

부산항과 감천항 방파제 인접 항로에서 선체에 작용하는 횡압류 현상에 관한 연구

이윤석* · 김철승** · 공길영***

* 한국해양대학교 연구원, ** 목포해양대학교 해상운송시스템학부, ** 한국해양대학교 운항시스템공학부

A Study on the Lateral Force Acting on a Ship in the adjacent Waterway of Busan and Gamcheon Breakwater

Yun-Sok LEE* · Chol-Soung KIM** · Gil-Young Kong***

* Researcher, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

** Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 503-729, Korea

*** Division of Ship Operation Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 항만을 출입항하는 선박의 통항 안전을 확보하기 위해서는 방파제와 같은 항만 시설물의 설계 또는 배치시에는 우선적으로 선박의 조종 성능을 감안하여 교통 흐름이 원활하도록 적절한 항로를 지정하여야 한다. 이 연구에서는 부산항 및 감천항 입항을 위해 방파제 인접 항로에서 일정 침도로 접근하는 컨테이너 선박이 외력인 바람, 조류, 파랑에 의해 선체에 발생하는 횡압류 및 회두 현상을 정량적으로 분석하여, 선속에 따라 외력을 상쇄하기 위해 취해야 할 대응타각을 산출한다. 또한 항후 방파제 설계 및 배치시 고려해야 될 외력하의 선박의 조종 성능 요소를 제한함과 동시에 방파제의 설계와 항로 배치와의 관계에 대하여 고찰한다.

핵심용어 : 횡압류, 방파제 설계, 통항 안전, 항로 배치, 외력, 선박 조종

Abstract: In order to secure the traffic safety especially in the entrance waterway of harbour, it is important that the breakwater and the port facilities should be designed properly considering ship-handling difficulty and traffic flow. In this study, the lateral force acting on ship hull under the external force(wind, current, wave) is investigated quantitatively for the container ship approaching to the Busan and Gamcheon breakwater. The relation of ship-handling difficulty to the breakwater and the arrangement of ship's routine are examined based on the lateral force under the external force. Some of reviews to secure traffic safety on the design of breakwater are discussed.

Key words : Lateral force, Breakwater design, Traffic safety, Arrangement of route, External force, Ship-handling

1. 서 론

일반적으로 선박을 조선함에 있어 항로의 입구 또는 방파제 인근 해역에서는 비교적 흐름의 변화가 강하고 빠른

* 정회원, lys@bada.hhu.ac.kr

** 정회원, cskimu@mmu.ac.kr

*** 정회원, gykong@hhu.ac.kr

조류, 파랑, 바람 등과 같은 외력들의 영향을 받기 쉽다. 이러한 해역에서의 통항 안전을 확보하기 위해서는 일반적으로 해상 교통량의 집중이 예상되는 항로 입구에서의 항로 폭을 항로 내측의 항로 폭 보다 더 넓도록 설계하여야 하고, 방파제와 같은 항만 시설물은 지역적 환경적 상황에 관한 분석과 선박의 조종 성능에 미치는 영향을 평가하여 신중히 결정하여야만 한다.

특히 방파제, 호안 또는 파도 흡수장치와 같은 항만 시

설물은 일단 설계 및 배치가 완료되면 재배치 및 개량이 어렵기 때문에 초기 설계에서부터 조류, 바람, 파도 등과 같은 외력하에서 선박의 안전 통항을 충분히 고려하여야 하고, 향후 항만의 확장 및 유지 보수 등을 종합적으로 감안하여 최적의 배치가 되도록 노력해야 한다.

우리나라 항만 개발의 경우는 항만을 이용하는 주체가 선박임에도 불구하고 방파제 설계시에는 선박의 조종 성능 보다는 항만을 파랑으로부터 보호하기 항만의 정온도를 역할을 우선적으로 고려하고 있어 방파제 공사가 완료된 후에 항로 지정을 하고 있는 실정이다. 다시 말하면 파도로부터 보호되는 항만이란 파도가 들어오기 어려운 형태로 방파제가 설계되므로 결국은 선박의 입항이 그만큼 어려워진다고 할 수 있다.

