

축소 모형을 활용한 선수 규칙파 중 수륙양용장갑차의 내항 성능 평가

허영민^{1,†} · 전명준² · 윤현규³
국방과학연구소 지상기술연구원¹
국방과학연구소 해양기술연구원²
국립창원대학교 스마트오션모빌리티공학과³

Evaluation of Seakeeping Performance for an Amphibious Vehicle in Regular Head Waves Using Scaled Model

Youngmin Heo^{1,†} · Myungjun Jeon² · Hyeon Kyu Yoon³
Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development¹
Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development²
Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon 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.

In the present study, seakeeping performance for an amphibious vehicle in regular head waves was analyzed and evaluated experimentally and numerically. First, seakeeping tests were performed to confirm the vehicle's motion response of heave, pitch motion and vertical acceleration in restricted wavelength ratio conditions for a simplified vehicle shape. Numerical analyses were also conducted for a simplified vehicle shape to validate the numerical solver. To simulate the vehicle's motions, multi-degrees of freedom were calculated by a dynamic fluid-body interaction solver in STAR-CCM+. Comparison between numerical and experimental results was carried out for a simplified vehicle shape. Numerical results are in good agreement with experimental results. Second, numerical analyses were performed for a detailed vehicle shape considering seaway wavelength conditions. The seakeeping performance for an amphibious vehicle was evaluated by comparing with the existing ship's seakeeping performance standards.

Keywords : Seakeeping performance(내항 성능), Amphibious vehicle(수륙양용장갑차), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Model test(모형 시험)

1. 서론

최근 개발이 진행중인 한국형 수륙양용장갑차는 해상에서 고속 기동하여 연안으로 접근하는 임무를 수행하기 위한 목적으로 운용할 계획이 있다. 고속 기동을 위해 장갑차는 별도의 선수익 및 선미익과 같은 수상운행장치를 운용하며, 수상운행장치에 의해 수동역학적 압력은 차체에 작용하여 차체를 부양시켜 저항을 감소시킨다. 수상운행장치에 작용하는 파랑하중은 장갑차의 상하동요 및 종동요, 횡동요 운동 응답에 직접적인 관계가 있으며, 이러한 동적 거동은 장갑차의 작전수행능력에 영향을 미칠 수 있다. 더불어 지속적인 동요는 탑승 병력의 피로도 누적과 임무수

행능력을 현저히 저하시킬 우려가 있기 때문에 장갑차의 설계 단계에서 내항 성능에 대한 분석은 세심하게 수행되어야 하지만, 무기체계 개발사업의 특성상 공개된 자료가 많지 않고 내항 성능 분석에 대한 연구는 대체로 공개된 선형에 대해 수행되었다.

내항 성능 시험과 관련해서는 주로 선수 규칙파 조건에서 상하동요 및 종동요와 같이 2자유도 운동에 대한 시험이 이루어져 왔다. Martin et al. (2008)은 DTMB 5512 형상의 축소 모형시험을 통해 상하동요 및 종동요 운동 응답 연산자(Response Amplitude Operator, RAO)를 도출하였으며, 계측 결과에 대해 불확실성 분석을 수행하였다. Stern et al. (2014)는 KVLCC2 및 KCS 형상에 대해 2자유도 동적 거동과 선체에 작용하는 부가 저항 결과를 전산 해석 결과와의 비교 분석을 수행하였다. Sanada et al. (2021)은

KCS 선형에 대해 파장비 변화에 따른 상하동요, 종동요 및 부가 저항 시계열 데이터를 도출하고 다양한 축척비 조건에서 시험을 수행한 기관들이 도출한 결과와 비교하였다.

내항 성능을 추정할 수 있는 수치적 방법으로 크게 포텐셜 이론을 기반으로 한 방법과 점성의 영향을 고려할 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 활용하는 방법이 있다. 포텐셜 이론을 기반으로 한 방법의 경우 Park et al. (2014)는 3가지 수치 해석 기법(스트립법, 랜킨패널법, 직교격자법)을 적용하여 Series 60, S175 컨테이너선, KLVCC2 선박에 대해 부가저항 해석을 수행하였으며 실험 결과와의 비교를 수행하였다. 또한, Kim et al. (2012)은 부가저항을 해석하기 위해 랜킨패널법을 사용하여 시계열에서 불규칙 파 조건에서의 부가저항을 분석하여 불규칙파 해석에 대한 기준을 제시한 바 있다. 포텐셜 방법의 경우 비교적 계산 비용이 적게 들어 다양한 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 장점이 있는 반면, Froude 수에 대한 제한이 있어 비교적 고속으로 운항하는 운동체에 대한 운동 응답을 분석하기에는 비교적 한계가 존재하는 것으로 알려져 있다. 컴퓨터의 계산 처리 속도 증가 및 대용량 계산을 위한 병렬 프로그래밍에 대한 활용성이 높아짐에 따라 포텐셜 이론 기반 방법의 대안으로 CFD를 활용하여 선박의 내항 성능 분석을 수행한 연구가 최근 증가하고 있다. Sadat-Hosseieni et al. (2013)은 KLVCC2 선박 형상에 대해 전후 동요 구속 여부에 따라 수행한 CFD 해석 결과를 실험 결과와 비교하였으며 Oh et al. (2015)는 랜킨패널법과 상용 CFD 프로그램인 STAR-CCM+를 이용하여 AFRAMAX급 유조선의 파랑 중 부가저항을 계산하였고 그 결과를 모형시험과 비교하였다. 또한, Seo and Park (2017)는 오픈소스 CFD 해석 툴킷인 OpenFOAM을 활용하여 KCS 선형에 대해 상하동요 및 종동요 운동 성능과 부가 저항을 계산하였으며 계산된 결과를 실험 결과와 비교하였다.

한편, 내항 성능 기준은 장비의 운용 목적이나 승조원의 안전과 업무 가능성을 고려하여 선정한다. 북대서양조약기구(North Atlantic Treaty Organization, NATO)에서 제정한 STANAG4154 (MAS, 2000)에서는 함정의 임무 및 함정의 형상에 따른 내항 성능 기준을 제시하였으며 NORDFORSK (1987)에서는 작업의 복잡도에 따라 작업 가능한 함정의 운동 크기를 제안하였다. Bales and Cieslowski (1981)는 5,000톤급 구축함의 내항 성능 기준을 정상 임무 수행, 이동성 보존, 생존 가능한 세가지 측면에서 제안하였다. 이와 유사하게 Schaffer et al. (1983)는 DDG51 구축함에 요구되는 주요 임무를 이동 및 전투, 해상보급, 전투의 세 가지로 나누어 내항 성능 평가 기준을 선정하였다.

