

이동식 전원공급장치 기반 전기추진차도선의 개념설계 연구

이준호*† · 장동원** · 진송한*** · 신승우****

*, ** 중소조선연구원 책임연구원, *** 중소조선연구원 수석연구원, **** 부경대학교 조선해양시스템공학과 연구원

Conceptual Design for Fully Electrified Car Ferry Powered by Removable Battery System

Jun-Ho Lee*† · Dong-Won Jang** · Song-Han Jin*** · Seung-Woo Shin****

*, **, *** Researcher, Green-Ship Research Division, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Busan 46757, Korea

**** Researcher, Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

요 약 : 대기오염물질 감축에 대한 국제적인 인식이 높아짐에 따라 친환경 선박에 대한 수요가 증가하고 있어 각국에서 전기추진선박 개발을 활발하게 수행하고 있다. 현재 전기추진선박에 대해서는 주로 전기추진시스템 및 전동기 연구를 주로 수행하고 있으며, 선박 관점에서 전기추진시스템 및 배터리의 탑재를 고려한 국내 연안 차도선 개념설계 연구는 수행된 바가 없다. 본 연구에서는 배터리 차량 기반의 이동식 전원공급시스템을 주전원으로 하는 순수전기추진차도선의 개념설계 과정에서의 주요 고려사항에 대하여 검토하였다. 100척 이상의 국내 연안차도선의 제원을 분석하여, 요구사항 만족을 위한 선박의 주요제원 선정과 이동식 배터리 차량 탑재를 고려한 비손상, 손상 복원성능 검토를 수행하였고, 개념설계 과정에서 발생하는 문제의 원인분석을 통해 해결방안을 모색하였다.

핵심용어 : 전기추진차도선, 이동식 전원공급시스템, 이동식 배터리 차량, 개념설계, 비손상/손상복원성

Abstract : The increasing international awareness regarding air pollutant reduction has resulted in increasing demand for eco-friendly ships; hence, electric ships are being actively developed by various countries. Presently, studies on electric ships are mainly focused on electric propulsion systems and electric motors. However, from the ship perspective, there are no studies on conceptual designs for coastal car ferries powered by removable power supply systems. In the present study, the main research consideration is regarding the conceptual design of a fully electrified car ferry using a battery-based removable system as the main power source. By analyzing the dimensions of more than 100 domestic coastal car ferries, the main criteria satisfying the requirements for developing a suitable vessel were derived, and a study on intact/damage stability was conducted considering the application of a removable battery truck. Further analyses of the problems concerning the conceptual design were also performed to derive solutions.

Key Words : Battery-powered car ferry, Removable power supply system, Removable battery truck, Conceptual design, Intact/damage stability

1. 서 론

기후변화를 야기하는 지구온난화와 환경보호 문제는 비단 우리나라만의 문제가 아니라 전 세계적인 문제로 대두되고 있으며, 육상 교통/운송 수단에 비해 훨씬 많은 미세먼지를 발생시키고 있는 것으로 알려진 해양 교통/운송 분야에서 미세먼지 저감을 위한 기술 개발의 필요성이 증대되고 있다.

해외 선진국들은 주요 항만을 중심으로 선박의 대기오염 물질 배출량 감축을 위하여 다양한 정책을 추진하고 있으며, 선박의 오염물질 배출량을 관리하는 것이 대기환경 개선에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 특히 배출규제해역(Emission Control Area: ECA) 도입을 통한 선박 대기오염 물질(SOx, NOx 등) 배출량 감축으로 수십억달러 이상의 사회적 비용 절감하고 있는 것으로 나타났다(Lee et al., 2017). IMO는 해양오염방지협약(MARPOL) Annex VI Regulation 13에서 2016년 1월1일 이후 건조되어, ECA지역을 운항하는 선박에 대하여 Tier III에 해당하는 질소산화물(NOx) 배출 기준을 준수하도록 규정하였고, Regulation14에 의해서 2020년 1월 1

* First Author : jhlee@rims.re.kr, 051-974-5565

† Corresponding Author : jhlee@rims.re.kr, 051-974-5565

일부러 전세계 모든 선박을 대상으로 연료유류의 황산화물(SOx) 기준을 3.5% μ m에서 0.5% μ m 이하로 강화하였으며, 2030년까지 이산화탄소 배출량 30% 감축을 목표로 규제를 강화하고 있다.

한편, 현재까지의 선박오염물질 배출 규제는 국제항해에 종사하는 대형 선박에 집중되었으나 최근에는 자국 환경보호를 위하여 중소형 선박 분야까지 확대되는 추세이며, 일부 선진국에서는 전기추진선박, 연료전지선박 등 ‘선제적 기술개발’을 통해 오염물질 배출 규제에 ‘선제적 규제 대응’이 가능한 상황이다. Clarkson Research(2017.03.13)에 따르면 신기후체제 출범에 따른 새로운 환경 규제 적용으로 선박의 탄소 및 유해가스 배출 저감을 위한 방법으로 전기추진시스템 사용이 꾸준히 늘고 있는 실정이며, 2000년대 초반 신조선 물량의 5% 미만이었던 전기추진선이 세계 조선해양경기부진에도 불구하고 2017년 초 이미 신조선 물량의 22%에 달하고 있는 것으로 조사되었다.

이에, 2020년 선박해양플랜트연구소에서는 800kW급 2차전지(배터리) 2기를 기반으로 하는 이동식 대용량 전원공급시스템을 전력 공급원으로 하는 새로운 개념의 순수 전기추진 차도선 및 도서전력 공급체계를 개발하고 있다(Hong et al., 2021). Fig. 1은 이동식 전원공급장치 기반 전기추진 차도선의 운영 개념을 보여주고 있다.

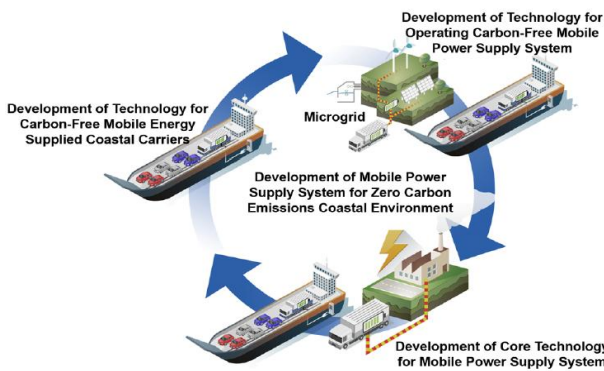


Fig. 1. Operation concept of fully electrified car ferry (Hong et al., 2021).

현재 중소조선연구원에서는 선박해양플랜트연구소와 협력하여 이동식 전원공급장치 기반 전기추진차도선 개발 과제를 수행중이며, 본 연구에서는 이동식 전원공급시스템을 주 추진원으로 하는 전기추진 차도선의 기본요구조건을 충족하는 개념설계안을 제시하였다. 개념설계단계에서는 실적선들의 주요요목을 분석하여 개발선의 주요제원을 선정하였고, 실적선 경하중량 자료를 기반으로 개발선의 초기 경하중량 및 무게중심을 추정하였으며, 이를 바탕으로 해수부

선박복원성기준 및 IMO 2008 IS code에 의거하여 각 적재조건에서의 비손상/손상 복원성을 검토하였다. 본 연구를 통하여 국내 연안을 운항하는 전기추진차도선의 설계개념을 정립함으로써, 향후 전기추진차도선의 보급화 및 중소형 조선소의 경쟁력을 강화하는데 기여하고자 한다.

