



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

350kW 급 40 인승 수소추진선박의

위험도 기반 구조 안전성 연구

Risk-based structural safety research on a 350kW

class 40-passenger hydrogen-powered ship

울산대학교 대학원

조선및해양공학과

김 명 규

350kW 급 40 인승 수소추진선박의
위험도 기반 구조 안전성 연구


지도교수 서형석


이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함


2024 년 02 월

울산대학교 대학원
조선 및 해양공학과
김명규

김명규의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원 유 정 수 

심사위원 서 형 석 

심사위원 오 민 재 

울 산 대 학 교 대 학 원

2024 년 02 월

감사의 글

학부 연구생으로 시작해서 석사 과정까지 저에게 과분할 만큼 지원과 격려 그리고 조언으로 지도해주신 서형석 교수님께 가장 먼저 감사의 인사를 드립니다. 다양한 연구를 도전할 수 있는 기회를 제공해 주시기 위해 항상 노력해 주신 교수님의 헌신에 지나온 3년 2개월 동안 부족한 제가 꾸준히 성장할 수 있었습니다. 받은 은혜를 잊지 않고 함께 동고동락한 연구실 친구들과 앞으로 연구실에 참여할 학생들에게 도움이 되기 위해 지속해서 찾아 뵙고 연락 드리겠습니다. 그리고 학위 논문 지도를 맡아 주신 유정수 교수님, 오민재 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

언제나 사랑과 응원으로 저를 걱정해 주고 지원해 준 가족에게 감사의 인사를 전합니다. 말썹꾸러기 아들이 자람이 되도록 더 노력하고, 일탈하지 않도록 늘 조심하고 또 조심하겠습니다. 사랑합니다.

학부 연구생 시절 함께 연구실 생활을 했던 김동욱 선배님, 정동기 선배님에게 항상 감사합니다. 저의 개인적인 상황들을 배려해주시고 방향을 잡지 못했던 저에게 방향을 알려준 선배님들의 도움을 항상 기억하겠습니다.

일반물리실험이라는 저의 대학교 첫 수업에 같은 조로 배정되어 대학 생활을 대부분 함께했고 지금의 연구실로 들어올 수 있도록 도와준 도현이에게 항상 미안하고 고맙습니다. 부족한 동료였고 골치 아픈 동기였던 저를 언제나 넓은 아량으로 품어주고 저의 석사과정을 무사히 마무리할 수 있도록 도와준 도현이에게 언제나 큰 빛을 지고 있다고 생각하고 있습니다. 감사합니다.

우리 ASRL 연구실 후배인 영재, 상훈이, 준석이, 대근이, 현성이, 정현이에게 더 많은 도움을 주지 못해서 미안합니다. 제가 없어도 도움이 될 수 있는 많은 자료를 만들어 전달하도록 하겠습니다. 여러분의 연구실 생활의 앞날을 응원하고 뿌듯한 성과가 함께하길 기도하겠습니다. 또한 연구실 생활 동안 잠깐 함께 생활했던 우진이, 기태, 장묘란의 앞으로의 삶을 응원합니다. 각자의 자리에서 최선을 다하는 ASRL 연구생들이 되길 소망합니다.

마지막으로 언제나 사랑으로 저를 인도해 주신 하나님 감사합니다. 귀한 인연들을 허락해 주시며, 때론 고난으로 저를 단련해 성장시키신 하나님 은혜에 감사합니다.

지금까지 저를 위해 함께 기도하고, 응원해 주고, 배려해 주신 모든 분께 감사합니다.

국문요약

국제해사기구(IMO)의 2023 온실가스 배출 규제는 현대 선박 산업에 중대한 영향을 미치고 있다. 이에 따라 2023 온실가스 배출 규제의 2050 년 목표인 탄소 순 배출량 '0'을 달성하기 위한 방안 중 하나인 수소추진선박에 대한 기술 개발과 도입이 활발히 진행 중에 있다. 수소추진선박은 전통적인 선박과는 다른 특성을 가진다. 수소추진선박을 구성하는 시스템은 수소 저장 및 공급 시스템, 수소연료전지(Fuel cell) – 에너지저장장치(ESS)시스템, 추진 및 제어 시스템 등으로 분류할 수 있다. 이러한 시스템을 갖춘 수소추진선박은 선박 내 설치된 연료전지에 수소 가스가 공급되어 전기를 생산하고, 생산된 전기를 추진용 모터에 공급하여 추진하는 선박이다. 수소 가스는 수소 농도, 공기와의 혼합 비율, 온도, 압력 등 특정 조건에서 폭발 위험이 있다. 따라서 수소 가스 누출 및 화재와 같은 상황에 직면하면 탑승객 및 승무원의 안전에 영향을 줄 수 있다. 이러한 수소추진선박에 대한 구조 안전성 연구는 기초 단계이며 새로운 안전 고려 사항이 필요하다.

본 논문은 수소추진선박에 대한 구조 안전성 평가 시 탑승객의 안전을 고려하기 위해 위험구역을 구분하고, 위험 시나리오에 따라 영향을 받는 구역을 분석한다. 그 후 구조 안전성 평가 시 해당 구역이 구조적으로 충분한 강도를 갖는지 분석한다. 위 과정을 통해 여객형 수소추진선박의 위험도 기반 구조 안전성 평가에 대한 기초 연구가 될 수 있도록 하는 것이 본 논문의 목적이다. 선박의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 여객형 쌍동선에 대한 구조 규정 중 해양수산부의 '알루미늄선의 구조기준'을 검토하였다. 규정에서 제시하는 설계하중(선저와 쌍동선 연결구조에 작용하는 슬래밍 압력, 해수압력, 호강·새김 모멘트, 횡방향 수직 굽힘모멘트, 종비틀림 모멘트 설계하중)을 계산하여 수소추진선박에 대한 유한요소해석 시 하중조건으로 적용하여 구조 안전성 평가를 수행하였다. 유한요소해석을 통한 응력 및 변형 결과를 통해 보강이 필요한 곳을 분석하였다. 또한 앞서 서술한 것처럼 여객형 선박에 대한 구조 안전성의 중점은 승객의 안전이며 이에 따라 수소추진선박은 화재 및 폭발 시 승객 및 승무원이 안전하게 대피할 수 있도록 충분한 강도를 갖춰야 한다. 따라서 수소 가스의 누출 및 배터리 화재 등 수소추진선박의 잠재적 위험 시나리오와 한국선급의 '선박용 연료전지 시스템 지침'을 통한 위험구역을 검토하였다. 검토된 위험구역과 위험 시나리오에 따라 승객의 안전을 위해서 우선적으로 안전성을 확보할 구역은 수소 저장탱크, 연료전지실, 여객실, 선체라고 판단하였다. 따라서 각 설계하중에 대한 유한요소해석 시 우선적으로 안전성을 확보할 구역에 대한 응력 및 변형 결과 분석을 통해 구조 안전성 평가를 수행하였다. 수행된 연구를 통해 수소추진선박의 구조 안전성 평가 절차에 대한 기초 연구를 제공할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

