

Received: 2023/11/30  
Revised: 2023/12/12  
Accepted: 2024/03/18  
Published: 2024/03/31

\*Corresponding Author:

Yongchul Lee

Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si, Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea

Tel: +82-55-907-5200

E-mail: wake8846@navy.ac.kr

# 파주력 및 외력 분석을 통한 묘박 중인 선체의 안정성 고찰

## A Study on the Stability of Anchoring Vessels Based on the Analysis of the Holding Forces and External Forces

민승식<sup>1</sup>, 노익제<sup>2</sup>, 이용철<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>해군 소령/해군사관학교 기초과학과 부교수

<sup>2</sup>해군 대위/서울대학교 원자력공학과 박사과정

<sup>3</sup>해군 대령/해군사관학교 기초과학과 부교수

Seungsik Min<sup>1</sup>, Ikjae Noh<sup>2</sup>, Yongchol Lee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>LCDR, ROK Navy/Associate professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

<sup>2</sup>LT, ROK Navy/Ph.D Candidate, Dept. of Nuclear Engineering, Seoul National University

<sup>3</sup>CAPT, ROK Navy/Associate professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

### Abstract

본 논문에서는, 바지형 선박(barge-type vessel)의 묘박 상황에서 외력과 파주력의 물리적 관계 분석을 통해 묘박 안정성을 추정하였다. 선박에 작용하는 주요 외력인 바람에 의한 풍압력, 해류에 의한 유압력, 파도에 의한 표류력의 관계를 살펴보고, 태풍 내습 시 강도에 따라 선박에 작용하는 외력을 추정하였다. 또한 닻의 무게와 수심에 따른 파주력을 적용하여 바지형 선박의 묘박 안정성을 추정하였다.

In this paper, the stability of the headstone was estimated through the analysis of the physical relationship between the external force and the field force in the situation of the headstone of a barge-type vessel. The relationship between the wind pressure by wind, hydraulic force by ocean current, and drift force by waves, which are the main external forces acting on ships, was examined, and the external force acting on the ship was estimated according to the strength during typhoon invasion. In addition, the stability of the headstone of a barge-type ship was estimated by applying the field force according to the weight and depth of the anchor.

### Keywords

바지형 선박(Barge-type Vessel), 파주력(Holding Force), 앵커(Anchor), 싱커(Sinker)

### Acknowledgement

본 논문은 2023년도 해군사관학교 해양연구소 연구비 지원을 통해 수행된 연구임.

## 1. 서론

항만에 계류(mooring) 중인 경우를 제외하면 묘박(anchoring)은 해상에서 선박을 고정시키는 유일한 방법이 된다. 묘박의 안정성을 확보하기 위해서는 선박 설계 시 앵커의 무게에 따른 파주력(把駐力, holding force) 산출이 필요하다. 일반적인 해양 환경의 경우 선박의 설계 시 장착된 닻과 사출되는 앵커 체인의 길이를 조절함으로써 묘박의 안정성을 기대할 수 있다. 그러나 태풍과 같이 가혹한 환경에서는 사출된 체인의 양을 조절하는 것만으로는 묘박의 안정성을 확보하기 힘들다. 바람과 해류, 파도에 의한 외력이 앵커와 앵커 체인의 파주력을 초과하여 작용하면 주요 현상(dragging anchor)이 발생하여 선박은 투묘지를 벗어나 해안에 좌초하거나 다른 선박과 충돌하는 피해를 입게 된다.

태풍의 내습이 예상되면 선박은 보통 태풍의 예상 진로에서 멀리 벗어나거나 안전한 피항지를 선택하여 투묘를 실시한다. 하지만, 투묘에 대한 구체적 사항이나 투묘 후 선박의 안전에 대한 판단은 아직까지 운항자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 태풍 내습 시 묘박 안정성을 연구한 사례로 2003년 제14호 태풍 매미 내습 시 진

해만 인근에서 발생한 62척의 해양 사고를 조사하여, 선박의 묘박 지침을 제시한 바 있다[1]. 또한, 태풍을 비롯한 악천후에서 묘박 중인 선박의 주요 현상을 시뮬레이션하거나 실선을 바탕으로 연구하여 묘박 지침을 제시하기도 하였다[2-5].

