

선수 규칙과 중 단동 활주선의 연직면 거동 추정 - Zarnick 비선형 스트립 방법의 개선

장양*^{****} · 엄덕준** · 김동진***

*서울대학교 조선해양공학과

**군산대학교 조선공학과

***한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

****로동대학교 조선해양공학과

Theoretical Prediction of Vertical Motion of Planing Monohull in Regular Head Waves - Improvement of Zarnick's Nonlinear Strip Method

Yang Zhang*^{****}, Deuk-Joon Yum** and Dong-Jin Kim***

^{*}Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

^{**}Department of Naval Architecture, Kunsan National University, Kunsan, Korea

^{***}Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

^{****}Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Ludong University, Yantai, China

KEY WORDS: Planing monohull 단동 활주선, Vertical motion response 연직면 운동응답, Non-linear strip method 비선형 스트립 방법, Warped hull form 비주상체 선형

ABSTRACT: In order to predict the motions of a planing hull in waves, it is necessary to accurately estimate the force components acting on the hull such as the hydrodynamic force, buoyancy, and friction, as well as the wave exciting force. In particular, based on strip theory, hydrodynamic forces can be estimated by the summation of the forces acting on each cross-section of the hull. A non-linear strip method for planing hulls was mathematically developed by Zarnick, and his formula has been used to predict the vertical motions of prismatic planing hulls in regular waves. In this study, several improvements were added to Zarnick's formula to predict the vertical motions of warped planing hulls. Based on calm water model test results, the buoyancy force and moment correction coefficients were modified. Further improvements were made in the pile-up correction. Pile-up correction factors were changed according to variations of the deadrise angles using the results found in previous research. Using the same hull form, captive model tests were carried out in other recent research, and the results were compared with the present calculation results. The comparison showed reasonably good agreements between the model tests and present calculations.

1. 서 론

고속선은 고속 영역에서의 침수 표면적을 줄이고 저항을 감소시키기 위해 선체 중량의 상당 부분을 동유체력이나 공기압 등으로 부상시켜 지지한다. 대표적인 고속선형으로 하드차인(Hard chine) 활주선이 있으며 선저면에서 생성되는 양력으로 중량의 대부분을 지지하는 방식이다.

활주선 주위의 유동을 더 구체적으로 보면 고속 영역에서 수면과 선수부의 교차선 부근에 스프레이(Spray)가 발생하며 스프레이 발생 부분을 따라 정체점(Stagnation point)이 분포하여

높은 압력을 받는다.

선체 표면을 따라 흐르는 유동은 차인(Chine)과 트랜섬(Transom) 선저 라인에서 대부분 박리되며 각 차인과 트랜섬 부근의 압력은 대기압 정도로 감소한다. 이와 같이 복잡한 유동 현상이 발생하므로 활주선은 선형에 따라 유체성능이 특히 민감하게 변화한다. 한편 파랑 중에서 고속 운항할 경우 파랑 하중에 의해 운동 진폭이 커지기 쉽다. 따라서 활주선 설계 시 대상선의 유체성능을 설계 과정에 잘 반영하여 목표 사양에 부합하는 선형을 개발하여야 한다.

본 연구에서 대상으로 하는 크루즈 레저보트는 하드차인 활

Received 10 April 2015, revised 29 May 2015, accepted 22 June 2015

Corresponding author Dong-Jin Kim: +82-42-866-3652, djkim@kriso.re.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

주선형이나, 레이저 선박이기 때문에 승선 시 안락함이 요구된다. 이를 만족하기 위해 특히 파랑 중 우수한 운동성능 확보가 필요하다. 설계 과정에서 대상선의 운동성능 예측을 위하여 모형시험이나 이론계산 등의 기법을 활용할 수 있다. 본 연구에서는 두 방법을 모두 활용하여 설계 선형의 운동성능을 검토하고, 특히 이론계산법의 검증 및 일부 개선을 시도하였다.

활주선이 받는 힘 성분은 동유체력, 부력, 마찰력 등으로 분류할 수 있으며, 이 중에서 특히 고속 활주 시에는 동유체력의 비중이 크고 이에 대한 정도 높은 추정이 필요하다. Wagner(1931) 등을 시작으로 활주선을 작은 종횡비(Asspect ratio)의 세장체로 가정하여 여러 2차원 횡단면으로 나눈 후, 운동량이론에 근거하여 각 단면 동유체력을 추정하는 연구가 지속되어 왔다. 선체를 여러 횡단면들로 분할하여 계산하는 이른바 스트립 방법(Strip method)은 저속 배수량형선에는 과거부터 널리 적용되었으며, 배수량형선은 자세 변화가 크지 않으므로 선형 스트립 방법도 적절하다. Martin(1976)은 선형 스트립 방법을 주형 활주선에 적용하여 주과수영역 운동 분석을 시도한 바 있다. 하지만 활주선은 속도 별 자세 변화가 크기 때문에 스트립 방법 역시 비선형으로 확장할 필요가 있으며, Zarnick(1978)은 비선형 스트립 방법으로 시간 영역에서 활주선 운동을 계산하였다. 즉, 매 순간마다 각 횡단면의 실제 침수면적을 고려하여 각 힘 성분들을 계산하고 운동을 추정하였다. Zarnick이 제안한 계산법은 Keuning(1994), Akers(1999), Van Deyzen(2008) 등에 의해 최근 까지 주형 활주선에 응용된 바 있다.