본 연구에서는 STANAG4154 등 기존 선박에서 적용될 수 있는 내항 성능 기준을 고려하여 수륙양용장갑차에 적용 가능한 내항 성능 기준을 선정하고 해석 결과와의 비교를 통해 수륙양용장갑차의 내항 성능을 평가한다. 수륙양용장갑차의 내항 성능 평가를 위해 선수 규칙파 조건에서 단순화된 장갑차 형상에 대해 축소 모형 시험과 CFD 해석을 수행하였다. 동일한 조건에서 도출된 시험 결과와의 비교를 통해 CFD 해석자의 유효성을 입증하고 실험 파장비 조건을 고려하여 장갑차 상세 형상에 대한 내항 성능

해석을 수행하였다. 이후 도출된 결과를 바탕으로 기존 내항 성능 기준과 비교를 통해 수륙양용장갑차의 내항 성능을 평가하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 서론에서 소개한 내항 성능 기준을 정리하여 종합하였으며 수륙양용장갑차에 적용 가능한 내항 성능 지표를 선정하였다. 또한, 각 내항 성능 항목을 도출하는 절차에 대한 내용을 수록하였다. 3장에서는 본 연구에서 수행한 내항 시험 및 CFD 해석 전반에 대한 내용을 수록하였다. 4장에서는 도출된 결과를 바탕으로 내항 성능 평가를 수행하였다. 5장에서는 본 연구의 결과를 정리하였다.

2. 내항 성능 기준 선정 과정

2.1 내항 성능 기준 소개 및 선정

Table 1 Seakeeping performance criteria of various reference

Reference	Index	Unit	Criteria level	Location
STANAG 4154 (MAS, 2000)	Pitch	SSA (deg)	3°	-
	Roll	SSA (deg)	8°	-
	Vertical acceleration	SSA (g)	0.4	Bridge
	Propeller emergence	no./hr	90%	1/4 Propeller diameter
	Slamming index	no./hr	20%	Keel
	Motion sickness incidence	%,hr	20%, 4hr	Task location
Schaffer et al. (1983)	Pitch	SSA (deg)	3°	-
	Roll	SSA (deg)	10°	-
	Vertical acceleration	SSA (g)	0.4	Bridge
	Lateral acceleration	SSA (g)	0.2	Bridge
	Propeller emergence	no./hr	24	Sonar dome
	Slamming index	no./hr	20	Station 3
Republic of Korea Navy (2004)	Deck wetness	no./hr	30	Station 0 (FP)
	Pitch	SSA (deg)	4.8°	Center of gravity
	Roll	SSA (deg)	12.7°	Center of gravity
	Vertical acceleration	SSA (g)	0.3	Bridge
	Lateral acceleration	SSA (g)	0.24	Bridge
	Slamming index	no./hr	20	0.15% of LBP abaft F.P
	Deck wetness	no./hr	30	F.P

Table 2 Seakeeping performance criteria for an amphibious vehicle

Index	Unit	Criteria level	Location
Pitch	SSA (deg)	4.8°	Center of gravity
Vertical acceleration	SSA (g)	0.4	Sternmost seat
Intake emergence	no./hr	24	Intake
Motion Sickness Incidence (MSI)	%,hr	20%, 2hr	Sternmost seat

수륙양용장갑차의 내항 성능 평가를 위해 먼저 문헌 조사 결과를 바탕으로 수상함에 사용되고 있는 기준을 확인하였다. 확인한 내용을 문헌별로 종합하여 Table 1에 나타내었다. 서론에서 다룬 STANAG4154의 경우 해상 임무별 기준이 상이하지만, 장갑차의 운용 목적인 목적지로의 기동 및 공격을 위한 주요 장비 성능 유지 가능과 비교적 유사한 수송 및 정찰(Transit and Patrol, TAP) 임무의 내항 기준을 나타내었다. STANAG4154에서 내항 성능 기준으로 제시하는 MSI는 O'hanelon and McCauley (1974)의 연구에서 제안되었으며 승객이 일정한 주파수 운동에 대한 수직 가속도에 2시간 동안 노출되었을 때의 멀미 발생 확률을 의미한다. MSI 계산 절차는 2.3절에 상세히 나타내었다. Schaffer et al. (1983)에서 나타난 세 가지 주요 임무 중 이동 및 전투(transit and combat) 임무가 수륙양용장갑차의 운용 목적과 유사하기에 해당 임무에 대한 내항 성능 기준을 나타내었다. 또한, 대한민국의 내항 성능 설정 지침 (Republic of Korea Navy, 2004)에서 승무원의 작업 효율성의 경우 작업 난이도에 따라 평가 기준을 다르게 명시하였다. 승조원의 작업능률과 피로도 및 임무 수행 능력 관점에서 내항 성능 기준을 수륙양용장갑차의 유사한 목적인 목적지 이동 임무에 해당하는 기준을 나타내었다. 내항 성능 지표에 대한 결과는 유의단일진폭(Single Significant Amplitude, SSA) 값으로 선체운동 응답 스펙트럼 면적의 제곱근의 2배로 계산하였다.

본 연구에서는 수륙양용장갑차의 작전 특성과 선수 규칙과 조건에서 평가 가능한 조건을 확인하였기에 횡동요는 기준에서 제외하였으며, Table 2와 같이 내항 성능 지표를 선정하고 기준을 설정하였다. 수륙양용장갑차의 병력 수송 목적 뿐 아니라 적 발견 시 발포를 해야하는 상황 등을 고려하여 내항 성능 지표를 선정하였다. 파랑 조건의 경우 ITTC 1978 스펙트럼에서 해상상태에 3에 해당하는 파장과 유의파고 조건에서 내항 성능 평가를 수행하였다. 수륙양용장갑차의 형상 특성에 고려하여 기존 프로펠러 노출 빈도를 유도관 노출 빈도로 정의하였으며 유도관 입구에서의 노출 빈도를 계산하였다. 수직가속도 및 MSI 도출 위치는 수직가속도가 가장 클 것이라고 판단되는 최후방 좌석 기준으로 선정하였다.

2.2 파랑 스펙트럼 선정 및 내항 성능 지표 도출 과정

본 절에서는 내항 성능 기준으로 선정된 지표 도출 과정에 대

한 계산 절차를 소개한다. 먼저 본 연구에서 사용한 파랑 스펙트럼으로 ITTC 1978 스펙트럼을 활용하였으며 병진 운동 및 회전 운동에 대한 스펙트럼을 아래 식 (1)과 (2)에 나타내었다.

$$S_t(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (1)$$

$$S_r(\omega) = \frac{A}{\omega g^2} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (2)$$

여기서, ω 는 파 주파수이며, $S_t(\omega)$, $S_r(\omega)$ 은 각각 파 에너지 스펙트럼과 파 경사 스펙트럼(Wave slope spectrum)을 의미한다 (Lloyd, 1989). 식 (1)과 (2)에서 $A = 173H_{1/3}^2/T_1^4$, $B = 691/T_1^4$ 이며, T_1 은 파의 평균 주기를 의미한다.

