



Received: 2023/01/16
Revised: 2023/01/29
Accepted: 2023/02/24
Published: 2023/03/31

***Corresponding Author:**

Jeongil Shin

Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute

61, Yeouidaebang-ro 16-gil, Dongjak-gu, Seoul, 07062, Republic of Korea

Tel: +82-2-2079-1753

E-mail: jishin@add.re.kr

함정의 선체 침하현상 (Squat)에 관한 연구

A Study on the Naval Ship Squat

신정일^{1*}, 김태현²

¹해군중령/(재)국방과학연구소 부설 국방신속획득기술연구원, 함정기술팀, 소원

²해군대령/(재)국방과학연구소 부설 국방신속획득기술연구원, 함정기술팀, 팀장

Jeongil Shin^{1*}, Taehyun Kim²

¹CDR, ROK Navy/Research Officer, Naval Ship Technology Support Team, Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute

²CAPT, ROK Navy/Team Manager, Naval Ship Technology Support Team, Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute

Abstract

본 논문에서는 선박 좌초의 주요 원인 중의 하나인 선체 침하현상(Squat)과 개방된 해역과 운하에서 선체의 침하량을 계산하는 방법에 대해 알아보았다. 이를 토대로 우리 해군의 주요 함정형태별 침하량을 예측하였다. 함정 운용요원을 위해 선체 침하현상을 인지하고 조치할 수 있는 방법을 제시하였고 우리 해군교범에 이를 반영하는 것을 제안하였다.

This study was conducted to understand what ship squat is and how to predict maximum squat in open water conditions and in confined channels. Based on short-cut formulae the ROK naval ship's maximum squat are gained. For Naval ship handler, the method on how to recognize naval ship squat and how to reduce the danger of grounding due to naval ship squat were shown. The result was suggested to be reflected on ROK navy manuals and documents.

Keywords

선체침하(Squat), 좌초(Grounding)
천해(Shallow Water), 함정(Naval Ship),
방향비척계수(Block Coefficient)

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 한국해군과학기술학회 동계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

2021년 3월 4,000 TEU급 컨테이너선 에버기븐호가 수에즈 운하에 좌초되었다. 400미터에 이르는 선박이 운하를 가로막음으로써 복구되기까지 11일 동안 369척의 선박의 운송이 차질을 빚었으며 사건의 원인조사와 배상문제는 1년이 지난 지금도 여전히 진행 중이다.

선박의 좌초(grounding)는 비단 상선에 국한되는 것은 아니다. 2017년 1월 미 해군 순양함 Antietam(CG 54)은 도쿄 만에 좌초되어 프로펠러 손상사고를 당했고, 2009년 5월 미 해군 순양함 Port Royal(CG 73)은 하와이 근해에서 좌초되어 약 200억 원이 소요되는 대대적인 수리를 해야 했다.

군함의 좌초는 운항의 지연, 유류 유출로 인한 환경손상은 물론 군함 특성상 선박의 기선(base line)보다 하부에 있는 장비 즉, 음탐기, 수중통신기, 프로펠러 등이 다수 존재하여 고가의 장비가 손상될 가능성이 크며 해양작전의 공백 등 국가 안보상의 심각한 영향을 미치기 때문에 좌초의 위험이 있는 구역에서 함정을 운용할 때에는 특별한 주의가 필요하다.

본 논문에서는 선박 좌초의 주요 원인 중의 하나인 선체 침하현상(squat)에 대해 알아보고 선체 침하량을 계산하는 방법과 주요 함정 형태별 침하량을 예측하였다. 또한 선체 침하현상을 인지하고 조치할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 선체 침하현상(squat)

선체 침하현상은 선박이 천해에서 이동할 때 선체 하부와 해저면과 사이의 유속이 증가함에 따라 베르누이의 법칙에 의해 압력이 떨어지고 결국 선체가 원래의 흘수보다 다소 가라앉는 현상이라고 정의할 수 있다.

선체 침하현상으로 인한 좌초의 가장 유명한 사례는 1992년 8월에 발생한 유람선 Queen Elizabeth 2호 사건이다. 당시 사고 해역의 수심은 조수의 영향을 포함하여 12.2 m이고 선박의 흘수는 피트 9.7 m로 해저면과 선저 사이에 약 2.5 m의 여유가 있어 운행 가능한 조건이었으나, 최대 2.5 m에 이르는 선체 침하현상으로 인해 좌초되었다.

Barrass and Derrett[2]에 따르면 선체 침하현상은 여러 실험과 경험을 토대로 얻은 다음의 계산식으로 예측할 수 있다.