본 연구에서는 Zarnick의 비선형 스트립 방법을 기반으로 규칙파 중 활주선 연직면 운동 추정 프로그램을 작성하였다. 그리고 대상 활주선의 운동을 계산하였으며, 병행하여 수행한 모형시험 결과와 비교하였다. 우선 Zarnick의 계산 방법은 선저경사각이 모든 단면에서 일정한 주형 활주선을 대상으로 하므로, 일반적인 비주상형 활주선에 적용할 수 있도록 계산을 개선하였다. 그리고 정수 중 속도별 항주자세 시험 결과를 바탕으로 부력 및 부력모멘트암 보정계수를 본 대상선에 맞도록 적절히 수정하였다. 마지막으로 각 횡단면의 실제 침수 깊이를 정확하게 반영하기 위하여 최근 타 연구 결과를 바탕으로 'Pile-up' 보정계수를 정도 높게 수정하였다. 계산 결과는 모형시험과 비교하여 검증하였고, 시험 결과를 잘 추정할 수 있음을 보였다.

2. 활주선 연직면 운동 추정법

2.1 좌표계와 운동방정식

본 장에서는 Zarnick(1978)에 의해 제안된 규칙파 중 주상체 활주선 연직면 운동의 이론적 계산 방법을 요약하였다. 우선 Zarnick(1978)이 활주선의 연직면 운동을 표현하기 위해 사용한 좌표계는 Fig. 1과 같다. 자유표면과 평행한 선체 전진방향이 x 축, 연직하방이 y 축이고 공간상에 고정된 한 점을 원점 O 로 하는 공간고정좌표계 $O-xz$ 와, 선수방향이 ξ 축, 선저방향이 ζ 축이고 원점 O 가 무게중심에 위치한 선체고정좌표계 $O-\xi\zeta$ 로 구성된다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 활주선이 항주할 때 연직 하방으로 중량 W , 선저면에 법선방향 유체력 N , 선저면의 접선 방향

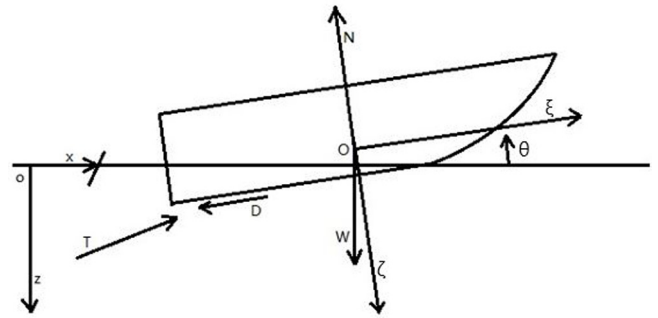


Fig. 1 Coordinate system

으로 마찰력 D , 그리고 선미부에 추력 T 가 작용한다. 참고로 N 는 법선방향 유체압력에 의한 동유체력과 부력 성분을 모두 포함한다.

활주선의 전후동요, 상하동요, 종동요 변위를 각각 x_{CG} , z_{CG} , θ 라고 할 때 운동방정식을 구성하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_{CG} &= T_x - N\sin\theta - D\cos\theta \\ M\ddot{z}_{CG} &= T_z - N\cos\theta + D\sin\theta + W \\ I\ddot{\theta} &= Nx_c - Dx_d + Tx_p \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 M 과 I 는 각각 활주선의 질량과 종동요 관성모멘트이며, T_x , T_z 는 추력의 x , z 방향 벡터성분이다. 그리고 x_c , x_d , x_p 는 각각 무게중심부터 N , D , T 벡터까지의 거리를 의미한다.

선체고정좌표계에서의 임의의 점 $P(\xi, \zeta)$ 좌표를 활주선 무게중심 변위 (x_{CG}, z_{CG}) 를 이용하여 공간고정좌표계에서의 좌표 $P(x, z)$ 로 변환하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_{CG} + \xi\cos\theta + \zeta\sin\theta \\ z &= z_{CG} - \xi\sin\theta + \zeta\cos\theta \end{aligned} \tag{2}$$

한편, 장파정 선수규칙파 파면변위 r 은 위치 x 와 시간 t 의 함수로서 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r &= A\cos(kx + \omega t) \\ &= A\cos[k(x_{CG} + \xi\cos\theta + \zeta\sin\theta) + \omega t] \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)에서 ω 는 파의 원주파수, A 는 파진폭이며, k 는 파수이다. 항주하는 활주선이 규칙파를 조우할 때 파랑에 의한 유속 중 수평방향 성분은 활주선 전진속도에 비해 무시할만큼 작다고 가정하고, 파랑에 의한 유속 중 수직방향 성분인 w_z 만 고려하여 활주선 기준선에 대한 접선 및 법선방향 유체상대속도 U , V 를 수식화하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} U &= \dot{x}_{CG}\cos\theta - (z_{CG} - w_z)\sin\theta \\ V &= \dot{x}_{CG}\sin\theta + (z_{CG} - w_z)\cos\theta - \dot{\theta}\xi \end{aligned} \tag{4}$$

