

선종 변화를 고려한 의장수 계산식의 적합성 검증

구남국¹·하솔^{2,†}·이규열²·양진혁³·배재류⁴·이수호⁴
동의대학교 조선해양공학과¹
서울대학교 공학연구소²
서울대학교 조선해양공학과³
(주)대우조선해양⁴

Verification of Equipment Number Equation Considering New Types of Ships

Namkug Ku¹·Sol Ha^{2,†}·Kyu-Yeul Lee²·Jin-Hyeck Yang³·Jae-Ryu Bae⁴·Soo-Ho Lee⁴
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-eui University¹
Seoul National University Engineering Research Institute²
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University³
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., LTD.⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The purpose of this research is a verification of the current equation for calculating equipment number and a suggesting a method for development of a rational new equation. The equation for calculating equipment number consists of total surface area of a ship that fluid resistance act on. Equipment number determines the specification of anchoring and mooring equipment such as anchor weight, anchor chains length and diameter, the number, length and breaking load of tow lines and mooring lines. The equation for equipment number calculation is basically derived considering x, y components of a wind and current force acting on a ship. But this equation is only based on a tanker, which was main type of ships when the equation was derived. Therefore, verification of the equation is required for other types of ships, such as container carrier, LNG carrier, etc. Therefore, in this research, we find out the equation for equipment number calculation should be revised for other types of ships especially the container carrier, by comparing wind and current force acting on a ship to holding force of an anchor and anchor chains, which are selected based on the equipment number.

Keywords : Equipment Number(의장수), Wind and current force(풍력 및 해류력), Mooring force calculation(계류력 계산)

1. 서론

선박을 해상에 이동 없이 고정시키기 위해서는 앵커와 앵커체인, 로프 등의 의장품이 필요하다. 한편, 이러한 의장품의 파지력과 절단하중은 해류로부터 작용하는 수압과 바람으로부터 작용하는 풍압 등의 유체 저항력에 의해 결정이 된다.

의장수(equipment number)는 유체 저항력이 작용하는 선체의 총 걸면적 넓이를 의미하는 값이다. 계선 및 계류 시에 필요한 앵커의 중량, 앵커체인의 길이와 지름, 예인삭(tow line)과 계류삭(mooring line)의 개수, 길이 및 절단하중 등이 의장수로 결정된다.

현재의 의장수 계산식은 수 십 년 전에 개발된 것이다. 그동안 세부적인 보완과 개정은 여러 차례 있어왔지만 기본적인 계산식의 구조에는 변화가 없었다. 하지만 해상환경의 변화와 초대형

컨테이너선, LNGC, 드릴쉽 등의 다양한 선종 개발 그리고 새로운 기술의 출현 등으로 인해 지금의 의장수 계산식이 그 적합성을 유지하고 있는지에 대한 검증이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구를 통해 기존 의장수 계산식의 적합성을 검증하고, 새로운 계산식을 도출할 수 있는 방법에 대하여 제시하고자 한다.

2. 의장수 계산식 소개

의장수는 수면하부의 접수표면적과 수면상부에 드러난 형상에 작용하는 풍압면적에 대한 수치를 정의한 것으로 계선 및 계류설비 결정의 표준산식을 제공해 준다. 현재 IACS 소속 KR 및 주요 해외 선급이 동일한 의장수 계산식과 의장수 테이블을 사용하고 있다 (ABS 2012).

본 과제에서 연구대상으로 하고 있는 의장수 계산식은 다음과 같다.

$$E = \Delta^{\frac{2}{3}} + 2.0 \cdot Bh + 0.1 \cdot A \quad (1)$$

첫 번째 항의 $\Delta(2/3)$ 은 수면하부의 해류력(current force)를 받는 면적, 즉 접수표면적(wetted surface area)에 비례하는 값을 의미한다. Δ 는 하기만재흡수선에서의 배수량으로서 3분의 2 승을 함으로서 면적의 차원으로 바꾼 것이다.