2. 이동식 배터리 기반 전기추진차도선 개념설계

2.1 실적선 자료 분석

Fig. 2에서 2018년 기준 국내 운항중인 차도선 105척의 주요설계인자를 분석하였다.

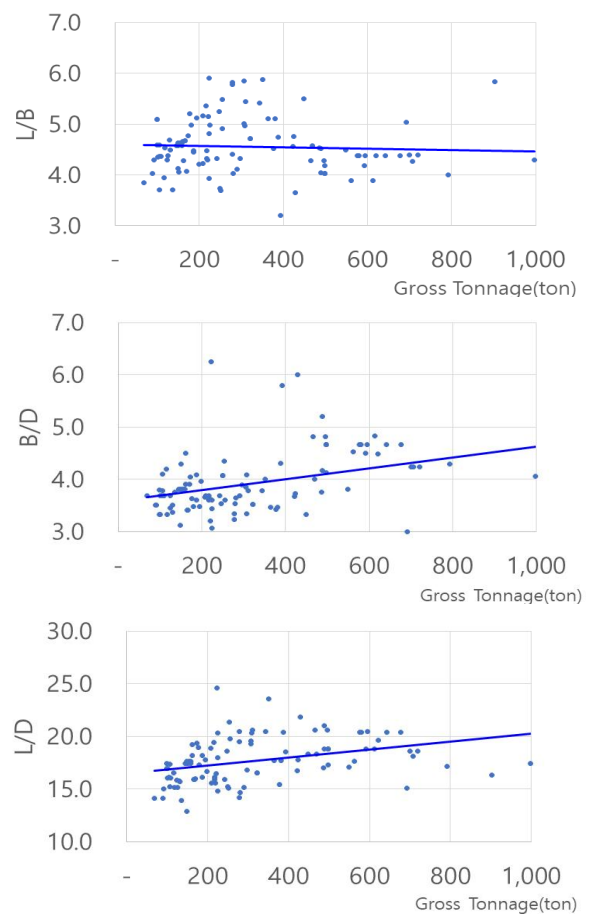


Fig. 2. Comparison for G/T vs main dimension ratio.

총톤수 대비 주요 계수비를 검토한 결과 Fig. 2와 같이 총톤수가 증가함에 따라 L/B는 완만하게 감소추세를 보였으며, B/D와 L/D는 상승 추세를 보였다. 이는 총톤수가 증가함에 따라 선체 길이와 폭은 비교적 일정한 비율로 증가하는 반면 길이 및 폭 증가에 비해 깊이가 증가율은 상대적으로 낮음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 총톤수 대비 여객 및 차량 증가 현황을 검토한 것이다. 총톤수가 증가함에 따라 여객정원은 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 차량 적재 대수는 700톤까지는 선형적으로 증가하였으나 이후 총톤수가 증가하여도 여객정원 대비 차량적재대수는 감소하는 경향을 보였다. 총톤수가 높은 카페리 선박의 경우 연안차도선에 비해 장거리를 운항하는 선박이므로 상대적으로 승객이 차량을 가지고 이동하는 수요가 제한적인데 기인하는 것으로 보이며, 총톤수가 증가할수록 선박 안정성 확보를 위하여 상대적으로 중량이 높은 차량의 적재를 제한하고 선체규모를 증가시킨 것으로 판단된다.

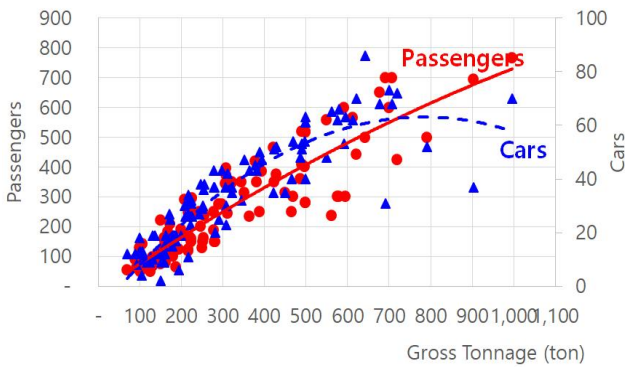


Fig. 3. Comparison for G/T vs Passengers and Cars.

2.2 주요 요구사항 분석 및 길이(Length) 추정

선박의 개념설계는 제시된 요구사항을 만족시키는 최적 선박의 개념을 정립하는 단계이며, 화물의 종류, 적재능력, 크기, 선속, 항해 거리등의 이에 해당한다. 차도선의 개념설계단계에서의 주요 요구사항은 Table 1과 같다.

Table 1. Main requirement for fully electrified car ferry

Item	Requirement
Cargo	20 passenger cars
	120 Passengers
Nav.Distance	16 N.M
Speed	10 knots
Power Capacity	1.6 M.W (800 kW × 2)

이동식 전원공급시스템의 개념은 12ft급 컨테이너 규모의 배터리시스템을 친환경 연료로 구동되는 차량(길이 약 10m)에 탑재하여 차도선의 추진동력으로 사용하는 것이며, 각 800 kW의 배터리시스템이 적재된 2대의 차량을 자가 운전하

여 차도선의 일정구역에 고박하고 전원을 공급하게 된다. Fig. 4에 이동식 배터리 탑재차량의 개념을 나타내었다.



Fig. 4. Concept of removable battery truck.

이동식 배터리 차량의 배치는 선체중앙부 구역과 선미구역에 대하여 각각 검토하였다. 선체중앙부 좌우현 선측에 각각 1대씩 배치하는 경우 배터리 차량의 폭은 약 2.5~3.0m 이고, 선폭이 12m이므로 차량의 고박시설을 감안하면 중앙 통로부에서 일반차량이 이동할 수 있는 폭은 6m 미만으로 배터리 차량과 일반차량과의 간섭우려가 높다. 그리고 좌우현 측면은 승객이 이동하는 통로로 이용되고 있어 승객안전을 고려한 별도의 장소에 배치가 필요하였다. 선미부에 배치하는 경우 선미부 전체를 배터리차량 공간으로 배치가 가능하고, 승객실과 분리하여 배치가 가능하였다. 따라서 선미부 중앙에 배치하는 것으로 결정하였다.

실적선 자료를 바탕으로 주요 요구사항 만족을 위한 개발선의 주요제원을 선정하였다. 주요 요구사항에 따라 상갑관상에 이동식 배터리 차량 2대 및 중형승용차 20대 적재가 가능해야하므로, 이를 고려하여 차량의 승하선과 배치를 용이하게 하고자 LBP를 49.00m로 우선 결정하고 폭, 깊이 등의 추정을 수행하였다.