2023 IMO (International Maritime Organization) strategy on reduction of greenhouse gas emissions from ships are having a significant impact on the modern shipbuilding industry. Accordingly, the development and introduction of technology for hydrogen-powered ships, which is one of the ways to achieve '0' net carbon emissions, which is the 2050 goal set forth in the regulations, is actively underway. These hydrogen-powered ships have different characteristics from traditional ships. The systems that make up hydrogen-powered ships can be classified into hydrogen storage and supply systems, hydrogen fuel cell-energy storage system (ESS) systems, and propulsion and control systems. Hydrogen-powered ships equipped with such a system produce electricity by supplying hydrogen gas to fuel cells installed within the ship and supply the generated electricity to propulsion motors to propel the ship. Hydrogen gas has a risk of explosion under certain conditions such as hydrogen concentration, mixing ratio with air, temperature, and pressure. Therefore, encountering situations such as hydrogen gas leaks and fires may affect the safety of passengers and crew. Structural safety studies for these hydrogen-powered ships are at a basic stage and new safety considerations are needed.

In this paper, to consider the safety of passengers when evaluating the structural safety of hydrogen-powered ships, hazardous areas are classified, and the affected areas are analyzed according to the risk scenario. Afterwards, finite element analysis is used to analyze whether the area has sufficient structural strength. Through this process, the goal is to enable this thesis to become basic research on risk-based structural safety evaluation of passenger hydrogen-powered ships. To evaluate the structural safety of the ship, the Ministry of Oceans and Fisheries' 'Structure Standards for Aluminum Ships' among the structural regulations for passenger catamarans was reviewed. Structural safety evaluation was performed by calculating the design load provided in the regulations and applying it as a load condition (slamming pressure acting on the bottom of the ship and the catamaran connection structure, seawater pressure, hogging/sagging moment, lateral vertical bending moment, longitudinal/lateral twisting moment) during finite element analysis for hydrogen-powered ships. The structure requiring reinforcement was analyzed through stress and deformation results through finite element analysis. In addition, as described above, the focus of structural safety for passenger ships is passenger safety, and accordingly, hydrogen-powered ships must have sufficient strength to allow passengers and crew to safely evacuate in

the event of fire or explosion. Therefore, we reviewed the hazard areas through the Korea Register of Shipping's 'Marine Fuel Cell System Guidelines'. Afterwards, potential risk scenarios for hydrogen-powered ships, such as hydrogen gas leaks and battery fires, were also reviewed. According to the reviewed hazard areas and risk scenarios, it was determined that the areas to prioritize safety for passengers were the hydrogen storage tank, fuel cell room, passenger room, and hull. Therefore, when conducting finite element analysis for each design load, structural safety evaluation was performed through analysis of stress and deformation results for the area where safety would be secured first. It is believed that the conducted research will provide basic research on the structural safety evaluation procedures of hydrogen-powered ships.

목차

감사의 글	i
국문요약.....	ii
Abstract.....	iii
List of Figures.....	vi
List of Tables.....	ix
1. 서론.....	1
2. 구조 안전성 평가 조건 도출	4
2.1.1. 주요 제원	4
2.1.2. 설계하중 계산	6
2.2. 위험구역 및 잠재적 위험 요인 분류	15
2.2.1. 위험구역 선정	15
2.2.2. 잠재적 위험요인 분류	18
3. 유한요소해석을 통한 수소추진선박 구조 안전성 평가.....	21
3.1. FE 모델.....	21
3.2. 경계조건.....	24
3.3. 하중조건.....	25
4. 수소추진선박 유한요소해석 결과 및 분석.....	34
4.1. FEM 결과 분석	34
4.2. FEM 결과 분석 및 보완	46
5. 결론.....	48
참고문헌 목록	49

LIST OF FIGURES

그림 1. IMO 2023 온실가스(GHG) 감축전략.....	1
그림 2. 수소추진선박 기술개발 사례.....	2
그림 3. 수소추진선박 운항 경로.....	5
그림 4. 선박의 길이방향에 따른 분포계수(kv).....	7
그림 5. 쌍동선 연결부 슬래밍 분포계수(kt).....	1 0
그림 6. 해수압력 분포계수(ks).....	1 1
그림 7. 수소추진선박의 위험구역.....	1 7
그림 8. 위험도 기반 구조 안전성 평가 절차.....	2 0
그림 9. CATIA V5 를 통해 모델링한 수소추진선박의 모델(좌: 외판, 우: 보강재).....	2 2
그림 10. Patran 으로 import 한 수소추진선박 모델(좌: 외판, 우: 보강재).....	2 2
그림 11. 수소추진선박의 쉘 요소.....	2 2
그림 12. 수소추진선박 빔 요소.....	2 3
그림 13. 수소추진선박 판 두께.....	2 3
그림 14. 경계조건.....	2 5
그림 15. 하중조건 적용(선저에 작용하는 슬래밍 압력).....	2 6
그림 16. 하중조건 적용(쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력).....	2 7
그림 17. 하중조건 적용(해수압력, 흘수 기준 상부).....	2 8
그림 18. 하중조건 적용(해수압력, 흘수 기준 하부).....	2 8
그림 19. 하중조건 적용(호킹 굽힘모멘트).....	2 9
그림 20. 하중조건 적용(새깅 굽힘모멘트).....	2 9

그림 21. 하중조건 적용(횡방향 수직 굽힘모멘트).....	3 0
그림 22. 하중조건 적용(종비틀림 모멘트).....	3 1
그림 23. 하중조건 적용(수소 저장탱크에 의한 하중).....	3 2
그림 24. 하중조건 적용(탑승객에 의한 하중).....	3 3
그림 25. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(F.P.).....	3 5
그림 26. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.9L).....	3 5
그림 27. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.8L).....	3 6
그림 28. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.7L).....	3 6
그림 29. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.6L).....	3 7
그림 30. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.5L).....	3 7
그림 31. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(F.P.).....	3 9
그림 32. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.9L).....	3 9
그림 33. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.8L).....	4 0
그림 34. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.7L).....	4 0
그림 35. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.6L).....	4 1
그림 36. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.5L).....	4 1
그림 37. 해수압력 유한요소해석 결과.....	4 2
그림 38. 호킹 굽힘모멘트 유한요소해석 결과.....	4 3
그림 39. 새깅 굽힘모멘트 유한요소해석 결과.....	4 4
그림 40. 횡방향 수직 굽힘모멘트 유한요소해석 결과.....	4 5
그림 41. 종비틀림 모멘트 유한요소해석 결과.....	4 6