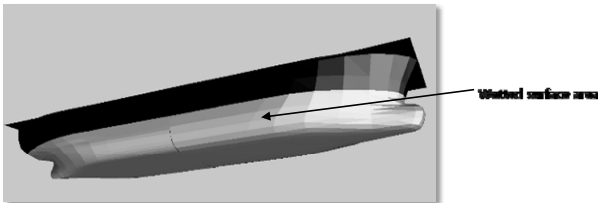


Fig. 1 Wetted surface area on which current force is exerted

두 번째 항의 Bh 는 수면상부의 선체 종방향 풍력(wind force)을 받는 면적, 즉 종방향 투영면적에 비례하는 값을 의미한다. 한편, Bh 의 B 는 선체의 폭이고 h 는 다음과 같이 정의된다.

$$h = f + h' \quad (2)$$

여기서 f 는 선체 중앙의 선측에서 만재흡수선으로부터 최상층 전통갑판 상면까지의 수직거리이고, h' 는 최상층 전통갑판으로부터 너비가 $B/4$ 를 넘는 선루(superstructure) 또는 갑판실(deck house) 중 가장 높은 위치에 있는 것의 꼭대기까지의 높이이다.

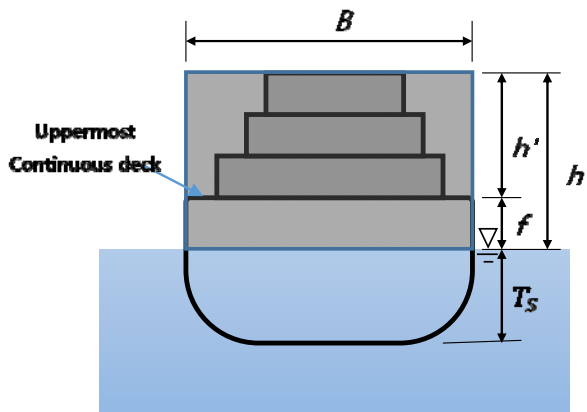


Fig. 2 Second term of the equation for calculating equipment number: Bh

마지막으로 세 번째 항의 A 는 수면상부의 선체 횡방향 풍력을 받는 면적, 즉 횡방향 투영면적에 비례하는 값을 의미하며, 다음과 같이 계산된다.

$$A = fL + \sum h''l \quad (3)$$

여기서 $\sum h''l$ 은 너비가 $B/4$ 를 넘고 높이가 1.5m 이상인

선루, 갑판실 또는 트렁크(trunk)의 높이 h'' 와 그 길이 l 을 곱한 것의 합이다.

3. 풍력 및 해류력 계산식

3.1 풍력 계산

의장수 계산식의 의미를 파악하기에 앞서 우선 정박 시 선박이 받는 저항력에 대하여 살펴 보자. OCIMF(Oil Companies International Marine Forum)에서는 풍력 및 해류력을 계산하는 식과 유조선(tanker)에 대한 풍력 및 해류력 계수 값을 제공하고 있다. 바람이 θ 의 각도로 작용할 때 OCIMF의 풍력을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$F_{w,x} = \frac{1}{2} \cdot C_{w,x,\theta} \cdot \rho_w \cdot v_w^2 \cdot A_T \quad (4)$$

$$F_{w,y} = \frac{1}{2} \cdot C_{w,y,\theta} \cdot \rho_w \cdot v_w^2 \cdot A_L \quad (5)$$

식 (4)은 종방향 풍력 대한 식이고, 식 (5)는 횡방향 풍력에 대한 식이다. 한편, 해류를 계산하는 식은 다음과 같다. θ 의 크기는 아래의 그림과 같이 선미 쪽을 0° 로 하여 반시계방향으로 측정된다.

A_T 는 수면상부의 정면투영면적이고, A_L 는 수면상부의 측면투영면적이다.