2.3 폭(Breadth)의 추정 및 검토

선박의 폭은 복원성능, 조종성능 및 운동성능에 주로 영향을 준다. 개발선은 갑판 상부에 자동차, 여객 뿐 아니라 이동식 배터리 차량을 선적하여 운항하는 선박이므로 이를 감안하여 선박복원성 기준을 만족시키는 양호한 복원성을 가지도록 설계해야 하며, 복원성 향상을 위해서는 폭의 증가가 효과적이다. 그러나 폭이 커질수록 저항이 증가하여 속력을 감소시키는 방향으로 작용하므로 선속과 복원성능을 적절하게 만족시킬 수 있는 폭의 설정이 필요하다.

Fig. 5에서 실적선의 등록길이에 따른 L/B를 검토하였고, Table 2에 검토 결과를 나타내었다. 실적선 자료 대비 개발선의 등록길이 기준 L/B는 4.62에 해당하며 선형회귀식에 따른 표준오차를 고려한 L/B 범위는 4.09~5.15로 나타났다. 개발선의 길이는 49.0m로 등록길이를 기준으로 한 개발선의 적정 폭 범위는 9.94~12.51m로 검토되었다. 따라서 유사 실적

선의 길이 대비 L/B 추세선 범위 내에서 복원성 및 일반배치 측면을 고려하여 개발선의 초기 폭을 12.00m로 결정하였다.

Table 2. Breadth estimation based on existing vessel's data

Item	Result
Rule length (Lr)	51.17 m
L/B according to linear regression	4.62
L/B standard error	abt. 0.53
L/B range	4.09~5.15
Breadth range	9.94~12.51 m

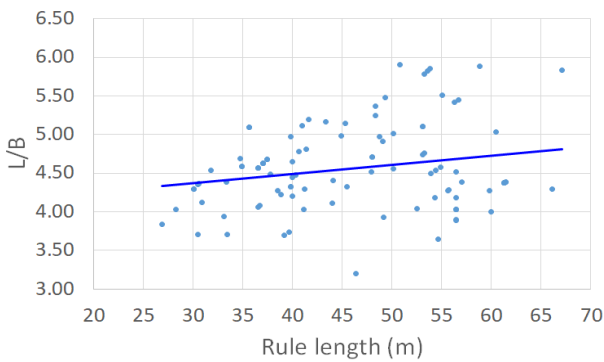


Fig. 5. Length vs L/B for existing vessel.

초기 추정된 주요제원을 바탕으로 Fig. 6과 같이 차량배치를 고려한 선폭 추정의 타당성을 검토하였다. 중형승용차(길이 4.855 m, 폭 1.865 m, 높이 1.475 m)를 기준으로 검토한 결과 선박설비기준 제51조 2항에 따라 차량 사이 통로 폭을 0.6 m로 배치하고 4열 배치하였을 때 통로 폭은 1.370 m로 양호함을 확인하였다. 배터리 차량의 폭은 약 2.35 m로 2대 배치의 따른 선폭의 여유는 높은 것으로 확인하였다.

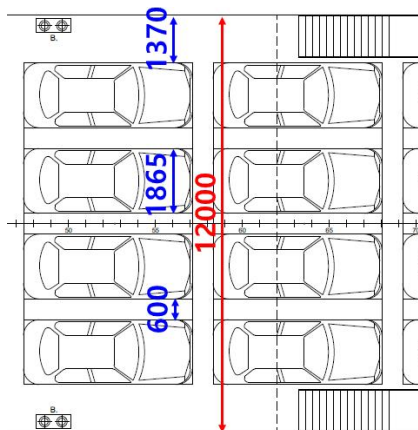


Fig. 6. Review of Breadth according to car arrangement.

2.4 깊이(Depth)의 추정 및 검토

선박의 깊이는 복원성 및 선체 종강도에 주로 영향을 준다. 깊이가 커지면 선박의 무게중심 위치가 상승하여 소각도 경사 시 복원능력이 저하되는 반면, 깊이가 낮아지면 무게중심을 낮출 수 있어 초기 복원능력은 향상되나 건현이 작아져 대각도 경사 시 복원능력이 저하되므로 적절한 깊이 선정이 요구된다.

Fig. 7에서 실적선의 길이 대비 깊이 비를 검토하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 선형회귀분석에 따른 깊이는 2.80 m이며 표준오차 0.25 m를 적용한 개발선의 깊이 범위를 2.55~3.05 m로 도출하였다.

전기추진차도선의 갑판 상부에 이동식 배터리 차량을 선적하여야 하므로 차량의 높이 및 승객실 갑판 높이를 감안하여, 규정 상 요구건현을 만족하면서 대각도 경사 시 복원 성능에 큰 영향을 미치지 않도록 고려하여 초기 깊이를 2.5 m로 추정하였다.

Table 3. Depth estimation based on existing vessel's data

Item	Result
Length (LBP)	49 m
Rule length (Lr)	51.17 m
Depth according to linear regression	2.80 m
Depth standard error	abt. 0.25 m
Depth range	2.55~3.05 m

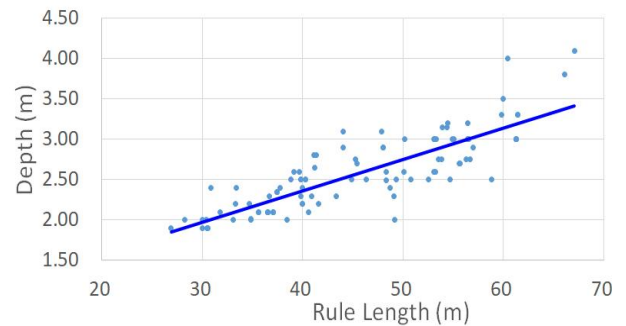


Fig. 7. Length vs Depth for existing vessel.

차도선의 경우 상갑판 하부는 비어있는 공간(Void space)으로 필요에 따라 고정발라스트 혹은 발라스트 탱크 배치 외에는 별도의 활용도를 가지지 않기 때문에 복원성을 고려하여 적정 깊이인지 검토하는 과정이 필요하다.

기관실부는 MSBD(Main switch board)가 배치되므로 Fig. 8과 같이 MSBD(높이 약 2.0 m) 설치공간 확보를 위하여 갑판 상 너클라인을 적용하여 약 3.10 m의 깊이를 확보하였다.

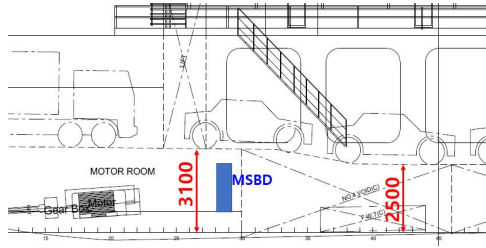


Fig. 8. Review of depth according to major equipment arrangement.