그림 42. 연료전지실의 수소 가스 환기를 위해 설계된 천장..... 4 7

LIST OF TABLES

표 1. 수소추진선박의 주요 제원	4
표 2. 항해범위 제한부호	5
표 3. 선종과 항해범위 제한부호에 따른 가속도 계수.....	6
표 4. 선박의 길이방향 위치에 따른 설계수직가속도	7
표 5. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력	9
표 6. 선체 형상에 따른 계수(kc)	1 0
표 7. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력.....	1 0
표 8. 해수압력의 최소 값 기준.....	1 1
표 9. 만재흡수선 하부와 상부에 대한 해수압력	1 2
표 10. 호강·새강 굽힘모멘트.....	1 3
표 11. 횡방향 수직 굽힘모멘트	1 4
표 12. 종비틀림 모멘트	1 4
표 13. 수소 저장탱크에 의한 하중	1 5
표 14. 위험요소의 빈도 지수.....	1 8
표 15. 위험요소의 심각도 지수	1 8
표 16. 위험 상황에 따른 영향 구역	1 9
표 17. 구조 재료의 물리적 특성.....	2 4
표 18. 위치 별 경계조건	2 4
표 19. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과	3 4
표 20. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과.....	3 8

1. 서론

1.1. 연구 배경

국제해사기구(IMO)의 '2023 온실가스 감축 전략'은 2008 년 온실가스 총배출량을 기준으로 2050 년까지 절반을 감축하기로 한 목표를 상향하여 2050 년에는 온실가스 배출량 '0'를 달성하는 것을 목표로 한다[1]. 이러한 '2023 온실가스(GHG) 감축 전략'은 조선 산업에 중대한 영향을 미치고 있다. 온실가스 감축 전략의 대응 방안은 암모니아, 수소 등 친환경 연료를 사용하는 선박 기술의 개발 및 도입이다. 따라서 친환경적인 해양 운송 수단으로 주목받고 있는 수소추진선박 기술의 개발과 도입이 전 세계적으로 활발히 진행 중에 있다. 이러한 수소추진선박의 기술 개발은 조선 산업의 경쟁력뿐만 아니라 타 산업에 자극을 주어 국가 경제에 크게 기여할 것으로 전망된다[2].

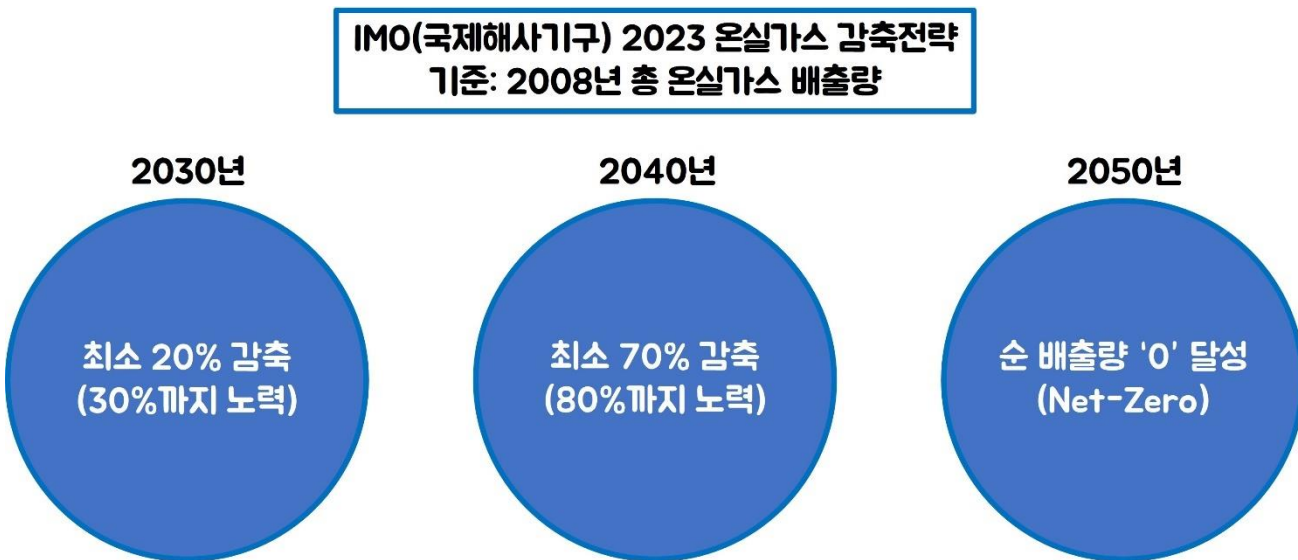


그림 1. IMO 2023 온실가스(GHG) 감축전략

1.2. 연구 필요성

국내외 수소추진선박에 대한 연구 동향에 대해서 조사했을 때, 미국, 유럽 등에서 활발히 기술 개발 중에 있으며, 실증사례를 통해 친환경 및 경제성을 입증하고 있다. 현재 해외에서 개발된 수소추진선박의 대표적인 사례는 미국의 Sea change 호, SF-BREEZE 호 그리고 유럽 측에서 개발된 Elektra 호 등이 있다[3-5]. 국내에서 개발된 수소추진선박은 Gold Green HYGEN 이

있다[6-7]. 하지만 해외의 수소추진선박에 대한 기술 연구에 비해 국내 수소추진선박에 대한 기술 수준은 초기 단계이며 상용화 및 실증을 위한 심화 연구가 필요한 실정이다[8]. 따라서 현재 국내 기술 개발 중인 350kW 급 40 인승 수소추진선박에 대한 위험도 기반의 구조 안전성 평가를 수행하려 한다.



(a) Sea change

(b) SF breeze



(c) Elektra



(d) Gold Green HYGEN

그림 2. 수소추진선박 기술개발 사례

1.3. 연구 목표

수소추진선박은 수소 저장탱크에서 연료전지로 수소 가스를 공급하여 전기를 생산하고, 생산된 전기를 추진 시스템에 공급하여 추진하는 선박이다. 수소 가스의 경우 수소 농도, 공기와의 혼합 비율, 온도, 압력 등 특정 조건에서 폭발 위험이 있다[9]. 바다 위에 떠 있는 선박에서 화재나 폭발은 승객 및 승무원의 안전을 위협할 수 있다. 이에 수소추진선박에 대한 위험도 기반의 구조 안전성 평가가 필요하다. 따라서 본 연구는 수소추진선박의 특수한 환경과 안전 고려 사항을 중심으로 선박의 구조 안전성을 분석하는 것이 목표이다.