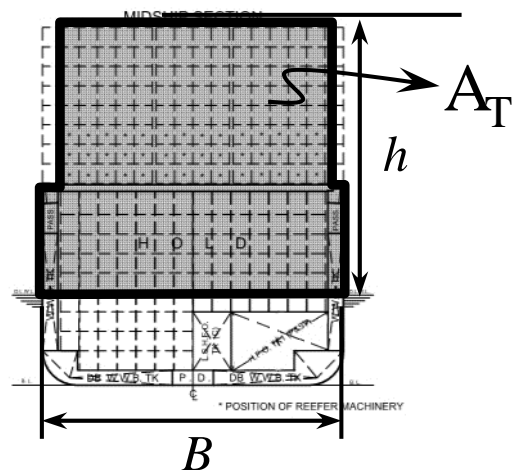


Fig. 3 Transverse projection area above the water line

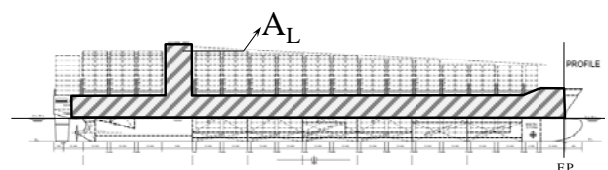


Fig. 4 Lateral projection area above the water line

위의 식에서 사용되는 계수 C 는 OCIMF에서 제공하는 문서 (OCIMF, 1994; 2008)에 잘 나타나있다. $C_{w,x,\theta}$ 는 θ 에서의 종방향 풍력 계수이다. OCIMF에서 제공하는 유조선에 대한 종방향 풍력 계수 그래프는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 cylindrical bow 그래프와 conventional bow 그래프로 나뉘어지는 선은 ballast 상태에서의 값을 그리고 다른 선은 full loaded 상태에서의 값을 나타낸다. Cylindrical bow는 U형 선수(U-shaped bow)를, conventional bow는 V형 선수(V-shaped bow)를 의미한다.

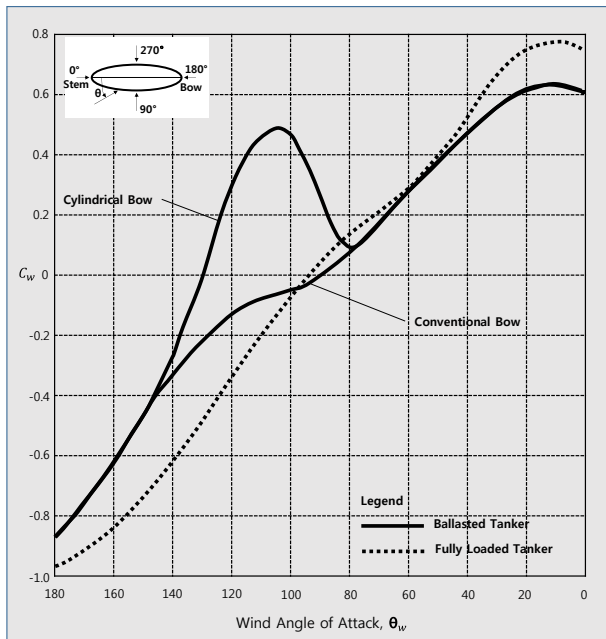


Fig. 5 Longitudinal wind drag force coefficient

$C_{w,y,\theta}$ 는 θ 에서의 횡방향 풍력 계수이다. OCIMF에서 제공하는 유조선에 대한 횡방향 풍력 계수 그래프는 Fig. 6과 같다.

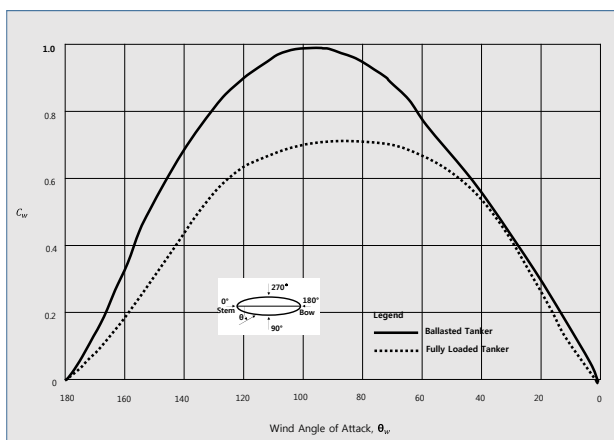


Fig. 6 Lateral wind drag force coefficient

Fig. 6에서 위쪽의 선은 ballast 상태에서의 값을 그리고 아래의 선은 full loaded 상태에서의 값을 나타낸다.