2.2 동유체력 추정법

활주선의 각 2차원 횡단면이 받는 동유체력은 운동량의 시간 변화율과 횡류저항(Cross flow drag)의 합으로 표현할 수 있으며, 한 횡단면의 동유체력 f 를 수식화하면 식 (5)와 같다.

$$f = - \left[\frac{D}{Dt} (m_a V) + C_{D,c} \rho b V^2 \right] \quad (5)$$

여기서 m_a 는 각 횡단면의 부가질량, $C_{D,c}$ 는 횡류저항계수, ρ 는 유체의 밀도이다. 그리고 b 는 해당 횡단면의 침수 반폭이다.

식 (5)에서 운동량의 시간변화율인 첫 번째 항에서 부가질량 m_a 는 동일 시간이라도 각 횡단면에 따라 다를 수 있다. 즉, 시간 t 의 함수일 뿐만 아니라 전후방향 좌표 ξ 의 함수이므로 전개하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{D}{Dt} (m_a V) = m_a \frac{dV}{dt} + V \frac{dm_a}{dt} - \frac{\partial(m_a V)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dt} \quad (6)$$

선저경사각이 일정한 활주선의 모든 횡단면은 썸기형상이며 그 부가질량은 식 (7)과 같다.

$$m_a = k_a (\pi/2) \rho b^2 \quad (7)$$

식 (7)에서 k_a 는 부가질량계수이며 Zarnick은 1.0을 사용하였다. 그리고 부가질량의 시간변화율은 식 (8)과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= k_a \pi \rho b \dot{b} \\ &= k_a \pi \rho b (d \cot \beta) \\ &= k_a \pi \rho b (C_{pu} \dot{\cot \beta}) \\ &= k_a \pi \rho b C_{pu} \cot \beta [(z - \dot{r}) / (\cos \theta - \nu \sin \theta)] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 2행은 침수 반폭 b 를 기준선 법선방향 침수 깊이 d 와 기하학적 관계를 이용하여 전개한 것이다. 3행은 썸기형상이 수직 입수할 때 초기 정수면 기준으로 썸기 표면을 따라 자유수면이 더 높게 솟아오르는 'Pile-up' 현상을 고려하기 위해 보정계수 C_{pu} 를 곱한 것이다. Wagner(1931)에 의하면 C_{pu} 는 $\pi/2$ 이다. 4행은 파장이 활주선 홀수에 비해 매우 크고 파 기울기가 작다는 가정 하에 침수 깊이 d 를 공간좌표상의 상하 변위 z 와 파면변위 r 의 높이 차로 변환한 것이다. ν 는 파 기울기이다.

차인이 침수되는 경우에는 식 (7), (8)에서 침수 반폭 b 가 차인 반폭 b_c 으로 일정하다. 따라서 이 경우 부가질량과 부가질량 시간변화율은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} m_a &= k_a (\pi/2) \rho b_c^2 \\ \dot{m}_a &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (5)에서 두 번째 항은 속도의 제곱에 비례하는 횡류저항 성분이다. 횡류저항계수 $C_{D,c}$ 는 평판일 경우 1.0을, 선저경사각 β 를 갖는 V형 선저의 경우 $1.0 \cos \beta$ 를 사용한다.

2.3 부력 추정법

활주선에는 침수 부피에 상응하는 유체의 중량이 연직상방으로 가해지며 이 힘이 부력이다. 활주선의 한 횡단면의 침수단면적이 A_s 일 때 그 횡단면이 받는 부력 f_B 는 식 (10)과 같다. g 는 중력가속도이다.

$$f_B = -b_f \rho g A_s \quad (10)$$

단, 활주선이 고속 항주할 경우 트랜십과 차인 근처에서 유동 박리가 발생하고, 이 부근의 압력이 대기압 혹은 그 이하가 되면서 전체 부력도 일부 감소한다는 Shuford(1957) 등의 연구가 있다. Zarnick도 이를 인용하여 식 (10)에서 부력보정계수 b_f 를 0.5로 대입하였다. 또한 부력에 의한 중동요 모멘트를 계산할 때 무게중심부터 각 횡단면까지의 부력모멘트암에 보정계수 b_m 를 추가로 곱하였고, 그 값은 0.5이다.

2.4 수식 단순화 및 전개

활주선이 등속 항주 시 전후방향 속도 x_{CG} 가 일정하고, 추력과 마찰력이 근사적으로 무게중심에 가해지며 두 힘이 항상 평형을 이룬다고 하여 소거하면 식 (1)은 식 (11)처럼 단순화된다. 이는 예인수조에서 상하동요, 중동요를 제외한 운동을 구속하고 활주선 모형의 무게중심 위치를 등속 예인하는 경우와 같다.

$$\begin{aligned} M z_{CG} &= -N \cos \theta + W \\ I \ddot{\theta} &= N x_c \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 우변에서 상하동요 방향 유체력과 중동요 방향 유체력모멘트 항의 구체적인 전개 과정은 부록에 요약하였다.