1.4. 연구 방법

수소추진선박의 구조 안전성 연구를 수행하기 위해 여객형 쌍동선에 대한 구조 규정 중 해양수산부의 '알루미늄선의 구조기준'에 따라 구조 안전성 평가를 수행하였다[10]. 규정에서 제시하는 설계하중을 계산하고 수소추진선박에 하중조건으로 적용하여 구조 안전성 평가를 유한요소해석을 통해 수행하였다. 구조 안전성 평가의 중점은 승객의 안전이므로 수소추진선박은 화재 및 폭발 시 승객 및 승무원이 안전하게 대피할 수 있도록 충분한 강도를 갖춰야 한다. 따라서 수소 가스의 누출 및 배터리 화재 등 수소추진선박의 잠재적 위험 시나리오를 고려하여 위험도에 따라 구조적인 안전을 우선적으로 확보할 구역을 분류한다. 이때, 수소 저장탱크 및 배터리를 갖춘 구역의 경우 잠재적 위험을 갖춘 위험구역이다. 위험구역을 분석하기 위해 한국선급의 '선박용 연료전지 시스템 지침'을 검토하였다[11]. 또한 수소추진선박은 수소탱크와 배터리 등 전통적인 선박과 다르게 추가적으로 고려할 하중 조건을 가지고 있다. 따라서, 수소탱크, 배터리의 무게와 위치를 고려한 하중과 규정에 따른 설계하중 조건을 적용한 수소추진선박에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 얻은 결과를 통해 잠재적 위험의 분류에 따라 우선적으로 안전성을 확보할 구역과 위험구역에 대한 구조 안전성을 검토하였다.

2. 구조 안전성 평가 조건 도출

2.1. 규정 조사 및 검토

350kW 급 40 인승 수소추진선박의 구조 안전성 연구를 수행하기 위하여 여객형 쌍동선에 대한 구조 규정을 조사하였다. 현재 개발 중인 수소추진선박의 선질의 경우 알루미늄 합금을 고려하고 있으며, 이에 따라 국내 선질별로 제정된 구조기준 중 해양수산부의 '알루미늄선의 구조기준'을 검토하였다. 규정에서 제시하는 설계하중의 값을 계산하여 수소추진선박 전선 모델에 대한 유한요소해석 하중조건으로 적용하였다. 적용된 하중조건에 따른 응력 결과를 분석한 뒤 허용응력과 비교하여 구조 안전성을 평가하였다.

2.1.1. 주요 제원

선박의 구조기준에서 제시하는 설계하중과 관련한 식에는 선속, 배수량, 선박의 선질, 선박의 타입 및 길이와 같은 제원이 필요하다. 따라서 구조기준에서 제시하는 설계하중을 계산하기 위해 아래의 주요 제원 값을 대입하여 산출하였다. 수소추진선박의 주요 제원은 표 1 과 같다.

표 1. 수소추진선박의 주요 제원

항목	값	단위
Length between perpendicular (L_{BP})	21.0	m
Breadth	7.0	m
Depth	2.0	m
Draft	0.96	m
Displacement	61.1	tonne
Wetted area	137.216	m^2
Midship section area	3.632	m^2
Waterplane area	87.673	m^2
Block coefficient	0.422	-
Prismatic coefficient	0.782	-
Midship section coefficient	0.54	-
Waterplane area coefficient	0.596	-
Service speed	8	knot
Maximum speed	12	knot

본 연구에서 계획 중인 수소추진선박의 운항 시나리오는 그림 3 과 같다. 주간외의 경우 장생포항에서 대왕암까지 4 회 왕복 운항하며 야간의 경우 장생포항에서 태화강역까지 왕복한다. 이때의 총 운항 거리는 약 20km 정도이며, 운항 시나리오에 따른 항해범위 제한부호는 '1966 ICLL 의 Annex II'에서 제시한 계절별 항해범위에 따른 제한부호를 기준으로 선정하였다[12]. 항해범위 제한부호는 피항지로부터 거리와 선종에 따라 SA0 부터 SA5 로 나뉘며 표 2 와 같다.



그림 3. 수소추진선박 운항 경로

표 2. 항해범위 제한부호

항해범위 제한부호	계절	여름	겨울	열대	단위
	SA0	제한없음	300	제한없음	해리
SA1	300	100	300	해리	
SA2	100	50	250	해리	
SA3	50	20	100	해리	
SA4	20	5	20	해리	
SA5	2	1	5	해리	

2.1.2. 설계하중 계산

'알루미늄선의 구조기준'은 해양수산부에서 제정한 기준으로 알루미늄선의 선체구조에 관한 사항을 규정한다. '알루미늄선의 구조기준'의 제 3 편 선체구조의 제 1 장 일반사항의 15 조부터 28 조까지는 재료계수, 치수경감 등 선체구조의 설계 시 고려사항에 대해 언급하고 있다. 제 3 장 설계하중의 29 조부터 41 조까지는 설계수직가속도, 선저에 작용하는 선저설계슬래밍 압력, 종굽힘, 전단 및 축하중 등 선박에 대한 구조 안전성 평가를 위한 설계하중에 대한 계산식을 제시하고 있다. 규정 분석을 통해 정리한 계산식 및 계산 값은 아래와 같다.

1) 설계가속도

1.1) 선박의 무게중심에서의 설계수직가속도(a_{cg})

선박 무게중심에서의 설계수직가속도는 식 1 과 같다. L 은 선박의 길이, V 는 최고 속도, g_0 는 중력가속도($9.81m/s^2$), f_g 는 선종과 항해범위 제한부호에 따른 가속도 계수를 의미하며 표 3 에 따라 선정했다. 제시된 규정에 따르면 항해범위 SA0 에서 SA4 사이의 경우 설계수직가속도는 $9.81 m/s^2$ 이상으로 설정해야 한다. 또한 속장비($\frac{V}{\sqrt{L}}$)는 최대 3.0 으로 설정해야 한다. 계산된 설계수직가속도는 $8.12m/s^2$ 으로 지침에 따라 $9.81m/s^2$ 이상 설정해야 하므로 $9.81m/s^2$ 으로 설정했다.

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L}} \frac{3.2}{L^{0.76}} f_g g_0 = 9.81m/s^2 \quad (\text{식 1})$$

표 3. 선종과 항해범위 제한부호에 따른 가속도 계수

선종	항해범위 제한부호					
	SA0	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5
여객선	-	1	1	1	1	0.5
카훼리	-	1	1	1	1	0.5
화물선/어선	4	3	2	1	1	0.5
순시선	7	5	3	1	1	0.5
요트	1	1	1	1	1	0.5

1.2) 선박의 길이방향 위치에 따른 설계수직가속도(a_v)

선박 길이방향 위치에 따른 설계수직가속도는 식 2 와 같다. K_v 는 선박의 길이방향에 따른 분포계수이며 그림 4 에 따라 설정한다. a_{cg} 는 $9.81m/s^2$ 으로 수직설계가속도의 길이방향 위치에 따른 계산 값은 다음 표 4 와 같다.

