

40ft 급 크루즈 레저보트의 운동성능 해석 및 모형시험 비교 연구

김동진¹·이기표²·염덕준^{3,†}·장 양³
한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소¹
서울대학교 조선해양공학과²
군산대학교 조선공학과³

Comparative Study on the Motion Responses for a 40ft Class Cruise Leisure Boat

Dong-Jin Kim¹·Key-Pyo Rhee²·Deuk-Joon Yum^{3,†}·Yang Zhang³
Maritime and Ocean Engineering Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²
Department of Naval Architecture, Kunsan National University³

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.

Hydrodynamic characteristics of a planing craft are very sensitive to the hull form variations, especially when the craft navigates with high-speed. Therefore, we need to verify hydrodynamic performances of the craft during the process of hull form design. In this paper, motion performances of a 40ft class cruise leisure boat are evaluated by both model tests and theoretical analyses using two different methods. Model tests are carried out at calm sea and regular wave conditions using high speed towing carriage installed in SNU towing tank. Theoretical methods used are an empirical method proposed by Martin (1976) and a potential method based on Rankine panel (DNV, 2010). The results from the theoretical methods are compared with and verified by those of model tests. Results of empirical formula showed somewhat larger motion RAOs and resonant frequencies than those of model tests. Potential based method showed even larger discrepancies with the model test results. From the analyses of comparison results, we could confirm the limitation of each theoretical method and suggest the way of improvement for the better prediction of motion performances.

Keywords : Planing hull(활주선), High-speed model test(고속모형시험), Motion response(운동응답), Empirical formula(경험식), Potential theory(포텐셜이론)

1. 서론

활주선은 실제 해상상태에서 운항될 경우 선형에 따라 안정성이나 내항성능 등이 민감하게 변화한다. 활주선 설계 시에는 대상선의 유체성능을 설계 과정에 잘 반영하여 안전하고 경제적인 운항이 가능한 선형을 개발하여야 한다.

본 연구에서 대상으로 하는 40ft 급 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) 소재의 크루즈 레저보트는 하드차인(hard chine)을 가진 단동 활주선 형태이고, 레저용 선박이기 때문에 탑승 시의 안전과 안락함이 요구된다. 이를 위해 특히 초점을 두어야 하는 유체역학적 성능은 파 중 운동성능이며, 본 논문에서는 대상선이 고속 운항할 경우의 운동성능을 다양한 방법으로 추정하고자 한다.

활주선 건조 이전의 설계 과정에서 실선의 운동성능을 추정할 수 있는 방법은 크게 실험적인 방법과 계산에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 실험적인 방법은 수조 시험이 가능한 정도로 축소 모형을 만들어 조파시설이 있는 수조에서 고속예인시험을 수행하고 시험 결과를 토대로 실선의 성능을 추정하는 것이다. Fridsma (1969), Savitsky and Brown (1976), Bessho (1977), Ikeda, et al. (1996), Kang, et al. (1996), Kim, et al. (2009a, 2009b, 2010) 등에 의해 활주선 모형에 대한 운동시험이 수행된 바 있다. 그리고 계산에 의한 방법은 주로 이전의 모형시험 자료를 바탕으로 전개된 경험식 (Savitsky & Brown, 1976; Martin, 1976) 이 있으며, 포텐셜 이론을 기반으로 한 2D+ ϵ 방법 (Sun & Faltinsen, 2011)이나 VLM(Vortex Lattice method) 방법 (Lai & Troech, 1996)이 있다. 최근에는 자유표면을 포함한 3차원 활주

문제를 CFD(Computational Fluid Dynamics) 방법 (Ifrati & Broglia, 2010)으로도 접근하고 있다.

본 연구에서는 실험적인 방법과 계산에 의한 방법 두 가지를 모두 사용하여 대상선의 운동성능을 추정하고, 두 결과를 비교하여 분석하였다. 먼저 실험적 방법, 즉 모형시험을 수행하는 경우 대상선의 항주 자세 변화 및 운동 성능을 잘 포착하려면 실선에 대한 모형선 축소 비율이 너무 작지 않은 것이 유리하며, 이를 위해 가능한 높은 속도에서 예인할 수 있는 장비가 필요하다. 본 연구에서는 최대 속도가 약 10m/sec인 서울대학교 선형시험수조의 고속예인전차를 이용하여 1/6의 축척비를 갖는 모형을 대상으로 고속예인시험을 실시하였다. 속도별 정수 중 항주 자세를 측정하고, 순항속도 및 최대속도 조건에서 다양한 주파수의 선수 규칙 파 중 운동을 계측하였다.

한편 계산에 의한 방법으로 경험식에 의한 계산과 포텐셜 기반 상용 프로그램 해석을 함께 수행하였다. 구체적으로 Martin (1976)의 경험식을 통해 파 중에서 대상선의 운동성능을 추정하고, 포텐셜 이론 기반의 상용 프로그램인 WASIM (DNV, 2010)을 이용하여 파 중 운동 성능을 추정하였다. Martin (1976)의 경험식은 활주선이 주형일 경우에만 적용할 수 있고 WASIM과 같은 포텐셜 프로그램은 중저속 배수량형 선박에만 적용하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 모형시험 결과를 기준으로 두 가지 계산이 얼마나 차이를 보이는지, 그리고 계산법을 더 발전시켜 앞으로 활주선 계산에 적용 가능한지를 판단하는 것에 초점을 두었다. 따라서 모형 시험 결과를 기준으로 두 가지 계산법에 의한 추정 결과를 비교하고 차이가 발생하는 원인을 분석하였다.