3. 대상 활주선

본 논문에서 계산을 수행한 대상 활주선은 크루즈 레저보트이며 Kim et al.(2013)의 연구에 활용된 대상선과 동일한 선형이다. 설계 실선의 정면선도와 측면선도는 각각 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

수조시험을 위해 제작한 1/6 축소 모형이 제작되었고, 그 주요 제원은 Table 1에 정리하였다.

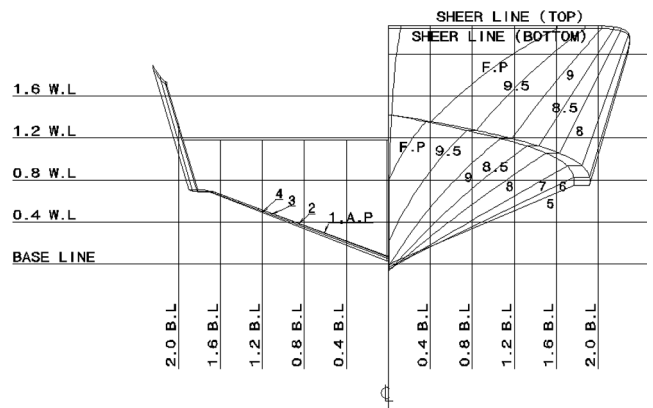


Fig. 2 Body plan of a leisure boat

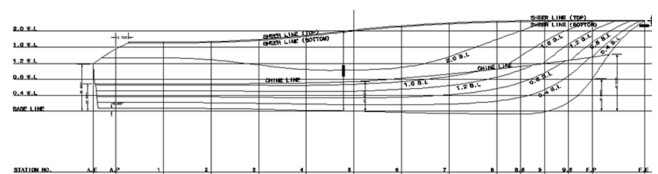


Fig. 3 Shear plan of a leisure boat

Table 1 Main particulars of model ship

Particular	Value
Displacement	73.350 kgf
Length overall, LOA	2.467 m
Length between perpendiculars, LBP	2.000 m
Breadth (B)	0.761 m
Depth (D)	0.333 m
Draft (d)	0.135 m
Longitudinal center of gravity, LCG (from midship)	- 0.195 m
Vertical center of gravity, KG (from baseline)	0.204 m
Pitch radius of gyration	25 % of LOA
Deadrise angle	20° at A.P.
	23° at midship

Kim et al.(2013)에서 본 모형선의 정수 및 선수 규칙과 중 수 조 모형 시험이 수행된 바 있다. 본 연구에서 수행된 계산의 정확도를 파악하기 위하여 Kim et al.(2013)에서 인용된 모형시험 결과를 4장에서 계산 결과와 비교하여 도시하였다.

4. 대상 활주선 성능 추정 및 계산방법 개선

4.1 계산 과정의 개요

2장의 이론 계산법에 근거하여 규칙과 중 활주선 연직면 운동 계산 프로그램을 작성하였다. 완성된 프로그램으로 Zarnick(1978)의 연구에서와 동일한 주형 활주선의 운동을 계산하였고, 그 결과가 Fridsma(1969)에 의하여 선행된 모형시험 결과와 잘 일치하며 오류가 없음을 확인하였다.

Zarnick(1978)의 계산법은 주형 활주선에만 국한된다. 부력 및 부력모멘트암 보정계수도 계산 검증에 사용된 세 가지 주형 활주선의 정수 중 특정 속도 영역 시험 자료만을 근거로 결정하였다. 그리고 Pile-up 보정계수를 Wagner(1931)의 이론 계산을 참고하여 상수로 대입하였으나 그 이후의 연구들에서는 입수하는 썰기형상 단면의 선저경사각에 따라 Pile-up 되는 정도가 달라짐이 밝혀졌으므로 Wagner(1931)의 결과는 실제 현상과 다소 차이가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 세 가지의 한계점을 파악하고, 개선을 위하여 Zarnick(1978) 계산 방법을 포함한 총 4단계의 계산을 수행하였다. 각 단계의 계산 조건을 표로 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Condition of variables in present calculations

No.	Deadrise angle	Buoyancy correction		Pile-up correction (C_{pu})
		b_f	b_m	
Cal.0	Constant	0.5	0.5	$\pi/2$
Cal.1	Varied*	0.5	0.5	$\pi/2$
Cal.2	Varied*	Modified**	Modified**	$\pi/2$
Cal.3	Varied*	Modified**	Modified**	Modified***

* varied according to the hull forms

** modified by using the test results in Kim et al.(2013)

*** modified by using the results in Zhao and Faltinsen(1993)

4.2 각 횡단면별 선저경사각 변화 고려

2장에 요약한 Zarnick의 계산법은 주형 활주선을 대상으로 하며, 특히 식 (8) 등에서 선저경사각 β 를 모든 횡단면에서 일정하다고 간주한다. 하지만 대상선을 비롯하여 대부분의 활주선은 선수부 입수 충격을 줄이기 위해 선수부로 갈수록 선저경사각이 커지는 비주상체 형상을 갖는다. 동유체력을 정도 높게 추정하려면 각 횡단면 별 선저경사각 변화를 고려하여야 한다.