해석 및 실험 결과 도출된 종동요 및 수직가속도 시계열 데이터를 푸리에 변환(Fourier transform)을 활용하여 파장비 변화에 따른 RAO를 도출한다. 도출된 RAO 데이터와 조우주파수에 따른 파 스펙트럼 및 파 경사 스펙트럼을 통해 응답 스펙트럼을 도출할 수 있다. 조우주파수는 차량의 전진 중 차속과 파향에 의해 발생하는 응답의 주파수를 의미하며 식 (3)에 나타내었다. 또한 종동요 및 수직가속도 응답 스펙트럼을 각각 식 (4)와 (5)에 나타내었다.

$$w_e = w - \frac{w^2 U \cos \mu}{g} \quad (3)$$

$$S_{R_p}(w_e) = S_r(w_e) \times |RAO_p(w_e)|^2 \quad (4)$$

$$S_{R_v}(w_e) = S_t(w_e) \times |w_e^2 \times RAO_v(w_e)|^2 \quad (5)$$

여기서, w_e , U , μ 는 각각 조우주파수, 차속, 파향을 의미하며, $S_{R_p}(w_e)$, $S_{R_v}(w_e)$ 는 각각 종동요 및 수직가속도 운동 응답 스펙트럼을 의미한다. 도출된 운동 응답 스펙트럼을 활용하여 식 (6), 식 (7)을 활용하여 0차 모멘트와 유의단일진폭 값을 계산한다.

$$m_n = \int_0^\infty w_e^n S_R(w_e) dw \quad (6)$$

$$\zeta_{1/3} = 2.0 \sqrt{m_0} \quad (7)$$

여기서, m_n 는 n차 모멘트이며, $\zeta_{1/3}$ 는 유의단일진폭 값을 의미한다. 유의단일진폭은 응답 최댓값의 상위 1/3 수준을 의미한다.

유도관 노출 빈도는 관심 위치에서의 변위 RAO를 통해 도출된 0차 모멘트를 계산한 후 식 (8), 식 (9), 식 (10)과 같이 유도관 노출 확률을 계산하고 운동 응답 주기를 반영하여 노출 빈도를 계산한다 (Lloyd, 1989).

$$P_i = \exp\left(-\frac{H}{2m_0}\right) \quad (8)$$

$$N_{intake} = \frac{3600P_{intake}}{\overline{T}_p} \quad (9)$$

$$\overline{T}_p = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (10)$$

여기서, H 는 수면에서부터 유도관 입구까지의 높이를 의미하며 \overline{T}_p , m_2 는 운동 응답 주기 및 2차 모멘트를 의미한다.

MSI는 2시간 동안의 뱃멀미 발생 여부를 백분율로 나타내었으며 4차 모멘트와 수직가속도를 활용하여 도출한다 (Lloyd, 1989). MSI 도출을 위한 상세 내용은 식 (11)~식 (14)에 나타내었다.

$$MSI(\%) = 100 \times \left[0.5 + \operatorname{erf}\left(\frac{\log_{10}(\ddot{s}_3/g) - \mu}{0.4}\right) \right] \quad (11)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (12)$$

$$\mu = -0.819 + 2.32(\log_{10}\omega_e)^2 \quad (13)$$

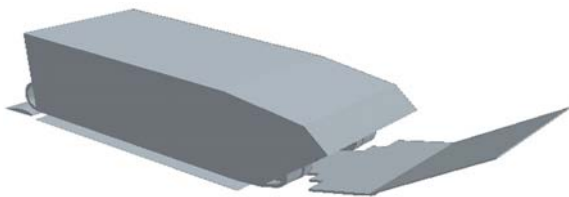
$$\ddot{s}_3 = 0.798 \sqrt{\int_0^\infty S_{R_v}(w_e) dw} \quad (14)$$

여기서, erf 는 오차함수(error function)을 의미한다.

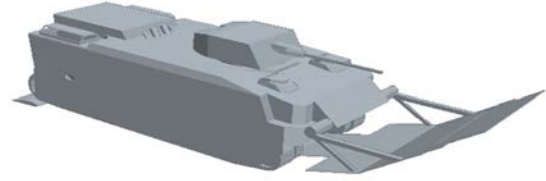
3. 축소 모형 시험 및 수치 해석

3.1 대상 차체 형상 및 주요 재원

본 연구에서는 단순 형상 및 상세 형상 두 종류의 형상에 대해 내항 성능 시험 및 해석을 수행하였다. 단순 형상에 대해 내항 시험 및 해석을 수행하였고 상세 형상에 대해 내항 해석을 진행하였다. 내항 성능 시험 및 해석에 사용한 단순 및 상세 형상을 Fig. 1에 나타내었다.



(a) Simplified vehicle shape



(b) Detailed vehicle shape

Fig. 1 Geometries of amphibious vehicle for seakeeping test and analysis

Table 3 Principal particulars of the amphibious vehicle

	Unit	Designed (simplified shape)	Set (Simplified shape)	Set (Detailed shape)
Vehicle Length	m	0.7		
Breath	m	0.295		
Draft	m	0.132		
Mass	kg	20.25		
Center of mass	x	m	0.249	0.250
	y	m	0	0
	z	m	0.0458	0.0443
Radius of gyration	k_{xx}	-	0.116	0.112
	k_{yy}	-	0.186	0.190
	k_{zz}	-	0.199	0.201

Table 3에서는 단순 및 상세 형상에 대한 수륙양용장갑차의 주요 정보를 나타내었다. 단순 및 상세 형상의 길이, 폭, 흘수, 중량은 동일하다. 단순 형상에서 개발상 구체화된 사항을 반영한 형상이 상세 형상이기 때문에 무게 중심 및 관성 반경이 비교적 차이가 나타난다. 내항 시험 및 해석을 위한 모형은 1/12로 축소하였으며 Table 3에 기술한 무게중심의 경우에는 축소 모형에 대하여 정확한 무게중심을 측정하지 않고 밸리스팅을 통해 등흘수 (even keel) 조건을 맞추어 길이방향 무게중심을 상사시키고 경사시험을 통해 횡메타센터 높이(GM_T)를 상사시켜 높이방향 무게중심을 상사시켰다. 횡경사(heel)가 발생하지 않도록 축소모형을 밸리스팅 하였으므로 횡방향 무게중심은 0으로 설정되었다. 무게중심은 첫 번째 바퀴인 기동륜 중심에서 떨어진 거리 기준이며 관성반경은 무게중심 기준으로 나타내었다. 축소모형의 관성 반경은 관성그네(inertia swing)를 활용한 관성시험(inertia test)을 수행하여 측정하였다.

단순 형상에 대한 수치 해석은 실제 시험을 수행한 재원을 바탕으로 해석을 수행하였으며 상세 형상에 대한 수치 해석은 설계치를 적용하였다. 단순 및 상세 형상이 대칭 형상이기 때문에 계산 자원의 효율적 활용을 위하여 반폭 해석을 수행하였다.

