자들에 의해 일부 변형 및 수정을 거쳐 활용되고 있다. 대표적으로 David, T. & Diane J.B.(1985)의 연구는 식 1.1의 추정식을 기반으로 낮은 침강비에서 해저면 이탈력의 상한 한계를 정의하고, Table 1.2에 정리된 침몰 시간과 침강비에 따른 해저면 이탈력 추정식의 수정된 가이드라인을 제안하였다.

**Table 1.2 Estimation of bottom breakout force by David& Diane (1985)**

Short-term breakout force	
$F_{IB}/F_q = \frac{1}{2}$	$(0 \leq D/B \leq 0.25)$
$F_{IB}/F_q = 1 - 0.97e^{-2.75(\frac{D}{B})}$	$(0.25 < D/B)$
Long-term breakout force	
$F_{IB}/F_q = 1$	$(0 \leq D/B \leq 0.25)$
$F_{IB}/F_q = 2(1 - 0.97e^{-2.75(D/B)})$	$(0.25 < D/B)$

구조물이 해저면에 침강된 후 시간이 지남에 따라 구조물의 침강으로 인해 교란 및 파괴되었던 해저 저질이 기존의 강도를 회복하고, 물체 주변에 퇴적물이 쌓이는 등 해저면 이탈력이 증가하게 된다. 이를 고려해 David, T. & Diane J.B.(1985)의 연구에서는 기존 해저면 이탈력 추정식 대비 두배의 해저면 이탈력을 가지도록 제안하였다. 또한 해당 연구에서는 상대적으로 낮은 침강비 ( $0 < D/B \leq 0.25$ )를 가지는 물체의 해저면 이탈력의 상한 한계를 물체의 해저면 지지력의 절반에 해당하는 값으로 제안하였다.

Ham et al.(2015) 및 Lee(2020)는 다물체 동역학에 기반한 침몰선 인양 작업의 시뮬레이션 기법을 개발한 바 있다. 해당 연구에서는 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식에 기반하여 해저면 이탈과정을 모사하였으며, 주로 침몰선의 전반적인 인양 과정에 초점을 맞추어 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

### 1.2.3 해저면 지지력에 관한 연구

해저면 이탈력에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나는 해저면 지지력(Bearing Capacity)이다. 해저면 지지력( $F_q$ )이란 침강된 물체를 지지하는 힘으로, 물체의 수중 무게( $W_b$ )에서 침강된 체적에 작용하는 해저 저질에 의한 부력( $W_s$ )를 뺀 값과 같다.

$$F_q = W_b - W_s \quad (1.2)$$

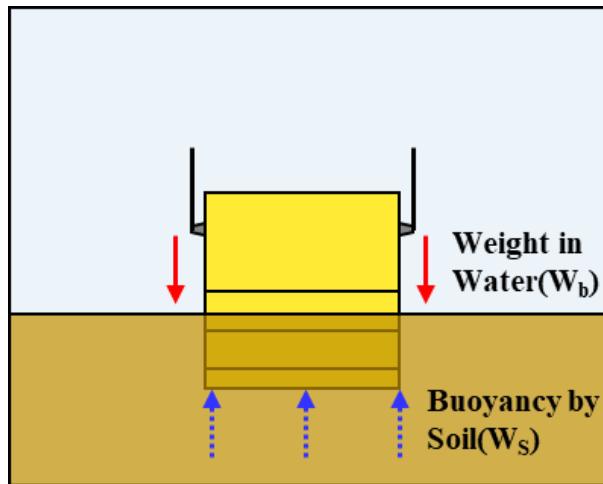


Figure 1.3 Schematic diagram of bearing capacity ( $F_q$ )

해저면 지지력에 관한 대표적인 연구로는 Finn & Byrne(1972), Terzaghi & Peck(1948)과 Skempton(1951)이 있다. Finn & Byrne(1972)는 해저면 이탈력이 해저 지지력, 물체에 작용하는 해저 저질에 의한 점착력, 물체와 해저 저질간의 마찰력과 물체 표면에 부착된 해저 저질의 질량에 의해 결정된다고 밝혔다. 이 중 해저면 이탈력을 구성하는 가장 지배적인 성분은 물체에 작용하는 해저 지지력과 해저 저질에 의한 점착력이라 제시하였다.

Terzaghi & Peck(1948)은 토양의 물리적 특성과 물체의 침강 깊이 등을 고려해 물체에 작용하는 해저면 지지력을 추정할 수 있는 Terzaghi Equation을 제시하였으며 이는 다음의 Equation 1.3과 같다. 해당 방정식은 흙의 점착력( $q_c$ ), 상재 하중( $q_q$ ), 단위 중량( $q_\gamma$ )에 관련된 세가지 항으로 이뤄져 있다.

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (1.3)$$

마지막으로 Skempton(1951)은 수직 파이프를 이용한 모형실험을 통해 물체의 형상에 따른 해저면 지지력의 형상계수를 제안하였다. 해당 연구를 통해 물체의 해저면 접촉 형상에 따라 동일한 상재 하중을 가질지라도 형상에 따라 서로 다른 해저면 지지력을 가질 수 있음이 확인되었다.

## 1.24 침강시간에 따른 해저면 이탈력에 관한 연구

토양은 교란 혹은 파괴된 이후 기존의 물성을 회복하기까지 일정 시간이 소요되는 틱소트로피(Thixotropy) 특성을 가진다. 이와 관련하여 Roderick & Luggad(1975)는 단순형상 물체를 사용하여 침강 시간에 따른 해저면 이탈력에 관한 모형실험을 수행하고, 시간에 따른 물체의 해저면 이탈력 변화에 대한 추정식을 식 1.5와 같이 제안하였다. 해당 추정식에서  $q_{net}$  의 경우 해저면 이탈력,  $q_d$  의 경우 해저면 지지력을 각각 의미한다.

$$R = q_{net}/q_d \quad (1.4)$$

$$R = R_0 - n \log(t/t_0) \quad (1.5)$$

Das(1991)는 Roderick & Luggad(1975)의 연구와 유사한 모형실험을 수행하고 침강 시간과 해저면 이탈력이 로그 함수의 관계를 가짐을 밝혔다. 또한, 연약 점토로 이루어진 토양에서는 점착력이 무시 가능할 정도로 낮다는 사실을 제안한 바 있다.

### 1.3 연구 목표 및 연구 내용

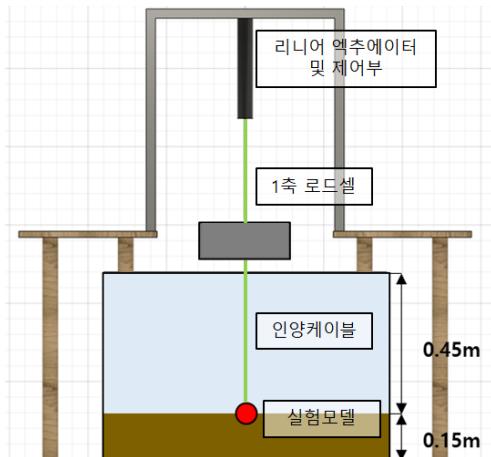
본 연구를 통해 현재 해저면 이탈력을 평가하기 위하여 가장 널리 활용되고 있는 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식을 다양한 단순형 구조물에 대한 모형실험을 통하여 새롭게 검토하였으며, 해당 추정식의 선박 형상에 대한 적용 가능성을 분석하고 새로운 해저면 이탈력 추정식을 제안하고자 하였다.

먼저 본 연구에서 수행한 모형실험 결과의 분석을 통해 실험 모델의 형상에 따른 해저면 이탈력의 영향을 파악하였다. 이후 선박 형상의 구조물을 이용한 모형실험을 수행하여 현재 널리 이용되고 있는 해저면 이탈력 추정식의 선박 형상에 대한 적용 가능성을 확인하였다. 또한, 실제 인양 작업을 고려하여 침몰된 구조물의 인양 속도, 침몰 자세 및 해저 저질에 의한 영향을 검토하기 위한 모형실험 및 분석을 수행하였다. 마지막으로 모형실험 결과를 바탕으로 기존 침강비만으로 제시된 해저면 이탈력 추정식에 추가적인 변수를 고려해 수정된 해저면 이탈력 추정식을 제안하였다.

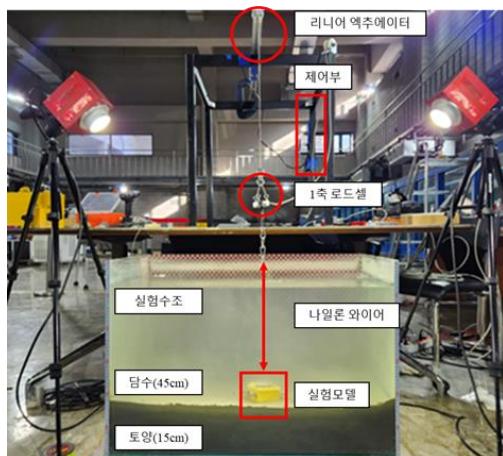
## 2. 연구방법

### 2.1 모형실험 장비

서울대학교 34동 대형 실험실에 해저면 이탈력 측정을 위한 모형실험 설비를 구축하였다. 모형실험 설비의 구성 장면은 **Figure 2.1**과 같으며, 해당 모형실험 설비에 이용된 장비의 목록은 **Table 2.1**에 정리하였다. 또한 본 연구에서는 실험 장면의 촬영을 위해 두 개의 외부 조명, 액션캠 및 스마트폰 카메라를 이용하였다.



(a) Drawing of experimental facility



(b) Experimental facility

**Figure 2.1 Configuration of experimental setup**

**Table 2.1 List of experimental equipment**

Equipment	Remark
Water tank	1200*900*600mm
Loadcell	Kistler-4576a
Linear Actuator	LM4075
Arduino	Arduino Uno
Motor driver	MDD-10A
Nylon wire	$\phi = 0.8mm$

단순형상 구조물을 이용한 Liu(1969)의 모형실험의 경우 일정한 무게를 가지는 무게추와 도르래를 결합한 단순한 형태의 인양 시스템을 구축하였다. 그러나 본 연구의 인양 장비는 실제 인양 작업에서 이용되는 원치의 작동방식을 고려해 실제와 유사한 인양 환경을 구축하였다.

실험 모델은 실험 조건에 따라 서로 다른 특정한 높이에서 자유낙하시키는 방식을 이용해 침강되었다. 침강된 모델의 인양 방법은 PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 이용해 리니어 엑추에이터를 제어하여 일정한 토크를 가지며 물체를 인양할 수 있도록 하였다. PWM 방식은 일정한 주기를 가지며 요구되는 출력에 따라 듀티 사이클(Duty cycle)을 적용하여 평균 전압을 제어하는 방식으로 넓은 분야에서 전압 및 전류의 제어를 위해 이용되는 방식이다.

## 2.2 실험 시료

실험 시료의 경우 서해안과 남해안의 해저 저질을 이용하였다. 토양의 물성의 경우 대한민국 연안의 토양의 물리적 특성에 대한 실험적 연구를 수행한 Yoo et al.(2010)의 연구 결과를 참고하였다. 또한 해저 저질의 채취 장소 선정을 위해 국내 연안 중 공학적으로 대비되는 특성을 가진 인천 및 부산지역을 선정하였다. 선행연구를 참고한 해저 저질의 특징 및 물성은 다음의 **Table 2. 2**와 같다.

**Table 2.2 Properties of seabed soil**

	Seabed Soil A	Seabed Soil B
Location	Incheon, Korea	Pusan, Korea
Gathered Depth	1.5~2	0.5~1
Specific Gravity	2.7	2.7
Water Content	80.70%	81.44%
Liquidity Index (LI)	2.63	1.80
Sat. Density	1500 kg/ m <sup>3</sup>	2090kg/ m <sup>3</sup>
Undrained Shear Strength	0.42kPa	1.14kPa
USDA Classification	Silty Clay	Sandy Clay

실험에 이용된 두 해저 저질은 입자의 크기에 따라 각각 실트 점토(Silty clay), 사질 점토(Sandy clay)로 구분될 수 있으며, 비배수 전단강도(Undrained shear strength) 등 토양의 물리적 특성을 나타내는 기타 지표에서도 구분되는 차이를 가진다. **Figure 2.2**은 간조 시 서해안 및 남해안의 채취 장소의 전경 및 채취 장면을 나타낸 사진이다.



(a) Site A for seabed soil A



(b) Site B for seabed soil B

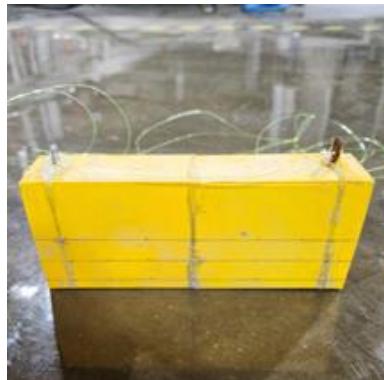
**Figure 2.2 Overview of site A and B for seabed soil gathering**

## 2.3 실험 모델

모형실험에 사용된 단순 형상 모델은 **Figure 2.3**과 같다. 모형실험에 이용된 모델 중 Cube 모델은 선행연구에서 이용한 0.25~0.75in의 크기를 참고하여 제작하였다. Prism, Sphere, Cube의 경우 Cube모델과 유사한 특성 길이를 가지되, 보유 중인 3D 프린터의 제작성 및 모형실험 수조의 크기를 고려해 치수를 선정하였다. 또한 Prism 모델 및 Cylinder 모델의 세장비는 일반적인 선박의 세장비인 3~7을 범위를 갖도록 선정하였다. 각 실험모델의 치수를 포함한 세부적인 제원은 아래의 **Table 2.3**에 정리하였다.