식 (7), (8)에서 횡단면의 부가질량과 부가질량 시간변화율은 매 순간 침수 반폭으로 결정된다. 각 단면 침수 깊이(d)에서 기하학적 관계로 침수 반폭(b)을 도출하는 과정에서 각 횡단면 별 선저경사각(β_i) 변화를 고려하였다. 주요 내용을 수식화하면 식 (12)와 같고, 아래 첨자 i 는 해당 횡단면 번호이다.

$$b = C_{pu} d \cot \beta_i \tag{12}$$

대상 활주선의 선저경사각 변화를 고려하여 운동 계산한 결과(Cal.1)는 Figs. 4-5의 실선과 같다. 모든 횡단면 선저경사각을 20도로 일정하게 대입한 계산 결과(Cal.0)도 점선으로 함께 도시하였다. 선저경사각 변화를 반영할 경우 선수부가 입수할 때 받는 외력이 작아지면서 운동 진폭이 감소한다.

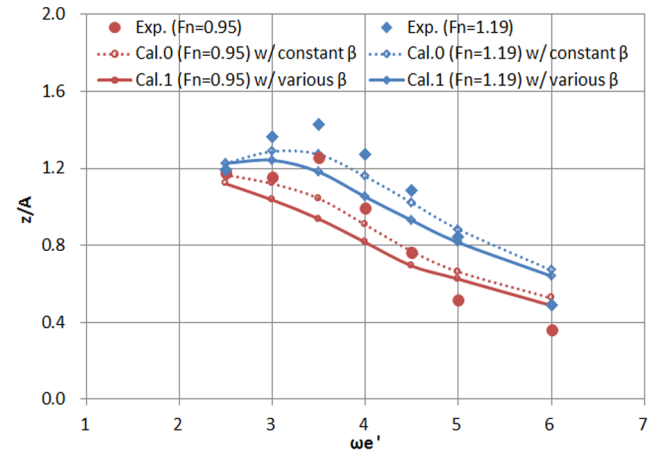


Fig. 4 Heave response with and without deadrise angle variation

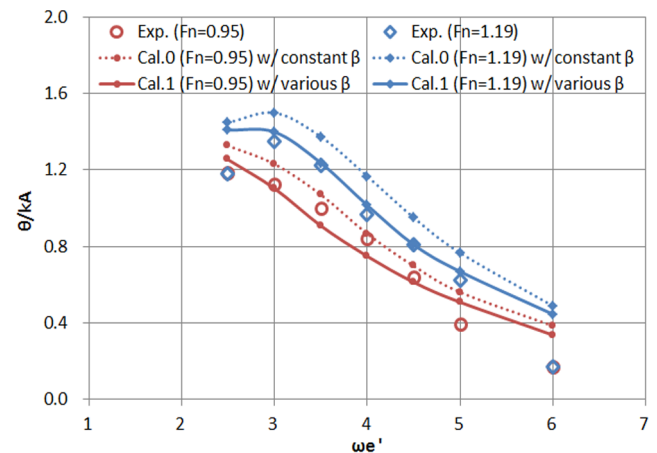


Fig. 5 Pitch response with and without deadrise angle variation

4.3 부력 및 부력모멘트암 보정계수 수정

Zarnick(1978)은 계산 검증에 사용한 주형 활주선의 평균 항주자세를 적절하게 맞추기 위하여 부력 보정계수 b_f 와 부력모멘트암 보정계수 b_m 을 각각 0.5로 제안하였다. 하지만 이는 Zarnick의 검증용 주형 활주선형의 특정 속도 영역에서만 적합한 값이다. 선형이나 속도에 따라 유동 분포가 바뀌면 달라질 가능성이 있다고 판단하여, 본 연구의 대상선에 적합한 보정계수를 다시 탐색하기로 하였다.

b_f, b_m 을 각각 0.3~0.7 내에서 바뀌가면서 대상선의 정수 중 속도별 부상량과 트림각을 계산하였다. 계산 결과를 정수 중 모형시험 결과와 함께 그래프로 나타내면 Figs. 6-7과 같다.

각 속도 영역 별로 정수 중 시험 결과를 근사하게 추정할 수 있는 b_f, b_m 을 추출하여 Table 3에 정리하였다. 부력보정계수 b_f 는 Froude 수 1.19 이하에서는 0.7을, 이를 초과하는 속도에서는 0.5를 사용하는 것이 바람직하다. Froude 수 1.19를 초과하는