3.2 해류력 계산

해류가 의 각도로 작용할 때 해류력을 계산하는 식은 식 (6)과 같다.

$$F_{c,x} = \frac{1}{2} \cdot C_{c,x,\theta} \cdot \rho_c \cdot v_c^2 \cdot L_{BPT} \quad (6)$$

$$F_{c,y} = \frac{1}{2} \cdot C_{c,y,\theta} \cdot \rho_c \cdot v_c^2 \cdot L_{BPT} \quad (7)$$

$C_{c,x,\theta}$ 는 θ 에서의 종방향 해류력 계수이다. 해류력 계수는 shallow water effect에 의해 수심과 흘수의 비가 작을수록 증가하게 된다. 수심과 흘수의 비가 1.1일 때 OCIMF에서 제공하는 유조선에 대한 종방향 해류력 계수 그래프는 Fig. 7과 같다.

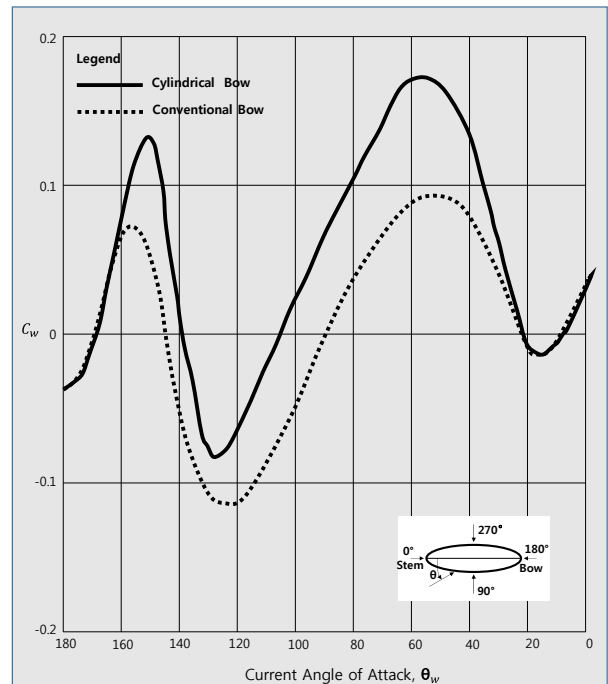


Fig. 7 Longitudinal current drag force coefficient - loaded tanker(WD/T=1.1)

Fig. 7에서 빨간색 선은 cylindrical bow에서의 값을 그리고 보라색 선은 conventional bow에서의 값을 나타낸다. OCIMF에서는 수심과 흘수의 비가 1.1일 때 뿐 아니라 1.2, 1.5, 3.0, 6.0 이상 등에 대해서도 위와 같은 그래프를 제공하고 있다.

마찬가지로 $C_{c,y,\theta}$ 는 θ 에서의 횡방향 해류력 계수이다. 다양한 수심과 흘수의 비율에 대해, OCIMF에서 제공하는 유조선에 대한 횡방향 해류력 계수 그래프는 Fig. 8과 같다.

참고로 해류에 의한 종방향 힘은 선수의 형상에 따라 한가지 수심/흘수비에 대해 두 가지 계수로 구분되기 때문에 다양한 흘수에 대하여 다른 그래프로 표시한 반면, 횡방향 힘은 한가지 수

심/흘수비에 대하여 한가지 계수만 존재하기 때문에 하나의 그래프에 모든 수심/흘수비에 대한 계수가 표시되어 있다.