$$a_v = k_v a_{cg} \quad (\text{식 2})$$

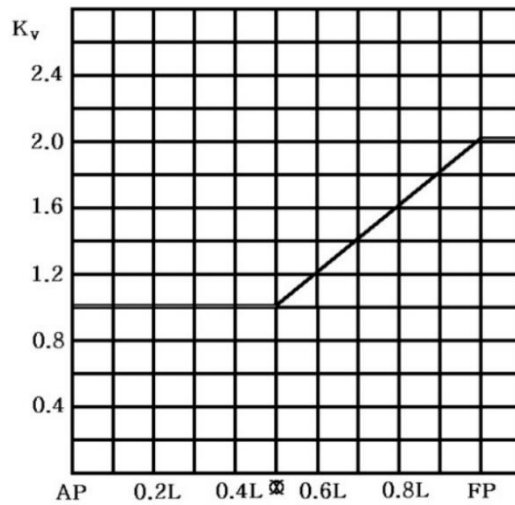


그림 4. 선박의 길이방향에 따른 분포계수(k_v)

표 4. 선박의 길이방향 위치에 따른 설계수직가속도

항목	A.P.	0.2L	0.4L	0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	F.P.	단위
k_v	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	-
a_v	9.81	9.81	9.81	9.81	11.77	13.73	15.70	17.66	19.62	m/s^2

1.3) 수평가속도

수평가속도의 경우 종방향 설계가속도(a_l)과 횡방향 설계가속도(a_t)가 계산되어야 한다. 종방향 설계가속도는 식 3 과 같다. C_w 는 파랑계수이며 선박의 길이가 100m 이하인 경우 0.08L 로 설정하며 100m 를 초과하는 경우 $6 + 0.02L$ 으로 계산한다. 따라서 C_w 는 1.68 이다. 횡방향 설계가속도는 횡요 중심 상단부와 하단부에 따라 나뉜다. 횡요 중심 상단부에서의

횡방향 설계가속도는 식 4, 횡요 중심 하단부에서의 횡방향 설계가속도는 식 5 와 같다. T_R 은 횡요주기이며 식 6 와 같다. 단 지침에 따라 횡요 주기가 4.0 이상의 값을 가지면 4.0 으로 설정한다. θ_r 는 최대 횡요의 기울기이며 식 7 과 같다. h_w 는 최대 속력의 70%를 유지할 수 있을 때의 최대 파고(m)로서 $0.6 C_W$ 이상으로 설정한다. r_r 은 횡요 중심에서 고려하는 위치까지의 거리(m)이며 쌍동선의 경우 수선으로 설정한다.

$$a_l = 2.5 \frac{C_W}{L} \left(0.85 + 0.25 \frac{V}{\sqrt{L}} \right)^2 g_0 = 4.44 m/s^2 \quad (\text{식 3})$$

$$a_t = \left(2 \frac{\pi}{T_R} \right)^2 \theta_r r_r + g_0 \sin \theta_r = 1.049 m/s^2 \quad (\text{식 4})$$

$$a_t = \left(2 \frac{\pi}{T_R} \right)^2 \theta_r r_r = 0.310 m/s^2 \quad (\text{식 5})$$

$$T_R = \frac{\sqrt{L}}{1.05 + 0.175 \frac{V}{\sqrt{L}}} = 3.038 \text{ sec} \quad (\text{식 6})$$

$$\theta_r = \frac{\pi h_w}{2L} = 0.0754 \text{ rad} \quad (\text{식 7})$$

2) 파랑하중

2.1) 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력(P_{sl})

선저 중요설계슬래밍 압력은 식 8 과 같다. d_L 는 선수단에서 측정된 최소 항해 흘수를 의미한다. β_x 는 횡단면의 선저 경사 각도로 10° 에서 30° 으로 설정한다. k_a 는 계수이며 판재류의 경우 1, 횡보강재 및 거더의 경우 $1.1 - 20 \frac{l_a}{L}$ 로 설정한다. 이때 l_a 는 하중 작용면적에 대한 종방향 거리이며 k_a 는 1 이상인 경우 1로 설정하며 0.35 이하인 경우 0.35로 설정한다. k_b 또한 계수이며 판재류, 종거더와 종횡보강재의 경우 1, 횡거더 또는 보강재는 $\frac{L}{40l} + 0.5$ 로 설정한다. k_b 가 1 이상인 경우 지침에 따라 1로 설정한다. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력의 작용 범위는 식 9 를 통해 구한 l_p 와 지침에 따라 용골에서 만곡상부 변곡점까지 구조 부재에 적용한다. 또한 3 항에 따라 선저에 작용하는 슬래밍 압력은 해수압력 이상의 값을 가져야 한다. 계산된 중요슬래밍 압력은 표 5 와 같다.

$$P_{sl} = \frac{21}{\tan(\beta_x)} k_a k_b C_W \left(1 - \frac{20d_L}{L} \right) \quad (\text{식 8})$$

$$l_p = \left(0.1 + 0.15 \frac{V}{\sqrt{L}}\right)L = 10.349m \text{ (F.P.로부터 약 } 0.49L)$$

(식 9)

표 5. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력

분류	항목	0.4L	0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	단위
공통	β_x	18.40	18.40	20.20	24.10	30.00	30.00	degree
	C_W	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	-
판재류	k_a	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
	k_b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
	P_{sl}	19.68	19.68	21.14	22.60	24.06	25.52	kN/m^2
보강재	l_a	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	m
	k_a	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	-
	l	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	m
	k_b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
	P_{sl}	15.65	15.65	16.81	17.97	19.14	20.30	kN/m^2
횡거더	l_a	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	m
	k_a	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	-
	l	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	m
	k_b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-
	P_{sl}	6.89	6.89	7.40	7.91	8.42	8.93	kN/m^2

2.2) 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력(P_{sl})

쌍동선 연결부에 대한 설계 슬래밍 압력은 식 10 과 같다. A 는 부재의 하중 작용 면적이며 판재류의 경우 $2.5S^2 m^2$ 이하, 보강재와 거더의 경우 e^2 로 설정한다. 이때 e 는 선박의 수선으로부터 충격압력 면적까지의 수직거리이며, S 는 보강재의 간격을 의미한다. H_c 는 하중 작용점으로부터 흘수선까지의 거리이다. K_t 는 선박 길이 방향에 대한 슬래밍 압력 분포계수를 의미하며, 그림 5 에 따라 설정한다. H_L 는 하중 작용점으로부터 수선까지 슬래밍을 피하기 위해 필요한 높이이며 $0.22L(k_c - 0.0008L)$ 로 계산하며 k_c 는 표 6 에 따라 선정한다. 또한 규정에서 명시된 것과 같이 슬래밍 압력의 작용범위를 선수로부터 0.5L 까지 적용하였다. 계산된 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력은 표 7 과 같다.

$$P_{sl} = 2.6k_t \left(\frac{\Delta}{A}\right)^{0.3} a_{cg} \left(1 - \frac{H_C}{H_L}\right) \quad (\text{식 } 10)$$