현재 방파제의 설계에 따른 항로 폭을 결정함에 있어서는 해상교통량의 관계를 토대한 연구 결과(박영수, 2003)가 있으나 선박의 조종 성능 측면에서 방파제의 영향을 정량적으로 평가한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구는 이와 같은 실정을 토대로 대형 선박이 부산항과 감천항 방파제를 통과하기 위해서 일정 침로로 접근할 경우 외력에 의한 압류 및 회두 현상을 정략적으로 파악하여 현행의 방파제와 항로 배치에 대한 객관적인 평가와 함께 방파제 인근 구역에서의 일어나는 조선상의 제약 조건 등에 대해 검토하고자 한다. 또한 향후 방파제와 같은 항만 시설물의 설계시 해상교통량 분석을 통한 항로 배치와 함께 선박의 조종 성능 요소로서 반드시 평가해야 될 요소들을 제안하고 이에 대해 고찰하고자 한다.

2. 외력에 따른 압류 및 타압력 계산

선박이 바람, 조류, 파랑과 같은 외력하에서 항해시에는 외력이 작용하는 방향과 크기에 따라 선체에 미치는 영향이 다르지만 일반적으로 선체에 나타나는 영향으로는 저항 증가로 인한 선속의 감속, 압류 현상과 선수 회두 현상 등을 들 수 있다. 통상적으로 선박은 바람, 조류, 파랑에 의한 압류되면서 항주하기 때문에 선박이 진행하고자 하는 방향과 실제 항적은 그림 1과 같이 반드시 일치하지 않는다. 이러한 압류 현상은 바람으로 인한 풍압차(風壓-Lee Way), 조류에 의한 유압차(流壓-Tide Way), 파랑에 의한 표류력(漂流力-Drifting force)가 가장 큰 원인으로 작용하며, 이에 대해 선박 운항자는 코스를 유지하기 위해 적절한 타각에 의한 타압력(舵壓力-Rudder force)를 이용하여 균형을 취하면서 항행하게 된다.

본 연구에서는 외력에 대한 일반화를 위해 선박의 조종 성능 분야에서 주로 취급하는 선체와의 상호 간섭을 배제하고, 외력에 대한 압류 현상을 독립적으로 가정하면 선체 압류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

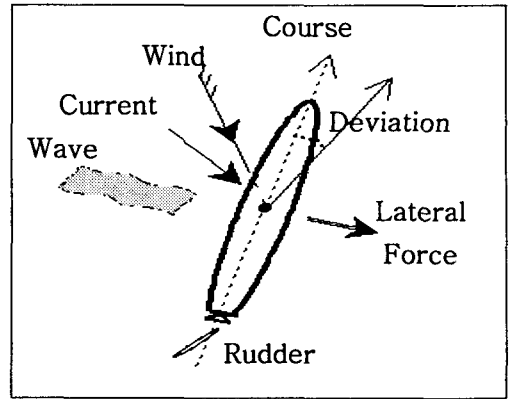


Fig. 1 Lateral drifting force due to the external force

$$F_y = Y_a + Y_w + Y_c + Y_\delta \quad (1)$$

Lateral force = Wind + Wave + Current + Rudder

선체에 외력이 작용할 경우 만약 선박이 대응타각을 적절히 취하지 않으면 외력 방향과 반대 방향으로 계속 압류되어 위험한 상태를 초래하게 된다. 감천항 방파제 인접 항로상에서 선박의 압류 현상에 대한 시뮬레이션 일례를 그림 2에 나타낸다. 시뮬레이션의 구체적인 외력 조건에 대해서는 2.1 절에서 기술한다.