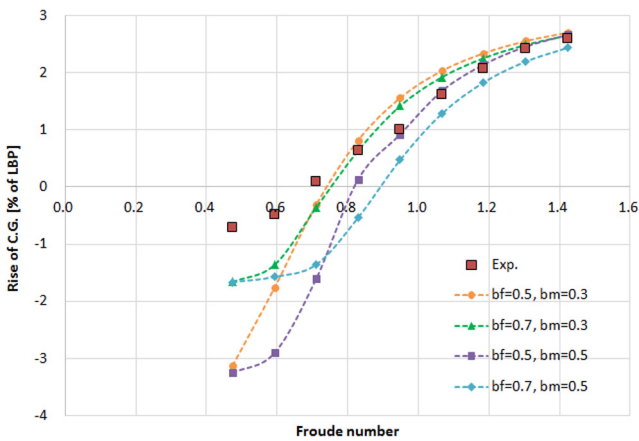


Fig. 6 Rises of C.G. with variations of b_f, b_m

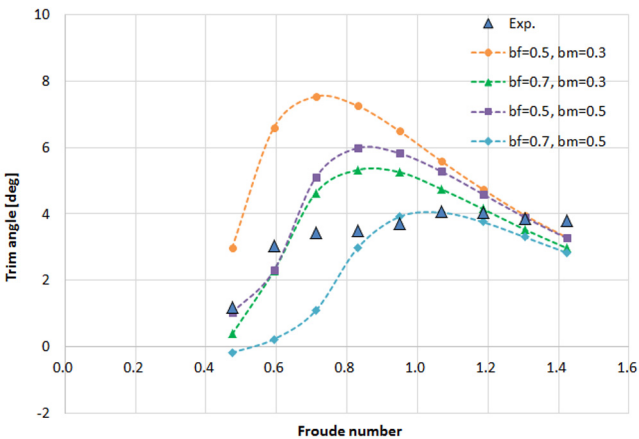


Fig. 7 Trim angles with variations of b_f, b_m

Table 3 Selected b_f, b_m according to Froude number

	b_f	b_m
$0.47 \leq Fn \leq 1.19$	0.7	0.3
$1.19 < Fn \leq 1.42$	0.5	0.5

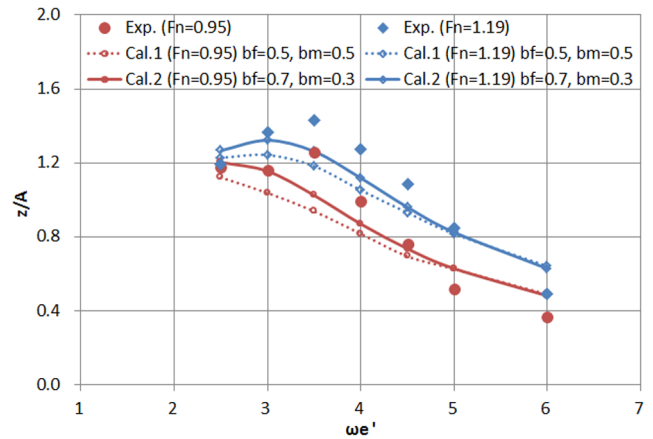


Fig. 8 Heave response with $b_f = 0.7, b_m = 0.3$

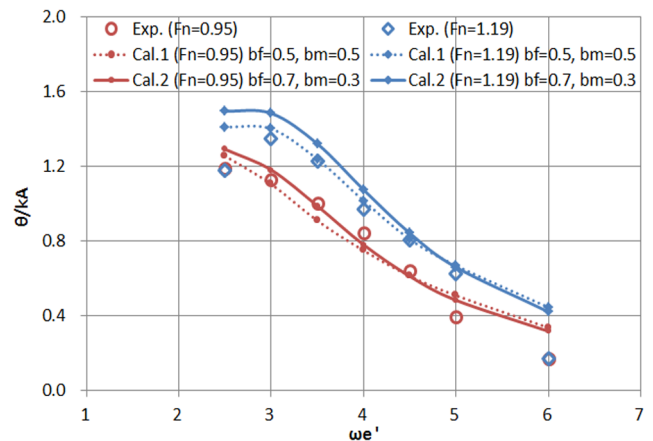


Fig. 9 Pitch response with $b_f = 0.7, b_m = 0.3$

고속에서 차인과 트랜섬 등에서 박리 현상이 현저하게 발생하고 이로 인한 압력 강하로 저속일 때보다 부력 감소 비율이 더 큰 것으로 추정된다. 한편 부력모멘트암 보정계수 b_m 는 Froude 수 1.19 미만에서는 0.3, 그 이상에서는 0.5를 사용하는 것이 적절하다. Froude 수 1.19 이상의 높은 속도에서는 스프레이에 의해 선수부에 압력이 집중되어 압력 중심이 보다 선수쪽으로 이동하며, 부력모멘트암도 그 영향을 받아 더 증가할 것으로 추정된다.

Table 3을 참고하여 보정계수 b_f 를 0.7, b_m 을 0.3으로 수정한 후 Froude 수 0.95, 1.19에서 대상 활주선의 주파수별 운동을 각각 계산한 결과(Cal.2)는 Figs. 8-9의 실선과 같다. b_f, b_m 을 각각 0.5로 대입한 계산 결과(Cal.1)도 점선으로 함께 표기하였다. 두 계산은 선저경사각의 변화를 반영한 것이다. 정수 중 모형시험에 근거하여 보정계수 b_f, b_m 을 수정하였을 때 전체적으로 파중 모형시험 결과를 더 잘 추정함을 확인하였다.