2. 모형시험

2.1 모형선

대상선은 40ft 급 크루즈 레저보트이며 실선과 1/6 축소 모형선의 주요 제원은 Table 1과 같다. 실선의 일반배치도와 정면선도는 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

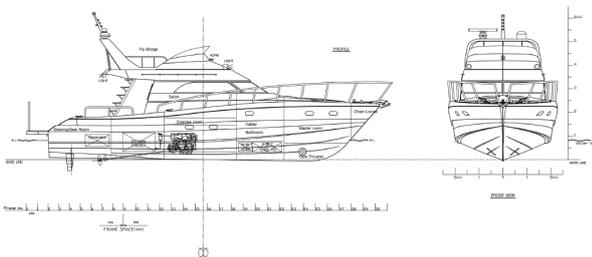


Fig. 1 General arrangement of a 40ft class leisure boat

2.2 고속예인시스템

본 연구에서의 모형시험은 서울대학교 선형시험수조에서 최고 속도 약 10m/sec인 경량형 고속예인전차를 이용하여 수행되었다. 연직면 자세 계측 장치는 상하동요와 종동요를 구속하지 않고 각각의 변위를 포텐셜미터로 계측하는 방식이며 상하동요를 계측하기 위한 수직 예인봉은 그와 같은 무게의 보정추를 통해

무게를 상쇄시켜서 모형의 배수량이 증가하지 않도록 하였다. 본 시험에서 보정추의 질량은 모형선 질량의 6% 정도이다. 고속예인전차와 연직면 자세 계측 장치 및 모형선 취부 상태의 사진은 Fig. 3과 같다.

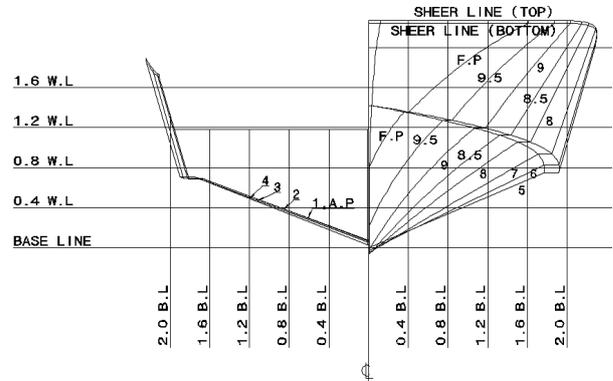


Fig. 2 Body plan of a 40ft class leisure boat

Table 1 Main particulars of a 40ft class leisure boat

Particular	Real ship	Model ship
Displacement [kgf]	16240	73.35
Length overall (LOA) [m]	14.8	2.467
Length between perpendiculars (LBP) [m]	11.996	2.0
Breadth (B) [m]	4.564	0.761
Depth (D) [m]	2.0	0.333
Draft (d) [m]	0.81	0.135
Maximum speed [knots / m/sec]	25 / 12.86	- / 5.25
Cruising speed [knots / m/sec]	20 / 10.29	- / 4.20
Longitudinal center of gravity (LCG) [m]	-1.168	-0.195
Vertical center of gravity (KG) [m]	1.123	0.204
Pitch radius of gyration [m]	3.7	0.617
Roll radius of gyration [m]	1.6	0.266



Fig. 3 Setup for model tests of a 40ft class leisure boat

항주 시 트림이 발생할 경우 추진 방향은 수면과 트림각 만큼의 각도를 이루는데 실제 선박과 동일한 추진 효과를 내려면 바깥 추력선 방향으로 예인하여야 한다. 따라서 연직면 자세 계측 장치 중에서 종동요를 계측하는 부분은 항상 추력선 방향으로 예인할 수 있도록 설계되었다.

2.3 모형선 중량분포 및 시험조건

FRP로 제작된 모형선에 추를 더하여 전체 중량을 맞추고, 추의 위치를 변경하면서 흘수와 무게중심을 맞추었다. 그리고 파종에서의 실선 운동을 모형선으로 재현하기 위해서는 관성반경을 실선과 동일하게 맞추어야 한다. 관성반경 테이블을 이용하여 종방향 진자운동의 주기를 측정하고 원하는 관성반경이 되도록 추를 분포시켰다.

Table 2 Test conditions for running attitude tests in calm water

Froude No.	Real ship speed [knots]	Model ship speed [m/sec]	Measured value
0.47	10.0	2.10	rise of C.G., trim
0.59	12.5	2.63	
0.71	15.0	3.15	
0.83	17.5	3.68	
0.95	20.0 (Cruising)	4.20	
1.07	22.5	4.73	
1.19	25.0 (Maximum)	5.25	
1.30	27.5	5.78	
1.42	30.0	6.30	

Table 3 Test conditions for motion tests in regular waves

Wave condition	Non-dimensional encounter frequency [rad/sec]	Encounter frequency [rad/sec]	Wave frequency [rad/sec]		Measured value
			Fn = 0.95	Fn = 1.19	
Amplitude =20mm	2.5	2,614	2,614	2,415	wave elevation, heave, pitch
	3.0	2,942	2,942	2,711	
	3.5	3,244	3,244	2,985	
Direction =180° (head waves)	4.0	3,528	3,528	3,240	
	4.5	3,796	3,796	3,481	
	5.0	4,051	4,051	3,709	
	6.0	4,524	4,524	4,136	

정수 및 선수 규칙파 종에서의 시험 조건은 각각 Table 2 및 Table 3과 같다. 정수 중 시험은 실선 대비 10~30노트, Froude 수로는 0.47~1.42 영역에서 수행되었으며 아홉 가지 각 속도별

로 등속 항주 시의 부상량(rise of C.G.)과 트림각(trim angle)을 계측하였다.