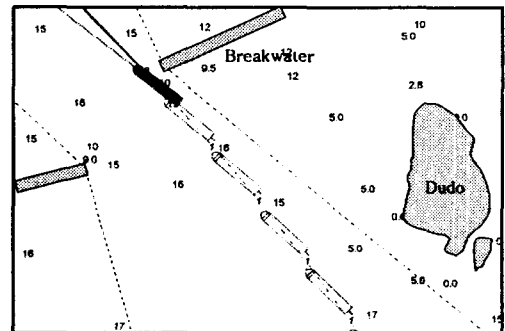


Fig.2 Entering simulation of Gamcheon port under the external force

2.1 부산항 및 감천항의 자연적 조건 및 대상 선박

부산항 및 감천항 방파제 인접 항로상에서 입항을 위해 일정 침로(부산항 309°, 감천항 318°)로 항해하는 선박을 대상으로 실제 부산항 및 감천항의 자연적 환경을 토대로 압류를 계산한다. 대상 선박은 컨테이너 선형으로 일반적인 제원은 표 1과 같다. 부산지방의 풍향, 풍속 및 파랑에 대한 부산기상청 관측 자료에 따르면 일평균풍속은 3.8m/sec, 풍향별 출현율은 NE 방향이 가장 높은 11.4%이며, 부산의 연평균 파고는 1.08m로 나타났다. 따라서 계산에 이용한 풍속은 3m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s를 고려하였고, 풍향은 횡압류 현상이 가장 크게 발생 할 수 있

는 방향인 NNE(춘계 및 추계), SSW(하계)로 했다. 조류 방향 및 크기에 대해서는 부산항에서 가덕도까지를 나타낸 W202(WGS-84) 차트에 표시된 조류(부산항: 낙조류 1.0knot, 창조류 1.1knot 감천항: 낙조류 1.7knot, 창조류 1.8knot)로 설정했다. 파고에는 1.08m를, 파향은 풍향 방향과 동일하게 설정하였다.

Table. 1 Principal dimensions of model ship

Type	A model (Busan)	B Model (Gmacheon)
Length L (m)	241.0	121.4
Breadth B (m)	32.2	20.8
draft d (m)	10.2	6.9
Rudder Area ration Ar/Ld	1/50	1/50
Rudder aspect ratio	1.75	1.833
Longitudinal wind Area (A_L) (m^2)	3441.0	1300.9

2.2 바람에 의한 풍압력(Y_a) 및 풍압모멘트(N_a)

컨테이너선과 자동차운반선과 같이 상부 구조물이 비교적 큰 경우에는 바람의 영향이 매우 현저히 작용한다. 바람에 의한 풍압력 및 풍압 모멘트에 관한 식은 일반적으로 Hughes의 실험식이 많이 이용되나, 여기서는 부산항 및 감천항의 풍향이 입항 선박에 대해 거의 정횡 방향이므로 풍압횡력계수와 수면상의 풍압면적과 풍속, 풍향 등의 요소를 변수로 다음과 같이 표현된 식을 이용한다.

$$Y_a = \frac{1}{2} \rho_a C_{ya} A_L v_a^2 \quad (2)$$

$$N_a = \frac{1}{2} \rho_a C_{ma} A_L v_a^2 L \quad (3)$$

단, A_L : 측면풍압면적, C_{ya} : 풍압횡력계수

C_{ma} : 풍압모멘트계수, v_a : 풍속,

ρ_a : 공기밀도 L : 선체 길이

계수에 대해서는 복잡한 상부 형상에 대한 이론적인 추정치가 곤란하기 때문에 풍동실험 결과 또는 유사 선형에 대한 특성(윤점동, 1996)을 바탕으로 추정된 값을 이용하였다.

바람에 의한 부산항 및 감천항의 횡풍압력을 그림 3에 풍속에 따라 제시한다. 그림 3으로부터 풍속에 따른 풍압력은 NE 방향의 경우가 SSW 보다 크게 나타났으며, 부산항에 입항하는 A 선박이 상대적으로 풍압면적이 크기 때문에 감천항 입항 선박보다 크게 작용함을 알 수 있다.

풍압모멘트는 선박의 풍압 중심점에 따라 달라질 수 있으나 입력된 선수미 방향에 대해 90도 전후의 정횡으로 풍압모멘트계수가 0에 가까워 바람에 의한 회두현상은 거의 일어나지 않았다.