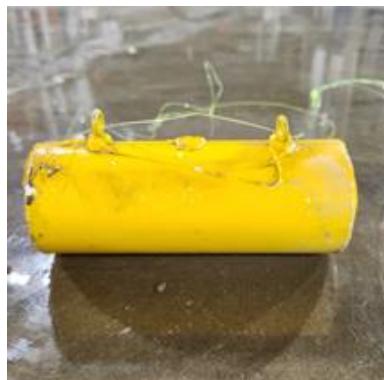
(a) Cube



(b) Prism



(c) Sphere



(d) Cylinder

**Figure 2.3 Experimental model (Simple shaped)**

**Table 2.3 Principle parameter of experimental model (Simple shaped)**

	Cube	Prism	Sphere	Cylinder
Length [m]	0.08	0.2	-	0.17
Breadth [m]	0.08	0.04	0.08	0.06
Height [m]	0.08	0.08	-	-
Aspect Ratio	1.0	5.0	-	2.83
Mass[kg]	0.61	0.82	0.5	0.577
Weight in Water[N]	0.879	1.413	0.381	0.738
Material	Acryl	PLA	Acryl	PVC

또한 선박의 해저면 이탈력에 중점을 둔 모형실험을 수행하기 위해 실험용 선박 모델을 선정하였다. 국내 연안에서 찾은 침몰 사례를 보이는 레저보트, 예인선, 병커링 선박을 고려하였다. 해당 선종 중 레저보트 및 예인선의 축소 모형의 경우 기성품을 이용하였으며, 추가적으로 병커링 선박을 고려하기 위해 유사한 선형 및 특징을 가지는 연구용 유조선인 KVLCC2의 모형을 3D프린팅 하여 이용하였다. 각 선박 형상의 모델은 아래의 **Figure 2.4**와 같고, 각 모델의 세부적인 치수를 포함한 주요 제원은 **Table 2.4**와 같다.



(a) Ship A(Leisure boat)



(b) Ship B(Tug boat)



(c) Ship C(Tanker)

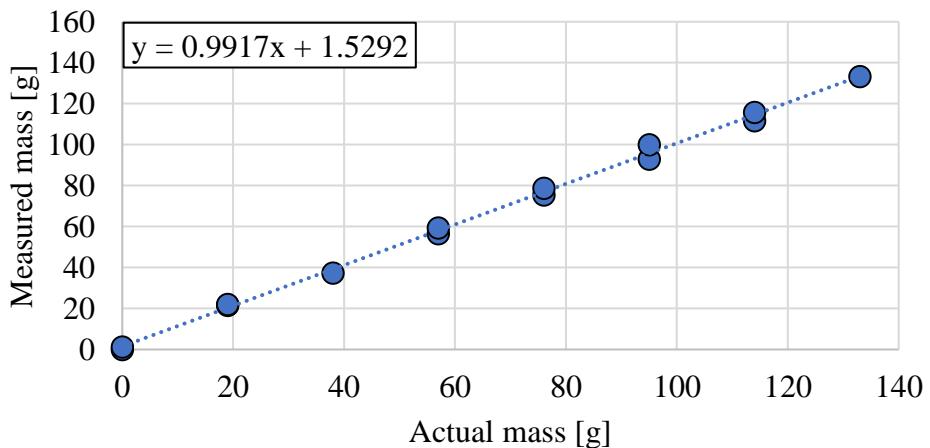
**Figure 2.4 Experimental model (Ship shaped)**

**Table 2.4 Principle parameter of experimental model (Ship shaped)**

	Ship A	Ship B	Ship C
Type	Leisure boat	Tug boat	Tanker
Length [m]	0.40	0.18	0.28
Breadth [m]	0.12	0.05	0.05
Height [m]	0.06	0.035	0.08
Aspect Ratio	3.33	3.6	5.6
Mass[kg]	1.47	0.388	0.369
Weight in Water[N]	6.828	2.11	1200
Block Coeff. ( $C_B$ )	0.47	0.71	0.81
Scale Ratio ( $\lambda$ )	-	1/121	1/1143
Material	PC	Wood	PLA

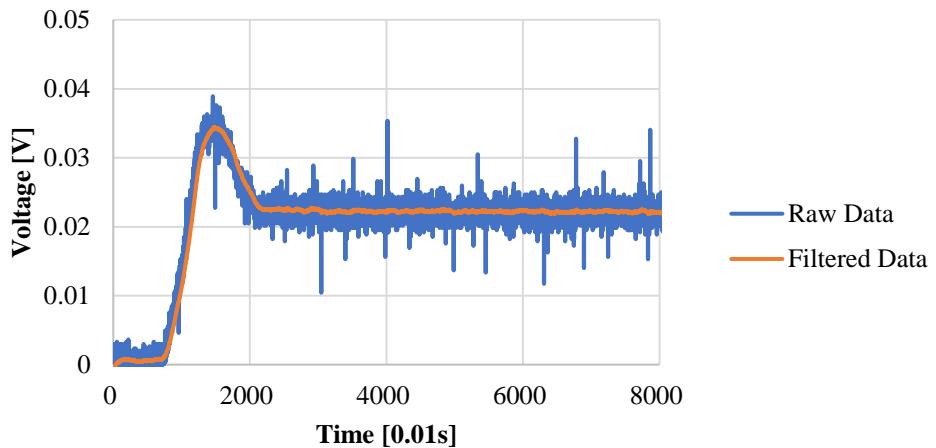
## 2.4 신호 처리 및 센서 캘리브레이션

모형실험에 앞서 실험에 이용된 로드셀의 캘리브레이션을 수행하였다. 캘리브레이션 과정에서는 19g의 무게추가 이용되었으며, 실제 실험에서 계측되는 질량(하중) 대비 낮은 무게를 이용해 로드셀의 정밀도를 파악하고자 하였다. 계측 결과 실제 질량 대비 1% 미만의 오차율을 가지는 것을 **Figure 2.5**의 결과를 통해 확인하였다.



**Figure 2.5 Calibration of loadcell**

모형실험에 이용된 로드셀(Kistler-4576a)의 계측 신호의 노이즈 제거를 위해 본 실험에서는 1차 저역 통과 필터를 이용하였으며, 아래의 **Figure 2.6**은 계측된 신호의 시계열 및 필터링된 신호의 시계열과 같다.



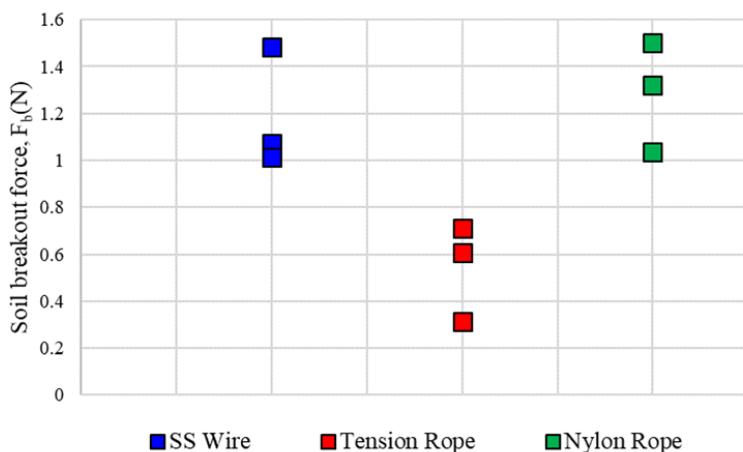
**Figure 2.6 Example of filtered data**

해당 방법을 이용해 모형실험 시 계측신호의 처리를 수행하였다. 모형실험 시 로드셀을 이용한 신호 계측 시간은 물체에 부착된 해저 저질이 충분히 떨어진 이후 수중 무게를 계측할 수 있도록 물체가 완전히 해저면을 이탈할 수 있는 시간을 확보하였다.

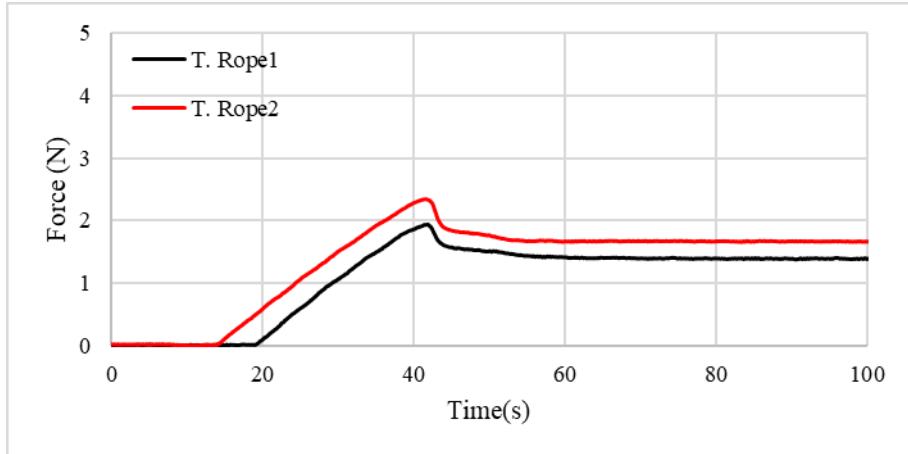
## 2.5 인양 케이블의 선정

본 연구의 모형실험에서 이용할 인양 케이블의 선정을 위해 일련의 모형실험을 수행하였으며, 인양 케이블에 따른 해저면 이탈력과 각 모형실험의 시계열 데이터는 각각 **Figure 2.7** 및 **2.8**과 같다. 고려된 인양 케이블의 소재는 첫째, 탄성이 있는 우레탄 로프, 둘째, 스테인리스 스틸 와이어( $\phi = 1.2mm$ ), 마지막으로 나일론 로프( $\phi = 0.8mm$ )이다.

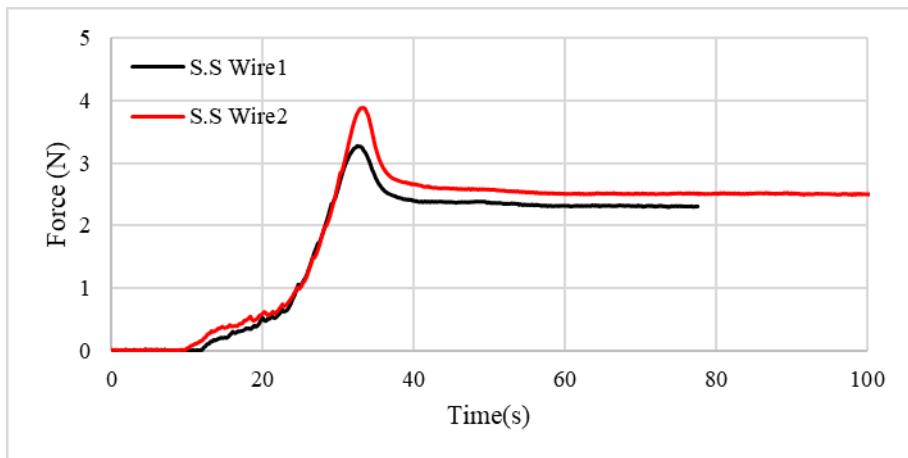
모형실험 결과 축강성이 높은 스테인리스 스틸 와이어와 나일론 로프의 경우 시계열 데이터 상 유사한 거동을 보이며, 유사한 수준의 해저면 이탈력을 가지는 현상이 확인되었다. 그러나 스테인레스 와이어는 실험이 반복됨에 따라 **Figure 2.9 (a)**와 같이 와이어가 변형되어 불필요한 거동이 발생하는 현상이 관측되었다. 또한 우레탄 로프는 상대적으로 낮은 해저면 이탈력이 계측되며, 다른 인양 케이블과 상이한 형태의 시계열 특성이 확인되었으며, 모형실험 중 낮은 축강성으로 인해 **Figure 2.9 (b)**와 같이 불필요한 운동이 발생하는 현상이 관측되었다. 이로 인해 우레탄 로프는 본 모형실험의 인양 케이블 선정 시 배제하였다. 이에 나일론 와이어가 본 연구에 가장 적합한 소재라 판단되어 이후 모형실험 연구는 나일론 와이어를 인양 케이블로 활용하였다.