본 논문에서는 싱커를 포함하여 묘박 중인 바지형 선박(barge-type vessel)의 외력과 파주력을 엄밀하게 분석하여 묘박 안정성을 추정하였다. 해양 환경에서 발생하는 풍압력, 유압력, 표류력 등 3가지 외력에 관한 식들을 검토하여 각 외력들 간의 관계를 고찰하였다. 이를 바탕으로 한반도 서해상에 정박된 바지형 선박의 사례를 들어 묘박 안정성을 추정하였다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 선박에 작용하는 외력

선박에 작용하는 외력은 바람에 의한 풍압력( $F_{wind}$ ), 조류에 의한 유압력( $F_{current}$ ), 그리고 파랑에 의한 표류력( $F_{wave}$ )의 벡터 합으로 나타낼 수 있다. 이들 힘이 모두 같은 방향으로 작용할 때 외력은 극대값을 나타내지만 일반적으로 개별 힘들은 풍속, 유속, 파고에 의해 독립적으로 작용하기 때문에 모두 같은 방향으로 작용할 가능성은 희박하다. 하지만 설계 및 운용상 극한 상황(worst case)을 고려하는 것이 안전하므로, 본 논문에서는 외력에 관하여 식 (1)과 같이 모두 같은 방향으로 작용하는 상황을 분석한다.

$$F_{ext} = F_{wind} + F_{current} + F_{wave} \quad (1)$$

우선, 식 (2)는 바람에 의해 공기가 밀어내는 힘인 풍압력으로, 정면 풍압면적, 풍압 중심점, 함교 높이 등을 기초로 Fujiwara et al.(1998)에 의해 제안된 추정식을 이용하였다[6].

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a C_a A v_a^2 \text{ [N]} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_a$ : 공기 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  
 $C_a$ : 풍압계수(= 1),  
 $A$ : 정면 풍압면적(m<sup>2</sup>),  
 $v_a$ : 풍속(m/s).

다음으로, 식 (3)은 해류에 의해 선박의 표면에 발생하는 마찰력인 유압력으로 선체의 길이, 수면하 선체의 면적, 해류의 속도 등을 기초로 Froude(1872)가 2차원 해석법(Froude 해석법)을 적용하여 발표한 평판마찰곡선 식을 이용하였다[7-10].

$$F_{current} = \frac{1}{2} g \rho C_{F.O} S v_w^{1.825} \text{ [N]} \quad (3)$$

여기서,  $g$ : 중력가속도 9.80(m/s<sup>2</sup>),  
 $\rho$ : 해수 비중 1.025,  
 $C_{F.O}$ : Froude의 마찰저항계수,  
 $S$ : 침수표면적(m<sup>2</sup>),  
 $v_w$ : 유속(m/s).

Froude의 마찰저항계수( $C_{F.O}$ )는 선체 길이가 증가할수록 값이 작아진다. 10 m씩 증가하는 선체 길이마다 마찰저항계수( $C_{F.O}$ ) 값은 이창억(2014)의 저서에 제시되어 있다[10]. 본 논문에서는 임의의 선체 길이( $L$ )에 대응하는 계수 값을 찾기 위하여 이창억[10]이 제시한  $C_{F.O}$  값을  $x \equiv \log L$  ( $10 \text{ m} \leq L \leq 300 \text{ m}$ )로 설정하고 식 (4)와 같이 5차식으로 근사시킨 값을 사용하였다.

$$C_{F.O} = 0.00686x^5 - 0.06085x^4 + 0.20092x^3 - 0.29754x^2 + 0.16945x + 0.14020 \quad (4)$$

여기서,  $x \equiv \log L$  ( $10 \text{ m} \leq L \leq 300 \text{ m}$ ).

Fig. 1은 선체의 길이와  $C_{F.O}$ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이다.

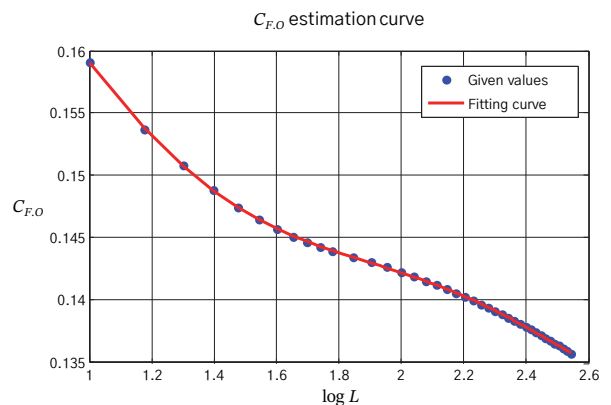


Fig. 1. Froude 상수( $C_{F.O}$ )와 선박의 길이 간의 관계

마지막으로, 식 (5)는 파랑에 의해 발생하는 힘인 표류력으로 선체의 길이와 파 진폭 등을 기초로 산출된다. 이때, 표류력은 규칙 성분과 불규칙 성분으로 구분하여 합산한다. 규칙 성분은 Hirano(1995)가 적용한 식을 활용하였으며[11], 불규칙파의 평균 표류력은 Remery(1973)의 연구 결과인 1/8을 적용하여 합산하였다[12].