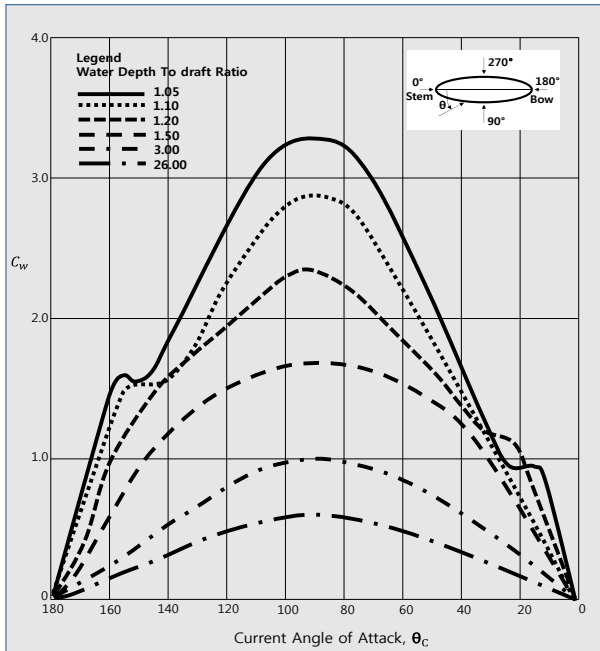


Fig. 8 Lateral current drag force coefficient - loaded tanker

4. 풍력 및 해류력과 앵커의 파지력

현재의 의장수 적합성을 검증하기 위해 의장수로 결정되는 앵커 및 앵커체인의 파지력과 선체가 받는 풍력 및 해류력을 비교해 보았다.

4.1 풍력 및 해류력 계산

먼저 선체에 작용하는 풍력 및 해류력은 식 (4) ~ (7)을 사용하여 계산하였으며, 이 때 가정한 상황은 다음과 같다 (Aghamohammadi, 1900; Blendermann, 1994).

- 해류력은 선박의 정면에서 작용한다고 가정
 - 풍력은 선박의 정면에서 작용한다고 가정
 - Fish tailing instability에 의한 yaw 운동 때문에 선박의 정면에서 약 5° 만큼 기울어진 각도에서 횡방향 풍력이 작용한다고 가정
 - Conventional bow를 가진 유조선의 계수를 사용
 - Full loaded 상태의 계수를 사용
 - 수심과 흘수의 비가 1.1일 때의 계수를 사용: 이 때 계수의 값이 가장 크다. 즉 가장 보수적인 상황을 고려한 것임
- 위의 사항을 고려하여 풍력과 조류력을 식 (8)과 같이 계산하였다.

$$F = F_c + F_w \quad (8)$$

여기서 F_c 는 해류력이고, F_w 는 풍력이다.

한편, F_c 와 F_w 는 위의 가정에서처럼 선박의 정면에서 작용한다고 가정하므로 $F_{c,x,180}$, $F_{c,y,180}$, $F_{w,x,180}$ 을 고려하였다. 또한, 풍력은 해류력 대비 방향 변화가 비교적 심하여 fish tailing instability에 의해 선박의 정면으로부터 약 5° 만큼 기울어진 각도에서 횡방향으로 작용한다고 가정하였으므로 $F_{w,y,175}$ 를 고려하였다. 이를 적용하여 식 (8)을 다시 정리하면 식 (9)와 같다. 여기에서 아래첨자 중 180, 175는 바람이나 해류가 작용하는 입사각을 의미한다.

$$F = F_{c,x,180} + F_{w,x,180} + F_{w,y,175} \quad (9)$$

여기서, $C_{c,y,180} = 0$ 이므로 $F_{c,y,180}$ 은 식 (9)에서 소거되었다. 식 (9)에 식 (4), (5), (6)을 대입하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$F = \frac{1}{2} C_{c,x,180} \rho_c v_c^2 L_{BT} T \quad (10) \\ + \frac{1}{2} C_{w,x,180} \rho_w v_w^2 A_T \\ + \frac{1}{2} C_{w,c,y,175} \rho_w v_w^2 A_L$$

위 식 (10)을 이용하여 유조선 3척, LNG 운반선 2척, 컨테이너 운반선 3척에 대한 풍력 및 해류력의 합(drag force)을 계산하였다. 유조선에 대한 계수 C는 3장에 소개한 그래프를 참조하였고, LNG 운반선과 컨테이너 운반선에 대한 계수 C는 대우조선해양의 협조를 받아 조선소에서 실제 계산에 사용되는 대외비 값을 참조하였으며, 계산 결과는 표 1에 정리되어 있다. 여기에서 v_c 와 v_w 에는 각각 의장수 계산식을 통해 선정된 앵커 및 앵커체인의 사용 조건인 2.5m/s, 25m/s를 사용하였다.