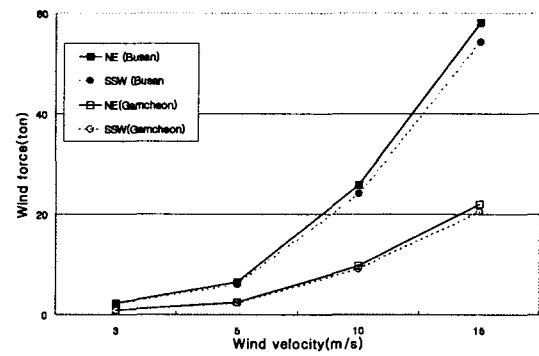


Fig 3. Wind force with the wind velocity

2.3 조류에 의한 유압(Y_c) 및 모멘트(N_c)

선속이 작을 경우에는 조류에 의한 영향이 매우 크며, 조류에 의한 유압은 선체는 조류 속도만큼 그대로 이동시키므로 횡방향 조류의 경우 강한 압류 현상을 유발하게 된다. 유압 및 유압모멘트 계산은 선체 침수면적(일반적으로 선박의 길이와 흘수를 곱해서 근사), 조류 속도 및 조류 방향에 대한 횡유압계수 및 유압모멘트계수를 변수로 표시하면 다음과 같다.

$$Y_c = \frac{1}{2} \rho C_{yc} L d v_c^2 \quad (4)$$

$$N_c = \frac{1}{2} \rho C_{mc} L^2 d v_c^2 \quad (5)$$

단, C_{yc} : 유압횡력계수 C_{mc} : 유압모멘트계수,

v_c : 풍속, ρ_w : 해수밀도

L : 선체 길이 d : 흘수

계산에 이용된 횡유압계수 및 유압모멘트계수는 표 2와 같이 모형 실험치(Tsuji, etc. 1969)를 참고로 선형에 따른 정상 횡력에 대한 최대치(Lee, 2003)를 수정하여 사용하였다.

Table. 2 Lateral coefficients of tidal current

Lateral coefficients of tidal current		A model (Busan)	B Model (Gmacheon)
tidal current	ebb current	1.0knot	1.7knot
	flood current	1.1knot	1.8knot
C_{ya} (force)	ebb current	0.37	0.41
	flood current	0.67	0.43
C_{ma} (moment)	ebb current	0.035	0.051
	flood current	0.043	0.061

조류에 따른 유압력 계산 결과를 그림 4에 나타낸다. 감

천항의 경우가 상대적으로 보다 큰 조속을 가지고 있으나 대상 선박이 작고, 조류의 방향에 따른 계수 값이 작아 부산항의 경우가 감천항 보다 크게 나타나고 있다. 또한 낙조류 보다는 창조류시에 보다 큰 유압력이 작용하고 있음을 알 수 있다.

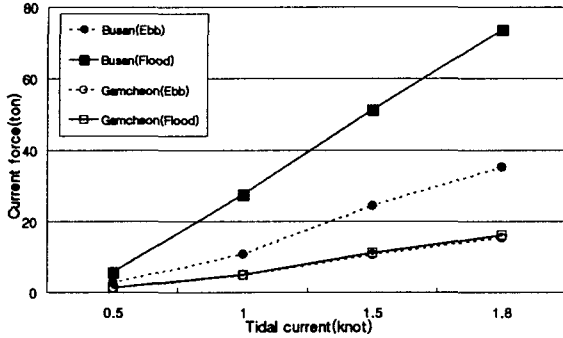


Fig 4. Tidal current force with the current velocity

부산항 및 감천항의 유압모멘트는 창조류가 작용할 경우 최대 나타났으며, 그 값은 각각 505ton·m와 277ton·m이다.