- 개방된 해역에서 H/T 가 1.1에서 1.4 사이일 때:

$$\text{최대 선체 침하량(m)} = \frac{C_b \times V_k^2}{100} \quad (1)$$

- 폭이 제한된 운하에서 S 가 0.1에서 0.265 사이일 때:

$$\text{최대 선체 침하량(m)} = \frac{C_b \times V_k^2}{50} \quad (2)$$

여기서, C_b : 방형비척계수,

V_k : 대수속력(knots),

H : 수심(m),

T : 등흘수(even-keel) 상태일 때의 흘수(m),

S : blockage factor, 운하의 폭×깊이와 선박의 폭×흘수의 비.

식 (2)는 폭이 제한되어 있는 환경에서의 침하량을 나타낸 것으로 폭의 제한이 없는 환경의 식 (1)에 비하여 2배 정도의 침하량이 산출된다. 하지만 파나마 운하, 수에즈 운하, 말라카 해협 등 일부 폭이 제한된 환경에서 우리 군함의 제원을 대입하여 blockage factor(S)를 구하면 대부분의 운하에서 blockage factor가 0.265를 초과하여 식 (2)를 적용할 수 없다. 또한 Table 1의 운하별 최대 운항 가능한 선박의 크기를 보았을 때에도 우리 함정이 운하에서 이동이 제한될 것이라 보이지 않으므로 식 (2)는 본 논문에서 고려하지 않기로 한다.

일반적으로 Fig. 1의 해역과 같은 천해에서 함정을 운행할 때 선체 침하량을 구하기 위하여 식 (1)을 사용하는데, 수식을 보면 알 수 있듯이 최대 선체 침하량은 선박의 속도가 높을수록, 선박의 방형비척계수(C_b)가 클수록, 수심이 얕을수록 크게 나타난다. 따라서 군수지원함, 강습상륙함 등의 대형 함정을 함정의 흘수의 1.4배 이내 수심에서 운용할 때에는 선체 침하현상을 반드시 염두하여 조합해야 할 것이다.

Table 1. Maximum ship sizes for Panama and Suez Canals, Strait of Malacca

Canal	Length (m) × width (m) × draft (m)
Panama Canal Max	290.0 × 31.8 × 11.9
New Panama Canal Max	360 × 48.3 × 15.0
Suez Canal Max	(unlimited) × 49.2 × 19.8
Strait of Malacca Max	393.6 × 57.9 × 24.6

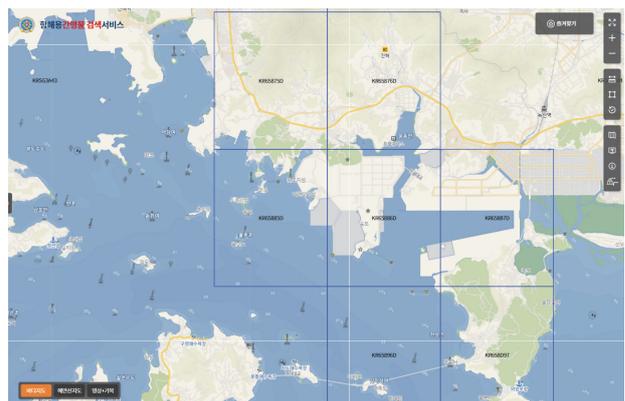


Fig. 1. Nautical chart for neighboring area of Jinhae and Masan Harbor

3. 우리 해군 함정의 선체 침하량 예측

해군 함정의 선체 침하량을 계산하기 위해서는 먼저 방형비척계수(C_b)를 알아야 한다.

$$C_b = \frac{\text{배수용적}(m^3)}{\text{선박의 길이}(m) \times \text{폭}(m) \times \text{흘수}(m)} \quad (3)$$

Table 2는 함정의 종류별 방형비척계수(C_b)를 나타낸다. 우리 해군 함정의 방형비척계수(C_b)를 명시하지 않았으나 이와 유사하며 더욱 정확한 값은 기본설계 또는 상세설계 보고서에 나와 있으니 참고하면 된다.

Table 2. Block coefficient

Ship class	Block coefficient (C_b)
Frigate	0.45 - 0.50
Destroyer	0.50 - 0.60
LHA/LHD, aircraft carrier	0.60 - 0.65
Logistic support ship	0.65 - 0.75

먼저 개방된 해역에서 수심과 함정 흘수의 비(H/T)가 1.1에서 1.4 사이일 때, 식 (1)을 적용하여 함형별 선체 침하량을 함속 최소 5 kts에서 최대 20 kts까지 나타내면 Table 3와 같다.