3.2 단순 차체 형상 시험 방법 및 조건

축소 모형 시험은 Fig. 2에 도시한 창원대학교 3차원 조파수조에서 수행되었다. 3차원 조파수조의 크기는 길이 20m, 폭 14m, 높이 2m이며, 양 끝단에 피스톤 타입 조파기(wave maker)와



Fig. 2 Test facility

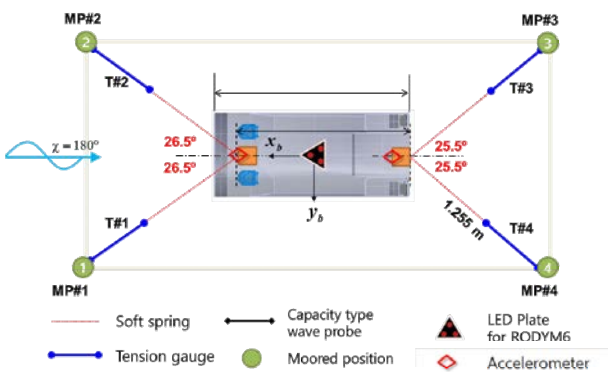


Fig. 3 Schematic of seakeeping performance test for simplified vehicle shape

Table 4 Regular wave conditions for simplified vehicle shape

Wave period (s)	Wave length ratio	Wave height (m)	Wave steepness
0.519	0.6	0.017	0.127
0.635	0.9		0.085
0.733	1.2		0.064
0.82	1.5		0.051
0.898	1.8		0.042
0.97	2.1		0.036
1.037	2.4		0.032
1.1	2.7		0.028
1.16	3.0		0.025
1.216	3.3		0.023
1.270	3.6		0.021
1.322	3.9		0.020
1.372	4.2		0.018
1.42	4.5		0.017
1.467	4.8		0.016

소파기(wave absorber)가 설치되어 있어 규칙파 또는 장파정 불 규칙파를 생성할 수 있다. 단순 차체 형상의 경우, 수직가속도 계측을 위해 선수 10% 위치에 MEMSIC사의 CXL04GP3 가속도 계(accelerometer)를 설치하였다. 축소 모형 설치 및 내부 구성에 대한 상세 방법을 Fig. 3에 나타내었다. 축소 모형은 스프링

계류 방식으로 파랑 중 6자유도 운동이 자유롭게 발생할 수 있도록 구성하였다. ITTC 권고사항에 준하여 스프링 계류한 선체의 운동 주파수가 파장이 가장 긴 규칙파의 조우주파수 보다 2배 이상 저주파가 되도록 스프링 강성을 결정하였다 (ITTC, 1999). Table 4에 기술한 규칙파 조건 중 차체의 운동 계측을 위해 KRYPTON사의 RODYM DMM-6D 모델의 비접촉 광학식 운동계 측정비를 사용하였다.

내항 성능 시험을 위한 파장비 조건은 실제 해상상태를 고려하여 선정해야 하지만, 창원대학교 3차원 조파수조의 크기, 조파기가 만들어낼 수 있는 최대 파장, 소파기의 성능 등을 고려하여 비교적 파장비가 작은 범위에서 시험을 수행하였고 선형 수면파를 만족하는 파고로 선정하여 선수 규칙파 시험을 진행하였다. 축소 모형 기준 상세 시험 조건을 Table 4에 나타내었다. 규칙파 시험 중 차량 속도는 실차 기준으로 3.33m/s이다.

3.3 단순 차체 형상 수치 해석 방법 및 조건

축소 모형 내항 성능 해석을 위해서 STAR-CCM+ V16.04를 활용하였다. 자유수면 및 물체 주위의 전산 해석을 위해 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하였으며 식 (15)와 식 (16)에 나타내었다.

$$\nabla \cdot \vec{v}_m = 0 \tag{15}$$

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + S \tag{16}$$

여기서, \vec{v}_m 은 속도 벡터를 의미하며, ρ 는 유체의 밀도, ν 의 동점성계수, p 는 압력이다. S 는 소스항을 나타내며 $\vec{\tau}$ 는 점성 응력 텐서를 나타내며 비압축성 유동에서 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\vec{\tau} = \mu(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \tag{17}$$

여기서, 아래첨자 m 은 액체와 기체의 혼합류를 의미하고 혼합류에 대한 자유수면 모델링을 위해 VoF(Volume of Fluid) 기법을 활용하였다. 밀도와 점성계수는 식 (18)과 식 (19)와 같이 나타낸다.

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \tag{18}$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l \tag{19}$$

여기서, a 는 체적분율을 의미하며 아래첨자 v 와 l 은 각각 액상과 기상을 의미한다.

STAR-CCM+에서 제공하는 wave forcing 기법을 활용하여 선체 운동으로 인한 경계에서의 반사파의 영향을 최소화하기 위해 특정 영역을 선정하여 모멘트 소스를 넣어주었으며 식 (20)과 식 (21)로 구성되어있다.

$$S_\phi = -\gamma\rho(\phi - \phi^*) \quad (20)$$

$$\gamma = -\gamma_0 \cos^s(\pi x^*/2) \quad (21)$$

여기서, γ 는 forcing 계수를 나타내며, ϕ 는 수치 해석 결과로 도출된 해, ϕ^* 는 해가 강제되는 값을 의미한다.

차체의 동적 거동을 수치 해석적으로 분석하기 위해 유체-물체 상호작용(Dynamic Fluid Body Interaction, DFBI) 기법을 적용하였으며 차체 운동 특성을 정도 높게 구현하기 위해 중첩 격자(Overset mesh)기법을 활용하였다. 중첩 격자 영역을 포함하여 총 약 400만개의 격자를 사용하였으며 정도 높은 규칙파의 모사를 위해 입사파의 파고 및 파장 기준으로 격자를 생성하였다. 본 연구에서는 Kim et al. (2018)의 해석 기법을 참고하여 입사 파고 내에 높이 방향으로 20개 정도의 격자를 사용하였고 길이 방향과 높이 방향의 격자 종횡비 $\Delta x/\Delta z$ 값은 8로 유지하였다. Fig. 4에 내항 성능 해석에 사용한 격자 시스템을 나타내었으며 적색 영역은 액상을, 청색 영역은 기상을 의미한다.