Table 1 Wind and current force(F) exerted on each type of ship

Type of ship		Drag Force F(kN)
Tanker	AFRAMAX	836
	SUEZMAX	870
	VLCC	1,385
LNGC	150K	981
	210K	1,259
Container Ship	9,200TEU	975
	13,050TEU	1,110
	14,000TEU	1,142

4.2 앵커 및 앵커체인의 파지력

앵커 및 앵커체인의 파지력 계산은 한국선급(KR)에서 제공하는 다음과 같은 식을 사용하였다 (KR, 2010).

$$P = K_a W_a + K_c L_c W_c \quad (11)$$

식 (11)의 첫 번째 항은 앵커에 의한 파지력을 의미하고, 두 번째 항은 앵커체인에 의한 파지력을 의미한다. K_a 는 앵커의 파지력 계수, K_c 는 앵커체인의 파지력 계수로서 해저의 상태에 따라 다른 값을 가지며, 이는 표 2에 정리되어 있다.

Table 2 Holding power coefficient for anchor K_a and for anchor chain K_c

	Mud	Hard Mud	Sand-Mud	Sand	Stone-Sand
K_a	2	2	2	3~4	3~4
K_c	0.6	0.6	-	0.75	0.75

W_a 와 W_c 는 각각 앵커의 수중중량, 앵커체인의 미터 당 수중 중량으로서 의장수에 결정되는 앵커 및 앵커체인의 공기 중 중량에 0.869를 곱한 값이다. 여기서 앵커를 이루고 있는 철의 밀도가 $7,874\text{kg/m}^3$ 이고 해수의 밀도가 $1,025\text{kg/m}^3$ 이므로 철원 본래 중량 대비 부력에 의해 감소된 중량은 1 : 0.131이 된다. 이에 의해 앵커 체인의 중량에 0.869를 곱하면 수중 중량이 되는 것이다.

한편, 파지력 계산은 다음과 같은 조건에서 이뤄진다.

- 수심과 흘수의 비가 1.1 : wind and current force 계산 조건과 동일
- 3종의 앵커체인 사용 : 일반적으로 조선소에서 3종 앵커체인 사용
- 앵커 2개의 파지력 계산 : 일반적인 상황
- 진흙에서의 파지력 계수 값 $K_a = 2$, $K_c = 0.6$ 사용 : 이 때의 파지력이 가장 작다. 즉, 가장 보수적인 상황을 고려한 것임.

우선 유조선 3척, LNG 운반선 2척, 컨테이너 운반선 3척에 대한 의장수를 식 (1)을 이용하여 계산하였으며, 계산된 의장수를 참조하여 앵커와 앵커체인을 결정하였다. 그리고 해당 앵커와 앵커체인의 파지력을 식 (11)을 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 표 3에 정리되어 있다.

Table 3 Holding power of anchor and anchor chain for each type of ship (P)

Type of Ship	Equipment Number	Holding Power P(kN)
Tanker	AFRAMAX	4,771
	SUEZMAX	5,444
	VLCC	7,368
LNGC	150K	5,790
	210K	7,101
Container Ship	9,200TEU	7,076
	13,050TEU	8,165
	14,000TEU	8,772

5. 분석 및 결론

5.1 계산 결과 분석

1장부터 4장까지는 현재 사용되고 있는 의장수 계산식의 의미를 알아보고, 의장수에 의해 결정된 앵커 및 앵커체인의 파지력 그리고 선박이 앵커링 중에 받는 힘(drag force)을 계산하였다. 표 4에는 앵커 및 앵커체인의 파지력 P와 선박이 앵커링 중에 받는 힘 F를 표시하였으며 그 비율을 계산하였다.