**Figure 2.7 Effect of lifting line**



(a) Urethane tension rope



(b) Stainless steel wire( $\phi = 1.2\text{mm}$ )

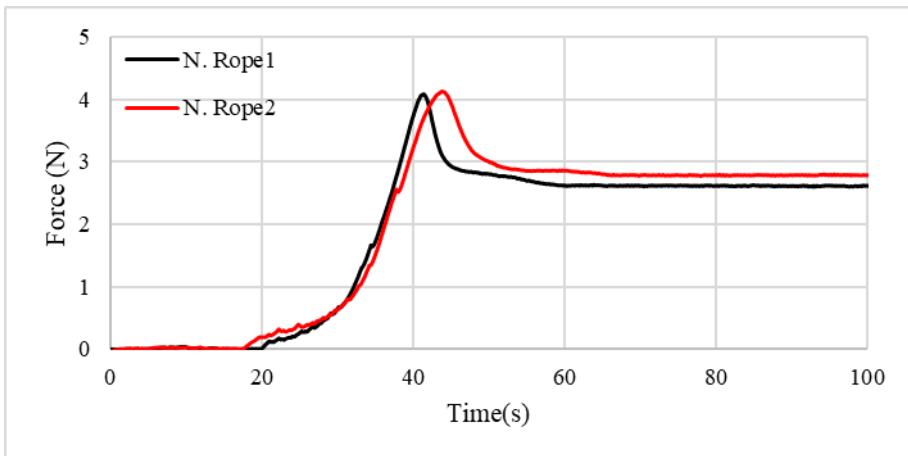
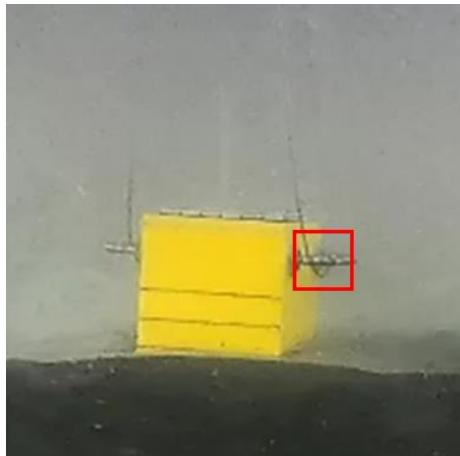
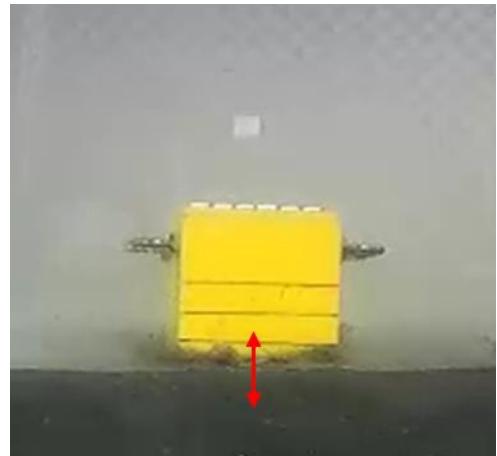


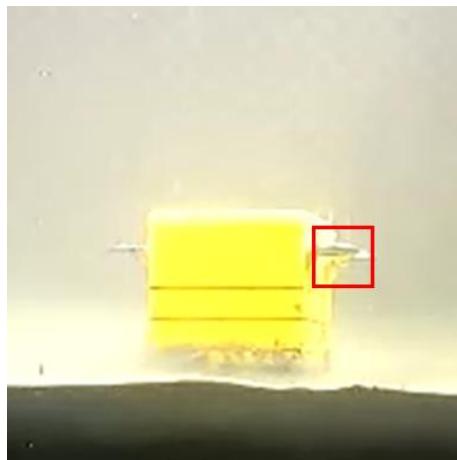
Figure 2.8 Effect of lifting line (Time series)



(a) Stainless wire



(b) Urethane tension rope



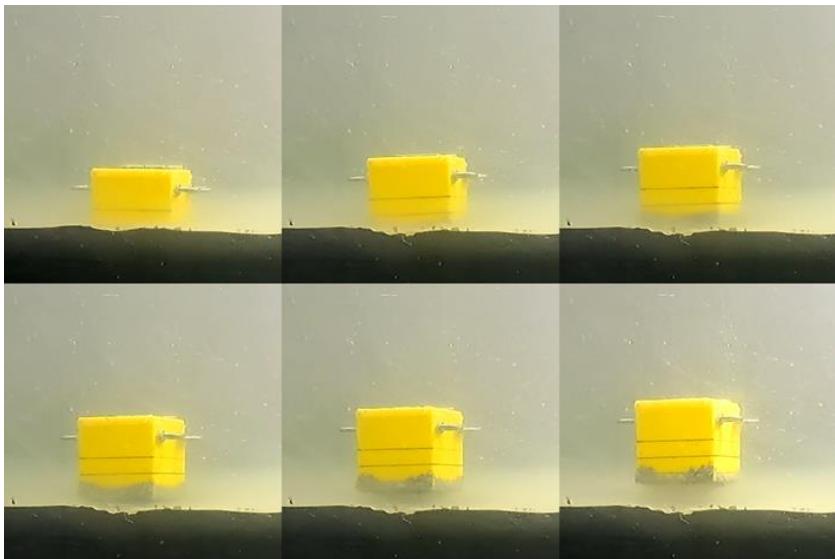
(c) Nylon rope

Figure 2.9 Comparison of lifting line

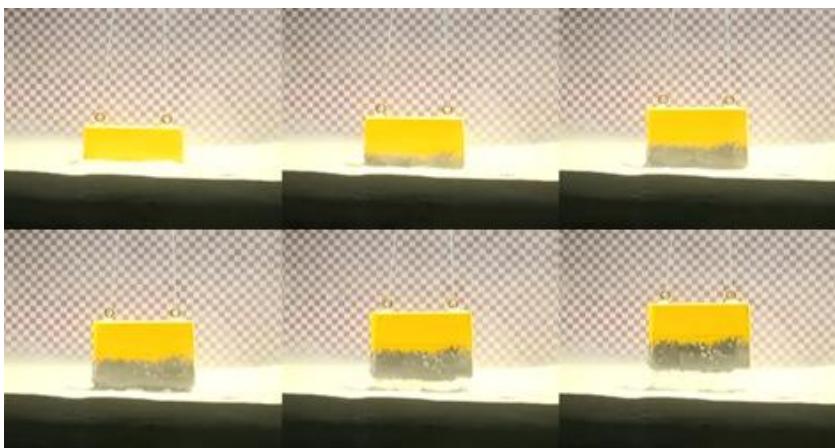
### 3. 모형실험

#### 3.1 단순형상 구조물

단순형상 구조물의 인양 시 작용하는 해저면 이탈력을 확인하기 위한 모형실험을 수행하였으며, **Figure 3.1**은 단순형상 구조물의 인양 과정에 관한 스냅샷을 순차적으로 보여주고 있다. 해당 스냅샷들의 모형실험은 해저 저질 A를 이용하여 침강비가 약 0.3인 조건에 대해 수행되었다.

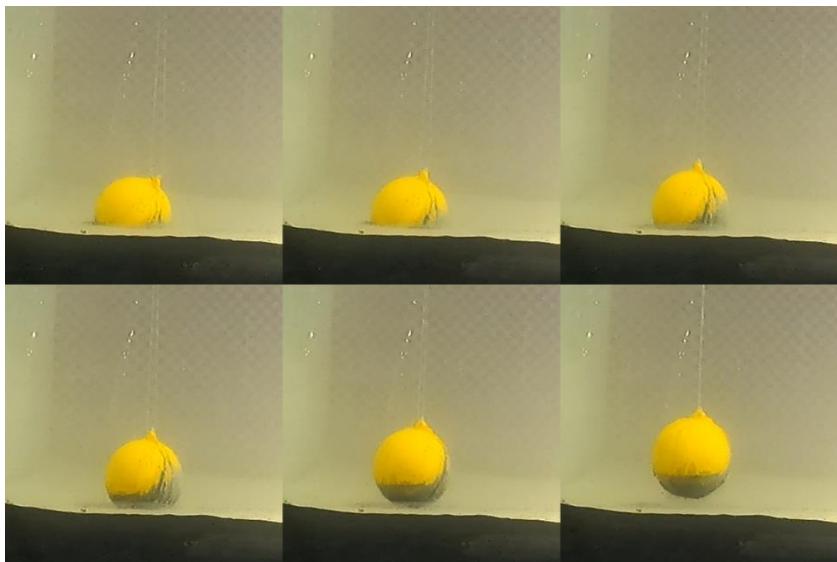


(a) Cube,  $D/B \approx 0.3$  with Seabed soil A

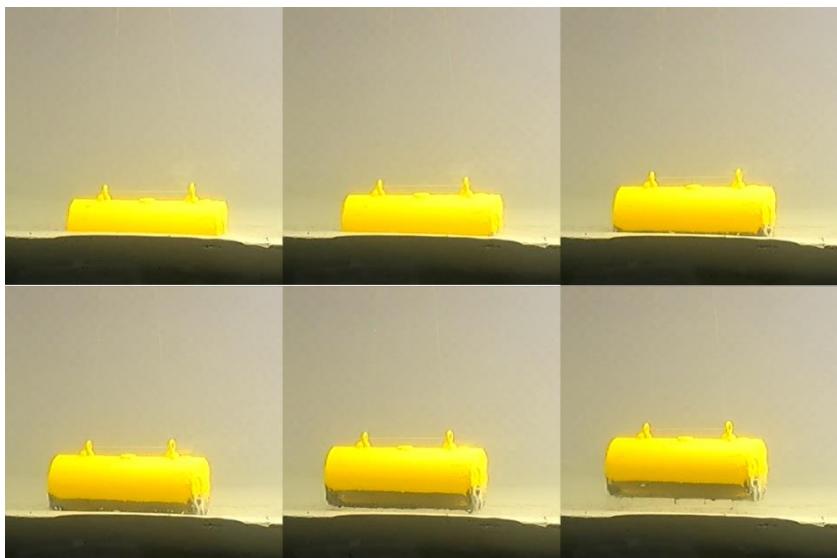


(b) Prism,  $D/B \approx 0.3$  with Seabed soil B

Continued



(c) Sphere,  $D/B \approx 0.3$  with Seabed soil C

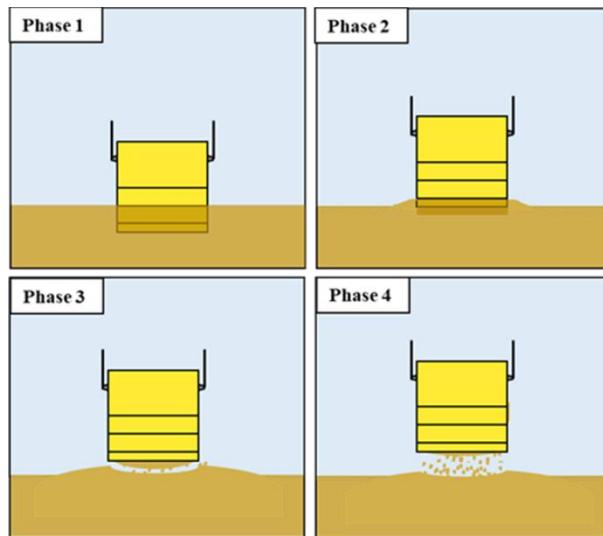


(d) Cylinder,  $D/B \approx 0.3$  with Seabed soil D

Figure 3.1 Experimental scene of simple shaped model

해저면에 침몰된 단순형상 물체의 일반적인 해저면 이탈과정은 다음과 같이 네 가지 단계로 구분할 수 있으며, 이에 대한 개념도는 Figure 3.2과 같다.

1. 물체가 해저면에 침강되고 안착된 상태
2. 물체가 인양되며 해저 저질이 변형되는 단계
3. 물체가 해저 저질로부터 이탈하며, 해저 저질이 파괴되는 단계
4. 물체가 수중에서 인양되며, 부착된 해저 저질이 떨어지는 단계

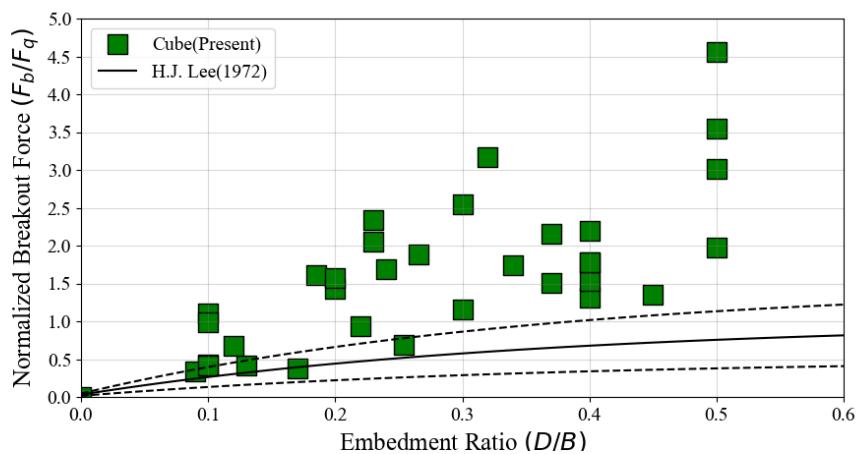


**Figure 3.2 Schematic view of soil breakout process of cube**

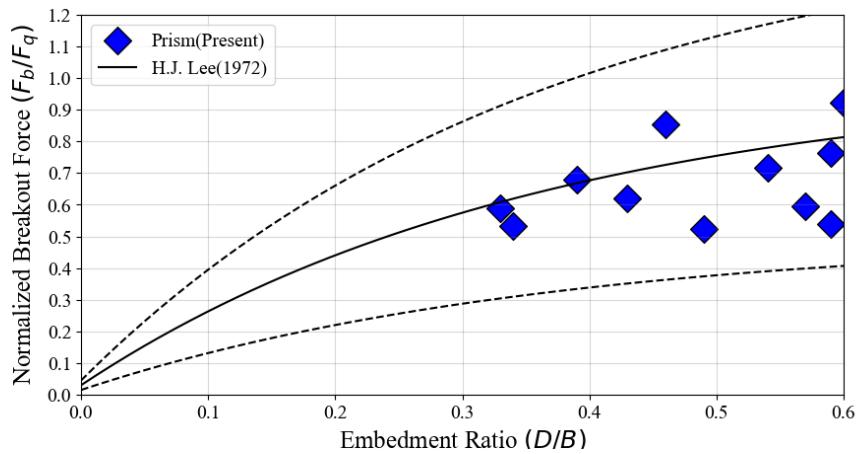
모형실험 결과로 얻어진 해저면 이탈력을 무차원화 한 후 침강비에 따라 **Figure 3.3**과 같이 산점도로 도시하였다. 해당 산점도의 x축은 침강비( $D/B$ ), y축은 무차원 해저면 이탈력( $F_b/F_q$ )을 나타낸다. 또한 해당 그래프에서 실선은 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식을 나타내며, 두개의 점선은 해당 추정식의 오차범위를 나타낸다.

모형실험 결과 Cube모델은 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식 대비 상대적으로 과도한 해저면 이탈력이 계측되지만, 이를 제외한 다른 단순형상 실험 모델들의 경우 대부분 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식의 제안범위에 포함되는 것을 확인하였다.

모형실험 결과 침강비가 증가함에 따라 무차원 해저면 이탈력이 증가하는 공통적인 경향을 보인다. 또한 Cube 모델을 제외한 각 모델은 형상에 따라 실험이 수행되는 침강비의 범위가 존재하였으며, 이는 Terzaghi Equation에 따라 물체에 작용하는 해저면 지지력(Bearing Capacity)의 차이에 기인한 현상으로 사료된다.