2.5 경하중량 추정 및 검토

초기설계 단계에서 경하중량을 추정하는 방법은 유사선 추정법, 중앙 횡단면에 의한 추정법, 주요제원에 의한 추정법, 통계적 추정법 등이 사용되고 있다. 현재 조선소에서 경하중량을 추정하기 위해 사용하는 방법은 조선소 자체적으로 건조한 선박설계 경험을 토대로 유사 실적선에 의한 추정식을 개발하여 각 회사 내부적으로 제한하여 사용하고 있다(Kim et al., 2019). 주요제원 및 경하중량과 중량분포 등 참고할 수 있는 유사 실적선 자료가 많을수록 개발선의 경하중량 추정 정확도를 향상시킬 수 있으나, 현재 국내 연안 차도선을 건조하는 조선소는 대부분 체계적인 선체중량 자료 관리 절차가 미흡하여, 참고 가능한 실적선 경하중량 자료가 부족한 상황이기 때문에 개념설계 단계에서는 활용할 수 있는 경하중량 추정 방법이 제한적이다. 따라서 개발선의 경하중량은 다양한 경로로 획득한 유사 실적선의 경하중량 자료를 바탕으로 주요제원에 의한 경하중량의 비율로 검토하여 추정하였다. 실적선 주요제원 자료는 Table 4와 같다.

Table 4. K-factor calculation by existing vessel's lightweight

Item	Unit	A	B	C	D
LBP	m	52	39	45	47
B (mld)	m	11.2	9	10.5	10.6
D (UPP DK)	m	2.6	2.5	2.7	3.1
LWT	t	395	321.2	497.474	526.047
LCG (fr. Mid.)	m	-0.289	-2.05	-2.178	-3.039
% of L	%	-4.02%	-5.26%	-4.84%	-6.47%
VCG (fr. B/L)	m	3.625	3.225	3.267	3.548
% of D	%	139%	129%	121%	114%
K-factor		0.5504	0.7162	0.8375	0.8170

개발선의 경하중량을 추정하기 위하여 실적선의 경하중량을 선박의 외관의 펼쳤을 때의 면적으로 나눈 값을 K-factor라고 하였을 때, K-factor는 식(1)과 같이 표현할 수 있

으며, 각 실적선들의 K-factor를 기준으로 개발선의 경하중량을 추정하였다.

$$K\text{-factor} = LWT/(L \times (B+D)) \quad (1)$$

실적선 경하중량 자료를 바탕으로 k-factor를 확인한 결과 선박 별 편차가 큰 것으로 확인되었다. 그 중 실적선 A는 선박제원 대비 타 실적선 경하중량 자료의 편차가 커서 경하중량 값의 신뢰성이 부족한 것으로 판단되어 제외하였고, 개발선의 주요제원과 유사한 실적선 C, D 자료를 참고하여 개발선의 K-factor를 0.81~0.82 범위로 선정하고자 하였다.

개발선의 주요제원과 K-factor 범위를 기준으로 한 개발선의 경하중량 범위는 575.5~582.6톤으로 추정되었으며, 따라서 개발선의 초기 경하중량을 580톤으로 결정하였다. 초기 추정된 개발선의 주요제원은 Table 5와 같다.

Table 5. Estimated main dimension for developing vessel

Item	Unit	Developing vessel
LBP	m	49
B (mld)	m	12.0
D (UPP DK)	m	2.5
LWT	t	580
LCG (fr. Mid.)	m	-2.372
% of L	%	-4.84%
VCG (fr. B/L)	m	3.025
% of D	%	121%
K-factor		0.8163

2.6 초기 선형 및 일반배치도 작성

초기 추정된 주요제원을 기준으로 Fig. 9에서 만재배수량을 고려한 전기추진차도선의 선형초안을 개발하였고, Fig. 10과 같이 승용차 22대와 선미부에 이동식 차량을 배치한 일반배치도 초안을 작성하였다.

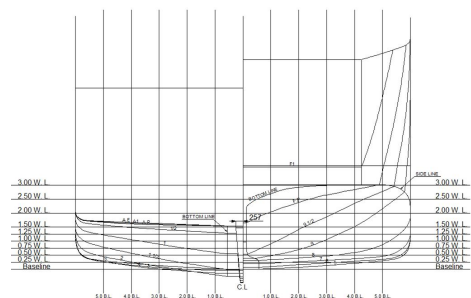


Fig. 9. Initial lines for developing vessel.

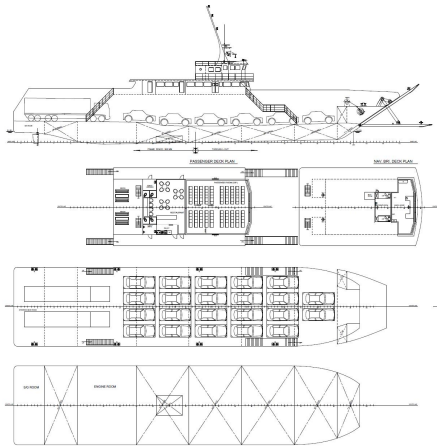


Fig. 10. Initial General Arrangement.

2.7 비손상 복원성 검토

초기 추정된 주요제원을 바탕으로 해양수산부 「선박복원성 기준 제3장 여객선의 복원성 기준」에 의거하여 개발선의 적재조건(Loading Condition)에 대한 복원성능 계산을 수행하였다. 복원성 기준은 첫 번째로 횡경사각 10도에 있어서의 복원정(GZc)이 여객의 횡이동에 따른 경사우력정(Mp/W)과 선회에 의한 경사우력정(Mr/W)이상이어야 하고, 두 번째 바람에 의한 경사우력정이 기준에 적합하여야 하고(Weather Criteria), 마지막으로 각 횡경사각 범위(0-30, 30-40, 0-40deg.)에서 복원정곡선(GZ curve)아래 면적이 기준값(Required) 이상 되도록 해야 한다(MOF, 2020).

Table 6. Loading Condition for stability calculation

1)	Design load departure condition
2)	Design load arrival condition
3)	Design load dep. cond. fixed batt.(1.6MW)
4)	Design load arr. cond. fixed batt.(1.6MW)
5)	Design load dep. cond. fixed batt.(0.4MW)
6)	Design load arr. cond. fixed batt.(0.4MW)
7)	Full load departure condition (25ton truck)
8)	Full load arrival condition (25ton truck)
9)	25ton truck load dep. cond. fixed batt.(1.6MW)
10)	25ton truck load arr. cond. fixed batt.(1.6MW)
11)	25ton truck load dep. cond. fixed batt.(0.4MW)
12)	25ton truck load arr. cond. fixed batt.(0.4MW)
13)	Full load departure condition (Mixer)
14)	Full load arrival condition (Mixer)
15)	Mixer load dep. cond. fixed batt.(1.6MW)
16)	Mixer load arr. cond. fixed batt.(1.6MW)
17)	Mixer load dep. cond. fixed batt.(0.4MW)
18)	Mixer load arr. cond. fixed batt.(0.4MW)

여객선의 복원성 계산을 위한 재화상태는 전체 적재조건에서 승객 120명, 임시승선객 20명, 선원 4명 등 총 11.6톤을 적용하였으며, 청수 10톤, 이동식 배터리차량의 중량은 25톤으로 2대 적재하는 것을 기본으로 고려하였다. 설계흡수조건(Design load condition) 및 만재흡수조건(Full load condition)에 대하여 검토를 수행하였으며, 만재흡수조건은 25톤 트럭 적재조건과 레미콘 적재조건에 대하여 검토하였다. 상기 적재조건을 기준으로 선내 고정 배터리 추가 조건을 검토하였으며, 각각 16톤(1.6 MW), 4톤(0.4 MW) 추가되는 것으로 가정하여 복원성 검토를 수행하였다.