파 중 시험에서는 순항속도인 20노트와 최대속도 25노트일 때 무차원 조우주파수 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0 일곱 가지 경우에 대해 상하동요 및 종동요, 파고를 계측하였다. 단, 조우주파수는 $\sqrt{(g/L_{WL})}$ 로 무차원화하였다. L_{WL} 은 수선간길이, g 는 중력가속도이다. 모형시험 시 파진폭은 20mm로 고정하였다.

2.4 정수 중 시험 결과

Fig. 4와 Fig. 5에 Froude 수에 따른 부상량과 트림각 결과를 각각 그래프로 나타내었다. 원형점은 서울대학교(SNU) 수조에서 수행한 모형 시험 결과이고, 사각점 및 실선은 서일본유체기술연구소(FEL ; West Japan Fluid Engineering Laboratory)의 회류수조에서 동일선형을 대상으로 수행한 모형 시험 결과이다. 부상량은 모형선의 수선간길이에 대한 비율로, 트림각은 각도(degree) 단위로 나타내었다. 부상량은 자유표면에 수직하게 연직상방으로 부상하는 값이 (+)이고 트림각은 선수가 들리는 방향이 (+)이다. 예인속도가 빨라질수록 선체가 부상하고 트림각이 커지면서 활주를 하게 되며, 속도가 빨라질수록 차인의 침수 시작 위치가 선미 쪽으로 옮겨진다. 순항속도인 20노트(Froude 수 0.95) 부근과 그 이상의 속도에서는 안정적인 활주를 하는 것을 확인할 수 있다.

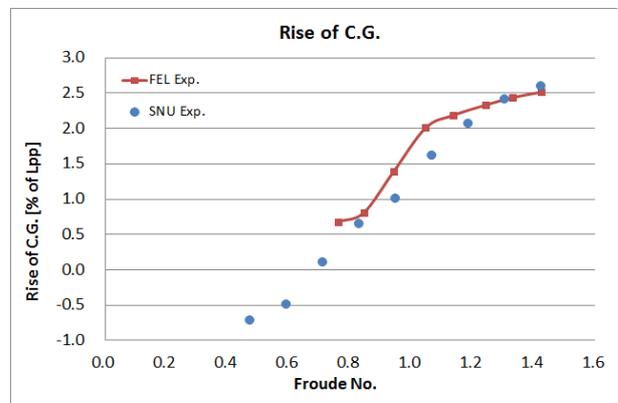


Fig. 4 Variation of rise of C.G. with Froude number

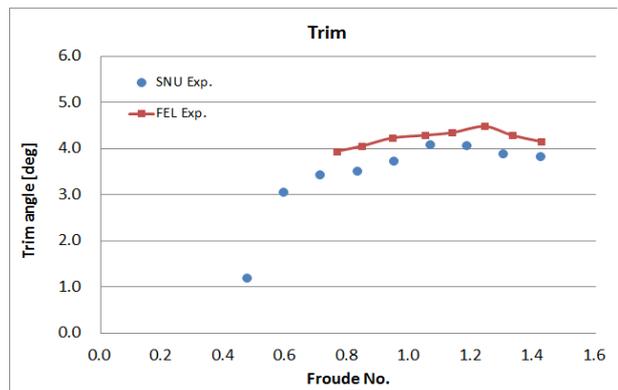


Fig. 5 Variation of trim with Froude number

부상량은 저속에서 음의 값이었다가 꾸준히 증가하여 Froude 수 약 0.7, 즉 실선 속도 약 15노트부터 양의 값을 보이며 그 이후에도 30노트까지 계속 증가한다. 트림각은 Froude 수 0.5~0.6에서 갑자기 급격히 증가하여 3도 이상이 된 후 그 이상의 속도에서 완만히 4도 정도까지 증가하고, Froude 수 1.1 이상에서는 약간 감소하는 것을 확인할 수 있다. 순항속도인 20노트일 때는 수선간길이의 약 1%, 최대속도 25노트일 때는 수선간길이의 약 2% 정도 부상하며, 두 경우에 트림각은 각각 3.7°, 4.1°이다.

2.5 선수 규칙파 중 시험 결과

선수 규칙파에서 실선 속도 20노트, 25노트 두 가지일 때 무차원 조우주파수 2.5~6.0일 경우의 상하동요와 종동요 진폭을 각각 파진폭(A)과 파기울기(kA)로 무차원화 한 값은 Fig. 6과 Fig. 7과 같다. 원형점은 20노트, 마름모점은 25노트일 때의 결과이다. 상하동요와 종동요는 각각 무차원조우주파수 3.5, 3.0 근처가 공진 대역이며 그 이상의 고주파수에서는 주파수가 높아질수록 운동의 무차원 값이 꾸준히 감소한다. 20~25노트의 고속 항주 영역에서는 속도가 커질수록 운동 진폭이 커지는 것으로 나타났다.