내항 성능 분석을 위해 설정한 계산 영역 및 경계 조건은 각각 Fig. 5와 Table 5에 나타내었다. 내항 성능 시험 조건 중 대표적

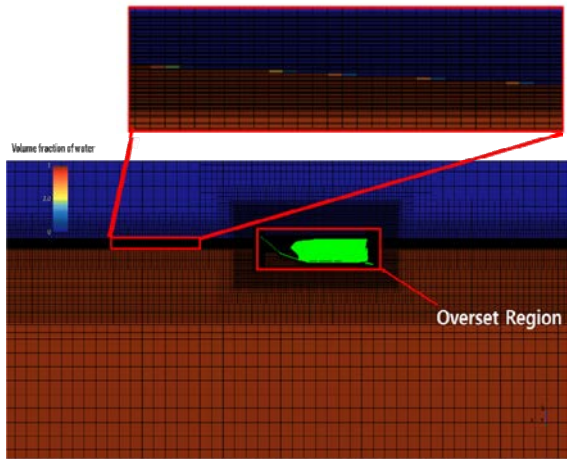


Fig. 4 Grid system for seakeeping analysis

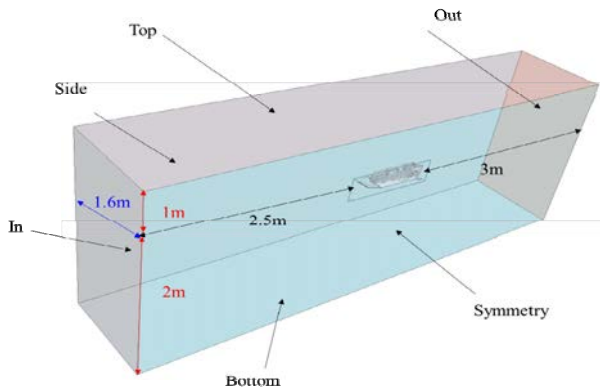


Fig. 5 Computational domain of seakeeping performance analysis

Table 5 Boundary conditions of seakeeping performance analysis

Patch name	Boundary condition	
	In	Velocity
Pressure		Neumann
Bottom	Velocity	Dirichlet
	Pressure	Neumann
Symmetry	Velocity	Dirichlet
	Pressure	Neumann
Side	Velocity	Dirichlet
	Pressure	Neumann
Top	Velocity	Dirichlet
	Pressure	Neumann
Out	Velocity	Neumann
	Pressure	Dirichlet

Table 6 Seakeeping performance analysis conditions for simplified vehicle shape

Wave period (s)	Wavelength ratio	Wave height (m)	Wave steepness
0.733	1.2	0.017	0.064
0.898	1.8		0.042
1.037	2.4		0.032
1.16	3.0		0.025
1.467	4.8		0.016

인 5가지 조건에 대해 해석을 수행하였으며 Table 6에 나타내었다. Table 6에 나타난 조건은 축소 모형 기준 조건이다.

3.4 단순 차체 형상 시험 및 해석 결과

본 절에서는 단순 차체 형상 축소 모형 시험 및 해석 결과를 수록하였다. 먼저 정도 높은 규칙파의 구현 여부를 확인하기 위해 대표적인 파장비 조건에서 이론 값과 계산 값을 비교하였다. 계측은 파의 진행이 시작되는 입구 경계면으로부터 출구 경계면 방향으로 1m 떨어진 위치에서 수행하였으며 해당 내용을 Fig. 6에 나타내었다. 장갑차 기준 흘수를 영점으로 설정하였으며, 정량적인 분석을 위해 마루와 골 위치에서의 입사파 결과 비교를 Table 7에 나타내었다. Table 8에는 Fig. 6의 결과를 푸리에 변환하여 도출된 조우주파수의 이론 값과 계산값을 비교하였으며 선형 규칙파가 정도 높게 구현된 것을 확인하였다. 수치 해석 해의 선형 규칙파 파형이 유사한 것을 확인하였다.

내항 성능 시험 및 해석 시 차체의 초기 자세는 실차 기준 12km/h 속도 조건에서 예비로 수행한 정수 중 시험 및 해석 결과 도출된 축소 모형의 침하량과 트림각으로 설정하였으며 해당 자세를 Table 9에 나타내었다. 침하량의 경우 선체가 부상하는 방향을 양의 값으로, 트림각의 경우 선수가 부상하는 방향을 음의 값으로 설정하였다.

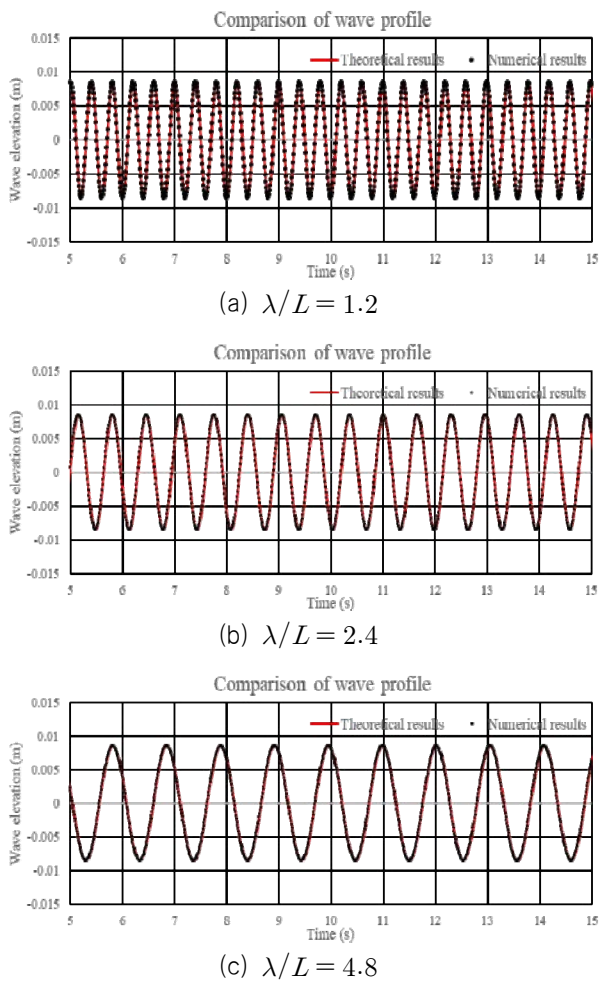


Fig. 6 Time history of regular wave elevation in various wavelength conditions

Table 7 Comparison between theoretical and numerical results for regular wave elevation

Wavelength ratio	Locaiton	Theoretical results (m)	Numerical reults (m)	Difference (%)
1.2	Crest	0.0085	0.008531	0.4
	Trough	-0.0085	-0.008531	0.4
2.4	Crest	0.0085	0.008521	0.2
	Trough	-0.0085	-0.008521	0.2
4.8	Crest	0.0085	0.008531	0.4
	Trough	-0.0085	-0.008531	0.4

Table 8 Comparison between theoretical and numerical results for encounter frequency of regular wave

Wavelength ratio	Theoretical results (rad/s)	Numerical reults (rad/s)	Difference (%)
1.2	15.762	15.763	0.003
2.4	9.654	9.651	0.03
4.8	6.082	6.078	0.07