복원성계산은 선박기본설계 프로그램인 NAPA를 이용하였다. 복원성 계산을 위한 적재조건은 Table 6과 같고, 초기선형을 기준으로 한 복원성 검토 결과를 Table 7에 정리하였다.

Table 7. Result of Intact stability calculation

	GZ AREA (m-rad)			Max.Gz (m) (>0.2)	AREA a (m-rad)	AREA b (m-rad)	Status (b>a)	Area Ratio (b/a)
	0-30 deg.	0-40 deg.	30-40 deg.					
	(>0.055)	(>0.09)	(>0.03)					
1)	0.683	0.934	0.251	1.615	0.8491	0.8841	OK	104.1%
2)	0.686	0.937	0.251	1.617	0.8638	0.8817	OK	102.1%
3)	0.674	0.922	0.248	1.593	0.8231	0.8768	OK	106.5%
4)	0.677	0.925	0.248	1.597	0.8374	0.8751	OK	104.5%
5)	0.680	0.931	0.251	1.609	0.8425	0.8824	OK	104.7%
6)	0.683	0.934	0.251	1.612	0.8571	0.8802	OK	102.7%
7)	0.609	0.823	0.214	1.403	0.7527	0.7587	OK	100.8%
8)	0.611	0.826	0.214	1.406	0.7650	0.7569	FAIL	98.9%
9)	0.600	0.812	0.212	1.383	0.7305	0.7516	OK	102.9%
10)	0.603	0.815	0.212	1.387	0.7425	0.7503	OK	101.1%
11)	0.607	0.820	0.214	1.398	0.7471	0.7570	OK	101.3%
12)	0.609	0.823	0.214	1.401	7.5930	7.5540	FAIL	99.5%
13)	0.589	0.791	0.202	1.336	0.7194	0.7220	OK	100.4%
14)	0.592	0.794	0.202	1.339	0.7312	0.7208	FAIL	98.6%
15)	0.580	0.779	0.199	1.314	0.6974	0.7133	OK	102.3%
16)	0.583	0.783	0.200	1.318	0.7090	0.7127	OK	100.5%
17)	0.587	0.789	0.202	1.331	0.7138	0.7199	OK	100.9%
18)	0.590	0.792	0.202	1.334	0.7256	0.7189	FAIL	99.1%

복원성능 검토 결과 초기복원성능을 나타내는 메타센터 높이(GM)은 기준치 0.15m 대비 모든 적재조건에서 6.0m 이상 확보하여 복원성 기준을 충분히 만족하고 있음을 확인하였다. Table 8에서 보는 바와 같이 동적복원성능 지표인 복

원정곡선 하 면적(GZ area)기준도 충분히 만족하여 복원성에는 문제가 없는 것으로 확인되었다. 그러나 일부 Arrival condition에서 Weather Criteria(AREA b > AREA a)를 만족하지 못하는 현상이 발생하였다. Arrival condition은 청수를 90% 소모한 조건이므로 Departure condition 대비 배수량이 감소하고 중량중심이 상승한 것이 원인으로 판단된다.

이에 선체 중앙부 NO.3 VOID 내 10톤의 발라스트(Ballast)를 추가 적재하여 적재중량 중심을 감소시켜 계산을 재 수행하였으며, Table 8의 모든 조건에서 Weather Criteria를 만족함을 확인하였다.

Table 8. Weather Criteria re-calculation

	Additional Ballast	AREA a	AREA b	Status (b>a)	Area Ratio (b/a)
		(m-rad)	(m-rad)		
8)	X	0.7650	0.7569	FAIL	98.9%
	O	0.7508	0.7597	OK	101.2%
12)	X	7.5930	7.5540	FAIL	99.5%
	O	0.7453	0.7580	OK	101.7%
14)	X	0.7312	0.7208	FAIL	98.6%
	O	0.7178	0.7232	OK	100.8%
18)	X	0.7256	0.7189	FAIL	99.1%
	O	0.7123	0.7211	OK	101.2%

발라스트를 적용함으로써 Table 8의 적재조건에서 Weather Criteria를 만족하였고 기존 적재조건에 의한 복원성능도 개선되는 것을 확인하였다.

선박복원성 기준 제9조 제1항에 의거하여 횡경사각 10도에서의 여객의 횡이동 및 선회에 의한 경사우력정 기준을 검토한 결과 개념설계 시 검토한 모든 적재조건에서 10도에서의 GZ값은 1.0m 이상이며, 횡이동 및 선회에 의한 경사우력정 계산식에 의한 값은 모두 0.1m를 하회하는 것으로 확인되어 기준에 충분히 만족함을 확인하였다.

2.8 손상 복원성 검토

해양수산부 「카페리선박의 구조 및 설비 등에 관한 기준」에 의거하여 개발선의 손상복원성을 검토하였다. 동 기준의 손상복원성 만족 기준은 첫 번째, 어느 1개의 구획이 침수하여도 한계선이 수면 밑으로 잠기지 않아야 하고, 두 번째 선수미단에서 서로 인접하는 2개의 구획이 침수하여도 한계선이 수면 밑으로 잠기지 않아야 한다는 것이며, 마지막으로 손상 시 횡메타센터(GM)높이가 0.05m 이상이어야

한다는 것이다. 손상복원성 기준에 따라 Fig. 11과 같이 6개의 Damage Case를 설정하였다. 선수미부에서는 각각 2개의 구획이 한번에 손상받는 것으로 가정하였다.

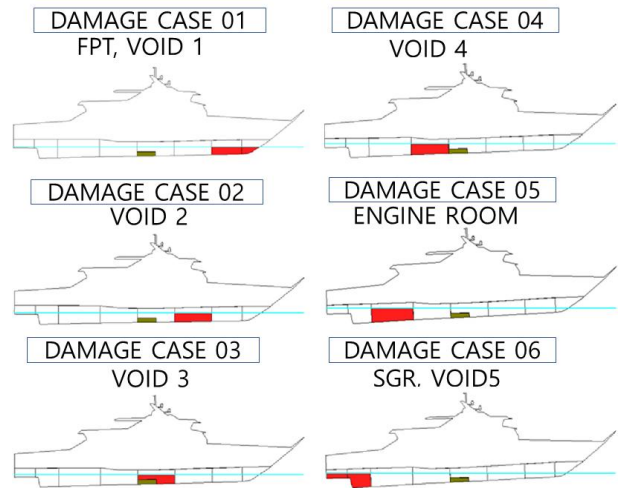


Fig. 11. Set up of Damage Case.