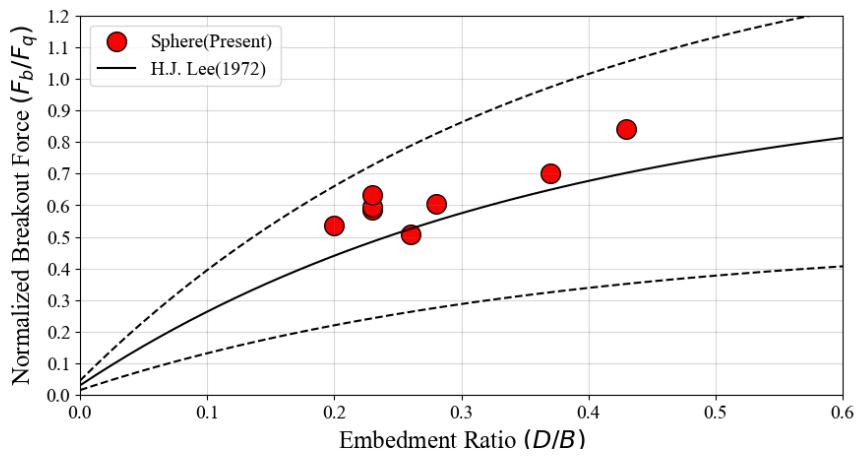


(a) Cube

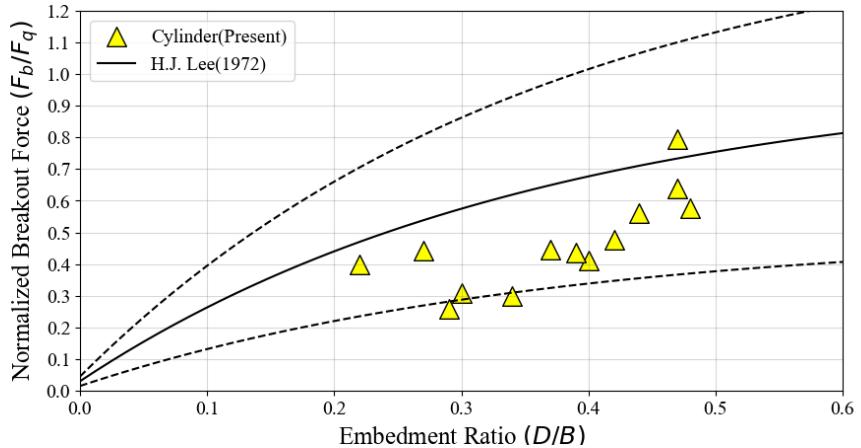


(b) Prism

Continued



(c) Sphere



(d) Cylinder

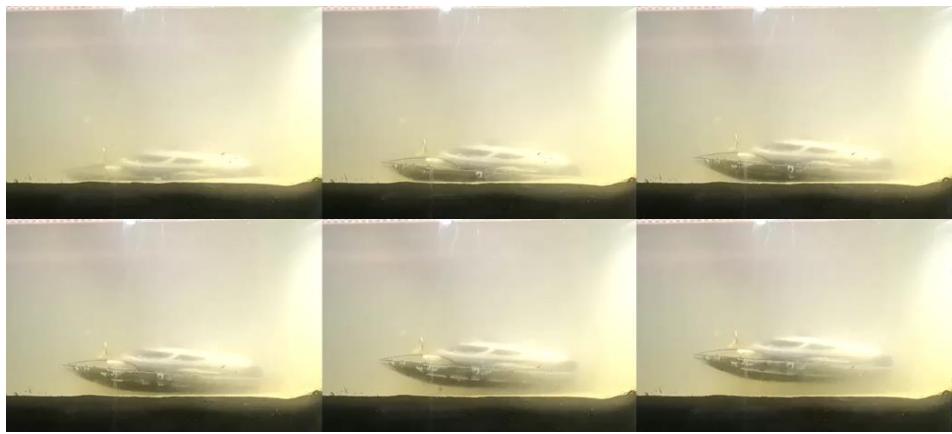
**Figure 3.3 Experimental results of simple shaped model**

모형실험 결과 Cube 형상을 가지는 실험 모델의 경우 약 0.3에서 최대 약 4.5의 해저면 이탈력을 가지는 것이 확인된다. 또한 Cube 모델은 Lee의 해저면 이탈력 추정식의 제안범위에 비해 과도한 해저면 이탈력이 확인된다. 그러나 이를 제외한 다른 단순 형상 구조물은 실험이 수행된 조건에서 공통적으로 1 미만의 상한 한계를 가진다. 또한 Lee의 해저면 이탈력 추정식의 제안범위와 잘 일치하지만, 형상에 따라서 서로 다른 해저면 이탈력 범위를 가지는 현상이 확인된다. 이를 통해 물체의 형상이 해저면 이탈력에 영향을 준다는 것으로 사료된다.

## 3.2 선박형상 구조물

본 연구에서는 선박 형상의 구조물을 이용한 모형실험을 수행하고, 모형실험 결과를 이용해 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식의 선박에 대한 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 모형실험을 위해 잣은 침몰 사례를 보이는 선종 중 일부를 고려해 레저보트, 예인선 및 탱커선 형태의 구조물을 선정하였다.

**Figure 3.4**는 선박 형상 구조물의 인양 과정에 관한 스냅샷을 순차적으로 보여주고 있다. 모형실험 결과 공통적으로 **Figure 3.1**에서 제시된 것과 유사한 해저면 이탈 과정이 확인되었다. 또한 **Figure 3.5**의 모형실험 결과 선박의 형상에 따라 서로 다른 침강비의 범위를 가지며, 침강비가 증가함에 따라 해저면 이탈력이 증가하는 경향성이 단순형상 구조물과 동일하게 확인되었다. Ship A와 Ship B는 기존 해저면 이탈력 추정식 제안범위보다 상대적으로 낮은 해저면 이탈력이, Ship C의 경우 보다 높은 해저면 이탈력이 작용하는 현상이 확인되었다.



(a) Leisure boat

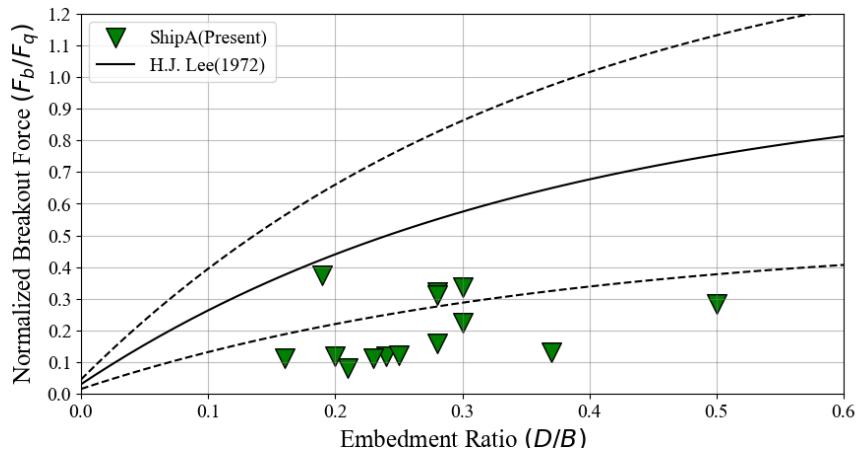


(b) Tug boat

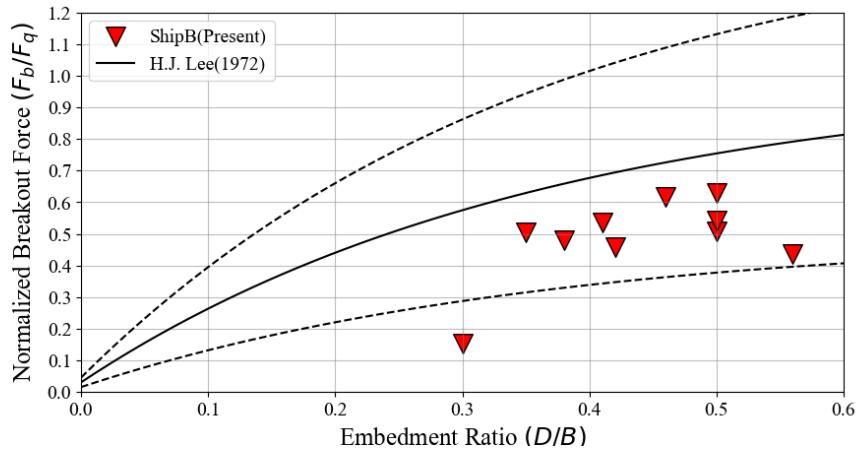


(c) Tanker

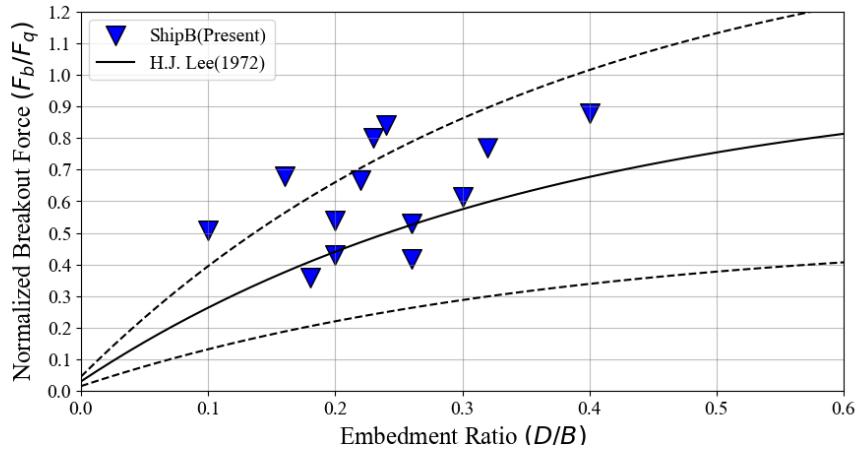
Figure 3.4 Experimental scene of ship shaped model



**(a) Leisure boat**



**(b) Tug boat**

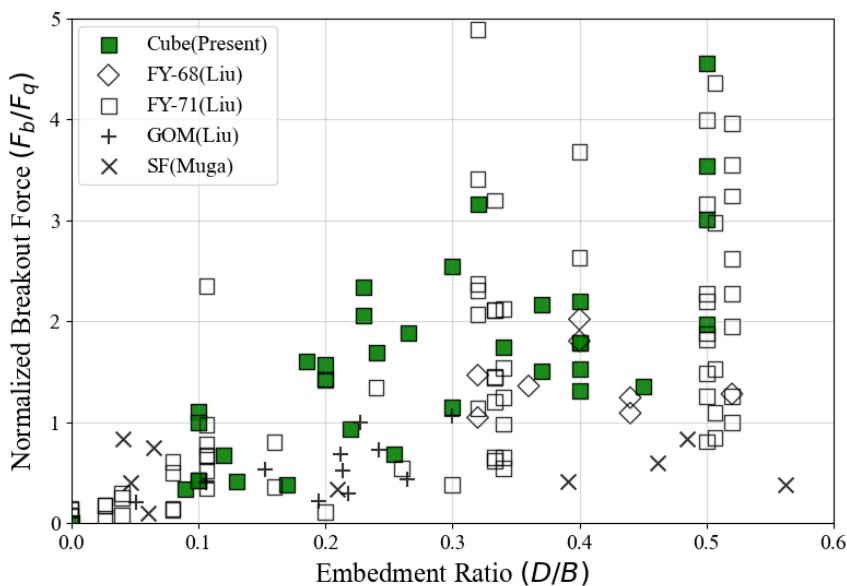


**(c) Tanker**

**Figure 3.5 Experimental results and shape coefficient of ship model**

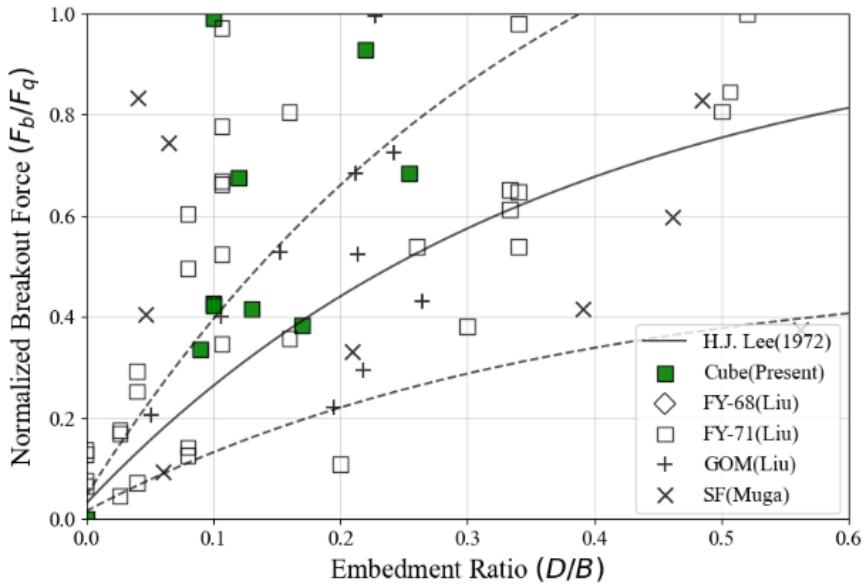
### 3.3 모형실험의 분산성

본 연구에서 수행하였던 단순형상 및 선박형상의 모형실험 결과는 공통적으로 높은 분산성을 가지는 경향성이 확인된다. 특히 Cube 형상 실험 모델을 이용한 결과는 다른 실험 모델들에 비해 높은 분산성을 가지며, Liu(1969)의 모형실험 결과와 유사한 해저면 이탈력 분포 특성 및 분산성이 확인된다. **Figure 3.6**은 현재 Cube 모델의 모형실험 결과와 Liu(1969)의 Cube 모델 모형실험 결과를 실해역 실증 결과와 함께 도시한 산점도이다. 해당 산점도에 제시된 모형실험 결과들 중 현재 모형실험의 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )는 0.553이며, Liu(1969)의 모형실험 결과는 0.5745의 결정계수를 가진다. 이를 통해 본 연구의 모형실험과 선행연구의 모형실험은 유사한 해저면 이탈력 분포특성 및 분산성을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 이용된 모형실험 설비와 모형실험 방법이 적합하다 판단하였다.