2.4 파랑에 의한 표류력(Y_w) 및 모멘트(N_w)

파랑에 의한 선체의 저항 증가는 통상적으로 내항성능(김순갑·공길영, 1997)에서 취급하는 선체운동에 기인하는 저항 증가 및 선수부로부터의 반사파에 기인하는 저항 증가로 분류할 수 있으나, 선박의 횡압류 현상만을 고려한다면 파랑에 의해 주기적으로 변동하는 성분과 정상 성분인 파 표류력으로 분류할 수 있다. 여기서는 선박의 조종 운동에 영향이 비교적 큰 파랑에 의한 표류력만을 고려한다. 규칙파중에서의 선회운동을 추정하기(Hirano, 1980) 위해 상대 파향 및 선장/선속비(λ/L)의 함수로 표현한 횡방향 표류력계수와 파진폭을 변수로 하면 표류력은 다음과 같다.

$$Y_w = \frac{1}{2} \rho C_{yw} g L h_c^2 \quad (6)$$

$$N_w = \frac{1}{2} \rho C_{mw} g L^2 h_c^2 \quad (7)$$

단, C_{yw} : 표류력 계수, C_{mw} : 표류력모멘트계수,
 h_c : 파진폭, L : 선체 길이

표류력 계산에 입력된 파 진폭은 0.54m, 표류력 계수에는 λ/L 이 0.8에 해당하는 0.1값을 사용하였다.

정상 표류력은 선체의 선형과 파진폭 및 표류력계수에 의해 정해지는 값으로 표류력 계산 결과를 그림 5에 파진폭에 의해 제시한다. 부산항과 감천항의 연평균파고가 1.08m이므로 파 진폭이 0.5m인 경우가 보통적인 해상 상태에 대한 표류력에 해당된다.

파랑에 대한 모멘트 또한 풍압모멘트와 동일하게 파랑 방향이 거의 정횡이므로 파랑모멘트계수가 0에 가까워 파랑으로 인한 횡두 모멘트는 무시할 수 있다.

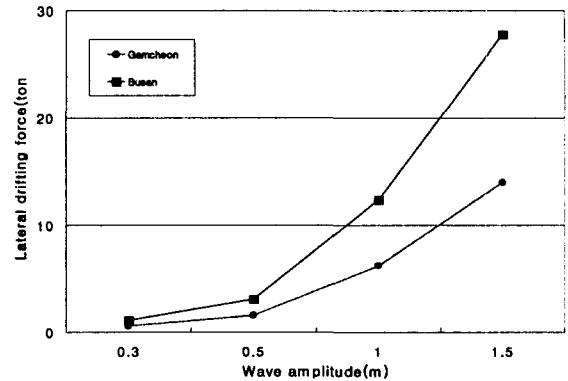


Fig 5. Drifting force with the wave amplitude

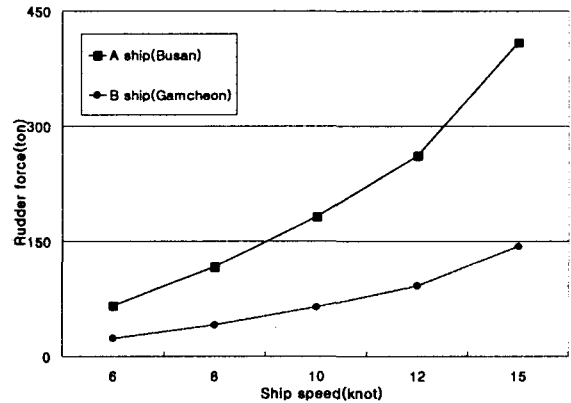


Fig. 6 Rudder force with the ship speed

2.5 타각에 의한 타압력(Y_δ)

선박의 조종 성능에서는 타압력 산출시 타에 유입되는 유효속도 및 양각 등을 타 단독 특성을 토대로 선체와의 간섭 현상(平野雅祥, etc. 1981, Kobayashi, etc. 1995)들을 상세하게 적용하여 산출하나, 여기서는 타에 유입되는 유효 속력과 양각을 선속과 타각으로 근사하여 산출한다. 타압력 계산은 타면적, 타 종횡비, 선박의 속도 및 타각 등을 변수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_\delta = F_\delta \cos \delta \quad (8)$$

$$N_\delta = F_\delta x_R \cos \delta \quad (9)$$

$$F_\delta = \frac{1}{2} \rho_w f_a A_R U^2 \sin \delta \quad (10)$$

단, F_δ : 타 직압력, f_a : 타 직압력계수
 A_R : 타면적, δ : 타각,

U : 선체전진속도, x_R : 중심에서 타까지의 길이
 상기 식에 의한 타압력 계산 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림 6는 타각에 의한 사인 및 코사인 값을 곱하지 않은