Table 9. Damage calculation for design load departure condition

CASE	T	Trim	Disp.	KG	Heel	Initial GM	Final GM	Dist. to MRG.
	m	m	t	m	Deg.	m	m	m
							>0.05m	>0.00m
IN01/D01	1.784	0.103	686.0	3.300	0.000	7.504	6.652	0.702
IN01/D02	1.899	0.213	686.0	3.300	0.000	7.504	6.307	0.580
IN01/D03	1.871	-0.231	686.0	3.300	0.000	7.504	6.316	0.627
IN01/D04	1.885	-0.733	686.0	3.300	0.000	7.504	6.271	0.578
IN01/D05	1.885	-0.733	686.0	3.300	0.000	7.504	6.271	0.578
IN01/D06	1.715	-1.476	686.0	3.300	0.000	7.504	5.594	0.669

Design load departure condition(IN01)에 대해서 Fig. 11에서 설정한 6개의 Damage case(D01 ~ 06)를 검토한 결과를 Table 9에 정리하였다. 모든 경우에서 한계선이 수면 밑으로 잠기지 않았으며(Dist to MRG > 0.00 m) 손상 시 GM높이가 5~6m 이상을 기록하며 0.05m이상인 기준을 만족함을 확인하였다.

이와 동일한 방법으로 18개의 초기적재조건을 기준으로 각각 6개의 Damage case를 고려한 총 108개의 손상복원성 계산을 수행하였으며 모든 조건에서 손상복원성 기준을 만족함을 확인하였다.

3. 설계 수정에 의한 개선 검토

3.1 주요제원의 변경

개념설계 단계에서 초기 추정된 주요제원을 바탕으로 비손상복원성, 손상복원성 검토를 수행하였다. 검토과정에서 발생된 일부 적재조건에서의 Weather Criteria 불만족에 대해서 발라스트 적용 등의 설계변경을 통하여 복원성 기준을 만족시켰으나, 그 개선 정도가 충분하지 못한 것으로 판단되었다. Weather Criteria는 Fig. 12와 같이 복원정 곡선(GZ curve) 하 면적에 대해서 선박의 경사우력정(M/W)의 1.5배 값과 횡요각(θ_0)을 기준으로 'b'면적이 'a' 면적보다 큰 값을 가지면 만족한 것으로 판정하게 된다.

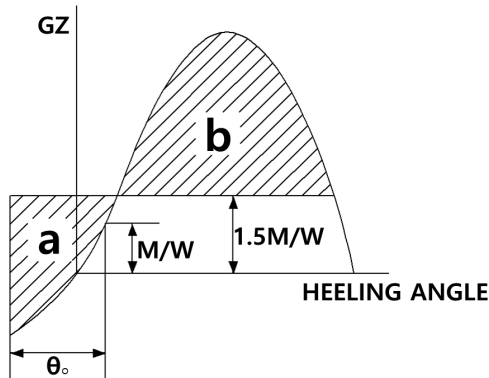


Fig. 12. Detail of weather criteria (MOF, 2020).

Weather Criteria를 개선하는 방법은 경사우력정을 감소시키거나 각 횡경사각에서의 GZ값을 증가시킴으로써 복원정 곡선의 면적을 증가시키는 방법 등이 있다. 경사우력정을 감소시키기 위해서는 흘수선 윗부분의 선체 측면적인 풍압 면적을 감소시키는 것이 가장 효과적이며, 복원정 곡선 면적을 증가시키기 위해서는 깊이 및 폭을 증가시키는 것이 효과적이다. 이에 Table 10과 같이 주요제원을 변경하였고 복원성능 개선을 검토하였다. 폭과 깊이의 증가는 복원성에 대한 고려뿐만 아니라 상갑판 배터리 차량 및 승용차 배치 및 갑판하부 전력배분을 담당하는 Main Switch Board (MSBD)의 주요제원 변경에 따른 설치공간 확보 등의 복합적인 요인을 감안하여 결정하였다.

Table 10. Revision of main dimension

Item	Unit	Initial	Revision
LBP	m	49	49
B (mld)	m	12.0	13.0
D (UPP DK)	m	2.5	3.15

주요제원의 변경을 통한 복원성능의 개선을 검토한 결과 모든 적재조건에서 복원성능이 만족하였으며 Weather Criteria의 개선폭도 증가하였음을 확인하였다. Table 11에서 보는 바와 같이 전체 적재조건에 대해서 Area a와 Area b 면적비가 약 11~29%의 개선되었음을 확인할 수 있다.

Table 11. Area ratio (area b/area a) for loading condition

Loading Condition	Initial (>100%)	Revision (>100%)	Deviation
1)	104.10%	116.49%	12.39%
2)	102.10%	114.57%	12.47%
3)	106.50%	118.55%	12.05%
4)	104.50%	116.67%	12.17%
5)	104.70%	117.02%	12.32%
6)	102.70%	115.08%	12.38%
7)	100.80%	113.10%	12.30%
8)	101.20%	113.50%	12.30%
9)	102.90%	114.87%	11.97%
10)	101.10%	113.24%	12.14%
11)	101.30%	113.41%	12.11%
12)	101.70%	130.96%	29.26%
13)	100.40%	112.06%	11.66%
14)	100.80%	122.04%	21.24%
15)	102.30%	113.74%	11.44%
16)	100.50%	112.20%	11.70%
17)	100.90%	112.50%	11.60%
18)	101.20%	129.42%	28.22%

Note) Name of Loading condition is same as Table 6

3.2 경하중량 재 산정

개념설계 단계에서 추정된 경하중량은 기본설계가 진행되면서 구체화된다. 선체, 의장, 기장, 전장설계 등 기본 사양서를 바탕으로 각 파트별로 비교적 구체화 된 중량 산정을 수행하며, 이후 상세설계 및 건조단계에서 지속적으로 중량정보를 업데이트하고, 최종적으로 건조완료 후 경사시험을 통하여 선박의 최종 경하중량을 확정하게 된다.

각 선각, 의장, 전장 등 파트별로 초기 산정한 중량 정보를 취합하여 재 산정한 결과 Table 12와 같이 개념설계 단계에서 추정된 경하중량 대비 중량은 감소한 반면 중량중심(VCG)값은 증가하였다.

Table 12. Comparison of Initial and Revision weight

Item	Unit	Initial	Revision
LWT	t	580	500
LCG(fr. Mid.)	m	-2.372	-0.55
% of L	%	-4.84%	-1.12%
VCG(fr. B/L)	m	3.025	4.5
% of D	%	121%	181%

기본설계의 초기단계에서 재 산정된 경하중량의 파트별 분포를 살펴보면 선체가 전체 중량의 약 68%를 차지하며, 의장 15%, 추진전동기를 포함한 기관실부 중량이 전체의 4%, 전장파트는 약 13%를 차지하고 있다. 중량중심의 증가 원인을 분석해보면, 첫 번째는 개발선의 Depth 증가에 의한 중량중심의 상승이고 두 번째로는 유사실적선의 경하중량 자료를 바탕으로 주요제원에 의한 경하중량 비율로 검토하여 개발선의 중량중심을 추정하였으나 실적선과 차별되는 개발선의 중량중심 상승요소를 충분히 반영하지 못한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 이동식 전원공급장치를 고려한 전기추진차도선은 새로운 개념의 선박으로 운용개념 및 일반배치 측면에서 기존의 실적선과는 다소 차이를 보이고 있다. 예를 들어 기존 차도선은 5톤 트럭 및 레미콘 등 높은 전고를 가지는 차량을 선체 중앙부에 배치하고, 선미부에는 승용차 등 2미터 내외의 낮은 전고를 가지는 차량을 배치하므로 선미부 상갑판 높이를 2.5~3미터 미만으로 상대적으로 낮게 배치할 수 있어 선미부에 배치된 승객실 갑판의 위치를 낮출 수 있고, 이와 비례하여 풍압면적을 작게 가져갈 수 있다. 반면, 개발선박은 설계 개념 상 Fig. 13과 같이 선체 중앙부에 승객실이 배치되어 있고, 선미부에 배터리 차량이 배치된다. 배터리 차량의 전고가 4미터 이상이므로, 배터리 차량의 선미부 이동을 위해 승객실 갑판 높이가 기존선에 비해 2미터 이상 높아지게 되었다. 따라서 승객실 갑판 상부 구조물의 무게중심 증가가 선체 무게중심의 증가로 이어졌다. 상기요인의 복합적인 작용으로 개발선의 중량중심이 상승한 것으로 판단된다.