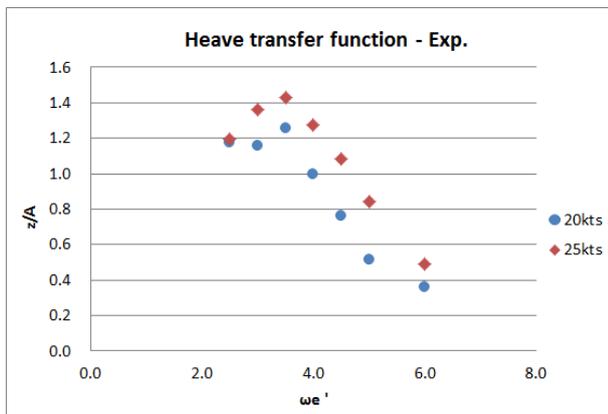


Fig. 6 Heave transfer function at 20 & 25knots

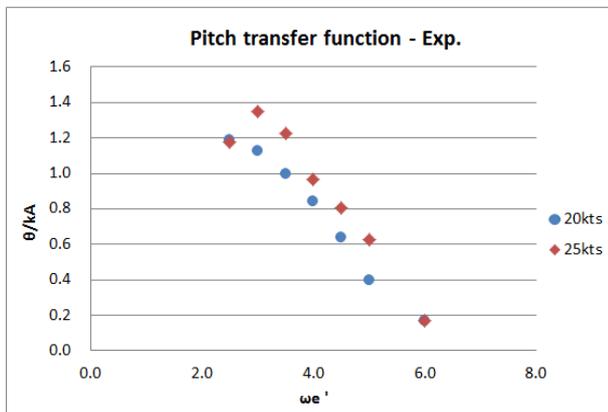


Fig. 7 Pitch transfer function at 20 & 25knots

3. 운동성능 해석

3.1 경험식에 의한 추정

활주선의 연직면 운동을 표현하는 좌표계를 Fig. 8에 나타내었다. 자유표면과 평행한 전방을 X좌표, 연직 하방을 Z좌표로 하고 정수 중 초기 등속 항주 시의 무게 중심 위치를 원점으로 하여 속도 U로 전진하는 등속 이동 좌표계 O-XYZ와 선수 방향 x좌표, 선저 방향을 z좌표로 하고 고속선의 무게 중심에 원점이 고정된 선체 고정 좌표계 o-xyz로 구성된다.

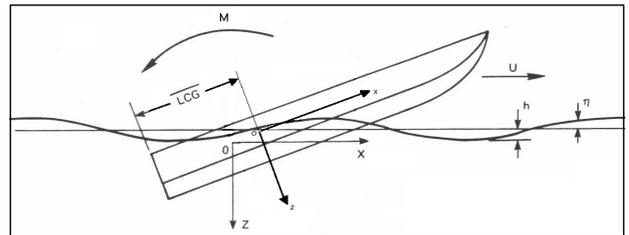


Fig. 8 Coordinate system

Martin (1976), Baek (1986), Kim, et al. (2009b; 2010) 등의 연구에 의하면 규칙파 중 활주선의 연직면 운동방정식은 식 (1)과 같다. 변위, 속도, 가속도에 대한 선형항만을 고려하였고 우변은 조우주파수 ω_e 인 규칙파에 의한 파강제력과 파강제모멘트이다.

$$(Z_z - m)\ddot{z} + Z_z\dot{z} + Z_z z + Z_\theta\ddot{\theta} + Z_\theta\dot{\theta} + Z_\theta\theta = Z_w e^{-i\omega_e t} \quad (1)$$

$$M_z\ddot{z} + M_z\dot{z} + M_z z + (M_\theta - I_y)\ddot{\theta} + M_\theta\dot{\theta} + M_\theta\theta = M_w e^{-i\omega_e t}$$

Martin (1976)에 의하면, 식 (1) 좌변의 유체력 미계수는 활주선 각 횡단면의 부가질량, 트림각, 3차원 영향계수 등의 함수로 표현할 수 있다.

한편 우변의 파강제력은 식 (2)와 같이 각 파강제력 성분들의 합으로 표현할 수 있다.

$$Z_w e^{-i\omega_e t} = -[F_1 + F_2 + F_5 + F_p + F_h] \cos \tau \quad (2)$$

$$M_w e^{-i\omega_e t} = M_1 + M_2 + M_5 + M_p + M_h$$

식 (2)에서 아래첨자 1, 2, 5는 각각 파고, 파속도, 파기속도 관련 성분이며, p는 Froude-Krylov 성분, h는 파고에 의해 keel의 평균 침수길이가 변하면서 추가되는 성분을 의미한다.

식 (1)의 유체력미계수 및 식 (2)의 파강제력 성분들의 자세한 수식 전개는 Martin (1976), 또는 Kim, et al. (2009b, 2010)의 연구를 참고하길 권장한다.