$$F_{wave} = \frac{1}{2} g \rho_w C_w L h^2 \text{ [N]} \quad (5)$$

여기서,  $g$ : 중력가속도  $9.80(\text{m/s}^2)$ ,

$\rho_w$ : 해수 밀도  $1.025(\text{kg/m}^3)$ ,

$C_w$ : 표류계수,

$L$ : 선체 길이(m),

$h$ : 파 진폭(m).

## 2.2 풍속과 유속 간의 관계

식 (2), 식 (3), 식 (5)와 같이 표현된 해상에서의 3가지 외력은 서로 독립적으로 작용하지 않는다. 지구의 자전으로부터 비롯된 해류뿐만 아니라 바람에 의해 발생하는 해류는 유압력에 영향을 미친다. 또한 해상에서의 파도는 역시 바람에 의해 지대한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 기상청에서 예보하기 힘든 해류의 속도를 풍속으로부터 유추함으로써, 기상 악화 시 유압력을 추정하여 주요 위험성을 판단하고자 하였다.

유압력은 선박이 정박하고 있는 곳의 해류의 속도 ( $v_w$ )와 관계된다. 바람은 해수면과의 마찰을 통해 표면 해류의 속도와 방향에 영향을 미치기는 하지만 대부분의 잔잔한 바람의 경우 해류의 유속은 지형류(geostrophic current)에 의해 결정된다. 따라서 일반적인 바람에 의한 표면해류의 유속변화는 무시해도 무방한 정도라 할 수 있다. 유속은 수심이 깊어질수록 로그함수 형태로 감소하는데, 이러한 현상은 소위 “wall boundary layer”로 널리 알려져 있다. 그러나 태풍 같이 강한 바람이 부는 상황에서는 쇄파(wave breaking)가 매우 강하게 발생한다. 쇄파에 의해 발생하는 난류는 표면해류의 모멘텀과 에너지를 수면 아래 깊은 곳까지 전달함으로써 표면 혼합층(surface mixed layer)의 깊이를 더욱 깊어지게 한다. 따라서 강한 바람에 의한 표면해류의 유속 변화는 보다 깊은

층까지 효과를 미치게 된다.

Kudryavtsev et al.[13]은  $3 \text{ m/s} - 15 \text{ m/s}$ 의 바람에 대해 수심  $0.25 \text{ m}$ 부터  $5 \text{ m}$ 까지의 유속을 측정하여 분석한 결과 측정된 유속의 그래디언트(gradient)가 “wall boundary layer”의 경우보다 2~5배 적으며 이는 바람에 의한 쇄파(breaking wave)의 발생이 주요 원인임을 보여주고 있다. 따라서 강한 바람을 동반하는 태풍의 상황에서는 표면 혼합층의 깊이가 더욱 깊어질 것이기 때문에 투묘한 선박의 안정성을 보장하기 위해 유압력 계산 시 지형류에 의한 유속과 더불어 태풍으로 인해 발생하는 유속 또한 고려되어야 한다. 강한 바람에 의한 표면해류의 유속에 관한 연구는 측정의 어려움 때문에 활발히 연구되지 않았지만 최근에 몇몇 결과들이 발표되고 있다.

Chang et al.[14]은 1999년부터 2009년까지 북서태평양 지역에서 발생한 초속  $20 \text{ m/s} - 50 \text{ m/s}$ 에 해당하는 바람과 표면해류(측정 수심  $15 \text{ m}$ )의 관계를 분석함으로써 표면해류의 유속은 평균적으로 바람 속도의 약 2%이고 대부분 바람의 방향과 같은 방향이었지만 초속  $35 \text{ m/s}$ 의 경우 우측으로 최대  $10^\circ$  편향되며, 지형류의 영향을 고려하였을 때에도 유사한 결과가 나타남을 보였다.