Table 3. Maximum squat for open water conditions with H/T of 1.1 to 1.4 and V_k of 5 kts to 20 kts

Ship class	Max. squat (m)
Frigate	0.2 - 1.9
Destroyer	0.2 - 2.2
LHA/LHD, aircraft carrier	0.2 - 2.5
Logistic support ship	0.2 - 2.8

위 결과를 보면 알 수 있듯이, 5 kts 이하의 저속에서 대부분의 함정은 0.2 m 이하의 선체 침하를 겪게 되지만, 대수속력이 20 kts까지 이르게 되면 증가할수록 함형에 따라 약 1.9 m에서 2.8 m까지의 선체 침하를 겪게 됨을 알 수 있다. 또한 Barrass and Derrett[2]에 따르면 방형비척계수(C_b)가 0.7 이하일 때 선체침하 현상은 선미에서 발생하게 되는데, 기동성을 중요시하는 함정의 특성상 대부분의 함정의 방형비척계수(C_b)는 0.7 이하이므로 함미부분에서 침하가 일어난다고 볼 수 있다.

4. 선체 침하현상의 인지와 조치방법

Barrass and Derrett[2]에 따르면 선체 침하현상은 충분히 인지와 조치할 수 있는 방법이 있다. 먼저 선체침하 현상이 발생하고 있다는 사실을 알 수 있는 몇 가지 정황들을 살펴보면 아래와 같다.

- 선박의 속도가 감소한다. 약 15 %까지 RPM이 감소할 수 있다.
- 선박의 타효가 떨어지고 전술선회경이 증가하는 등 조종성능이 나빠진다. 정지거리가 늘어난다.

- 갑작스러운 진동이 발생하기도 한다.
- 선체 주위에 흙탕물이 일어난다.

천해에서 선체침하 현상을 겪게 되었을 때 가장 중요하고 효과적인 조치는 함정 속력을 줄이는 것이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 선체 침하량은 속력의 제곱에 비례하기 때문이다.

그러나 더욱 중요한 것은 선체침하 현상으로 인한 좌초를 예방하는 것이다. 따라서 익숙하지 않은 천해를 이동하는 함정은 등흘수(even-keel) 상태를 유지하여 함미 부분의 추가적인 침하를 막아야 하며 함정의 속도와 조종성능, 함수·미 흘수, 부유물 유무 등을 면밀하게 관찰하여 지나친 선체 침하로 인한 좌초를 예방하여야 할 것이다.

우리 해군은 함정을 운용하는 요원에게 필요한 이론과 조함절차 등을 담아 ‘조함술과 안전항해’라는 참고도서를 발간하였다. 또한 함정별로 ‘○○함 운용’이라는 세부운용교범을 발간하여 함정별로 특화된 조함술 등 함정 운용에 필요한 제반 절차와 지침을 제공하고 있다. ‘조함술과 안전항해’에서는 천해에서의 선체침하 현상에 관련 다음과 같이 기술하고 있다.

제6절 특수 상황에서의 항해술

3. 제한수역에서의 항해

- 함수·미 흘수를 조정하여 등흘수 상태를 유지하고 함미 침하현상을 최소화로 생기게 한다.

위 교범의 내용에 추가하여 “천해를 이동하는 함정은 등흘수 상태를 유지하여 함미 부분의 추가적인 침하를 막아야 하며 함정의 속도와 조종성능, 함수·미 흘수, 부유물 유무 등을 면밀하게 관찰하여 선체 침하로 인한 좌초를 예방하여야 한다”, “천해에서 과도한 선체 침하현상이 발생한 경우 즉시 함정의 속력을 줄여야 한다” 등의 문구를 추가할 것을 제안한다.

5. 결론

본 연구에서는 선체 침하현상에 대해 알아보고 선체 침하량을 계산하는 방법과 주요 함정 형태별 침하량을 예측하였다. 그 결과 함형에 따라 고속(약 20 kts)에서 약 1.9 m에서 2.8 m까지의 선체 침하를 겪게 됨을 알 수 있었다.

또한 선체 침하현상은 선속, 조종성능, 흘수, 부유물 등을 관찰함으로써 인지 가능하고 과도한 선체 침하현상이 발생 시에는 함속을 감소시킴으로써 조치할 수 있다는 결론을 도출하였다.

참고문헌

- [1] Michael Balistreri, Ridge Alkonis, "Correctly Calculating Ship Squatting," Proceedings, U.S. Naval Institute, Nov. 2021.
- [2] C. B. Barrass, D. R. Derrett, "Ship Stability for Masters and Mates 7th ed.," Butterworth-Heinemann, Boston, 2012.
- [3] 항해용 간행물 검색 서비스, www.khoa.go.kr/chartindex/#, 국립해양조사원, 2022.
- [4] T. Mason Hamilton, "Panama Canal expansion will allow transit of larger ships with greater volumes," www.eia.gov/todayenergy/detail.cfm?id=18011, U.S. Energy Information Administration, 2014.
- [5] 대한민국 해군 2함대사령부, "조함술과 안전항해", 발간등록번호 37-982M0JY-016120-01, 국군인쇄창, 2018.
- [6] 대한민국 해군본부, "군수지원함(AOE-II) 운용" 등, 발간등록번호 37-982M000-016181-01, 국군인쇄창, 2018.