활주선의 상하동요 및 종동요는 규칙파의 조우주파수와 동일한 주파수를 갖는 주기운동이므로 식 (3)과 같이 가정할 수 있다.

$$z = z_0 e^{-i\omega_e t} \quad (3)$$

$$\theta = \theta_0 e^{-i\omega_e t}$$

식 (1)의 모든 유체력 미계수와 파강제력 성분을 수식화 한 후, 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 두 방정식을 연립하여 풀고 양변의 지수항 $e^{-i\omega_e t}$ 를 소거하면 복소수 형태의 z_0, θ_0 가 얻어지며 상하 동요와 종동요의 전달함수는 각각 식 (4)처럼 계산할 수 있다. A 는 파진폭, k 는 파수(wave number)이다.

$$\begin{aligned} \text{Heave transfer function} &= |z_0|/A \\ \text{Pitch transfer function} &= |\theta_0|/kA \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 포텐셜 이론에 의한 추정

DNV(Det Norske Veritas, 노르웨이 선급협회)프로그램인 WASIM (DNV, 2010)을 사용하여 대상선의 운동해석을 수행하였다. WASIM은 포텐셜 이론에 근거하여 전진속도가 있는 선박의 전선 운동과 국부하중 등을 계산하는 프로그램이다. 물체와 자유표면에 격자를 생성하고 랭킨소스패널법(Rankine source panel method)으로 포텐셜 계산을 수행한다. 시간영역에서 우선 계산하고, 그 결과를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서의 RAO(Response Amplitude Operator)를 추출한다.

비점성 유동으로 가정할 경우 전체 속도 포텐셜 Φ 는 식 (5)와 같이 라플라스 방정식을 만족하며, 각 성분들의 합으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\nabla^2 \Phi(\vec{x}, t) = 0 \quad (5)$$

$$\Phi(\vec{x}, t) = \phi_B(\vec{x}) + \phi_L(\vec{x}, t) + \phi_M(\vec{x}, t) + \phi_I(\vec{x}, t) \quad (6)$$

ϕ_B, ϕ_L, ϕ_M 은 각각 basis, local, memory 포텐셜 성분이며, ϕ_I 는 incident wave 포텐셜이다.

경계조건으로는 물체 경계조건, 자유표면 경계조건, 무한원방 경계조건이 있다. 수식으로 각각 나타내면 식 (7), (8), (9)와 같다. S_B 는 물체의 표면이며, ζ 는 파고를 의미한다.

$$\frac{\partial \Phi(\vec{x}, t)}{\partial n} = \vec{V}_B \cdot \vec{n} \quad \text{on } S_B \quad (7)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \nabla \Phi \cdot \nabla\right)[z - \zeta(x, y, t)] = 0 \quad \text{on } z = \zeta \quad (8)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -g\zeta - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \quad \text{on } z = \zeta$$

$$\nabla \Phi \rightarrow 0 \quad \text{at } S_\infty \quad (9)$$

식 (5)를 지배방정식으로 하고, 식 (7)~(9)을 경계조건으로 하

는 경계치 문제를 풀게 된다. DNV (2010), Kring (1994) 등을 참고하면 구체적인 계산 과정은 Fig. 9와 같다.

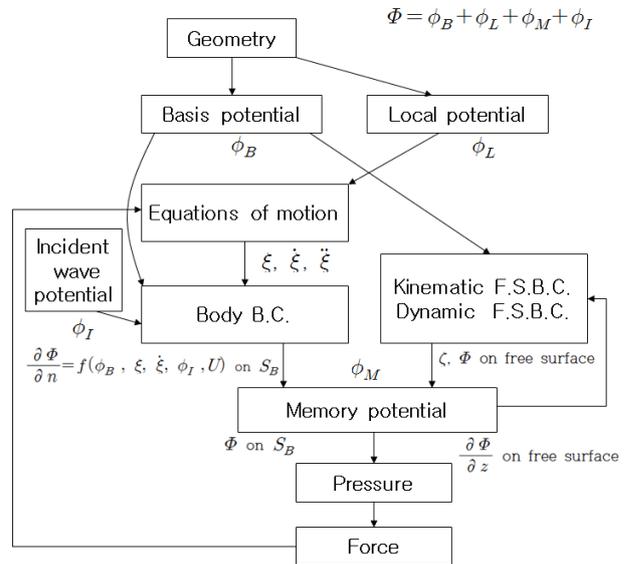


Fig. 9 Calculation procedure of WASIM program

수치계산을 위해 우선 선형을 모델링해야 한다. 대상 레저보트 모델링을 위해 레저보트 실선 스케일로 각 횡단면 오프셋을 입력하였고, 레저보트의 트랜섬과 차인 형태를 가능한 충실히 고려하기 위하여 패널의 개수를 다양하게 조절하면서 선체 전체를 모델링하였다. 최종적으로 해석에 사용한 선형과 자유표면 상의 패널은 Fig. 10과 같다.