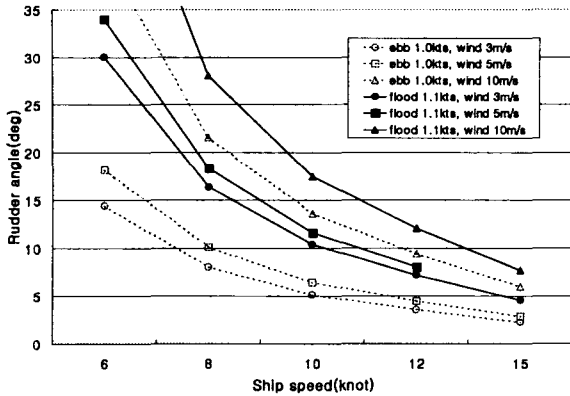


Fig 7. Rudder angle with the ship speed(Busan)

선형에 대한 타직압력을 부산항과 감천항으로 분류해서 나타낸 것이다. 타직압력의 경우 부산항 입항 모델이 타직압력 계수는 작으나 타면적이 커 감천항보다 크게 나타났다.

3. 부산항과 감천항의 횡압류 및 모멘트에 대한 대응 타각

2장에서 산출된 외력에 대한 압류를 상쇄하기 위해 필요한 대응타각을 선속에 따라 그림 7과 8에 부산항과 감천항의 경우를 각각 나타낸다. 대응타각이란 압류 현상을 상쇄하기 위한 타각으로 외력에 의해 발생하는 회두현상에 대한 타각이 아니다. 대응타각의 물리적 의미는 외력 하에서 선체의 압류 현상에 대해 자력 조선의 가능 여부를 판단하게 하는 기준으로 만일 자선이 제어 가능한 타압력 이상의 압류가 작용할 경우에는 예인선의 지원을 받아 조선을 하여야 한다.

그림 7에 의하면 부산항 입항시의 횡압류에 대한 대응타각은 그림 8의 감천항에 비해 비교적 작으나 풍속이 10m/sec 이상이고 선속이 7knot 이하가 되면 조타에 의한 보침이 어려워진다. 부산항 방파제 인접 항로상에서는 압류 현상을 줄이기 위해서는 선속을 10knot 이상으로 유지하는 것이 좋고, 창조류시의 입출항을 피하는 것이 좋다.

그림 8의 감천항의 경우에는 풍속이 5m/sec 이상이고 선속이 8knot 이하가 되면 자력 조선이 어려워진다. 따라서 입항 속력을 10knot 이상으로 하고 가급적 최강창조류를 피하여 입항하는 것이 바람직하다고 사료된다. 하지만, 감천항의 경우 횡압류를 줄이기 위해 선속을 증가시킬 경우 방파제 통과후 접안 부두까지의 거리를 고려한다면 선속을 줄이기 위해 다시 무리한 조선을 행해야 하는 부작용이 발생할 수 있다.

부산항과 감천항의 일반적인 해상 상태(파고 1.08m) 및

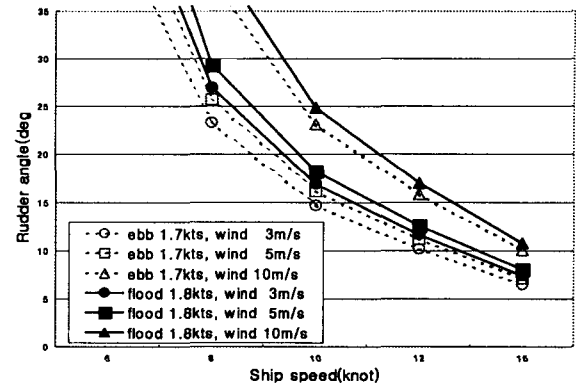


Fig. 8 Rudder angle with the ship speed(Gamcheon)