Chang et al.[15]은 2004~2008년에 북서태평양에서 카테고리 5(Saffir-Simpson hurricane scale)까지 발달한 4개의 태풍 우측 반원의 표면해류 유속(측정 수심  $15 \text{ m}$ )을 분석하여 표면해류의 유속을 태풍(카테고리 5)의 이동속도( $U_h$ )를 독립변수로 하는 회귀식, 그리고 태풍의 카테고리( $S$ )를 독립변수로 하는 회귀식을 각각 제시하였다. 특히 후자의 경우 등급이 높아도 이동속도가 빠르면 표면해류의 유속이 느리기 때문에 태풍의 이동속도를 slow, typical, fast의 3개 영역으로 구분한 후, slow와 fast의 범주에 해당하는 회귀식을 제안하였으며 그 결과 역시 풍속의 2% - 4% 범위에 해당함을 알 수 있다.

Fan et al.[16]은 2008년부터 2020년까지 북서태평양, 북동태평양, 인도양, 북대서양에서 발생한 170개의 열대성 저기압(tropical cyclone)의 각 4분면에 대한 표면해류(수심  $15 \text{ m}$ )를 분석하였다. 분석 결과 표면해류의 유속과 방향은 열대성 저기압의 좌측반원과 우측반원에서 비대칭적이며, 좌측반원에서의 유속은 바람세기의 약 2%, 우측반원에서는 약 2% - 4%에 해당함을 보임으로써 앞서 인용한 결과가 유

효함을 확인하여 주고 있다.

Lodise et al.[17]이 측정한 수면 아래 5 cm, 60 cm에서의 유속은 10 m/s – 20m/s의 바람에 대하여 각각 3.4 % – 6.0 %, 2.3 % – 4.1 %인 것으로 나타났다. 이상의 결과들을 종합하면 해류의 유속은 2 % – 4 % 범위를 가지며 깊이에 따라 약간씩 감소하는 것을 알 수 있다. 통상 선박의 흘수가 10 m 이내인 점을 감안하여 본 연구에서 유압력 계산에 사용하는 유속은 풍속의 3 %로 설정하였다.

Fig. 2는 외력이 꾸준히 증가함에 따라 주묘가 일어나는 상황을 예시로 나타낸 그림이다. 바람, 조류 등에 의해 외력이 커지면 해저면에 놓인 닻줄의 길이가 줄어들고, 장력 변화로 인한 닻의 수직항력이 줄어들어 파주력이 감소한다. 이때, 외력이 파주력과 같아지는 순간 주묘가 발생한다. 투묘의 도구와 방법이 같더라도 수심에 따라 파주력은 극명하게 달라진다. 수심 10 m에서 파주력은 113.7 tonf이지만 수심이 15 m, 20 m로 늘어나면 파주력은 84.3 tonf, 65.8 tonf로 급격히 줄어든다.

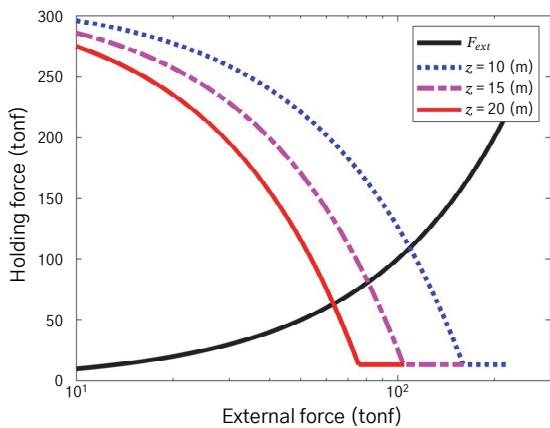


Fig. 2. 각각의 수심에서 외력  $F_{ext}$ 에 따른 파주력  $H$ 의 형태(x축은 로그 스케일임)