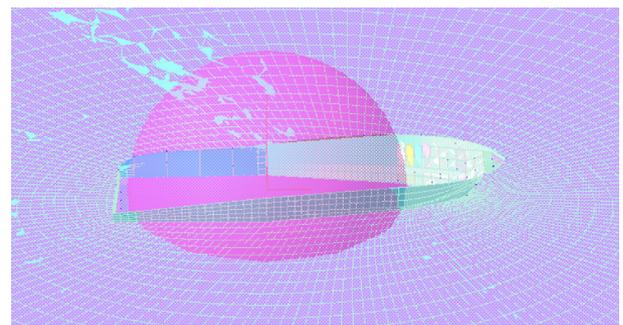


Fig. 10 Panels on the hull and on the free surface

3.3 계산 결과와 실험 결과의 비교

경험식 및 포텐셜 프로그램을 통한 상하동요, 종동요 전달함수 추정 결과를 2장의 모형시험 결과와 비교하여 그래프로 나타내면 Figs. 11, 12와 같다. 속이 찬 원점과 마름모점은 실선 속도 20 노트, 25노트에 해당하는 모형시험 결과이고, 실선과 점선은 각각 속도 20노트, 25노트일 때 Martin의 경험식에 의한 추정 결과이다. 그리고 속이 빈 원점과 마름모점은 역시 속도 20노트, 25노트일 때 포텐셜 프로그램으로 계산한 결과이다.

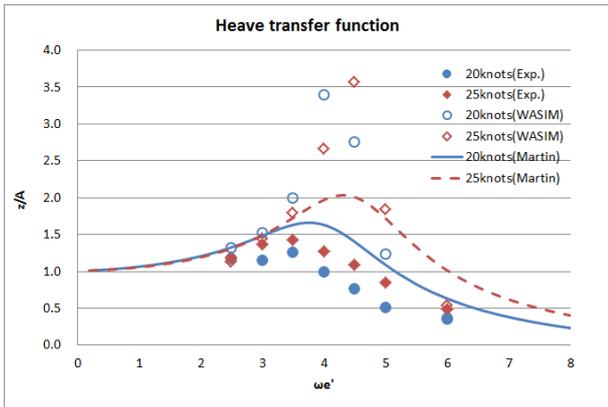


Fig. 11 Heave transfer function (Model test / Martin's formula / WASIM)

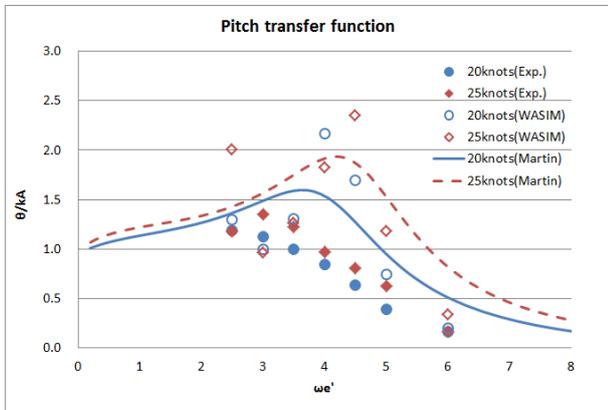


Fig. 12 Pitch transfer function (Model test / Martin's formula / WASIM)

모형시험의 경우 모형선 무게중심 위치에 예인봉이 위치한다. 정적으로는 보정추에 의해 예인봉 무게가 상쇄되어 전체 배수량에 영향을 주지 않으나, 파 중에서 동적 조화운동을 하는 경우 예인봉과 보정추에 의해 특히 상하동요의 부가질량이 증가할 것으로 추정된다. 따라서 예인봉이 존재하는 모형선은 실선에 비해 운동의 무차원 공진주파수가 낮아질 것이다.

Martin 경험식에 의한 추정 결과를 보면, 속도가 빨라질수록 운동 진폭이 커지며, 이는 모형시험의 경향과 같다. 하지만 모형 시험에 비해 운동 진폭이 과도하게 추정된다. Martin의 경험식은 모든 횡단면의 선저경사각이 동일하고, 초기 부양상태에서 keel과 차인이 수면과 평행한 주형 활주선을 대상으로 한다. 본 연구의 활주선은 선미 트랜섬부터 중앙부까지는 선저경사각이 약 20도로 일정하나, 선수로 갈수록 선저경사각이 50도 정도까지 증가한다. 또한 차인이 선수쪽으로 갈수록 위로 상승하므로 초기 부양상태부터 선수부의 선저가 유체와 받음각을 갖는 형태이다. 이와 같은 비주상형 활주선을 적용하려면 경험식의 보완이나, 혹은 입력 변수의 적절한 보정이 필요하다.

포텐셜 프로그램에 의한 계산은 모형시험과 비교하여 더 큰 차이를 보이고 있다. 공진주파수는 경험식에 의한 계산 결과와 유

사하나, 운동 진폭은 모형시험 및 경험식 계산 결과보다 현저하게 크다. 특히 종동요 전달함수는 무차원 조우주파수 2.5일 때 모형 시험과 반대 경향이다. 차인처럼 매끄럽지 않고 불연속적인 형상을 모델링에 정확히 반영하기 어렵고, 선저에 작용하는 양력 성분을 계산할 수 없는 프로그램의 한계로 인해 계산 결과가 모형 시험 결과와 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 WASIM과 같은 3차원 포텐셜 계산 프로그램을 활주선 문제에 그대로 적용하는 것은 무리이며, 고속에서 받는 양력을 계산할 수 있도록 근본적인 보완이 요구된다.

3.4 경험식 입력 변수의 보정 및 결과 분석

앞 절에서와 같이 경험식 및 포텐셜 프로그램으로는 대상 비주상체 활주선의 운동성능을 정도 높게 추정하기 어렵다. 상용 포텐셜 프로그램은 현실적으로 내부 코드 수정이 어려우므로 논외로 하고, 경험식 계산에 한하여 합리적으로 입력 변수를 변경하여 추정값의 정도를 높이고자 한다.