Table 9 Result of sinkage and trim for calm water

	Sinkage (m)	Trim (deg)
EFD	0.002	-0.77
CFD	0.002	-0.98

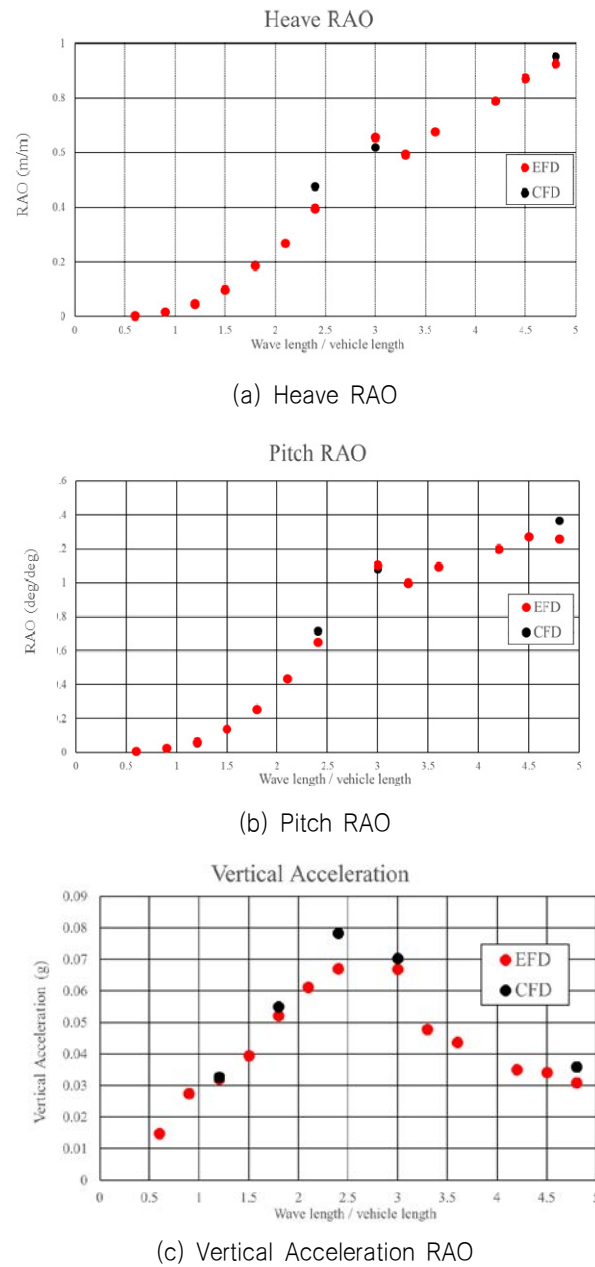


Fig. 7 Results of heave, pitch and vertical acceleration in various wave conditions

파장비에 따른 내항 성능 시험 및 해석 결과로 도출된 상하동요 및 종동요 운동응답 RAO 결과와 선수 10%의 위치에서 수직 가속도를 Fig. 7에 나타내었다. 정도 높은 운동 결과의 도출을 위해 10주기 이상의 시계열 운동 응답 결과를 푸리에 변환하여 1차 조화 진폭 값을 도출하였다. 상하동요 및 종동요 RAO의 경우 파장비가 증가함에 따라 운동 응답도 그에 따라 증가하는 것을

확인할 수 있다. 시험과 해석 결과가 유사한 경향을 따르는 것을 알 수 있으며 기존 내항 성능 실험 및 해석 결과를 비교한 연구들과 유사한 오차 수준임을 확인하였다 (Sadat-Hosseini et al., 2013; Shivachev et al., 2020). 수직가속도 결과의 경우 대체로 파장비가 증가함에 따라 파장비가 2.4 이하에서는 증가하다가 이후 구간에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 전반적으로 실험과 수치해석 결과의 수직가속도 주파수 응답 경향성이 잘 일치하는 것을 확인하였으나, 수직가속도가 최대가 되는 파장비 2.4 조건에서 실험과 수치해석의 차이가 눈에 띄는 것을 확인할 수 있다. 실험 모형과 수치해석 모형의 질량관성모멘트의 차이가 수직 운동에 대한 차이를 야기하였고, 이에 대한 영향이 수직가속도의 오차로 귀결된 것으로 판단된다.

3.5 상세 차체 형상 해석 조건 및 결과

본 절에서는 상세 차체 형상 해석에 대한 내용을 수록하였다. 창원대학교 3차원 조파수조의 사양 상 비교적 파장비가 작은 범위에서 시험이 수행되었으며 상세 형상 내항 성능 해석을 수행하기 위해 ITTC 1978 파 스펙트럼을 고려하여 실 해역 파장비 조건을 반영하였다. ITTC 1978 스펙트럼을 Fig. 8에 나타내었다. 파 스펙트럼 선정을 위한 유의 파고 및 평균 파 주기는 수륙양용장갑차의 운용 해상 환경을 고려하여 실차 스케일 기준으로 각각 0.88m와 7.5초로 설정하였으며 Fig. 9에 파스펙트럼과 해석 조건

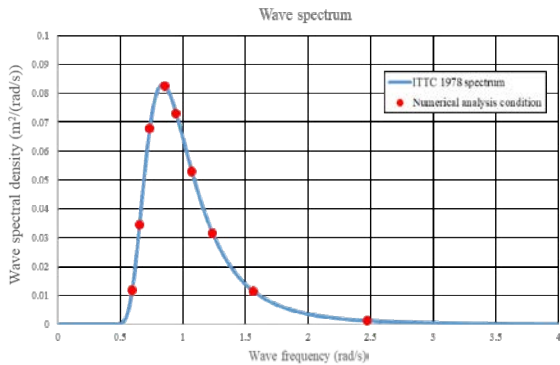


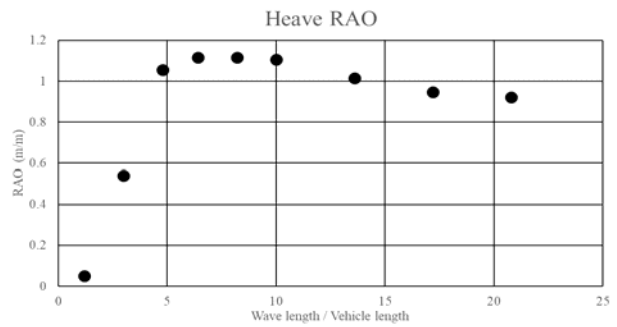
Fig. 8 ITTC 1978 wave spectrum and numerical analysis conditions

Table 10 Seakeeping performance analysis condition for detailed vehicle shape

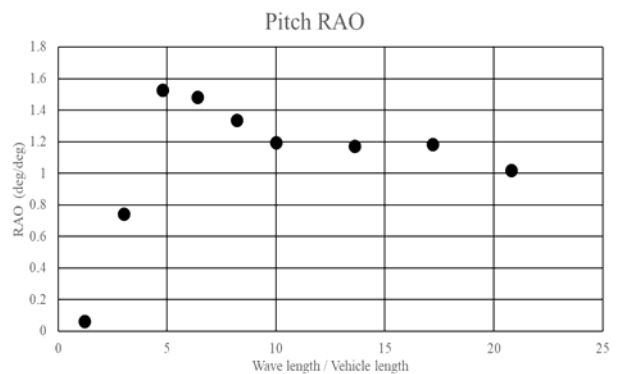
Wave Period (s)	Wavelength Ratio	Wave Height (m)	Wave Steepness
0.733	1.2	0.017	0.064
1.160	3		0.025
1.467	4.8		0.016
1.694	6.4		0.012
1.917	8.2		0.009
2.117	10		0.008
2.469	13.6		0.006
2.777	17.2		0.004
3.053	20.8		0.004

을 같이 도시하였고 축소 모형 기준 해석 조건을 Table 10에 나타내었다. 상세 해석을 위한 속도 조건으로는 임무 수행을 위한 실차 스케일 기준 5.5m/s 조건에서 내항 성능 해석을 수행하였다. 계산 영역과 경계 조건은 단순 차체 형상 해석과 동일하게 설정하였다.