기상 상태 조건(바람 3m/s)하에서 횡압류 계산 결과를 그림 9에 나타낸다. 선박의 안전한 입항을 위해서는 공통적으로 입항 속력을 높이고 가급적 조류가 심한 시기를 피해 입항하는 것이라 할 수 있지만, 방파제 통과후 접안 부두까지의 거리 및 항내 조선상의 안전 속력을 감안한다면 Slow 또는 Dead Slow 정도의 속력(6-10knot)이 안전할 것으로 사료된다. 따라서 감천항의 경우는 현행의 방파제 배치와 항로 지정으로는 선박의 입항에 상당한 지장이 있고, 횡압류로 인해 방파제 및 두도와의 충돌 위험성을 배제할 수 없다. 또한 선박 통항 안전은 최소한 일반적인 자연적 조건하에서 만큼은 보장되어야 함에도 불구하고 저속 입항시에는 이를 만족하지 못하고 있어 적절한 대응책이 요구된다.

그림 10에 조류로 인한 선수 회두를 제어하기 위해 필요한 대응타각을 선속(knot)에 따라 제시하다. 부산항과 감천항 모두 창조류시에 회두 현상이 크며, 특히 감천항의 경우가 조류가 강해 이에 대한 대응타각도 크게 나타났다. 감천항의 최대 대응 타각은 약 10도 전후로 적절한 타각으로 충분히 선수 회두현상을 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

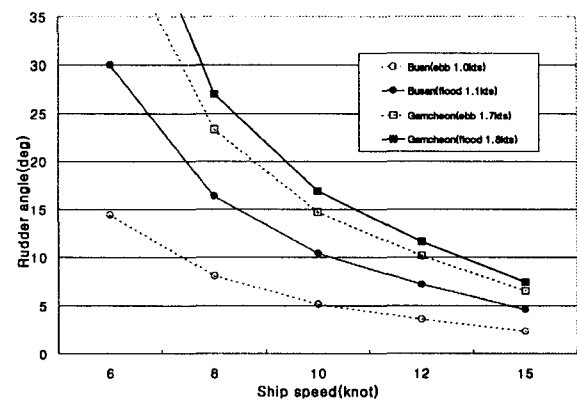


Fig 9. Rudder angle with the ship speed under the normal weather condition

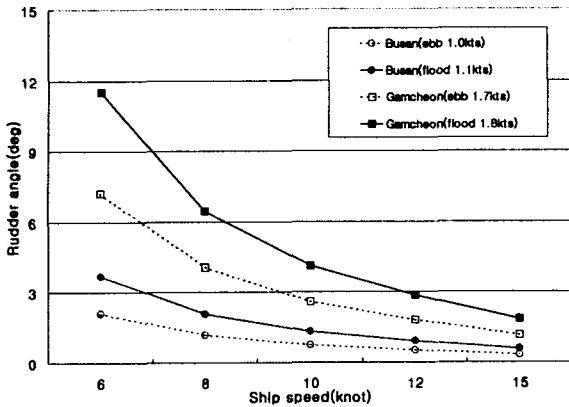


Fig 10. Rudder angle with the ship velocity due to the moment of tidal current

4. 방파제 설계시 고려해야 될 조종성능 요소 및 항로 배치에 관한 고찰

유럽 지역을 중심으로 한 항로설계 지침인 PIANC Rule 에 관한 자료(박진수, 2001)에는 항로를 설계할 때에는 해당 해역의 바람, 조류, 파도 등을 고려한 선체운동역학을 고려하여 배치하도록 정하고 있으며, 특히 선박의 조종성능에 대해서는 횡방향의 조류나 바람에 따른 편각이 선박의 최저 속력시 10도 내지 15도를 넘지 않도록 규정하고 있다. 우리나라의 경우는 아직까지 방파제와 항로 배치시 선박의 조종성능에 대한 명확한 기준이 설정되어 있지 않아 향후 방파제와 항로 설계시 선박의 조종성능에 대한 구체적인 기준 검토가 시급히 요구되고 있다.