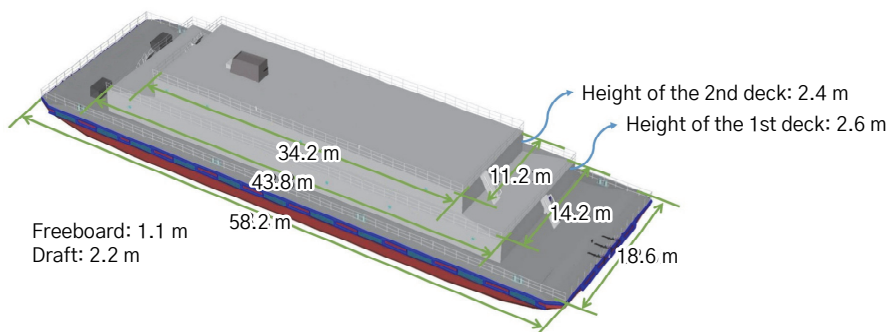


Fig. 3. 바지형 선박(barge-type vessel) 예시

### 3. 바지형 선박의 묘박안정성 분석

한반도 서해의 평균 수심은 44 m이며 상당부분이 20 m 이내의 얕은 수심을 이루고 있다. 따라서 본 해역에는 바지형 선박을 설치하기 용이한 조건을 갖추고 있다. 하지만 조수 간만의 차가 매우 커서 최대 10 m 가량의 수심 변화를 보이고 있다. 이처럼 매우 얕은 수심에 매우 큰 조석을 보이는 경우는 전세계적으로도 희귀한 환경이다. 본 연구에서는 앞서 해석한 외력, 현의 장력, 파주력을 바탕으로 한반도 서해상에 설치된 바지형 선박의 묘박안정성을 분석하였다.

Fig. 3는 바지형 선박의 모습을 정면과 측면에서 바라본 개념도이다. 구조물은 4개의 층으로 구성되어 있으며 직사각형 형태를 이루고 있다. 앵커는 정면에서 사출되어 투묘된 상태이며, 묘박의 안정성을 높이기 위해 싱커를 부착하고 있다.

Table 1은 선박의 상세정보를 나타낸 것이다. 풍압력 계산을 위한 정면 풍압면적은 167 m<sup>2</sup>, 유압력과 표류력 계산을 위해 필요한 선체 길이는 58.2 m이다. 또한 파주력 계산을 위한 앵커와 싱커의 무게는 각각 2.7 tonf, 33 tonf이고, 항만-싱커-앵커 간 체인의 길이는 각각 54 m와 27 m이다.

#### 3.1 해양환경에 따른 선박의 외력 분석

Fig. 4는 Table 1의 상세정보에 식 (2), 식 (3), 식 (5)를 적용하여 풍압력, 유압력, 표류력을 log-scale로 나타낸 것이다. 풍압력, 표류력은 각각 풍속과 파고의 제곱에 비례하고, 유압력은 유속의 1.825 제곱에 비례하므로 각각의 기울기는 2, 2, 1.825가 된다. 풍속의 범위는 1.00 m/s – 100m/s로 설정하였고, 유속의 범위는 풍속의 3 %인 0.03 m/s – 3.00m/s, 파고의 범위는 풍속의 10 %인 0.10 m – 10.0 m로 설정하였

Table 1. 바지형 선박(barge-type vessel)의 제원

구분	표기	값	관계식
공기 밀도	$\rho_a$	1.204 kg/m <sup>3</sup>	풍압력 $F_{wind} = \frac{1}{2}\rho_a C_a A v_a^2$ [N]
정면 풍압계수	$C_a$	1.000	
정면 풍압면적	$A$	84.26 m <sup>2</sup> [18.6 * 1.1 + 14.2 * 2.6 + 11.2 * 2.4]	
선체길이	$L$	58.20 m	유압력 $F_{current} = \frac{1}{2}g\rho_w C_{F.O} S v_w^{1.825}$ [N]
마찰저항계수	$C_{F.O}$	0.1441	
해수밀도	$\rho_w$	1,025 kg/m <sup>3</sup>	
침수면적	$S$	1,339 m <sup>2</sup> [58.2 * (18.6 + 2 * 2.2)]	
표류계수	$C_w$	0.17	표류력 $F_{wave} = \frac{1}{2}g\rho_w C_w L h^2$ [N]
체인의 선밀도	$\lambda$	1,700 kg/SHOT	$T_x = \frac{\lambda}{2} \left( \frac{l^2 - z^2}{z \sec \theta - l \tan \theta} \right)$
항만-싱커 간 체인 길이	$l$	54 m (2 SHOTS)	
항만의 수심	$z$	variable	
싱커, 닻의 파주계수	$\mu_a, \mu_s$	10	$H = \frac{\mu_a w_a + \mu_s w_s + \mu_c \lambda (d + d_0)}{1 + \mu_s \tan \theta}$
체인의 파주계수	$\mu_c$	1	
앵커 무게	$w_a$	2,700 kg	
싱커 무게	$w_s$	33,000 kg	
싱커-앵커 간 체인 길이	$d_0$	27 m (1 SHOT)	
항만-싱커 간 holding part 길이	$d$	0	