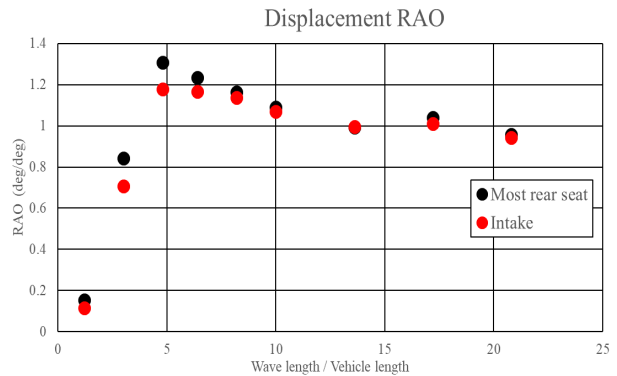
내항 성능 해석 결과 도출된 상하동요 및 종동요 RAO와 수직가속도와 유도관 노출 빈도를 계산하기 위해 최후방 좌석과 유도관 입구 위치에서의 변위 RAO를 Fig. 10에 나타내었다. 단순 차체 형상에서 나타난 경향과 동일하게 파장비가 5 이하인 구간에서 파장비가 증가함에 따라 운동 응답도 증가하는 것으로 나타났다. 파장비가 10 이상인 장파 구간에서는 운동 응답이 다소 감소하였다.



(a) Heave RAO



(b) Pitch RAO



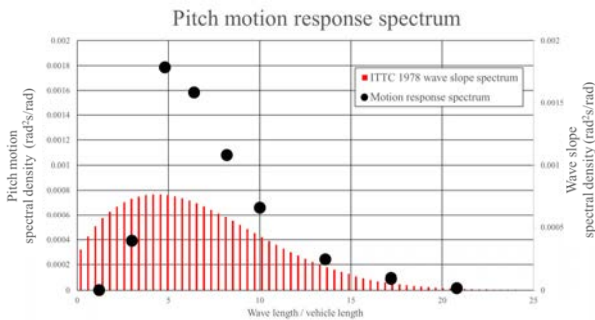
(c) Displacement RAO of the sternmost seat and intake location

Fig. 9 Results of heave, pitch and displacement RAO in various wave conditions

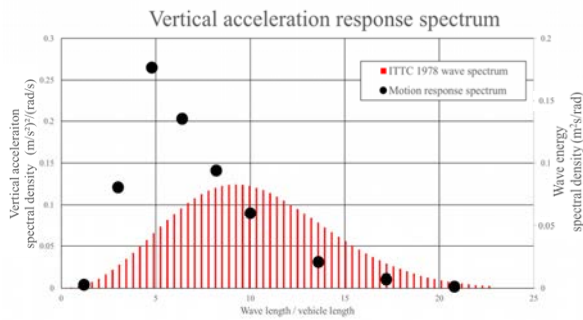
4. 내항 성능 평가

본 장에서는 3장의 내항 성능 해석 결과를 기반으로 2장의 내항 성능 지표 도출 과정을 활용하여 내항 성능 지표를 계산하고 선정된 지표와의 비교를 통해 내항 성능을 평가하였다. 내항 성능 평가를 위해 도출한 종동요 운동, 수직가속도 응답 스펙트럼과 유도관 노출 위치에서의 상대 운동 응답 스펙트럼을 Fig. 11에 나타내었다.

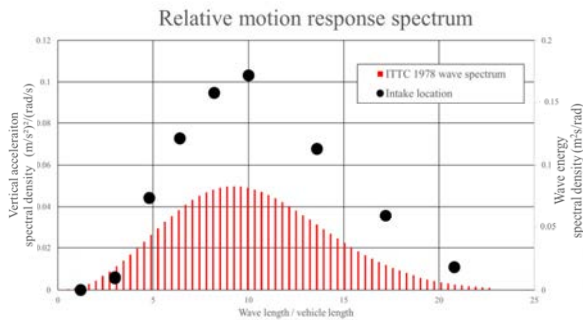
운동 응답 및 수직가속도 응답 스펙트럼 도출 결과 종동요 운동 응답의 경우 RAO 결과와 파 경사 스펙트럼 값의 영향으로 파장비 4.8인 조건에서 최댓값이 도출되었으며 이후 파 경사 스펙트럼 값의 감소로 운동 응답 스펙트럼 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 수직가속도 응답 스펙트럼의 경우 식 (5)에 따라 조우주파수의 4제곱 형태로 계산되기 때문에 파 스펙트럼 최댓값 위치와



(a) Pitch motion response spectrum



(b) Vertical acceleration response spectrum at the sternmost seat



(c) Relative motion response spectrum at Intake location

Fig. 10 Response spectrums in various wave conditions

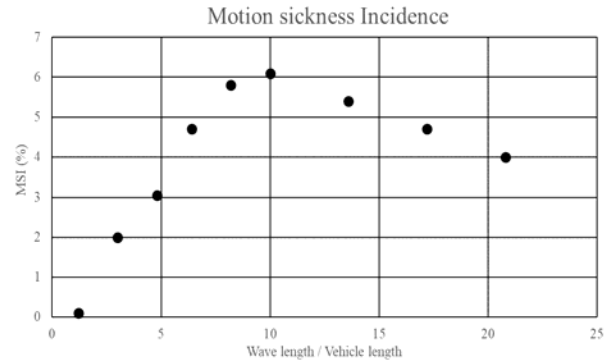


Fig. 11 Results of motion sickness incidence in various wave conditions

Table 11 Seakeeping performance for an amphibious vehicle

Index	Unit	Criteria level	Results	Location
Pitch	SSA (deg)	4.8°	3.3°	Center of gravity
Vertical acceleration	SSA (g)	0.4	0.09	Sternmost seat
Intake emergence	no./hr	24	0	Intake
Motion sickness incidence (MSI)	%	20%	6.1% (Max)	Sternmost seat

수직가속도 응답 스펙트럼의 최댓값 위치가 다른 것을 확인하였다. 또한, 유도관 위치에서의 상대 운동 스펙트럼의 경우 RAO 결과와 파 스펙트럼 값을 기반으로 파장비 10에서 상대 운동 스펙트럼 값이 가장 큰 것을 확인하였다.