Table 4 Comparison between holding power (P) and wind and current force (F)

Type of Ship	Equipment Number	Holding Power P(kN)	Drag Force F(kN)	P/F
Tanker	AFRAMAX	4,771	1,123	1.35
	SUEZMAX	5,444	1,291	1.48
	VLCC	7,368	1,385	1.29
LNGC	150K	5,790	1,375	1.40
	210K	7,101	1,809	1.44
Container Ship	9,200TEU	7,076	1,806	1.85
	13,050TEU	8,165	2,059	1.85
	14,000TEU	8,772	2,212	1.94

기본적으로 선박이 받는 힘 F보다 앵커 및 앵커체인의 파지력 P가 더 커야 하므로 그 비율인 P/F는 1 이상이 되어야 하며, 전선종 1.3에서 2.0 사이의 값을 가지는 것을 알 수 있다.

유조선의 경우 P와 F의 비율이 약 1.4에서 1.5 사이로서 일반적인 기계 시스템의 안전계수와 유사함을 알 수 있다. LNG 운반선 역시 유조선과 비교적 유사한 선형을 가진 선박으로서 P/F의 값이 크게 다르지 않다.

그러나 컨테이너 운반선의 경우에는 유조선이나 LNG 운반선과 비교하여 선형이 비대하지 않아서 상대적으로 선박이 받는 힘 F가 작다. 따라서 P/F값이 다른 선종에 비하여 큰 값으로 계산된 것을 알 수 있다. 이는 컨테이너 운반선에 선정된 앵커 및 앵커체인은 타 선종과 비교하였을 때 과도하다는 뜻이다. 즉, 현재 사용되고 있는 의장수 계산 식은 유조선에 최적화 되어 있으며 선형에 다소 차이가 있는 다른 선종에 대해서는 같은 의장수 계산식을 사용하기 보다는 각 선종에 최적화된 의장수 계산식을 사용하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단한다.

5.2 결론

현재 각종 룰에서 사용되고 있는 의장수 계산 식은 유조선을 기준으로 유도된 식이며, 해당 식은 현재까지 크게 변경되지 않았다. 하지만 현재 유조선 이외에 다양한 선종이 개발되고 생산 운항되고 있다. 이에 대하여 본 논문에서는 현재 사용되고 있는

의장수 계산식이 모든 선종에 적합한지 검토해 보았으며, 그 결과 유조선과 다소 차이가 있거나 혹은 새로 개발되는 선종에 대해서는 각 선종에 적합한 의장수 계산식을 개발/사용하는 것이 합리적일 것이다. 본 연구의 성과는 엔지니어링 관점에서 선박의 의장수 설계 최적화 달성이 가능한 아이디어 6건으로 정리되어 특허로 출원되었다.

후 기

본 연구는 (주) 대우조선해양 및 동의대학교의 선종 변화를 고려한 새로운 의장수 계산식의 개발 과제(2014AA442)의 후원으로 진행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

- Aghamohammadi, F. & Thompson, J.M.T., 1990. An Experimental Study of the Large Amplitude Fish-tailing Instabilities of a Tanker at a Single Point Mooring. *Applied Ocean Research*, 12(1), pp.25-33.
- American Bureau of Shipping (ABS), 2012. *Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units*. ABS: New York.
- Blendermann, W., 1994. Parameter Identification of Wind Loads on Ships. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51, pp.339-351.

Korean Register (KR), 2010. *Standard of floating offshore structure*. KR: Pusan.

Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), 1994. *Prediction of Wind and Current Loads on VLCC*. 2nd Edition. OCIMF: Glasgow.

Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), 2008. *Mooring Equipment Guidelines, OCIMF*. 3rd Edition. OCIMF: Glasgow.



구 남 국



하 슬



이 규 열



양 진 혁



배 재 류



이 수 호