다. 적용한 비율은 Table 2에서 동일하게 적용하였다. 그래프에 따르면 파랑에 의한 표류력이 가장 크게 작용하고, 다음으로 바람에 의한 풍압력이 작용하며, 해류에 의한 유압력은 미미하게 작용하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구는 태풍과 같은 강풍으로 해류가 발생함에 따라 정지한 선박에 작용하는 유압력을 고려한 것이다. 일반적인 해양 환경에서 고속 운항하는 선박은 풍속과 유속을 비슷한 수준으로 관측하므로 바람에 의한 풍압력보다 해류에 의한 유압력에 훨씬 큰 영향을 받게 된다.

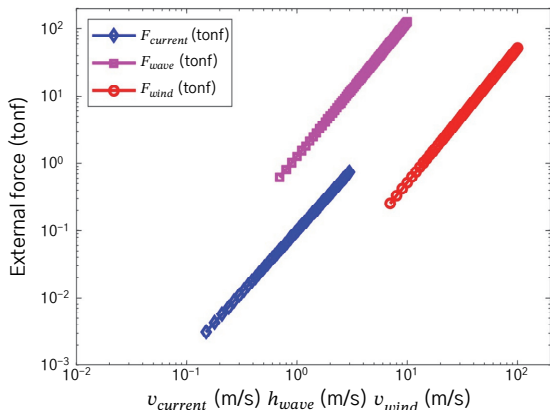


Fig. 4. 풍속, 유속, 파고에 따른 바지형 선박의 풍압력, 유압력, 표류력 그래프(x, y축 log-scale 표시)

Table 2는 대한민국 기상청 태풍 등급에 따른 외력을 나타낸 것이다. 2장에서 설명했듯이 풍속, 유속, 파고는 서로 밀접한 관계를 가지기 때문에, 풍속이 주어지면 유속과 파고는 일정한 범위 내에서 국한하여 생각할 수 있다. 이때 관례와 과거 자료를 바탕으로 파고는 풍속의 10%를 적용하였다. 한편, 풍압력과 유압력 간의 관계를 찾기 위하여 풍속과 유속의 관계를 알아보았다. 이를 바탕으로 유속은 풍속의 3%를 적용하였다. Table 1의 선박 기본정보와 풍속, 유속, 파고 수치로부터 식 (2), 식 (3), 식 (5)를 적용하여 풍압력, 유압력, 표류력을 산출하였고, 최종적으로 이들을 합산하여 외력의 합력을 도출하였다. Table 3에서 태풍 등급에 따른 합력의 계산 결과를 보면 미분류, 중, 강, 매우강, 초강력 등급 태풍에 대하여 각각 5.65 tonf, 12.2 tonf, 21.3 tonf, 37.8 tonf, 56.9 tonf 이상의 외력이 작용할 것으로 추정되었다.

### 3.2 수심에 따른 선박의 파주력 분석

바지형 선박의 수심은 10 m 내외이나, 조수 및 파랑을 고려할 때 순간적인 수심은 20 m까지 상승 가능하다. 수심이 깊어질 경우 싱커와 해저면 사이각( $\theta$ )

**Table 2.** 태풍의 강도에 따른 풍속, 유속, 파고 및 이에 따른 풍압력, 유압력, 표류력의 추정

태풍의 강도	풍속 (m/s)	유속 (m/s)	파고 (m)	풍압력 (tonf)	유압력 (tonf)	표류력 (tonf)	외력의 합력 (tonf)
-	17 - 25	0.51 - 0.75	1.7 - 2.5	1.50 - 3.23	0.03 - 0.06	4.12 - 8.91	5.65 - 12.2
중	25 - 33	0.75 - 0.99	2.5 - 3.3	3.23 - 5.64	0.06 - 0.10	8.91 - 15.5	12.2 - 21.3
강	33 - 44	0.99 - 1.32	3.3 - 4.4	5.64 - 10.0	0.10 - 0.16	15.5 - 27.6	21.3 - 37.8
매우강	44 - 54	1.32 - 1.62	4.4 - 5.4	10.0 - 15.1	0.16 - 0.24	27.6 - 41.6	37.8 - 56.9
초강력	≥ 54	≥ 1.62	≥ 5.4	≥ 15.1	≥ 0.24	≥ 41.6	≥ 56.9