(a) Comparison of experimental results

Continued

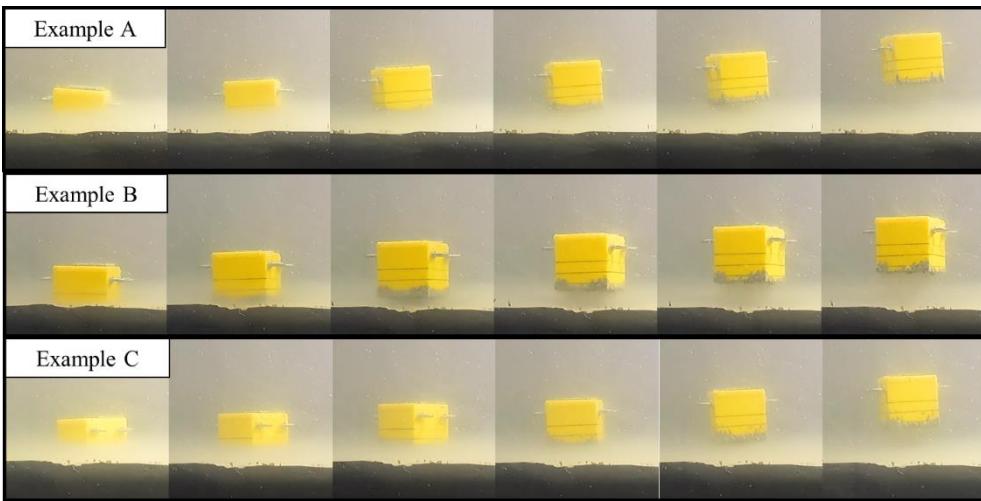


**(b) Comparison of experimental results with Lee's Equation**

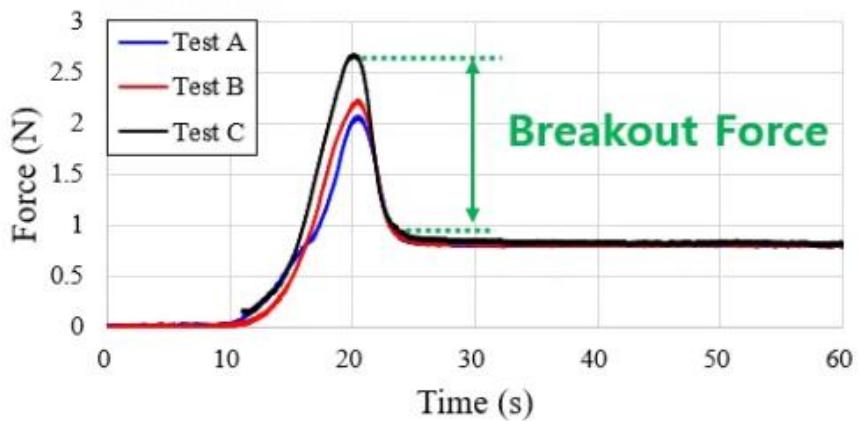
**Figure 3.6 Comparison of experimental results with Muga(1968), Liu(1969) and Lee(1972)**

모형실험 결과의 분산성은 해저 저질의 국부적인 조성 및 강도, 물체의 조도(Roughness), 물체의 끝단 효과(End effect), 톱 볼텍스(Tip vortex) 등을 포함한 3차원 효과 등이 있다고 사료된다. 이 중 본 연구에서는 모형실험의 분산성이 수조내 국부적인 물리적 특성의 차이로 인한 물체 표면에 부착되는 해저 저질의 양에 기인한다 추정된다.

**Figure 3.7**은 유사한 침강비를 가지지만 해저 저질의 부착효과의 차이를 가지는 실험 케이스의 순차적인 해저면 이탈 과정을 나타낸 장면과 같다. 또한 **Figure 3.8**은 각 실험 케이스 시계열 데이터를 나타낸다.



**Figure 3.7 Experimental scene of Cube8,  $D/B \approx 0.3$  with Seabed soil A**



**Figure 3.8 Time series of Cube8,  $D/B \approx 0.3$**

**Table 3.1 Soil breakout force of Cube8,  $D/B \approx 0.3$**

	Test A	Test B	Test C
Breakout Force, $F_b$ [N]	1.265	1.414	1.857

실험 장면 및 시계열 분석을 통해, 해저 저질이 가장 많이 부착된 Test C의 경우 Test A와 B에 비해 각각 0.6N, 0.4N 높은 해저면 이탈력이 계측됨을 확인할 수 있었다. 이에 따라 본 모형실험에서는 해저 저질의 부착효과가 해저면 이탈력의 분산성에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 또한 축소모델을 이용하는 본 연구의 특성 상 다른 해저면 이탈력 성분에 비해 해저 저질의 부착에 의한 성분이 과대평가될 수 있다고 판단된다.

**Figure 3.6**의 Muga(1968) 및 Liu(1969)의 실해역 실증 결과를 함께 비교할 때, 실해역 실증 결과는 모형실험에 비해 상대적으로 낮은 분산성을 가지며 상대적으로 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식의 제안범위와 어느정도 유사한 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 해저 저질의 부착효과가 부각되지 않는, 상대적으로 크고 무거운 실험 모델을 이용해 실험을 수행할 경우 본 모형실험의 한계를 극복할 수 있으리라 사료된다.

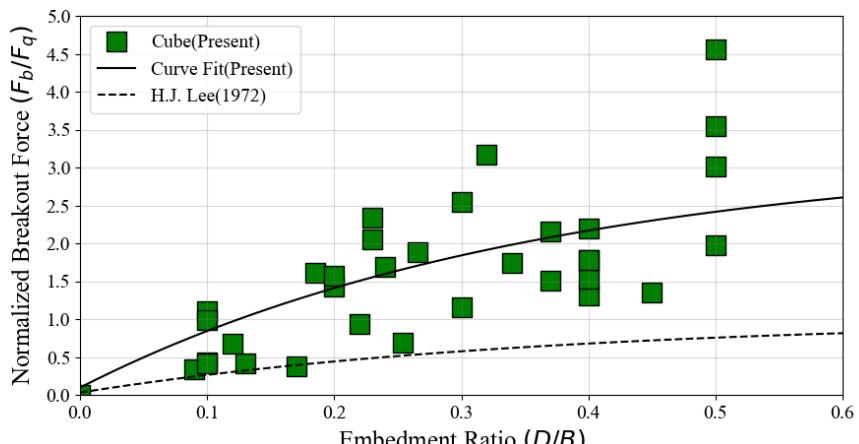
## 4. 결과분석 및 논의

### 4.1 물체의 형상의 영향

물체의 형상에 따른 영향을 고려하기 위해 본 연구에서는 기존 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식에 형상계수를 추가적으로 도입하고자 하였다. 수정된 해저면 이탈력 추정식은 식 4.1의 형태와 같이 기존 해저면 이탈력 추정식에 형상계수( $C_s$ )를 곱한 형태를 가진다.

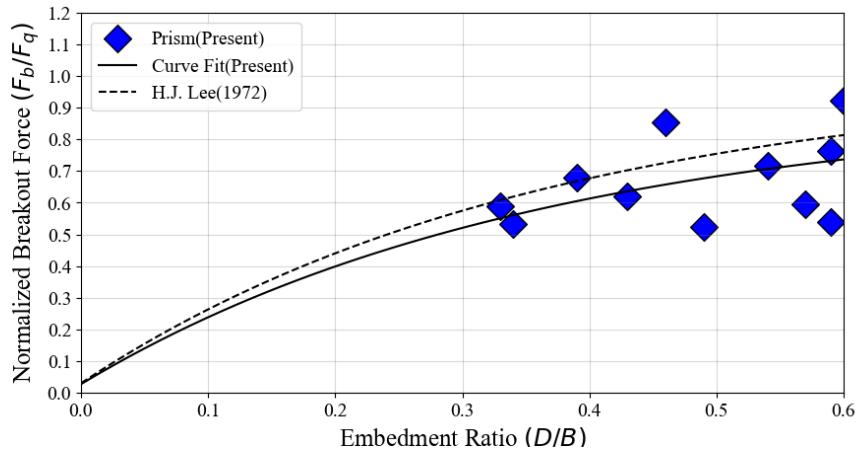
$$F_b/F_q = C_s (1 - 0.97 e^{-2.75(D/B)}) \quad (4.1)$$

단순형상 구조물들의 모형실험 결과에 형상계수를 도입하여 도시한 결과는 Figure 4.1의 검은 실선과 같다. 해당 그래프에서 점선의 경우 Lee(1972)의 기존 해저면 이탈력 추정식을 나타내며, Figure 4.1의(a)에서 (d)까지의 각 심볼들은 모형실험 데이터를 나타낸다. 형상계수를 적용한 결과 기존 해저면 이탈력 추정식 대비 모형실험 결과를 더욱 잘 대표하는 결과를 확인할 수 있었다.