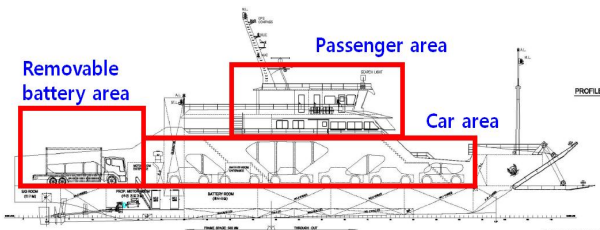


Fig. 13. Arrangement concept of developing vessel.

재 산정된 경하중량 정보를 기반으로 복원성 계산을 수행한 결과 Table 13과 같이 모든 적재조건에서 중량중심 증가로 인하여 복원정 곡선 면적비가 초기값 대비 36~40%까지 감소하며 Weather Criteria를 만족하지 못하게 되었다. 따라서 설계수정을 통한 복원성능 개선에 대한 검토가 필요하였다.

Table 13. Weather Criteria Area ratio for loading condition

Loading Condition	Initial (>100%)	Revision (>100%)	Deviation
1)	116.49%	75.51%	-40.98%
2)	114.57%	73.74%	-40.83%
3)	118.55%	77.80%	-40.75%
4)	116.67%	76.06%	-40.60%
5)	117.02%	76.08%	-40.94%
6)	115.08%	74.29%	-40.78%
7)	113.10%	74.39%	-38.71%
8)	113.50%	74.67%	-38.83%
9)	114.87%	76.39%	-38.48%
10)	113.24%	74.83%	-38.41%
11)	113.41%	74.83%	-38.58%
12)	130.96%	91.62%	-39.33%
13)	112.06%	75.14%	-36.92%
14)	122.04%	84.62%	-37.42%
15)	113.74%	76.95%	-36.79%
16)	112.20%	75.58%	-36.62%
17)	112.50%	75.69%	-36.81%
18)	129.42%	91.54%	-37.88%

Note) Name of Loading condition is same as Table 6

3.3 설계수정을 통한 복원성 개선

경하중량 재 산정을 통한 중량중심의 증가에도 초기복원성을 나타내는 GM 값과 횡경사각 범위에서의 복원정곡선 하 면적 값은 복원성규정의 기준값(Required) 대비 충분히 만족함을 확인하였다. 그러나 Table 13과 같이 중량중심 상승으로 인한 Weather Criteria 면적비 기준 미달로 복원성 기준이 불만족하였기 때문에 설계 수정을 통하여 개선하고자 하였다.

3.3.1 빌지킬 (Bilge Keel) 적용

Weather Criteria 면적비 개선을 위해서는 풍압면적 축소를 통하여 경사우력정을 감소시키는 방법과 함께 횡요각(θ_0)을 감소시킴으로써 Fig. 10에서의 'a' 면적을 상대적으로 감소시키는 방법이 있다.

「선박복원성기준 제13조(여객선의 횡요각)」 규정에 의하여 횡요각(θ_o)은 (2)에 의해 표현된다.

$$\theta_o = 109 \cdot K \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot s} \quad (2)$$

K, X_1 , X_2 등 각각의 계수는 기준에서 규정하는 표에 의해서 비례적으로 결정되며, 횡요각이 커질수록 경사우력정의 음의 방향 GZ 면적인 'a'면적이 증가하므로 상대적인 복원정 곡선 면적비에서는 불리하게 작용하게 된다. 따라서 횡요각을 감소시키는 방향으로 설계 개선점을 도출해야한다.

식(2)에서 계수 K를 제외한 나머지 계수들은 선폭, 길이, 상당흘수 등 선박의 주요제원에 의해 결정되는 값들이며, K는 식(3)에 의해 결정된다.

$$\frac{100Ak}{La \cdot B} \quad (3)$$

식(3)에서 La는 선박 길이, B는 배의 너비이고, Ak는 만곡부용골의 최대투영면적 및 방형용골의 선체중단면에 대한 투영면적의 합계(제곱미터)를 나타낸다. 개발선의 경우 평저선으로 선저외부로 돌출된 방형용골이 없기 때문에 빌지킬만을 고려하였다. 빌지킬은 선박의 횡동요를 감소시키기 위하여 선체 만곡부에 설치하는 것으로 빌지킬의 면적을 이용하여 선체중심의 반대방향으로 물을 밀어내도록 하여 횡동요를 감소시킨다.

빌지킬 면적이 증가할수록 K값은 감소하게 되고, 일정 비율로 횡요각도 감소하게 된다. 개발선의 경우 Fig. 14와 같이 빌지킬 면적 15~17m² 범위에서의 K값 감소율이 가장 높게 나타났다.

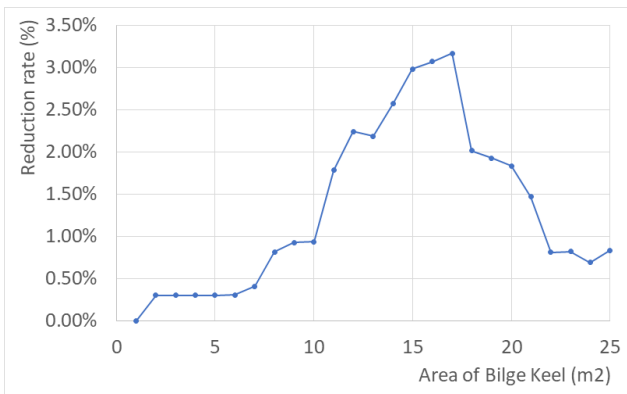


Fig. 14. Reduction rate of K coefficient for Bilge keel area.

이에 선체 최대 만곡부 길이에 따른 건조 상황을 고려하여 빌지킬 면적을 총 16m²로 확대하여 적용한 결과 전체 적

재조건에 걸쳐서 약 20%의 횡요각이 감소되었다. 최소한의 설계변경을 통하여 Weather Criteria를 만족시키기 위해 빌지킬 면적 확대 적용을 검토하였으며, 약 20%의 횡요각 감소에 의해 면적비가 약 17~23%까지 개선되었으나 여전히 기준값(100%)을 하회하였다.