\*10분 평균 최대 풍속을 기준으로 나는 scale임.  
 관례와 과거 자료 바탕으로 유속은 풍속의 3%, 파고는 풍속의 10% 적용.  
 1 tonf = 1,000 kgf = 9,800 N

**Table 3.** 파주계수와 수심에 따른 주요 시 파주력(H) 변화

수심 (m)	앵커 및 싱커의 파주계수											
	2		4		6		8		10		12	
	H (tonf)	θ (°)	H (tonf)	θ (°)	H (tonf)	θ (°)	H (tonf)	θ (°)	H (tonf)	θ (°)	H (tonf)	θ (°)
5	56.3	3.8	96.3	4.4	126.7	4.6	150.6	4.8	169.9	4.8	185.9	4.9
10	48.5	9	75.3	9.6	92.6	9.8	104.8	9.9	113.7	9.9	120.6	10
15	42.3	14.3	61.2	14.8	72.2	15	79.3	15.1	84.3	15.2	88	15.2
20	37.1	19.8	50.9	20.3	58.2	20.5	62.7	20.6	65.8	20.6	68	20.7
25	32.7	25.5	42.7	26	47.7	26.2	50.7	26.3	52.7	26.3	54.1	26.3
30	28.6	31.7	35.9	32.1	39.4	32.2	41.4	32.3	42.7	32.4	43.6	32.4

\*1 tonf = 1,000 kgf = 9,800 N

이 커짐에 따라 싱커의 수직항력이 작아져 파주력은 작아진다. 해저 파주계수는 정확히 알 수 없으나, 서해 일반적인 저질(펄)을 고려하였을 때 파주계수는 3에서 10의 범위를 가지는 것으로 알려져 있다.

Table 3는 Table 1의 상세정보를 적용하여 파주계수가 2, 4, 6, 8, 10, 12인 경우에 대해 수심 변화에 따른 파주력(H)을 계산한 결과이다. 일반적인 저질에서 앵커와 싱커의 파주계수가 8~12 정도이다. 그렇다면 수심이 10 m - 20 m일 때, 주요 발생 한계 파주력은 62.7 tonf - 120.6 tonf 수준이다. 실제 해당 해역의 조수 간만의 차는 10 m 수준에 이르고, 파고에 의해 순간적인 수심 증가 효과가 발생하는 것을 감안하면 수심의 범위는 유동적인 범위로 산정하는 것이 안전하다. 앞서 Table 2에서 초강력 등급에서 외력의 범위는 56.9 tonf 이상으로 산출되었으므로 주어진 선박은 초강력 태풍에서 주요 가능성이 있는 것으로 판단되며, 해당 규모의 태풍 내습 시 피항이 권고된다.

#### 4. 결론

태풍과 같은 극한 상황에서 묘박 중인 선박의 안정성을 예측하고 주요 상황을 대비하기 위해 본 논문에서는 (1) 바지형 선박에 작용하는 여러 가지 외력을 계산하고, (2) 현수선 방정식을 바탕으로 도출된 파주력을 계산하고, (3) 사례를 들어 묘박의 안정성을 분석하였다.

일반적으로 묘박에서 고려하는 힘은 바람에 의한 풍압력, 유속에 의한 유압력, 파랑에 의한 표류력이다. 본 연구에서는 외력의 3가지 요소인 풍속, 유속, 파고의 연관성에 주목하였다. 문헌 연구를 통해 유속은 풍속의 2% - 3%인 사실을 확인하였고, 사례분석에서는 보수적으로 유속은 풍속의 3%를 적용하여 유압력을 계산하였다. 또한 풍속과 파고 역시 밀접한 관계를 가진 것으로 알려져 있으며, 태풍의 등급에 따른 풍속과 파고 지표를 준용하여, 사례분석에서는 파

고를 풍속의 10 %로 적용하였다. 이로부터 주요 외력, 또는 원인이 되는 외력만으로 전체 외력의 세기 추정 가능성이 확인하였다.