선박의 조종자 입장에서 가장 바람직한 형태의 방파제 설계 및 배치 조건은 바람, 조류, 파랑과 같은 외력하에서 선박의 통항 안전(최소 항행 속력으로 침로 유지 및 변침)이 보장되는 일이라 할 수 있다.

부산항과 감천항의 사례 분석을 통해 고찰한 바와 같이 입항 선박의 통항 안전을 평가하기 위해서는 외력하에서의 회두현상과 압류현상 같은 요소가 선박의 조종성능 평가 요소로 중요할 것으로 사료된다. 즉, 항만의 자연적 환경에 따라 선박의 조종성능이 다르게 나타나겠지만 방파제의 설계 및 배치시에는 최소한 입항 선박에 대한 압류현상과 회두현상을 조사 분석하고 그 결과를 항로 지정에 적극 반영하도록 해야 한다.

또한 방파제의 위치, 항로 폭 등의 결정 및 항로 배치에 대해서는 해상교통량 평가를 통해 향후 항만의 확장 등에 대한 충분한 검토를 거쳐 확정되어야 하며, 가급적 방파제 설계시에는 항해 전문가를 참석시켜 방파제와 항로를 유기적이고 종합적으로 평가하는 것이 바람직하다.

5. 결론

부산항과 감천항 방파제를 통과하기 위해서 일정 침로로 입항하는 선박에 작용하는 압류현상과 회두현상을 외력을 중심으로 정량적으로 평가하였다. 계산 결과 부산항은 비교적 외력으로 인해 선박의 조종성능이 크게 제약받지 않았으나, 감천항은 현행의 방파제 배치와 항로로는 선박의 입항에 상당한 지장이 있고, 횡압류로 인해 선속이 10knot 이하일 경우에는 자력 조선에 어려움이 있는 것으로 나타났다. 또한 횡압류로 인해 방파제 및 두도와 충돌 위험성이 존재하므로 방파제와 항로 등에 대한 검토가 필요하다고 사료된다.

또한 방파제 및 항로 설계시 고려해야 될 선박의 조종성능 요소를 압류와 회두 현상을 중심으로 제안하였다. 더불어 방파제 설계시에는 항로 배치와의 관계를 종합적으로 고려하여 선박의 통항안전이 보장되도록 해야 한다.

참고문헌

- [1] Park, Y. S. and Lee, H. K(2003), "A Study on Proposed New Consideration Factors in Channel Design Process", 한국항해항만학회지, 제7권 제6호, pp 661-667.
- [2] 윤점동(1996), 선박 조종의 이론과 실무, 세종출판사, pp. 162-170.
- [3] Tsuji, T., Mori, N. and Yamanouchi, Y(1969), "On the Force Acting on a Ship Oblique Flow", 일본선박기술연구소보고, 제6권 제5호, pp 15-28.
- [4] Lee, Y. S "The Safety of Maneuverability based on the Hydrodynamic Forces Actinn on Ship Hull under the Lateral Berthing", 한국항해항만학회지, 제 27권 제6호, pp 625-630.
- [5] Hirono, M., Takashina, K. and Saruta, T(1980), "Ship Turing Trajectory in Regular Waves", The West-Japan Society of Naval Architects, No. 60.
- [6] 平野雅祥, 高井忠夫, 松本憲洋(1981), "조선설계에의 조종 운동 모델의 응용", 제3회 조종성 심포지움, 일본조선학회, pp. 101-136.
- [7] Kobayashi, E., Kagemoto H. and Hukukawa, Y(1995), "Mathematical Models of Ship Manoeuvring Motion", 제12회 조종성 심포지움, 일본조선학회, pp. 23-89.
- [8] 박진수 (2001), "(중보) 해상교통공학, 한국해양대학교 해사도서출판부, pp137-172.