3.3.2 Water Ballast Tank 적용

빌지킬 면적의 확대적용 만으로는 Weather Criteria를 만족하지 못하였기 때문에 추가 검토를 수행하였다.

각 적재조건에서 추가중량 적재를 통한 배수량 증가로 경사우력정(M/W)을 감소시켜 면적비를 추가 개선하고자 하였고, 이에 선수부에서 선체중양부에 이르는 No.1,2,3 Void tank의 선저부에 전체 약 60톤의 Water Ballast Tank를 설치하였다. 만재배수량의 범위 내에서 발라스팅하여 중량중심을 0.3~0.4m 낮추었으며, 빌지킬과 복합적으로 적용한 결과 Table 14와 같이 각 적재조건에서 Initial 조건 대비 약 32~38%의 면적비를 개선하였고, 최종 복원성 기준을 만족하였다. Table 14에서 Initial 조건은 Table 13에서의 Revision조건에서의 결과값과 동일하며, 중량중심 상승 후의 계산 결과를 의미한다. Table 14에서 Revision 1은 빌지킬 면적만을 고려하였을 때의 복원정 곡선 면적비이며, Revision 2는 빌지킬과 Water Ballast Tank를 함께 고려하였을 때의 면적비를 나타낸다.

Table 14. Weather Criteria Area ratio for loading condition

Loading Condition	Initial(A) (>100%)	Revision 1(B) (>100%)	Revision 2(C) (>100%)	Deviation (C)-(A)
1)	75.51%	93.91%	111.91%	36.39%
2)	73.74%	91.36%	109.61%	35.87%
3)	77.80%	97.01%	114.84%	37.04%
4)	76.06%	94.59%	112.43%	36.37%
5)	76.08%	94.61%	112.67%	36.59%
6)	74.29%	92.15%	110.20%	35.91%
7)	74.39%	91.88%	107.89%	33.50%
8)	74.67%	92.28%	108.22%	33.55%
9)	76.39%	95.50%	110.40%	34.01%
10)	74.83%	92.37%	108.27%	33.44%
11)	74.83%	92.53%	108.55%	33.72%
12)	91.62%	115.52%	130.14%	38.52%
13)	75.14%	92.82%	107.93%	32.79%
14)	84.62%	105.99%	120.87%	36.26%
15)	76.95%	95.24%	110.19%	33.24%
16)	75.58%	93.31%	108.33%	32.76%
17)	75.69%	93.48%	108.45%	32.76%
18)	91.54%	115.25%	129.04%	37.50%

4. 고찰 및 결론

이동식 전원공급장치를 고려한 전기추진차도선의 개념설계 및 관련하여 다음의 고찰 및 결론을 얻었다.

1. 일반적인 연안차도선은 갑판 상에 차량을 적재하여 운송하는 선박이므로 차량적재성능 향상을 위해 길이와 폭이 큰 데 반해 깊이가 낮고 무게중심이 상대적으로 높다. 그리고 차량갑판 상부에 승객실이 배치되어 있어 풍압면적이 일반선에 비해 높아서 여객선 관련 복원성기준을 만족시키기 위해 다양한 검토가 필요하다.

2. 배터리 차량에 기반한 이동식 전원공급시스템을 적용한 전기추진차도선은 현재 운항중인 차도선과 형상은 유사하나 배터리 차량의 배치와 전기추진 운항방식에서 기존의 차도선과는 다른 개념을 가지는 선박이다. 주요제원 및 경하중량의 초기 추정값을 바탕으로 개념설계를 진행하였으며, 폭과 깊이를 증가시켜 복원성능을 개선하고자 하였다. 그러나 경하중량 상세추정 단계에서 경하중량은 감소하였으나 승객실 갑판 위치 상승으로 인한 선체의 중량중심의 증가로 인해, 바람에 의한 경사우력정과 복원정곡선의 면적으로 표현되는 Weather Criteria 면적비가 초기값 대비 최대 40%까지 하향하며 기준값을 만족하지 못하는 상황이 발생하였다.

3. Weather Criteria 기준을 만족시키고 설계변경을 최소화 시키기 위하여 빌지킬 면적을 상향하여 횡요각을 감소시킴으로써 면적비를 개선하고자 하였으며, 16 m²의 빌지킬을 적용한 결과 약 20%의 횡요각이 감소하였고, 약 17~23%의 Weather Criteria 면적비를 개선하였다.

4. 경사우력정 감소를 통한 Weather Criteria 면적비 개선을 위해서 선체 중앙부에 만재배수량 범위 내에서 약 60톤의 Water Ballast Tank를 신설하여 적재한 결과 각 적재조건에서 0.3~0.4 m의 중량중심이 감소되었으며, 빌지킬 면적과 복합하여 적용한 결과 초기 Weather Criteria 면적비 대비 32~38% 상향하며 기준값을 만족시켰다.

5. 현재까지의 경하중량은 초기 설계자료를 바탕으로 한 추정값에 기반하고 있으며, 선박의 최종 경하중량은 선박의 건조가 완료되는 시점에 경사시험을 통하여 확정된다. 향후 건조가 진행되는 시점에 투입되는 장비 및 자재의 물량을 지속적으로 모니터링 함으로써 변경되는 중량정보에 대한 적절한 업데이트가 필요하다.

6. 새로운 개념의 선박을 개발함에 있어, 기존의 실적선과는 달리 선박의 설계 및 건조과정에서 이전에 발견하지 못한 새로운 문제가 지속적으로 발생할 개연성이 높으며, 선박의 개발은 문제에 대한 대응과 해결의 연속으로 진행 될 것이다. 이동식 전원공급장치를 적용한 전기추진차도선은 현재 차도선 선종에서는 최초로 개발을 진행하고 있는 상황이며 관련 규정이 없는 상황으로 향후 선급 협회 및 정부부처의 지속적인 협의 및 추가 연구를 통하여 개발 및 실증을 진행할 예정이다.

사 사

본 연구는 해양수산부 국책연구과제인 ‘전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개발(20200469)’의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Lee, K. Y., G. S. Kim, and B. K. Kim(2017), A Study on the Introduction of Emission Control Area(ECA) in Korea, Korea Maritime Institute, 2017-32, pp. 1-2.
- [2] Hong, J. P., Y. S. Kim, H. W. Shim, H. J. Kang, Y. H. Kim, G. B. Kim, and S. P. Cho(2021), Study on a Fully Electrified Car Ferry Design Powered by Removable Battery Systems Considering Domestic Coastal Environment, Journal of Ocean Engineering and Technology, 35(1), 1-12, Feb. 2021, pp. 7-8.
- [3] Kim, G. Y., I. J. Ban, B. C. Park, S. J. Oh, C. O. Lim, and S. C. Shin(2019), Estimation of Lightweight in the Initial Design of Ships Using Deep Neural Networks, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 29, No. 6, p. 417.
- [4] MOF(2020), Standard for Vessel's Stability, Retrieved from <http://www.mof.go.kr/>, pp. 4-11.

Received : 2021. 07. 27.

Revised : 2021. 08. 26. (1st)

: 2021. 09. 24. (2nd)

Accepted : 2021. 10. 28.