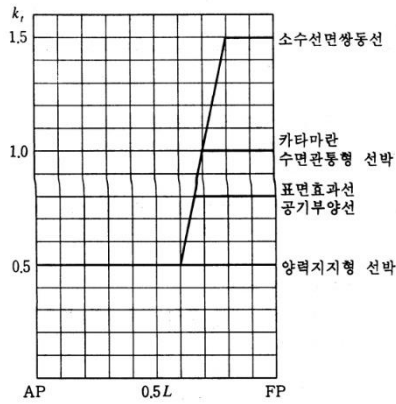


그림 5. 쌍둥선 연결부 슬래밍 분포계수(k_t)

표 6. 선체 형상에 따른 계수(k_c)

선형	k_c
카타마란	0.3
수면관통형 선박	
표면효과선, 공기부양선	
양력지지형 선박	
소수면쌍둥선	0.5

표 7. 쌍둥선 연결구조의 슬래밍 압력

분류	항목	0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	F.P.	단위
공통	Δ	61.10						tonne
	a_{cg}	9.81						m/s^2
	k_t	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	-
	H_C	0.74						m
	k_c	0.30						-
	H_L	1.31						m
판재류	A	1.37						m^2
	P_{sl}	17.3	17.3	34.6	34.6	34.6	34.6	kN/m^2

보강재	A	0.55						m^2
	P_{sl}	22.8	22.8	45.6	45.6	45.6	45.6	kN/m^2

2.3) 해수압력

만재흡수선 하부와 상부에 가해지는 압력 계산은 식 11, 12 와 같다. h_0 는 만재흡수선의 수선에서 하중 작용점까지의 높이를 의미하며, k_s 는 선박 종방향에 대한 해수압력의 분포계수로 선미단의 경우 7.5, 선수단의 경우 $5/C_b$ 으로 계산하며 선미단과 선수단 사이는 보간법으로 계산한다. 해수압력 분포계수는 그림 6 과 같다. a 는 노출건현갑판과 선측에 대해서 1.0, 건현갑판상반의 노출갑판의 경우 0.8 을 적용한다. 단, 해수압력은 지침에 따라 표 8 과 같이 항해범위 제한부호에 따라 선측부, 노출 갑판부, 수선상부 0.1L 보다 높은 루프부에 대해 제한된 값 이상이어야 한다. 만재흡수선 하부 압력과 상부 압력에 대한 계산 값은 표 9 와 같다.

$$P = 10h_0 + \left(k_s - 1.5 \frac{h_0}{d}\right) C_W \quad (\text{식 11})$$

$$P = ak_s(C_W - 0.67h_0) \quad (\text{식 12})$$

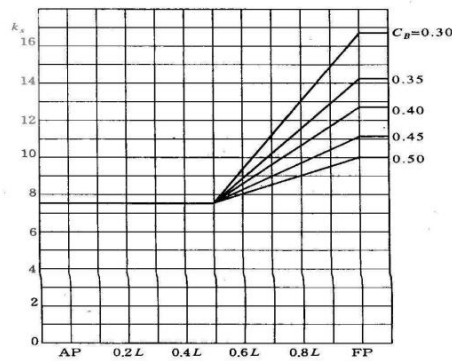


그림 6. 해수압력 분포계수(k_s)

표 8. 해수압력의 최소 값 기준

항해범위 제한부호	선측부	노출 갑판부	수선상부 0.1L 보다 높은 루프부	단위
SA0, SA1, SA2, SA3	6.5	5	3	kN/m^2
SA4	5	4	3	
SA5	4	3	3	

표 9. 만재흘수선 하부와 상부에 대한 해수압력

분류	항목	A.P.	0.1L	0.2L	0.3L	0.4L	0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	F.P.	단위
공통	C_W	1.68											-
	k_s	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.4	9.2	10.1	11.0	11.8	-
하부	h_0	0.00											m
	P	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	14.1	15.5	17.0	18.4	19.9	kN/m^2
	h_0	0.25											m
	P	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	15.9	17.4	18.8	20.3	21.7	kN/m^2
	h_0	0.50											m
	P	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	17.7	19.2	20.7	22.1	23.6	kN/m^2
	h_0	0.96											m
	P	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	21.1	22.6	24.7	25.5	27.0	kN/m^2
상부	a	1											-
	h_0	0.96											m
	P	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	8.7	9.6	10.5	11.4	12.3	kN/m^2
	h_0	1.50											m
	P	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	kN/m^2
	h_0	2.00											m
	P	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	kN/m^2

3) 굽힘하중

3.1) 호강·새깁 굽힘모멘트(M_{hog} , M_{sag})

쌍동선 호강 굽힘모멘트는 식 14 와 같다. M_{sw} 는 최대 하중 조건에서 정수 중 모멘트이며, 호강 시 $0.5\Delta L$ 로 계산한다. k_2 는 쌍동선 연결부의 잠수에 의한 영향계수이며 식 13 을 통해 계산한다. Z 는 용골로부터 쌍동선 연결구조까지의 수직 거리이며, B_{tn} 은 쌍동선 연결부 너비이다. 쌍동선 새깁 굽힘모멘트는 식 16 과 같다. k_3 는 쌍동선 연결부의 잠수에 의한 영향계수이며 식 15 를 통해 계산한다. M_{sw} 의 경우 지침에 따라 호강 굽힘모멘트 M_{sw} 의 50%를 새깁 굽힘모멘트의 M_{sw} 계산시 감안할 수 있다. 호강 및 새깁 굽힘모멘트에 대한 계산값은 표 10 과 같다.

$$k_2 = 1 - \frac{z - 0.5d}{0.5d + 2C_W} \quad (\text{식 13})$$

$$M_{hog} = M_{sw} + 0.19C_W L^2 (B_{WL} + k_2 B_{tn}) C_b \quad (\text{식 14})$$

$$k_3 = 1 - \frac{z - 0.5d}{0.5d + 2.5C_W} \quad (\text{식 15})$$

$$M_{sag} = M_{sw} + 0.14C_W L^2 (B_{WL} + k_3 B_{tn}) (C_b + 0.7) \quad (\text{식 16})$$

표 10. 호강·새강 굽힘모멘트

분류	항목	값	단위
공통	Δ	61.1	tonne
	B_{wl}	7.00	m
	B_{tn}	1.80	m
	z	1.70	m
	d	0.96	m
	C_W	1.68	-
호강 굽힘모멘트	작용범위	0.3L ~ 0.6L	-
	k_2	0.68	-
	M_{sw}	192.47	kN·m
	M_{hog}	236.46	kN·m
새강 굽힘모멘트	작용범위	F.P.~0.2L & 0.7L~A.P.	-
	k_3	0.74	-
	M_{sw}	128.31	kN·m
	M_{sag}	370.69	kN·m

3.2) 쌍동선체 연결구조의 하중

쌍동선의 연결구조에 대한 횡방향 굽힘모멘트는 식 17을 통해 계산한다. b 는 쌍동선체에 대한 중심선간 거리이며, s 는 항해범위 제한부호에 따른 값으로 SA3의 경우 지침에서 제시한 7.5를 적용한다. 횡방향 굽힘모멘트에 대한 계산 값은 표 11과 같다.