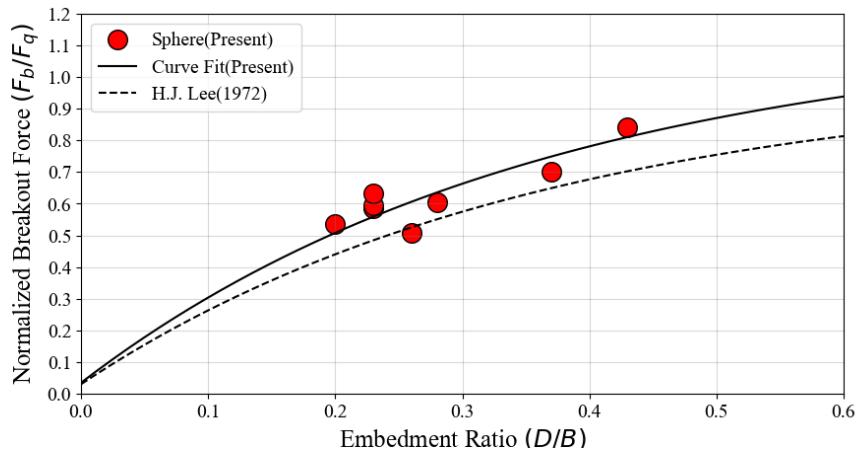


(a) Cube

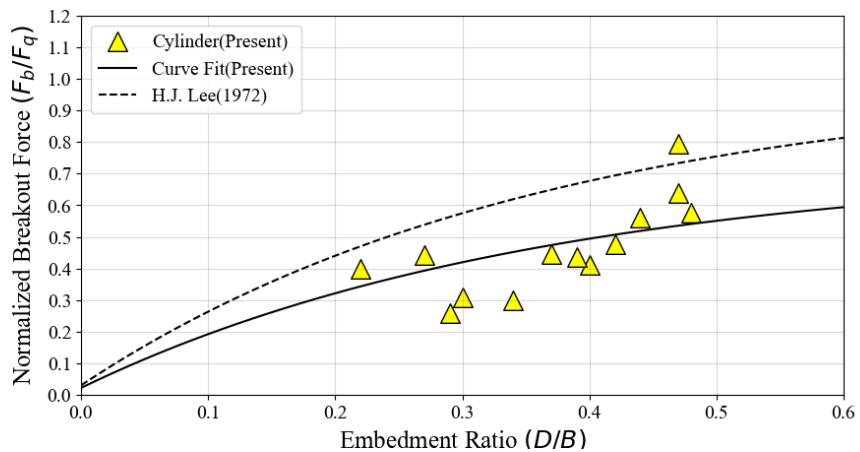
Continued



(b) Prism



(c) Sphere



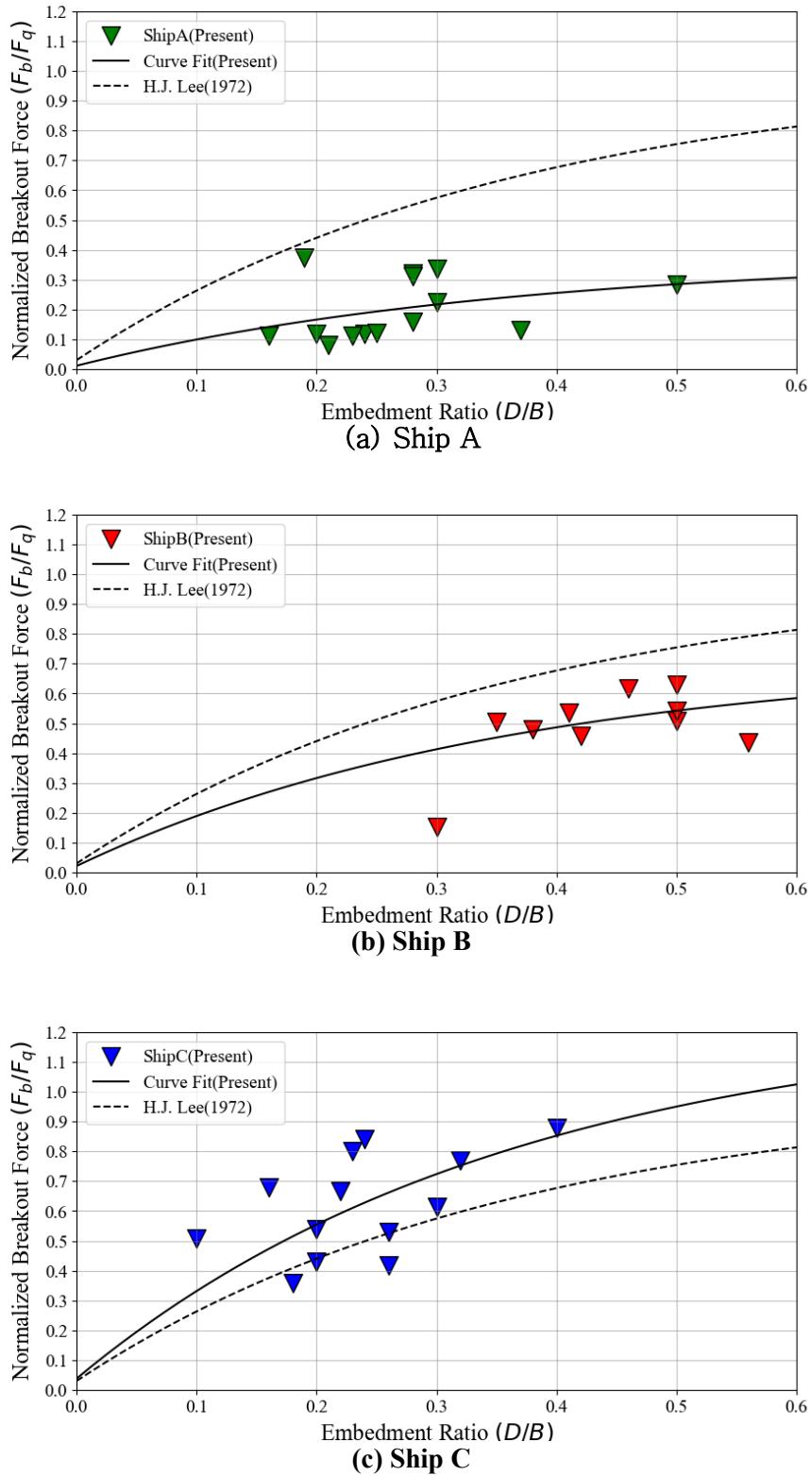
(d) Cylinder

Figure 4.1 Application of shape coefficient( $C_s$ )

**Table 4.1**은 실험 모델에 대한 형상계수의 도출결과를 나타낸 표이다. 해당 표에서 길이와 폭이 동일한 Cube와 Sphere 모델은 폭 대비 길이가 긴 Prism과 Cylinder 모델에 비해 상대적으로 높은 형상계수를 가지는 것이 확인된다. 또한 각진 형상의 구조물인 Cube는 Sphere보다, Prism은 Cylinder보다 상대적으로 높은 형상계수를 가짐이 확인된다. 또한 이를 통해 실험을 수행한 구조물의 형상에 따른 형상계수의 특성을 확인할 수 있었다. Prism 및 Cylinder 구조물에 형상계수를 적용한 결과, 기존의 해저면 이탈력 추정식에 비해 상대적으로 낮은 해저면 이탈력이 평가됨을 확인할 수 있었다.

**Table 4.1 Shape coefficient of simple shaped model**

	<b>Cube</b>	<b>Prism</b>	<b>Sphere</b>	<b>Cylinder</b>
<b>Shape Coeff. <math>C_s</math></b>	3.2	0.91	1.15	0.73



**Figure 4.2 Effect of shape coefficient on ship model**

또한 선박의 형상에 의한 영향을 알아보고자 **Figure 4.2**와 같이 형상계수를 적용한 수정된 해저면 이탈력 추정식과 기존 해저면 이탈력 추정식을 함께 도시하였다. 선박형상 구조물 또한 단순형상 구조물과 유사하게 형상에 따른 해저면 이탈력 분포특성에 차이를 가짐이 확인된다.

선박의 형상에 의한 영향을 면밀히 검토하기 위해, 선박의 형상계수와 방형계수( $C_B$ )를 비교한 모습은 **Table 4.2**에 요약 제시하였다. 해당 표에는 유사한 형상을 가지는 단순형상 구조물인 Cylinder와 Prism 모델의 결과를 함께 비교하였다. **Table 4.2**에 의하면 모든 실험 모델에서 방형계수가 증가할수록 형상계수가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Ship C 모델의 경우 돌출된 선수부의 구상선수로 인해 형상계수가 방형계수의 증가 대비 더욱 급격한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 방형계수가 높은 구조물일수록 높은 해저면 이탈력을 가진다고 사료된다.

**Table 4.2 Shape coefficient and Block coefficient of test model**

	<b>Shape Coeff. (<math>C_S</math>)</b>	<b>Block Coeff. (<math>C_B</math>)</b>	$C_S/C_B$
Ship A	0.38	0.47	0.81
Ship B	0.72	0.71	1.01
Ship C	1.26	0.81	1.62
Cylinder	0.73	0.79	0.92
Prism	0.91	1.0	0.91

## 4.2 침몰 자세의 영향

선박의 모형실험 중 선박의 침몰 자세에 따른 해저면 이탈력의 변화가 확인되었다. 특히 Ship A의 경우 **Figure 4.3(b)**처럼 선박이 침몰하며 종경사(Trim)가 종종 발생하였으며, Ship B의 경우 **Figure 4.3(d)**처럼 횡경사(Heel)가 빈번하게 관찰되었다. 이에 본 연구에서는 선박의 침몰 자세에 따른 해저면 이탈력의 영향을 확인하기 위한 일련의 추가 모형 실험을 수행하였다.



(a) Ship A, Neutral



(b) Ship A, Trimmed

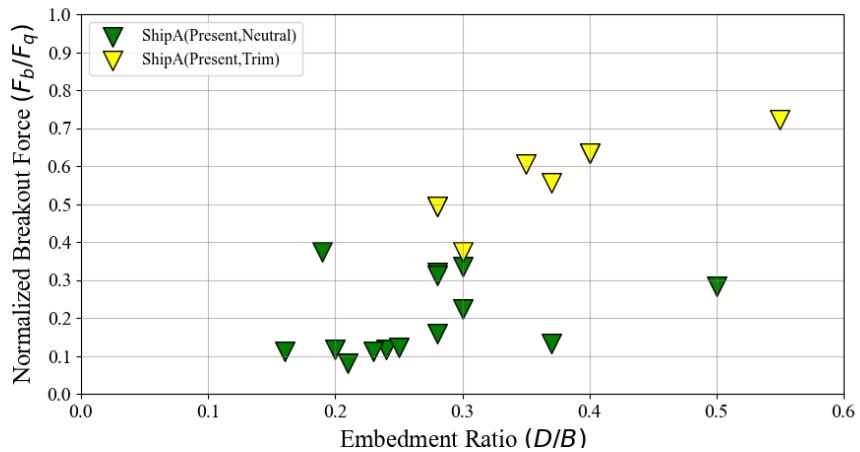


(c) Ship B, Neutral

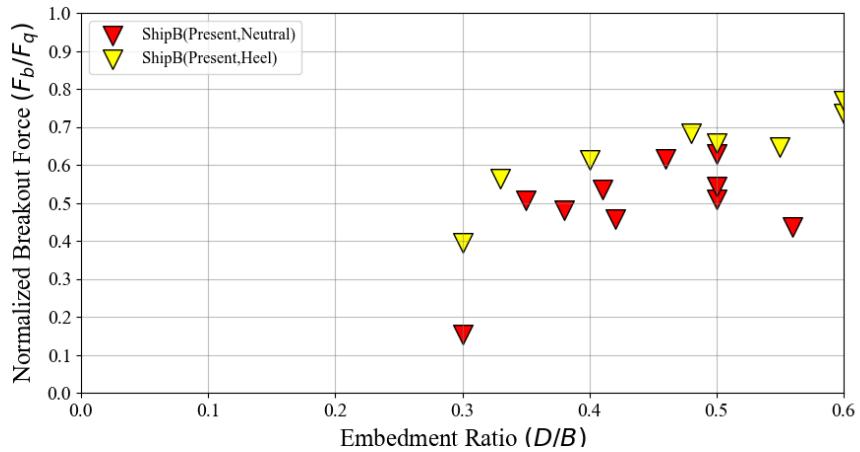


(d) Ship B, Heeled

**Figure 4.3 Examples for sunken posture of ship model**



(a) Effect of sinking posture of Ship A(Trim)



(b) Effect of sinking posture of Ship B(Heel)

Figure 4.4 Effect of sinking posture of ship model

**Figure 4.4**는 선박의 침몰자세를 평형상태와 경사 상태로 구분하여 해저면 이탈력을 비교하며 도시한 모습과 같다. **Figure 4.4**에서 Ship A와 Ship B 모두 침몰 자세에 따른 해저면 이탈력의 변화가 확인되었다. 모형실험 결과 선박의 침몰 시 종경사가 발생한 경우 평형상태에 비해 최대 2배 이상의 해저면 이탈력 차이를 가지는 데에 반해, 횡경사가 발생한 경우 유사하거나, 상대적으로 높은 해저면 이탈력을 가지는 현상이 확인되었다.

**Figure 4.5**은 종경사가 발생한 선박형상 모델(Ship A)의 인양 과정의 스냅샷을 순차적으로 보여주고 있다. 해당 그림에서 선박이 침몰한 상태에서 갑판의 일부가 침강된 모습이 확인된다. 해당 실험 케이스에서는 침강된 갑판이 앵커와 유사한 역할을 하게 되어 더 많은 해저 저질을 파괴하며 인양 작업이 이뤄지며, 침강된 구조물(갑판)과 파괴된 해저 저질이 함께 인양되며 보다 높은 해저면 이탈력을 발생시켰다.



**Figure 4.5 Bottom breakout scene of sunken ship in trimmed posture**

### 4.3 해저 저질의 영향

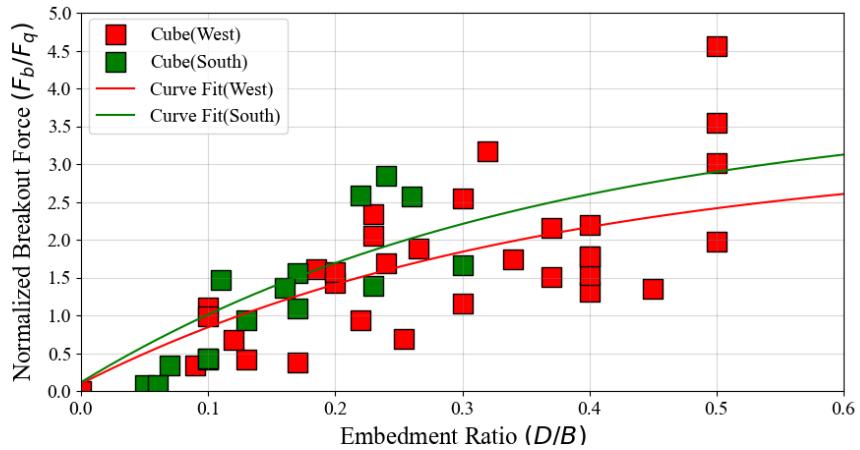
본 연구에서 해저면 이탈력 추정식의 다양한 해역에서 범용성 있는 적용을 위해 공학적 특성이 구분되는 두개의 해저 저질을 이용해 일련의 모형실험을 수행하였다. 모형실험에 이용된 해저 저질 A와 B는 각각 대한민국의 서해안 및 남해안에서 채취되었으며, 해저 저질의 물리적 특성은 **Table 2.2**에 요약 및 정리하였다.

모형실험 결과를 해저 저질에 따라 구분하여 도시한 모습은 **Figure 4.7**과 같다. **Figure 4.7**에서 붉은색으로 표기된 심볼과 실선은 각각 서해안에서 채취한 해저 저질 A를 이용한 모형실험 결과 및 회귀 결과를 나타낸다. 또한 초록색으로 표기된 심볼과 실선의 경우 남해안에서 채취한 해저 저질 B를 이용한 모형실험 결과 및 회귀 결과와 같다.

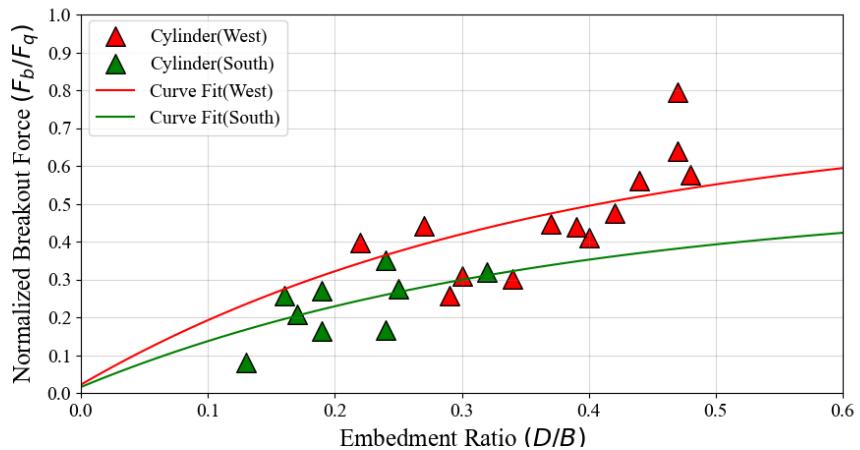
각각의 해저 저질을 이용한 모형실험 결과의 분산성과 신뢰도를 확인하기 위해 **Table 4.2**와 같이 결정계수(Coefficient of determination)를 비교하였다. 이때 두가지 해저 저질을 이용해 수행한 모형실험 결과, 각각의 결정계수( $R^2$ )는 유사하거나, 해저 저질 B에서 상대적으로 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 이는 해저 저질 B에서 상대적으로 모형실험의 분산성이 낮게 작용하는 것으로 사료된다.