4.4 'Pile-up' 보정계수 수정

2.2절에서 요약한 바와 같이 췌기형상 단면의 수직 입수 시 정수수면을 기준으로 자유수면이 물체 표면을 따라 더 상승하여 실제 침수깊이가 증가하는 'Pile-up' 현상이 발생한다.

Table 4 Pile-up correction coefficient, C_{pu}

Deadrise angle [°]	Wagner (1931)	Zhao and Faltinsen (1993)
20	1.5708	1.5087
25	1.5708	1.4709
30	1.5708	1.4243
40	1.5708	1.2866

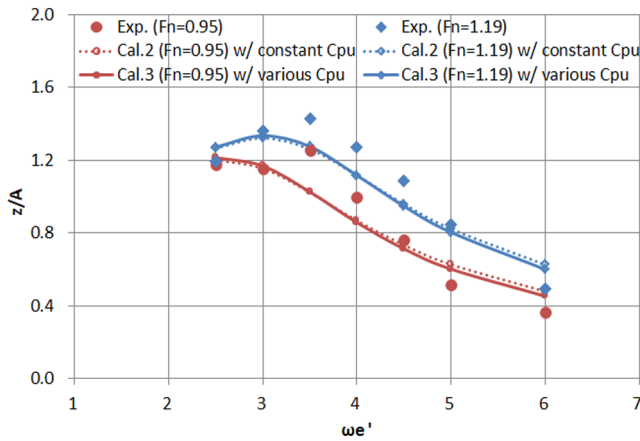


Fig. 10 Heave response with modification of 'pile-up' correction coefficient

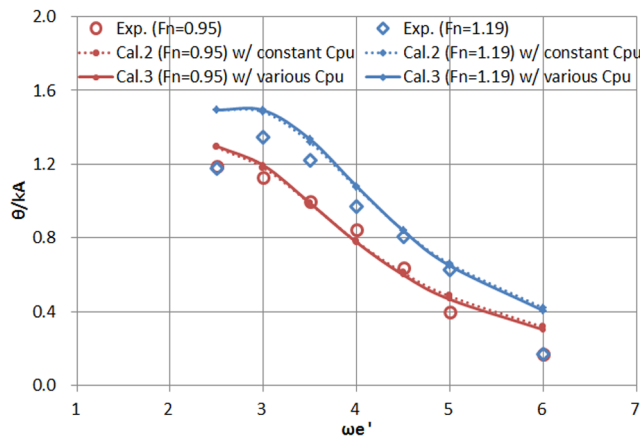


Fig. 11 Pitch response with modification of 'pile-up' correction coefficient

Zarnick은 Wagner(1931)의 연구를 참고하여 pile-up 보정계수 C_{pu} 를 $\pi/2(=1.5708)$, 즉 일정한 상수로 대입하였다. 하지만 이후 Zhao and Faltinsen(1993) 등은 선저경사각이 커질수록 C_{pu} 가 감소하는 경향을 보인 바 있다. Zhao and Faltinsen(1993)을 인용하여 선저경사각 20~40도에서의 C_{pu} 를 표로 정리하면 Table 4와 같다.

선저경사각 별 pile-up 보정계수 C_{pu} 의 변화를 고려하여 대상 활주선의 운동을 계산(Cal.3)하면 Figs. 10-11의 실선과 같다. C_{pu} 를 $\pi/2$ 로 일정하게 대입한 계산 결과(Cal.2)도 비교를 위해 함께 점선으로 표기하였다. 두 계산은 선저경사각의 변화를 받

영하고, 부력 및 부력모멘트암 보정 계수를 각각 0.7, 0.3으로 대입한 것이다. C_{pu} 의 변화를 고려할 경우 파 중 운동 진폭이 공진주파수 근처에서는 약간 증가하고, 고주파수 영역에서는 약간 감소하여 모형시험 결과에 더 근접하나, 그 영향은 작다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Zarnick(1978)의 비선형 스트립 방법을 도입하여 대상선의 선수 규칙과 중 운동을 추정하였다. 계산 결과를 모형시험 결과와 비교하여 검증하고, 계산 방법을 일부 개선하였다. 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 주형 활주선만을 대상으로 한 본래의 계산법을 비주상형 활주선으로 확장하였다. 선수부로 갈수록 증가하는 선저경사각을 고려하여 계산할 경우 파 중 연직면 운동 진폭이 감소함을 확인하였다.

(2) 정수 중 시험 결과를 바탕으로 대상 활주선의 속도 영역 별 부력 및 부력모멘트암 보정계수를 수정하였다. 선저경사각의 변화를 고려하고 수정된 부력 및 부력모멘트암 보정계수를 사용할 경우 파 중 연직면 운동 진폭을 더 정도 높게 추정하였다.

(3) 선저경사각에 따른 pile-up 보정계수 변화를 계산에 반영하였고, 운동진폭이 공진 주파수 근처에서는 약간 증가, 고주파수에서는 약간 감소하나 그 영향은 작다.