$$M_s = \frac{\Delta a_{cg} b}{s} \quad (\text{식 17})$$

표 11. 횡방향 수직 굽힘모멘트

항목	값	단위
Δ	61.10	tonne
a_{cg}	9.81	m/s^2
b	4.60	m
s	7.50	-
M_s	367.63	$kN \cdot m$

3.3) 쌍동선체 종비틀림 모멘트

쌍동선체에 대한 종비틀림 모멘트는 식 18 에 따라 계산한다. 계산된 종비틀림 모멘트에 대한 계산 값은 표 12 와 같다.

$$M_p = \frac{\Delta a_{cg} L}{8} \quad (\text{식 18})$$

표 12. 종비틀림 모멘트

분류	항목	값	단위
종비틀림	Δ	61.10	tonne
	a_{cg}	9.81	m/s^2
	L	21.00	m
	M_p	1573.40	$kN \cdot m$

4) 중량물에 의한 하중

중량물에 의한 하중은 한국선급의 '선급 및 강선규칙 적용지침' 제 3 편 '선체구조'에 제시된 전선구조모델에 대한 하중조건에 따라 각 설계하중 적용 시 화물과 승객에 의한 하중을 반영해야 한다.

4.1) 수소 저장탱크에 의한 하중

수소 저장탱크는 탱크 모듈을 포함하여 1 개당 약 0.3 톤이며 총 16 개로 4.8 톤이다. 수소 저장탱크는 여객실의 천장에 선미를 기준으로 0.3L 에서 0.5L 까지 폭 2.2m 로 설치된다. 지침에 따라 장비에 의한 하중은 식 19 를 통해 계산한다. M 은 화물의 질량을 의미하며, a_v 는

길이방향에 따른 설계 수직가속도를 의미한다. 계산된 수소 저장탱크에 의한 하중은 표 13 과 같다.

$$P = (g_0 + 0.5a_v)M \quad (\text{식 19})$$

표 13. 수소 저장탱크에 의한 하중

분류	0.3L~0.5L	단위
M	4.80	tonne
g_0	9.81	m/s^2
a_v	9.81	m/s^2
P	70.63	kN

4.2) 탑승객에 의한 하중

여객실의 탑승객 40 명이 위치했을 경우에 대한 하중을 고려할 때, 한 사람당 체중은 80kg 으로 가정한다. 탑승객에 의한 총 질량은 3.2 톤으로 여객실에 해당하는 구역에 총 31.39kN 의 하중을 부여한다.

2.2. 위험구역 및 잠재적 위험 요인 분류

수소추진선박은 선박 내 설치된 연료전지에 수소가 공급되어 전기를 생산하고, 생산된 전기를 추진용 모터에 공급하여 추진하는 선박이다. 이러한 수소추진선박을 구성하는 시스템은 수소연료전지(Fuel cell) – 에너지저장장치(ESS)시스템, 수소 저장 및 공급 시스템, 추진 및 제어 시스템 등으로 분류할 수 있다[8]. 이러한 수소추진선박에 설치된 수소 저장탱크 및 연료전지의 경우 수소 가스 누출 및 화재와 같은 상황에 직면하면 탑승객의 안전에 영향을 줄 수 있다. 따라서 수소추진선박에 대한 구조 안전성 평가 시 탑승객의 안전을 고려하기 위해 위험구역을 구분하고, 위험 시나리오에 따라 영향을 받는 구역을 분석하여 구조 안전성 평가 시 해당 구역이 구조적으로 충분한 강도를 갖는지 분석한다.

2.2.1. 위험구역 선정

수소추진선박에 대한 위험구역의 선정 시 한국선급에서 제공하는 '선박용 연료전지 시스템 지침[10]'을 참고하였다. 해당 지침은 연료전지 기술 사용 시 안전하고 신뢰할 수 있는 전기 및 열 에너지의 사용을 위한 기준과 위험구역 선정 기준에 대한 내용을 포함하고 있다. 현재 연구중인 수소추진선박은 연료전지 장비를 포함하고 있으며, 지침의 기능요건에 따라 선박, 선내 인원 및 장비와 관련하여 안전에 영향을 줄 수 있는 잠재적 위험도를 최소화해야 한다. 따라서 수소추진선박에 배치된 연료전지 구역은 폭발성, 인화성 또는 독성가스의 농도가 축적되지 않도록 환기 시스템을 갖춰야 하며, 외부 충격으로부터 보호해야 한다. 지침 속 기능요건을 고려했을 때, 수소추진선박 연료전지 구역의 위험도는 선박과 선내 인원의 안전과 직접적인 연관을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 지침 속 '전기시스템'의 '구역 분류'에는 위험구역 0~2 에 대한 기준이 명시되어 있으며, 각 위험구역에 대한 기준은 다음과 같다.

(a) 위험구역 "0"

- 저인화염 연료 또는 개질된 연료가 포함된 완충 탱크, 개질기, 배관 및 장비, 압력도출관 또는 벤트장치 관의 내부

(b) 위험구역 "1"

- 개질된 연료 또는 퍼지가스의 출구 또는 연료전지 구역 통풍 출구로부터 3m 이내의 개방갑판상 지역 또는 갑판상 반폐위 구역
- 연료전지 배기공기 또는 배기가스 출구
- 연료전지 구역 입구, 연료전지 구역 통풍 입구 및 구역 "1"의 기타 개구로부터 1.5m 이내의 개방갑판상 지역 또는 갑판상 반폐위 구역
- 기타 개질된 연료의 방출원이 위치한 곳으로부터 3m 이내의 개방갑판상 지역 또는 갑판상 반폐위 구역
- 연료전지 구역

(c) 위험구역 "2"

- 구역 "1"의 개방 또는 반폐위 구역 주위의 1.5m 이내 구역
- 에어로크

각 기준을 수소추진선박에 적용했을 때 그림 7 과 같이 위험구역이 선정되었다. 위험구역 "0"에 해당하는 것은 수소가스가 충전된 탱크이다. 연료가 충전된 탱크의 폭발 시 압축된 수소가스의 폭발압이 승객의 안전에 위험이 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 수소 저장탱크의 위치는 수소가스의 누출 시 외부 공기로 수소가스가 밀도차에 의해 날아가 폭발 위험을 방지하도록 외부 공기와 접하는 여객실의 천장에 위치하고 있다. 따라서 수소 저장탱크의 폭발에 대한

위험도는 낮다. 위험구역 "1"에 해당하는 것은 수소가스가 충전된 탱크와 연료전실 통풍 출구로부터 3m 에 해당하는 범위 그리고 연료전지실이다. 수소 저장탱크의 경우 수소가스가 누출되는 상황이라도 밀도차에 의해 공기중으로 수소가스가 날아간다. 이에 비해 수소가스를 공급받아 전기를 생산하는 연료전지실은 수소가스의 누출 시 가스가 빠르게 확산된다면 폭발 가능성이 있다. 수소가스의 폭발범위는 공기 중 4~75%이다[13]. 따라서 수소가스가 연료전지실에 쌓이지 않도록 경사가 있는 천장과 환기시스템을 갖추고 있다. 또한 연료전지실의 폭발 및 화재에 대한 여객실의 안전을 고려하여 연료전지실과 스위치보드실 사이에 코퍼댐을 갖추고 있다. 위험구역 "2"의 경우 위험 "1"의 반폐위 구역 주위의 1.5m 이내에 해당하는 범위 그리고 배터리실에 해당한다. 연료전지실의 화재 및 폭발 시 배터리는 선박의 추진 시스템에 전기를 공급해야 하므로 배터리실에 대한 구조 안전성을 확인해야 한다. 따라서 선정된 위험구역을 통해 선박과 승객의 안전을 위하여 고려할 구역은 연료전지실과 배터리실로 판단된다.