**Table 4.3 Coefficient of determination of experimental results**

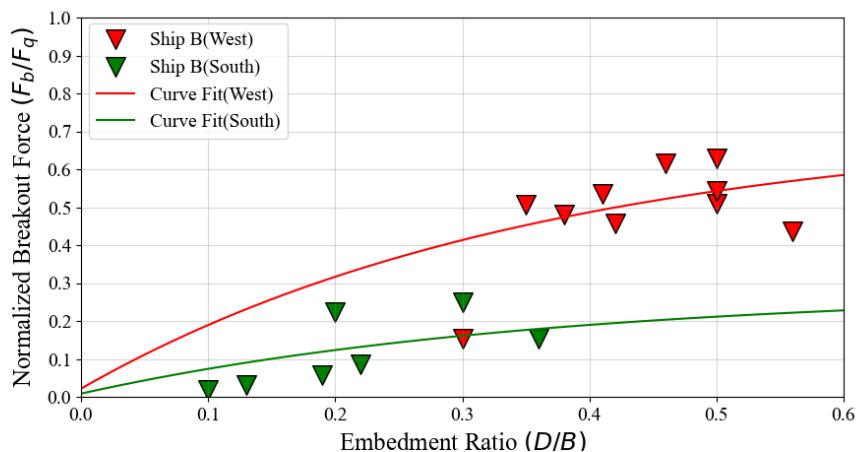
	Cube		Cylinder		Ship B	
Seabed soil	A	B	A	B	A	B
Coeff. of Det., $R^2$	0.553	0.7275	0.3449	0.3504	0.4225	0.5315



(a) Cube



(b) Cylinder



(c) Ship B

Figure 4.6 Effect of seabed soil

모형실험 결과 해저 저질에 따라 두가지 주요한 영향이 확인되었다. 첫째로, 해저 저질에 따라 동일한 실험 물체일지라도 서로 다른 침강비의 범위를 가지는 것을 확인하였다. 둘째로, 침강비에 따른 해저면 이탈력이 유의미한 차이를 가진다는 것이다.

이에 대한 분석을 위해 물체에 작용하는 해저면 지지력에 대해 검토할 필요가 있다. 식 1.3의 Terzaghi's bearing capacity equation은 토양의 단위 중량에 의한 성분, 토양의 점착력에 의한 성분, 마지막으로 구조물에 의한 상재하중으로 구성된다.

본 연구에 이용된 해저 저질 A와 B는 각각 매우 유사한 단위중량을 가지며, 동일한 실험 물체를 해저 저질의 변화를 주며 실험을 수행했기 때문에 동일한 상재하중을 가진다. 이에 따라 해저 지지력을 구성하는 성분 중 해저 저질에 의해 유의미한 차이를 가지는 성분은 점착력이 유일하여, 해저 저질에 따른 해저면 이탈력의 영향을 확인하기 위해서 이에 대한 비교가 필요하다.

점착력에 관한 비교에 앞서 본 연구의 모형실험에 이용된 해저 저질의 점착력과 전단강도의 관계에 대한 관계를 정립하기 위해 식 4.2의 Coulomb의 법칙을 고려하였다. Coulomb의 법칙은 토양의 특성에 따른 점착력과 전단강도의 관계를 설명하는 법칙이다. Coulomb의 법칙을 구성하는 변수들은 토양의 전단강도( $S$ ), 점착력( $C$ ), 유효응력( $\sigma$ ) 및 내부 마찰각( $\phi$ )과 같다.

$$S = C + \sigma \tan \phi \quad (4.2)$$

본 연구에 이용된 해저 저질에 모형실험으로 인한 파괴 및 교란 이후 기준의 물성을 회복할 수 있도록 24~48시간의 안정시간을 부여하였다.

이에 따라 모형실험에 이용된 해저 저질은 내부 마찰각( $\phi$ )이  $0^\circ$ 인 포화점토로 가정할 수 있으며, 이 경우 토양의 점착력은 토양의 전단강도와 동일하다. 이에 따라 내부 마찰각과 관계없이 상대적으로 전단강도가 높은 해저 저질 B에서 상대적으로 높은 점착력이 작용한다고 여길 수 있다. 결과적으로 더욱 높은 점착력을 가지는 해저 저질 B에서 상대적으로 낮은 침강비를 가진다는 것을 이론적으로, 또한 경험적으로 확인할 수 있었다.

추가적으로 해저 저질에 따른 해저면 이탈력의 차이에 대한 분석을 위해 각각의 해저 저질에서 해저면 이탈력 구성요소의 크기를 비교하고자 하였다. Finn & Byrne(1972)의 연구에서 제시된 내용과 같이, 해저면 이탈력 구성성분은 크게 점착력, 마찰력 및 물체 표면에 부착된 해저 저질의 질량에 기인한 힘으로 구분될 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 고려된 두가지 해저 저질에서 해저면 이탈력의 구성성분을 다음과 같이 비교할 수 있다.

첫째, 비배수 전단강도가 높은 사질 점토인 해저 저질 B는 Coulomb의 법칙에 해저 저질 A보다 높은 점착력을 가진다.

둘째, 해저 저질 A에 비해 상대적으로 입자가 크고 거친 사질 점토인 해저 저질 B에서 더욱 높은 마찰력을 가진다.

셋째, 실험영상의 분석 결과, 해저 저질의 부착효과는 해저 저질A에서 강하게 나타나는 것이 정성적으로 확인되었다.

해저면 이탈력을 구성하는 성분 중 가장 지배적인 요소로 작용하는 성분인 점착력은 해저 저질 B에서 높은 값을 가지지만, 현재 모형실험에서는 이에 의한 영향이 명확하게 확인되지 않는다고 사료된다. 이에 따라 현재 모형실험은 실험 수조 및 실험 모델의 한계로 해저 저질의 부착효과가 더욱 부각되는 현상이 존재하여 해저 저질에 따른 점착력의 영향이 가려졌다고 추정된다.

결과적으로 해저 저질에 따른 해저면 이탈력의 영향의 직접적이고 명확한 평가는 어려움이 있었지만, 4.1절에서 고려하였던 형상계수의 접근법을 이용하여 해저 저질에 따른 해저면 이탈력의 차이를 평가하고자 하였다. 모형실험 결과를 통해 구한 해저 저질에 따른 형상계수는 다음의 **Table 4.4**과 같다.

**Table 4.4 Effect of seabed soil on shape coefficient**

	Cube		Cylinder		Ship B	
Seabed soil	A	B	A	B	A	B
Shape Coeff. $C_s$	3.20	3.84	0.73	0.52	0.72	0.28
Relative value	1	1.2	1	0.71	1	0.39

#### 4.4 인양 속도의 영향

인양작업 중 인양속도에 따른 해저면 이탈력의 영향을 검토하기 위해 관련된 일련의 모형실험을 수행하였다. 모형실험을 위해 0.19m 길이의 예인선 모형인 Ship B를 이용하였으며, 이는 23m의 길이를 가지는 실제 운항 중인 예인선 Jarrett M의 축소모델로 1/121의 축척을 가진다. 또한 추가적인 검토를 위해 이와 유사한 형상을 가지는 Cylinder, Prism에 대해서도 모형실험을 수행하였다. 모형실험 시 인양 속도와 본 연구에서 가정한 실제 선박의 인양속도는 **Table 4.5**에 표기된 값과 같다.

리니어 엑추에이터의 정밀도 및 PWM 제어 방식 특성상 정확하고 균일한 인양속도의 설정에 한계가 있었다. 그러나 인양 과정 중 20개의 구간 평균을 측정한 결과 구현하고자 했던 세가지 단계의 인양 속도와 높은 일치성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.



**Figure 4.7 Experimental model and considered Barge in Length of 20m**

**Table 4.5 Lifting speed of prism model and prototype vessel**

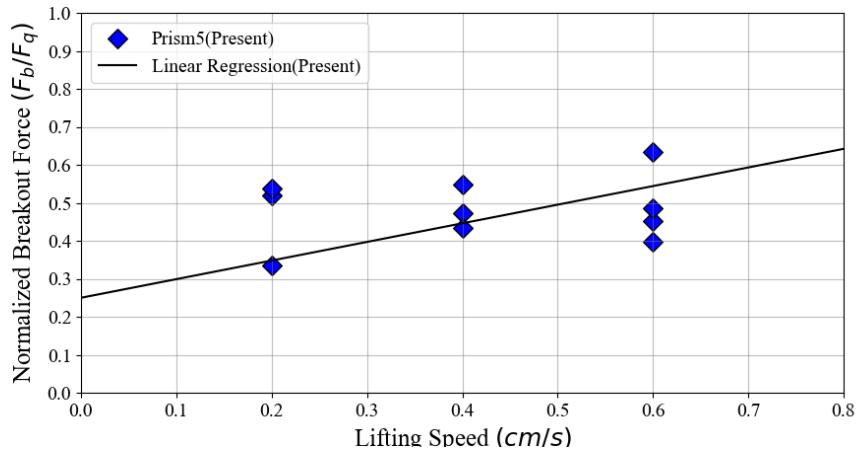
Model Scale( $\lambda = 1/100$ )	Full Scale( $\lambda = 1$ )
$U=0.2\text{cm/s}$	$U=0.02\text{m/s}$
$U=0.4\text{cm/s}$	$U=0.04\text{m/s}$
$U=0.6\text{cm/s}$	$U=0.06\text{m/s}$

본 연구에서 수행한 모형실험 결과를 통해 인양 속도에 따른 해저면 이탈력의 영향을 확인하기 위해 해당 결과들에 대해 선형보간을 수행한 결과는 **Figure 4.9**과 같다. 선형보간은 무차원 해저면 이탈력 ( $F_b/F_q$ ) 의 하한값 0.25와 인양 속도에 관한 보정계수( $C_u$ )를 적용하여 수행하였다.

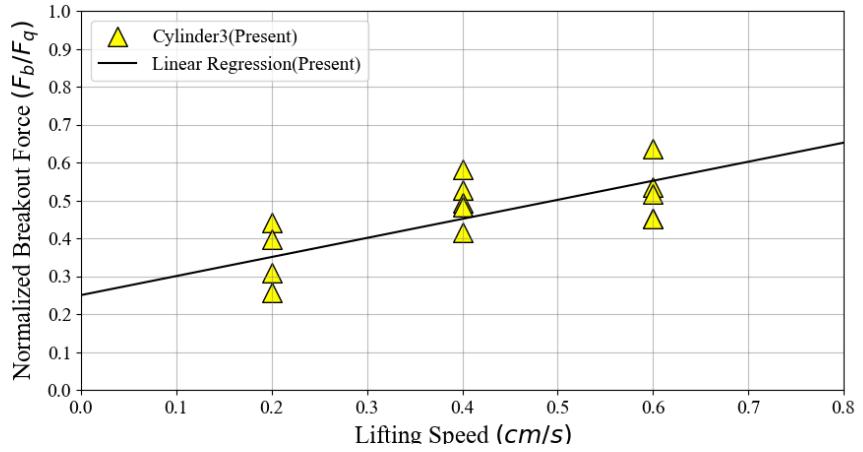
해당 선형 보간 방법을 수식화 한 모습은 다음의 식 4.3과 같다.

$$y = C_u \cdot u + 0.25 \quad (4.3)$$

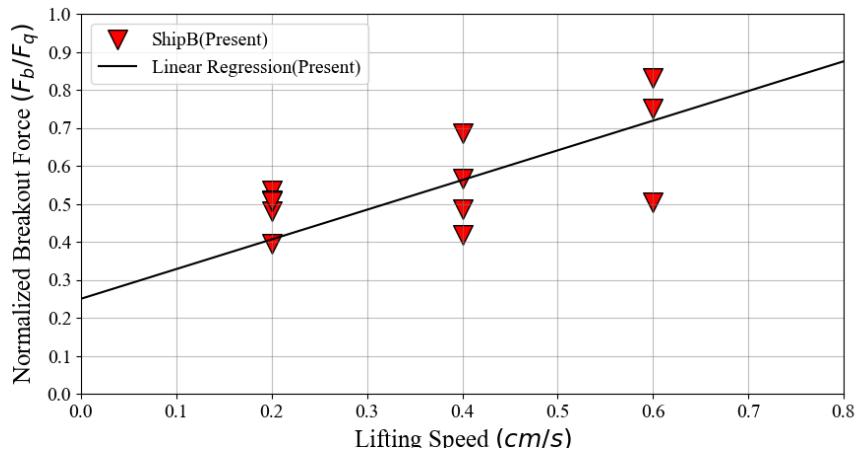
**Figure 4.10**은 Prism, Cylinder 및 Ship B 모델을 이용하여 인양 속도에 의한 해저면 이탈력의 변화를 도시한 산점도이다. 모형실험 결과 공통적으로 양의 기울기를 가지는 것을 확인하였으며, 이는 곧 실험 모델에 관계없이 인양 속도가 증가함에 따라 해저면 이탈력이 증가함을 의미한다.



(a) Prism, D/B≈0.3



(b) Cylinder, D/B≈0.5



(c) Ship B, D/B≈0.4

Figure 4.8 Effect of lifting speed

**Table 4.6 Comparison of lifting speed coefficient**

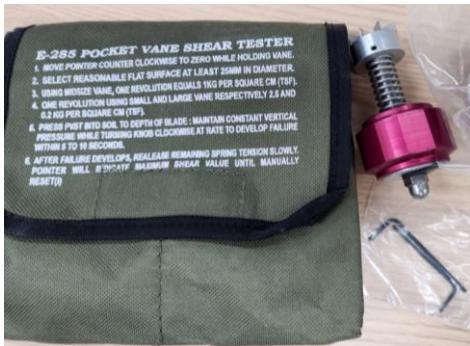
	Prism	Cylinder	Ship B
Lifting Speed Coeff.( $C_s$ )	0.31	0.3	0.78

**Table 4.6**은 인양속도의 보정계수를 비교한 모습과 같다. Prism과 Cylinder는 약 0.3의 유사한 크기의 보정계수를 가지지만, Ship B의 경우 각각의 단순형상 물체에 비해 두배 이상 높은 0.78의 보정계수를 가지는 것을 확인하였다. 이에 따라 인양속도가 증가함에 따라 해저면 이 탈력이 증가하는 경향성을 확인할 수 있었지만, 명확한 경향성을 확인하기에 어려움이 있었다. 그러나 추가적인 검토를 통해 보다 정밀한 인양 속도의 영향을 확인할 수 있으리라 여겨지며, 실제 인양 작업 시 인양속도에 관한 고려가 요구된다고 판단한다.