또한, 실증적인 사례를 들어 묘박의 안정성을 분석하였다. 대한민국 해안에 정박해 있는 바지형 선박의 상세정보를 바탕으로 태풍의 등급에 따른 외력을 산출하였다(Table 2 참조). 외력을 구성하는 힘은 풍압력, 유압력, 표류력 3가지를 모두 고려하였다. 이들 세 가지 힘은 사실상 같은 방향으로 작용하지 않을 것이나 재난 상황에서 피항 여부를 판단하기 위해 보수적으로 모두 한 방향으로 작용할 경우를 가정하여 외력의 합력을 추산하였다. 추산 결과, I~V 등급 태풍에 대해 각각 5.65 tonf, 12.2 tonf, 21.3 tonf, 37.8 tonf, 56.9 tonf 이상의 외력이 작용할 것으로 추정되었다. 한편, 선박의 상세정보를 바탕으로 앵커의 파주계수와 수심에 따른 파주력 변화를 산출하였다(Table 3 참조). 이들 값의 비교를 통해 외력이 파주력을 넘어서는 순간인 주요 위험성이 있는 태풍의 강도를 찾을 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Jung, C.-H.; Kong, G.-Y. A Study on the Development of Anchoring Manual for T.S. HANBADA, J. Kor. Soc. Marine Env. Safety, 15(1), 2009, 49-55.
- [2] Lee, Y.-S.; Jung, Y.-C.; Kim, S.-W.; Yun, J.-H.; Bae, S.-H.; Guyen, P. A Study on the Limit of Anchor Dragging for Ship at Anchor(I), J. Navig. Port Res. 2005, 29, 357-363.
- [3] Jung, C.-H.; Kong, G.-Y.; Bae, B.-D.; Y.-S. Lee. Analysis on the Pattern of Dragging Anchor in Actual Ship, J. Navig. Port Res. 2009, 33, 505-511.
- [4] Jung, C.-H.; Lee, Y.-S.; Kim, J.-S.; Kong, G.-Y. A Study on the Holding Power Coefficient of AC-14 type and ASS type Anchor in Actual Ships, J. Navig. Port Res. 2011, 35, 613-618.
- [5] Jung, C.-H.; Kong, G.-Y. A Study for the Evaluation of the Force by the Wind on the Ship at Anchoring, Korean Soc. Mar. Environ. Saf. 2009, 15, 223-228.
- [6] Fujiwara, T.; Ueno, M.; Nimura, T. Estimation of Wind Forces and Moments Acting on Ships. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1998, 1998.183: 77-90.
- [7] Froude, W. The Resistance of Ships. US Government Printing Office, 1888.
- [8] Froude, W. The Papers of William Froude 1810-1879, The Institution of Naval Architects, London, 1955.
- [9] FROUDE, R. E. On the "Constant" System of Notation of Results of Experiments on Models. In: TINA. 1888.
- [10] Lee, C.-E. Ship Design. 2014. Chungmoongak. Republic of Korea, p. 485.
- [11] Hirano, M. The Application of Maneuvering Study to Ship's Design. The Society of Naval Architecture of Japan, 1995, 48-50.
- [12] Remery, G. F. M.; Van Oortmerssen, G. The Mean Wave, Wind and Current Forces on Offshore Structures and Their Role in the Design of Mooring Systems. In: Offshore Technology Conference. OnePetro, 1973.
- [13] Kudryavtsev, V.; Shrira, V.; Dulov, V.; Malinovsky, V. On the Vertical Structure of Wind-driven Sea Currents. Journal of Physical Oceanography, 38, 2121-2144, 2008.
- [14] Chang, Y.-C.; Chen, G.-Y.; Tseng, R.-S. et al. Observed Near-surface Currents under High Wind Speeds. Journal of Geophysical Reserach, 117, C11026, 2012, doi: 10.1029/2012JC007996
- [15] Chang, Y.-C.; Chu, P. C.; Centurioni, L. R.; Tseng, R.-S. Observed Near-surface Currents under Four-super Typhoons. Journal of Marine Systems. 139, 311-319, 2014.
- [16] Fan, S.; Zhang, B.; Perrie, W.; Mouche, A.; Liu, G.; Li, H.; Wang, C.; He, Y. Observed Ocean Surface Wind and Mixed Layer Currents under Tropical Cyclones: Asymetric Characteristics. Journal of Geophysical Research: Ocean, 127, e2021JC017911. 2021.
- [17] Lodise, J.; Özgökmen, T.; Griffa, A.; Berta, M. Vertical Structure of Ocean Surface Currents under High Winds from Massive Arrays of Drifters. Ocean Sci. 15, 1627-1651, 2019.