Savitsky (2012)는 비주상체의 특성을 대표하는 트림각(τ_e ; equivalent trim angle)과 선저경사각(β_e ; equivalent deadrise angle)을 적절히 택한다면 기존의 주상체 정수 중 성능 추정식을 그대로 이용하여도 큰 오차가 없음을 보였다. 주상체, 혹은 비주상체의 선저 압력분포를 보면 차인이 침수되지 않는 선수부 정체선(stagnation line)의 압력이 대부분의 비중을 차지한다. 따라서 Savitsky는 비주상체의 트랜섬부터 선수쪽으로 평균침수깊이 위치에서 B/4 buttock line과 keel이 이루는 받음각을 대표트림각(τ_e)으로, 동일한 위치 횡단면의 선저경사각을 대표선저경사각(β_e)으로 정의하였다.

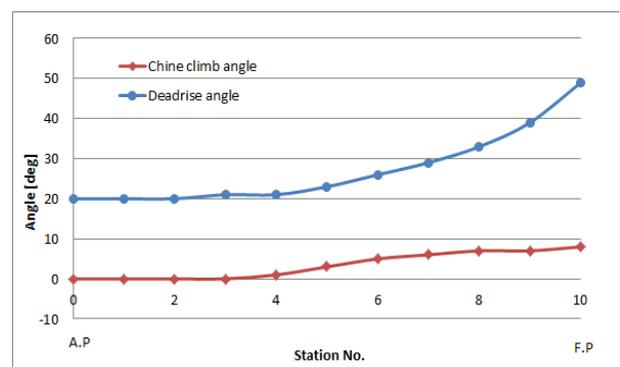


Fig. 13 Chine climb angle and deadrise angle at each station

정량적인 차이는 있지만 파 중에서도 선저압력의 큰 비중이 선수부에 가해지므로 Savitsky (2012)의 방법을 동일하게 적용해 보기로 한다. Fig. 13은 대상 비주상체 활주선의 각 스테이션 별 keel을 기준으로 한 차인의 상승각도와 선저경사각을 그래프로 나타낸 것이다. 20~25노트의 고속영역에서 평균침수깊이는 대략

7번 스테이션에 위치한다. 따라서 대상선의 대표선저경사각 β_e 는 28도로 결정하였다. 그리고 이 위치에서 차인상승각도는 약 7도이나 대표트림각 τ_e 는 B/4 buttock line의 받음각이기 때문에 절반인 3.5도로 근사하여 결정하고, 이를 추정식 계산 시 기준이 되는 정수 중 항주 트림에 더하였다.

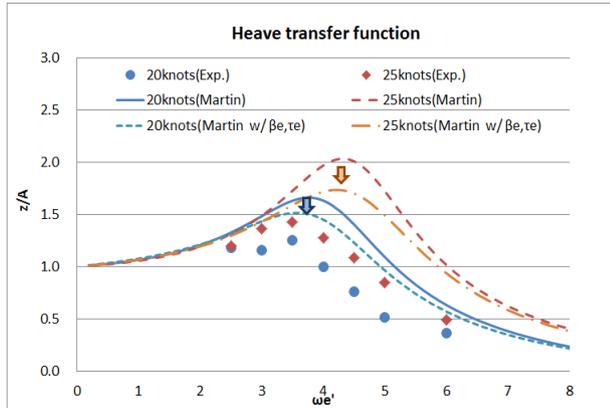


Fig. 14 Heave transfer function (Model test / Martin's formula w/o and w/ β_e, τ_e)

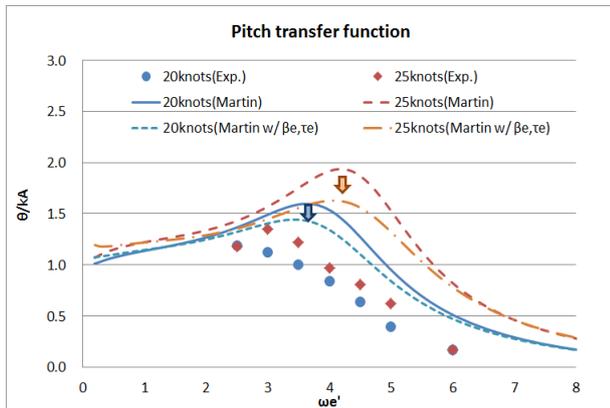


Fig. 15 Pitch transfer function (Model test / Martin's formula w/o and w/ β_e, τ_e)

계산 결과를 모형시험 결과와 함께 그래프로 나타내면 Fig. 14, Fig. 15와 같다. 대표트림각(τ_e)과 대표선저경사각(β_e)을 Martin 추정식에 대입한 결과 공진주파수 부근의 상하동요와 종동요 무차원 값이 10~15% 감소하면서 모형시험 결과에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 여전히 모형시험에 비해 운동 진폭이 다소 크게 추정된다.

따라서 비주상체 활주선의 선형을 충분히 고려하여 파 중 운동 성능을 추정할 수 있는 방안이 필요하다. 그리고 고속선 모형시험은 예인장비의 속도 한계로 모형의 크기와 중량이 작고 예인봉의 영향이 상대적으로 커지게 되므로, 가능한 예인봉을 경량화하여야 하며, 가능하다면 추정식에 이러한 장비의 영향까지 포함시키는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 연구에서는 대상선인 크루즈 레저보트의 운동 성능을 실험적인 방법과 계산에 의한 방법으로 각각 추정하고 결과를 비교, 분석하였다. 구체적인 분석 결과는 다음과 같다.