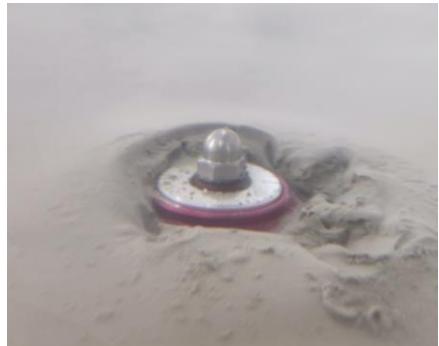
## 4.5 침몰 시간의 영향

해저면 이탈력 관점에서 침몰 시간은 토양의 텍소트로피 특성에 의해 중요한 요소로 사료된다. 이에 본 연구에서는 해저 저질의 텍소트로피 특성을 관찰하기 위해 Roderick & Luggad(1975) 및 Das(1991)의 선행연구를 참고하여 모형실험을 수행하였다.

모형실험에 앞서 해저 저질의 전단강도를 측정하기 위해 토베인(Torvane)을 이용한 베인 전단시험을 수행하였다. **Figure 4.9(a)**는 베인 전단 시험을 위한 토베인의 사진이다. 토베인을 이용한 베인전단 시험은 끝단의 회전 날개가 달린 장치를 토양내에 관입하여 회전시킨 후 토베인의 회전수에 따라 토양의 강도를 확인할 수 있는 간단하고 효과적인 방법이다.



(a) Torvane



(b) Mounted torvane in seabed

**Figure 4.9 Image of Torvane**

다만 실험수조에서 직접 전단시험을 수행하는 경우 포화 토양의 낮은 전단강도 및 해저 지지력에 의해 **Figure 4.9(b)**와 같이 토베인이 과도하게 파묻히는 현상이 발생해 직접적인 측정이 어려웠다. 이에 따라 본 연구에서는 해저 저질의 비배수 전단강도를 높이기 위해 48시간의 건조 시간을 부여해 해저 저질의 함수비를 낮춘 후 베인 전단 시험을 수행하였다.

건조시킨 해저 저질의 파괴 후 회복 시간에 따른 상대적인 비배수 전 단강도 차이를 확인하고자 1분, 15분, 3시간 및 24시간의 회복시간을 부여하였으며, 이때의 베인 전단 시험 결과는 **Figure 4.10** 및 **Table 4.7**과 같다.



**Figure 4.10 Vane shear test results of Torvane(Exp. Scene)**

**Table 4.7 Vane shear test results of Torvane**

	1 min	15 min	3 hours	24 hours
Number of Rev.	0.09	0.11	0.18	0.22
Shear Strength	2.2kPa	2.7kPa	4.4kPa	5.4kPa

베인 전단 시험 결과 대기시간의 증가에 따라 증가하는 비배수 전단강도를 확인할 수 있었다. 이에 따라 해저 저질의 교란 및 파괴 후 대기 시간(침몰시간)이 해저면 이탈력에 미치는 영향을 확인하기 위한 일련의 모형실험을 수행하였다. **Figure 4.11**의 산점도는 침강시간에 따른 해저면 이탈력을 확인하기 위한 모형실험 결과와 Das(1991)의 연구 결과 중 본 모형실험 연구와 유사한 해저 저질을 이용한 실험결과의 비교를 위해 함께 도시하였다. 침강시간에 따른 해저면 이탈력을 검토한 결과 식 4.6 과 같이 시간에 따라 Logarithmic 한 증가세를 보이는 현상을 보였으며, 이는 **Figure 4.11**의 실선으로 표기된 성분과 같다.

$$y = 0.38 \ln(x) + 1.78 \quad (4.6)$$

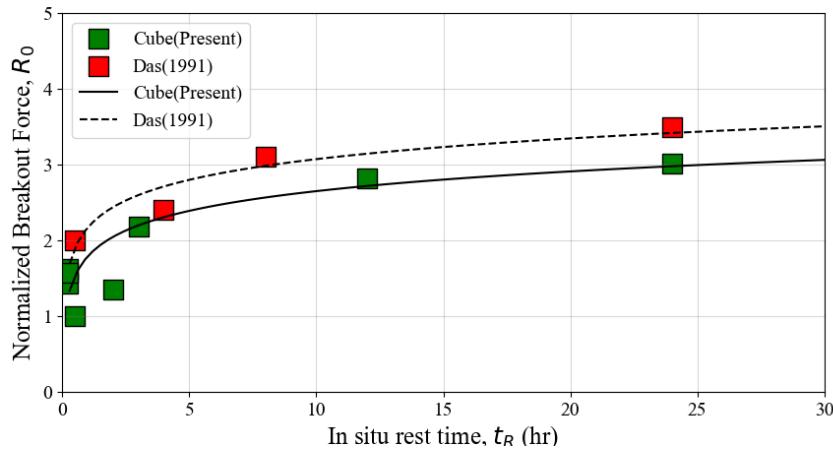


Figure 4.11 Effect of In-situ rest time

본 모형실험 결과에 의하면 침강시간에 따라 해저면 이탈력이 최대 약 3 배까지 증가하는 경향이 확인된다. 이는 해저 저질이 물체의 침강으로 인해 교란 및 파괴된 이후 대기 시간이 부여됨에 따라 해저 저질의 전단강도가 증가하고, 이로 인해 구조물에 작용하는 점착력이 증가한 것으로 사료된다. 이에 따라 침강시간에 증가에 따른 안전율에 대한 정밀한 고려가 요구된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서 단순형상 및 선박형상 구조물의 해저면 이탈력에 관한 축소 모형을 이용한 일련의 모형실험 연구를 수행하였다. 모형실험을 위해 실험 설비를 설계하고 제작하였으며, 단순형상 구조물과 선박형상 구조물을 이용해 다양한 인양 조건에서 해저면 이탈력을 검토하였다. 본 모형실험 연구를 통해 아래의 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 모형 실험을 통하여 부분적으로 침강된 물체가 해저면을 이탈하는 과정에서의 물리적 현상에 대해 관찰하였다. 해저면 이탈 과정을 총 4 단계로 구분하여, 물체가 해저면에 침강되고 안착된 상태, 물체가 인양되며 해저 저질이 변형되는 단계, 물체가 해저 저질로부터 이탈하며 해저 저질이 파괴되는 단계, 물체가 수중에서 인양되며 부착된 해저 저질이 떨어지는 단계로 구분될 수 있었다.

둘째, 해저면 이탈력은 물체의 형상에 따라 중요하게 영향을 받으며, 이에 본 연구에서는 형상에 대한 영향을 공학적으로 반영하기 위해 기존에 널리 활용되고 있는 Lee(1972)의 해저면 이탈력 추정식에 형상 계수를 도입하여 수정된 추정식을 제안하였다. 이 때 형상 계수는 모형실험 데이터를 기반으로 도출하였으며, 선박의 경우 방형계수, 부가물 및 침몰 자세가 형상계수에 중요하게 영향을 미침을 확인하였다.

셋째, 해저 저질, 인양 속도, 침강 시간의 다양한 인양조건에 따른 인양력 변화 특성을 검토하였다. 해저 저질에 따라 상이한 해저면 지지력이 작용하여 동일한 물체일지라도 서로 다른 침강비의 범위를 가지는 것을 확인하였으며, 인양 속도가 증가함에 따라 해저면 이탈력이 선형적으로 증가함을 확인하였다.

마지막으로 침강 시간에 따른 해저면 이탈력 변화를 확인하였으며, 침강시간에 따라 최대 약 3배 정도로 해저면 이탈력이 증가할 수 있음을 확인하였다.

본 논문의 연구결과를 통해 침몰선의 인양작업에서 침몰선의 형상, 침몰 자세 등 다양한 요소를 고려해 더욱 정확한 해저면 이탈력 예측 모델을 개발하였으며, 이를 통해 인양 작업의 안정성과 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 인양 속도, 침강 시간, 축척비 효과 등에 따른 해저면 이탈력의 영향에 대해서는 추가적인 실험을 통하여 연구가 필요하며, 정확도 높은 해저면 이탈력 추정식을 도출하기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] Terzaghi, Karl, and RALPH B. Peck. "Soil mechanics." Engineering Practice. John Wiley and Sons, Inc., New York (1948).
- [2] Skempton, A. W. "The bearing capacity of clays." Selected papers on soil mechanics (1951): 50–59.
- [3] Muga, B. J. (1968). OCEAN BOTTOM BREAKOUT FORCES. INCLUDING FIELD TEST DATA AND THE DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL METHOD. NAVAL CIVIL ENGINEERING LAB PORT HUENEME CA.
- [4] Liu, C. L. (1969, December). Ocean sediment holding strength against breakout of partially embedded objects. In Presented in ASCE Proc Civ Eng. in Oceans, 2nd Conf, Miami Beach, Florida, Dec 10–12, 1969.
- [5] Lee, H. J. (1972). Unaided breakout of partially embedded objects from cohesive seafloor soils. NAVAL CIVIL ENGINEERING LAB PORT HUENEME CA.
- [6] Thompson, D., Beasley, D. J., True, D. G., Lin, S. T., Briaud, J. L., Seelig, W. N., & Jung, B. (2012). Handbook for marine geotechnical engineering. NAVFAC
- [7] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. John wiley & sons.
- [8] Roderick, G. L., & Lubbad, A. L. (1975, May). Effect of object in-situ time on bottom breakout. In Offshore Technology Conference. OnePetro.

- [9] Das, B. M. (1991). Bottom breakout of objects resting on soft clay sediments. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1 (03).
- [10] Herbich, John B. "Handbook of dredging engineering." (*No Title*) (1992).
- [11] Terzaghi, Karl, Ralph B. Peck, and Gholamreza Mesri. Soil mechanics in engineering practice. John wiley & sons, 1996.
- [12] Byun, S. H., Choi, H. J., & Chun, T. B. (2001). Calculation of lifting force for a sunken ship considering the bottom soil property. Journal of the Korea Society for marine Environment and Energy, 4(2), 135–139.
- [13] Huang, Jun, Jianchun Cao, and Jean ME Audibert. "Geotechnical design of suction caisson in clay." ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. ISOPE, 2003.
- [14] Ryu, Woongryul, Yoseph Byun, and Byungsik Chun. "A Study on Undrained Shear Strength Characteristic of Pusan Clay." *Journal of the Korean GEO-environmental Society* 11.3 (2010): 43–51.
- [15] 이주필. (2014). 안전성과 경제성을 고려한 침몰 선박 인양 설계(서울대학교)
- [16] 이찬수. 침몰선박의 인양 기법과 인양력 평가에 관한 연구. Diss. 부경대학교, 2014.
- [17] 함승호, 노명일, 김주성, 이혜원, & 하솔. (2015). 환경 하중을 고려한 침몰 선체의 물리 기반 인양 시뮬레이션. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), 387–394.
- [18] Das, Braja M., and Nagaratnam Sivakugan. *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning, 2016.'

- [19] Dean, Michael S. "Salvage operations." *Springer Handbook of Ocean Engineering* (2016): 985–1066.
- [20] Das, Braja M., and Nagaratnam Sivakugan. *Principles of foundation engineering*. Cengage learning, 2018.
- [21] Al-Janabi, Husham A., Charles P. Aubeny, and Jinbo Chen. "Cyclically loaded risers and pipelines in cohesive soil." *Ocean Engineering* 241 (2021): 110056.
- [22] Das, Braja M. *Principles of geotechnical engineering*. Cengage learning, 2021.
- [23] 해양수산부, 「항만시설 및 능력 현황」, 2021, 2023.02.28,  
항만시설현황
- [24] 해양수산부, 「해양수산 통계시스템」, 2011~2020 사고유형별  
발생 현황

# Abstract

## Experimental study on soil breakout force of sunken ships

Sejun Kim

Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Ship sinking accidents can lead to various secondary accidents, for instance, loss of life, marine pollution caused by the leakage of fuel and other pollutants from the sunken ship, thus emergency rescue and salvage operations are essential. The salvage operation of a sunken ship submerged on the seabed can be categorized into several stages: breakout from the seabed, underwater lifting, surfacing, and aerial lifting. Among them, predicting the appropriate bottom breakout force is crucial for safely performing the first stage, the breakout from the seabed.

The bottom breakout force is one of the main components of the lifting force, which acts due to the resistance of the seabed when an object breakout from it. The most widely used method to evaluate the bottom breakout force is the bottom breakout force estimation formula proposed by Lee (1972). This bottom breakout force estimation formula is based on experimental results conducted with simple shaped structures. However, an examination of its direct applicability to ships, which have relatively complex three-

dimensional shapes, is needed.

In this study, a series of experiments are conducted with the aim of developing a formula for the bottom breakout force of sunken ships.

First, experiments on the bottom breakout force for various simple-shaped structures using the seabed soil of South Korea's coastal area are conducted. Also, the examination of their physical characteristics and the accuracy of the existing bottom breakout force estimation formula is conducted.

Second, experiments on the bottom breakout force for ship-shaped structures are conducted, and a modified bottom breakout force estimation formula, which introduces a shape factor to the Lee(1972)'s formula, is proposed for applicability to ship shapes.

Third, additional experiments are conducted on the sinking posture of the ship and the lifting speed that can occur in various salvage operations, and their effects are examined.

**Keywords** : Bottom breakout force, Experiment, Sunken ship, Emergency rescue, Salvage process

Student Number : 2021-25000