추후에 더 많은 선형으로 계산식에 대한 검증과 보완이 이루어져야 할 것이다. 계산 신뢰도를 높인 후, 활주선 운동의 자유도 등을 더 확장할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2013년도 군산대학교 교수장기국외연수경비, 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 연구개발사업(10 RTIP B01), 해양수산부 연구장비 및 인프라구축사업으로 선박해양플랜트연구소에서 주관하는 '다목적 지능형 무인선 국산화 개발 (4) (PMS2950)' 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

Akers, R.H., 1999. Dynamic Analysis of Planing Hulls in Vertical Plane. Proceedings of the meeting of the New England Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers.

Fridsma, G., 1969. A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Crafts. Davidson Laboratory Report 1275, Stevens Institute of Technology.

Keuning, J.A., 1994. The Nonlinear Behaviour of Fast Monohulls in Head Waves. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.

Kim, D.J., Rhee, K.P., Yum, D.J., Zhang, Y., 2013. Comparative Study on the Motion Responses for a 40ft Class Cruise

Leisure Boat. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 50(4), 240-247.

Martin, M., 1976. Theoretical Prediction of Motions of High-Speed Planing Boats in Waves. DTNSRDC Report 76-0069.

Shuford, S.L.Jr., 1957. A Theoretical and Experimental Study of Planing Surfaces Including Effects of Cross Section and Plan Form. National Advisory Committee for Aeronautics Report 1355.

Van Deyzen, A., 2008. A Nonlinear Mathematical Model of Motions of a Planing Monohull in Head Seas. Proceedings of the 6th International Conference on High Performance Marine Vehicles, 187-199.

Wagner, H., 1931. Landing of Seaplanes, National Advisory Committee for Aeronautics TN 672.

Zarnick, E., 1978. A Nonlinear Mathematical Model of Motions of a Planing Boat in Regular Waves. DTNSRDC Report 78-032.

Zhao, R., Faltinsen, O.M., 1993. Water Entry of Two-dimensional Bodies. Journal of Fluid Mechanics, 246, 593-612.

부 록

본문 2.4절 식 (11)의 우변에 있는 상하동요 유체력 $-N\cos\theta$ 와 중동요 유체력모멘트 Nx_c 는 각각 식 (A.1)과 (A.2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 -N\cos\theta &= \int_l f \cos\theta d\xi + \int_l f_B d\xi & (A.1) \\
 &= - \int_l [m_a \dot{V} + \dot{m}_a V - U \frac{\partial(m_a V)}{\partial \xi} + C_{D,c} \rho b V^2] \cos\theta d\xi \\
 &\quad - \int_l b_f \rho g A_s d\xi
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -M_a \cos^2\theta \cdot \ddot{z}_{CG} + Q_a \cos\theta \cdot \ddot{\theta} \\
 &\quad + M_a \dot{\theta} (z_{CG} \sin\theta \cos\theta - x_{CG} \cos^2\theta) \\
 &\quad + \int_l m_a \frac{dw_z}{dt} \cos^2\theta d\xi - \int_l m_a w_z \dot{\theta} \sin\theta \cos\theta d\xi \\
 &\quad - \int_l m_a V \frac{\partial w_z}{\partial \xi} \sin\theta \cos\theta d\xi + \int_l m_a U \frac{\partial w_z}{\partial \xi} \cos^2\theta d\xi \\
 &\quad - UV \dot{m}_a |_{stern} \cos\theta - \int_l V \dot{m}_a \cos\theta d\xi \\
 &\quad - \int_l \rho C_{D,c} b V^2 \cos\theta d\xi - \int_l b_f \rho g A_s d\xi
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Nx_c &= - \int_l f \cdot \xi d\xi - \int_l f_B \cos\theta \cdot \xi d\xi & (A.2) \\
 &= \int_l [m_a \dot{V} + \dot{m}_a V - U \frac{\partial(m_a V)}{\partial \xi} + C_{D,c} \rho b V^2] \cdot \xi d\xi \\
 &\quad + \int_l b_f \rho g A_s \cos\theta \cdot (b_m \cdot \xi) d\xi \\
 &= -I_a \ddot{\theta} + Q_a \cos\theta \ddot{z}_{CG} - Q_a \dot{\theta} (z_{CG} \sin\theta - x_{CG} \cos\theta) \\
 &\quad - \int_l m_a \cos\theta \frac{dw_z}{dt} \cdot \xi d\xi + \int_l m_a \dot{\theta} \sin\theta w_z \cdot \xi d\xi \\
 &\quad + \int_l V \dot{m}_a \xi d\xi + \int_l \rho C_{D,c} b V^2 \xi d\xi + m_a UV \xi |_{stern} \\
 &\quad + \int_l m_a V U d\xi + \int_l m_a V \frac{\partial w_z}{\partial \xi} \sin\theta \xi d\xi \\
 &\quad - \int_l m_a U \frac{\partial w_z}{\partial \xi} \cos\theta \xi d\xi + \int_l b_f \rho g A_s \cos\theta (b_m \cdot \xi) d\xi
 \end{aligned}$$

상기 식 (A.1)과 (A.2)에서 M_a , Q_a , I_a 는 식 (A.3)와 같다.

$$\begin{aligned}
 M_a &= \int_l m_a d\xi & (A.3) \\
 Q_a &= \int_l m_a \xi d\xi \\
 I_a &= \int_l m_a \xi^2 d\xi
 \end{aligned}$$