- 정수 중 모형시험에 의하면 순항 속도인 실선 20노트에서는 수선간길이의 1%만큼 부상하고, 트림각은 3.7도이다. 최대 속도인 실선 25노트에서는 수선간길이의 약 2%만큼 부상하고, 트림각은 4.1도로 예측되었다. 서울본유체기술연구소에서 동일 선형으로 예측한 결과와 본 연구의 모형 시험 결과가 큰 차이가 없이 유사한 것을 확인하였다.
- 규칙파 중 모형시험을 통하여 순항 속도 및 최대 속도 조건에서 다양한 주파수 영역의 상하동요, 종동요 전달함수를 도출하였다. 상하동요와 종동요 각각 무차원 조우주파수 3.5, 3.0가 공진주파수이며, 최대속도일 때 상하동요 진폭은 파진폭의 약 1.5배, 종동요 진폭은 파기울기의 약 1.3배이다.
- 포텐셜 이론을 기반으로 하는 상용 프로그램 WASIM을 이용하여 운동 성능을 추정하였다. 안정된 계산을 위해 가능한 원래 선형을 유지하는 한도 내에서 차인, 트랜섬 등을 부드럽게 생성하였다. 하지만 모형시험 결과에 비교할 때 추정된 운동 진폭이 현저하게 크다. 포텐셜 방법으로는 활주선에 가해지는 양력을 적절히 추정할 수 없다고 판단되며, 양력을 계산하여 추가할 수 있는 계산법이 근본적으로 필요하다.
- Martin (1976)의 경험식을 이용하여 규칙파 중 운동 성능을 추정할 경우 계산된 파 중 상하동요와 종동요의 공진 주파수가 모형시험 결과보다 높고, 운동 진폭이 과도하게 추정되었다. Savitsky (2012)가 제안한 비주상체 활주선의 정수 성능 해석법을 접목하여 운동 진폭이 약간 감소하고 결과가 개선되었지만 모형시험 결과와는 여전히 차이가 있다. 앞으로 비주상체 활주선의 선형을 충분히 고려하여 운동성능을 추정할 수 있는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2011년~2012년 지식경제부 광역경제권 연계협력 사업(A000500128), 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단, 국토해양부 연구사업 '다목적 지능형 무인선 국산화 개발' 과제 지원으로 수행되었습니다.

References

Baek, K.H., 1986. *An analysis of the stability and the motion responses of a planing craft*. M.S. Thesis. Seoul National University.

Bessho, M., 1977. Motions of a High Speed Planing Boat in Regular Head Sea. *Journal of the Society of*

- Naval Architects of Korea*, 14(4), pp.36-44.
- DNV, 2010. *SESAM User Manual : WASIM 4.3-04, Wave Loads on Vessels with Forward Speed*, Det Norske Veritas.
- Fridsma, G., 1969. A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Crafts, *Davidson Laboratory Report 1275*, Stevens Institute of Technology.
- Iafrati, A. & Broglia, R., 2010. Comparisons between 2D+t potential flow models and 3D RANS for planing hulls hydrodynamics. *Proceedings of 25th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Harbin, China, 9-12 May 2010, pp.65-68.
- Ikeda, Y. et al., 1996. Development of an Experimental Method to Assess the Performance of a High-Speed Craft(2nd Report). *Journal of Kansai Society of Naval Architects*, 226, pp.77-84.
- Kang, C.G. et al., 1996. Attitude Control Tests for a High Speed Catamaran in Regular Head Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(2), pp.36-43.
- Kim, D.J. Rhee, K.P. & Park, H.S., 2009a. A Study on the Effects of Weight and Center of Gravity of a Planing Craft on Running Attitude. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.335-342.
- Kim, D.J. Rhee, K.P. Hwang, S.H. & Park, H.S., 2009b. An Experimental Study on the Motion Response of a High-Speed Planing Craft in Regular Head Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(4), pp.373-381.
- Kim, D.J. Rhee, K.P. You, Y.J. & Park, H.S., 2010. An Experimental Study on the Vertical Motion of a High-Speed Planing Craft in Regular Following Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.496-507.
- Kring, D.C., 1994. *Time domain ship motions by a three-dimensional rankine panel method*. Ph.D. Massachusetts Institute of Technology.
- Lai, C. & Troesch, A.W., 1996. A Vortex Lattice Method for High Speed Planing. *International Journal of Numerical Method in Fluids*, 22(6), pp.495-513.
- Martin, M., 1976. Theoretical Prediction of Motions of High-Speed Planing Boats in Waves, *DTNSRDC Report 76-0069*.
- Savitsky, D. & Brown, P.W., 1976. Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water. *Marine Technology*, 13(4), pp.381-400.
- Savitsky, D., 2012. The effect of bottom warp on the performance of planing hulls. *Proceedings of 3rd Chesapeake Powerboat Symposium*, Annapolis, Maryland, USA, 15-16 June 2012.
- Sun, H. & Faltinsen, O.M., 2011. Dynamic Motions of Planing Vessels in Head Seas. *Journal of Marine Science and Technology*, 16(2), pp.168-180.