도출된 수직가속도 운동응답 스펙트럼을 활용하여 파장비에 따른 MSI를 Fig. 12에 나타내었다.

본 장에서 도출된 결과를 종합하여 2장에서 제시한 내항 성능 기준과 비교를 통해 내항 성능 평가를 수행하였으며 Table 11에 나타내었다. 내항 성능을 도출한 결과는 기존 내항 성능 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 세장비가 큰 선박과 다르게 수륙양용장갑차의 폭 대비 전장이 작은 특성으로 인해 평가 위치에서의 수직가속도가 종동요 결과에 비해 비교적 작게 나타난 것을 알 수 있다. 흡수에서 유도관 까지의 높이가 비교적 높아 선정된 파랑 스펙트럼 조건에서의 유도관 노출 빈도는 없는 것으로 나타났다. MSI 결과의 경우 최대 멀미 발생율을 결과에 나타내었으며 파장비가 10인 경우 해당 조우주파수는 0.98 rad/s이며 MSI를 도출한 결과가 6.1%로 가장 크게 나타난 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 수륙양용장갑차의 내항 성능 평가를 위해 수륙양용장갑차의 내항 성능 기준을 정립하고 축소 모형을 활용하여 내항 성능 실험 및 해석을 수행하였다.

먼저, 내항 성능 기준을 정립하기 위해 수상함에 적용되는 기준을 확인하고 수륙양용장갑차의 형상 및 임무 특성을 고려하여 내항 성능 기준을 정립하였다.

단순 형상에 대해 창원대학교 3차원 조파수조에서 축소 모형 내항 성능 시험을 수행하였고 그 중 대표적인 조건에 대해 STAR-CCM+를 활용하여 전산 해석을 진행하였다. 해석 결과 도출된 상하동요, 종동요, 수직가속도 결과를 시험 결과와의 비교를 통해 두 결과는 유사한 경향을 따르는 것을 알 수 있으며 기존 내항 성능 실험 및 해석 결과를 비교한 연구들과 유사한 오차 수준임을 확인하였다.

이후 실험역 파장비 조건과 수륙양용장갑차의 운용 조건을 고려하여 상세 형상에 대해 전산 해석을 수행하였다. 전산 해석 결과 도출된 종동요 운동응답의 경우 RAO 결과와 파 경사 스펙트럼 값의 영향으로 파장비 4.8인 조건에서 최댓값이 도출되었다. 더불어, 유도관 위치에서의 상대 운동 스펙트럼의 경우 RAO 결과와 파 스펙트럼 값을 기반으로 파장비 10에서 상대 운동 스펙트럼 값이 가장 큰 것을 확인하였다.

도출된 결과를 종합하여 내항 성능 기준과 비교를 통해 내항 성능 평가를 수행한 결과, 해상상태 3조건에서 기존 내항 성능 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 세징비가 큰 선박과 다르게 수륙양용장갑차의 폭 대비 전장이 작은 특성으로 인해 평가 위치에서의 수직가속도가 종동요 결과에 비해 비교적 작게 나타난 것을 확인하였다.

향후 횡파 및 선미파 중 내항 성능 시험 및 해석을 수행하여 내항 성능을 분석하고 관련 기준을 정립하여 파향 변화에 따른 내항 성능을 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2023년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임

References

Bales, N.K. and Cieslowski, D.S., 1981. A guide to generic Seakeeping performance assessment. *Naval Engineers Journal*, 93(1), pp.59-66.

ITTC, 1999. *Testing and Extrapolation Methods High Speed Marine Vehicles Sea Keeping Tests*. ITTC - Recommended Procedures 7.5-02-05-04.

ITTC, 1999. *Testing and Extrapolation Methods High Speed Marine Vehicles Sea Keeping Tests*. ITTC - Recommended Procedures 7.5-02-05-04.

Kim, C. H., Choe, M. S., Lee, I. S. and Jin, B. Y., 2018. Numerical simulation of added mass in regular head waves using Simcenter STAR-CCM+. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(1), 35-44.

Kim, K.H., Seo, M.G. and Kim, Y., 2012. Numerical analysis on added resistance of ships. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 21(1), pp.21-29.

Lloyd, A. R. J. M., 1989. Seakeeping: ship behaviour in rough weather. *Admiralty Research Establishment*, Haslar, Gosport, Publisher Ellis Horwood Ltd, John Wiley & Sons.

Martin, J., Longo, J. and Stern, F., 2008. Pitch and heave tests and uncertainty assessment for a surface combatant in regular head waves. *Journal of Ship Research*, 52, pp.146-163.

MAS, 2000. *Common procedures for seakeeping in the ship design process*. NATO Standardization Agreement 4154 Third Edition.

NORDFORSK, 1987. *Assessment of ship performance in a seaway*. Nordic cooperative project: Seakeeping performance of ships, Copenhagen, Denmark.

O'hlanon, J.F. and McCauley, M. E., 1974. Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion. *Aerospace medicine*, 45(4), p. 366-369.

Oh, S., Yang, J. and Park, S.H., 2015. Computational and experimental studies on added resistance of Aframax-class tankers in head seas. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp. 471-477.

Park, D.M., Seo, M.G., Lee, J., Yang, K.K. and Kim, Y., 2014. Systematic experimental and numerical analyses on added resistance in waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), pp.459-479.

Republic of Korea Navy, 2004. *Naval-ship design&construction criteria : Guideline for Seakeeping*.

Sadat-Hosseini, H., Wu, P.C., Carrica, P.M., Kim, H., Toda, Y. and Stern, F., 2013. CFD verification and validation of added resistance and motions of KVLCC2 with fixed and free surge in short and long head waves. *Ocean Engineering*, 59, pp. 240-273.

Sanada, Y., Simonsen, C., Otzen, J., Sadat-Hosseini, H., Toda, Y. and Stern, F., 2021. Experimental data for KCS added resistance and ONRT free running course keeping/speed loss in head and oblique waves. *In Numerical Ship Hydrodynamics-An Assessment of the Tokyo 2015 Workshop*, 94, Springer International Publishing.

Schaffer, R.L., Byers, D.W. and Slager, J.J., 1983. Towards an improved hull form design methodology. *Naval Engineers Journal*, 95(3), pp.109-126.

Seo, S., and Park, S., 2017. Numerical simulations of added resistance and motions of KCS in regular head waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp. 132-142.

Shivachev, E., Khorasanchi, M., Day, S. and Turan, O., 2020. Impact of Trim on Added Resistance of KRISO Container Ship (KCS) in Head Waves : An Experimental and Numerical Study. *Ocean Engineering*, 211, 107594.

Stern, F., Sadat-Hosseini, H., Mousaviraad, M. and Bhushan, S., 2014. Evaluation of seakeeping predictions. In *Numerical Ship Hydrodynamics—An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop*, Springer, Netherlands.