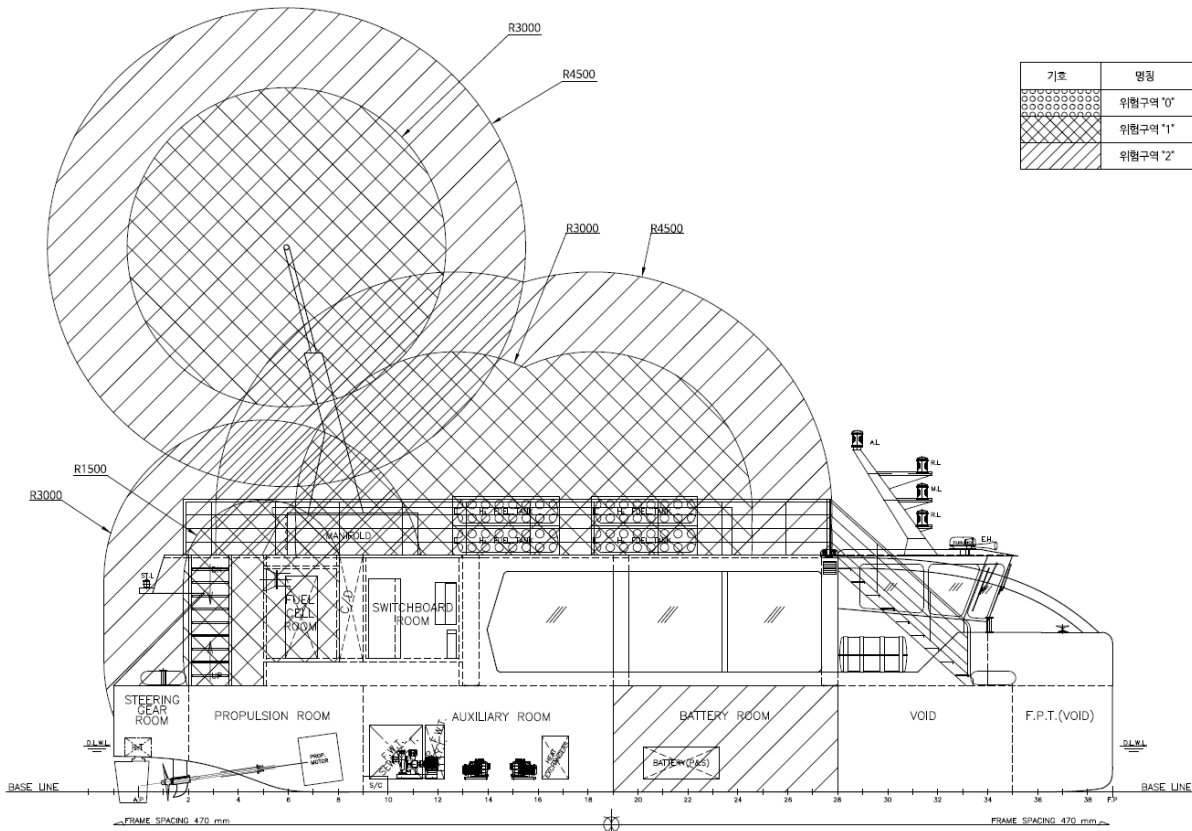


그림 7. 수소추진선박의 위험구역

2.2.2. 잠재적 위험요인 분류

수소추진선박의 개발을 위해 국제해사기구의 공식안전성평가(Formal safety assessment)에 따라 위험도평가(Hazard Identification)가 수행되고 있다. 단 본 논문은 수소추진선박에 대한 구조 안전성 연구를 위해 구조에 직접적인 영향을 줄 수 있는 위험요인에 한해서 분석하고 다루려고 한다. 따라서 수소추진선박 탑승객의 안전을 위해 선박의 구조와 관련한 잠재적 위험요인을 고려하여 해당하는 상황에 의해 영향을 받을 구역을 분석한다. 위험요인에 대한 구분 시 위험요소의 위험도 지수를 고려하였으며 위험요소의 위험도 지수는 식 20 과 같이 계산된다. FI(Frequency Index)는 위험요소의 빈도 지수를 의미하며, SI(Severity Index)는 위험요소의 심각도 지수를 의미한다[16]. 위험요소의 빈도 지수는 발생 빈도에 따라 단계를 1 에서 5 단계로 나누었으며, 심각도 지수는 인명피해의 정도에 따라 단계를 1 에서 5 단계로 나누었다. 위험요소의 빈도 지수와 심각도 지수의 단계는 표 14, 15 와 같다. 잠재적 위험요인은 외부와의 충돌, 화재와 배관 파손에 의한 수소가스 누출 등을 고려하였으며 각 위험요인에 대한 영향을 받은 선박 구역을 표 16 에 정리하였다.

표 14. 위험요소의 빈도 지수

지수	항목	기준
5	Frequent	단기 운용 간 수 차례 발생 가능(1 년 사이)
4	Probable	장기 운용 간 수 차례 발생 가능(1 년~10 년 사이)
3	Occasional	운용 수명 간 1~2 회 발생 가능
2	Rare	유사 시스템 집단에서 1~2 회 발생 가능
1	Improbable	유사 시스템 집단에서 발생 가능성 적음

표 15. 위험요소의 심각도 지수

지수	항목	기준
5	Catastrophic	다수 사망자 발생
4	Critical	사망자 또는 다수 중상자 발생
3	Major	중상자 발생
2	Minor	경상자 발생
1	Slight	단순 부상

$$RI(\text{Risk Index}) = FI(\text{Frequency Index}) \times SI(\text{Severity Index})$$

(식 20)

표 16. 위험 상황에 따른 영향 구역

상황	FI	SI	RI	영향 구역
외부에서의 화재 및 폭발	1	5	5	선체(전기추진실, 배터리실)
	1	3	3	연료전지실
	1	5	5	수소 저장탱크
	1	3	3	여객실
수소가스 공급 배관 파손	1	5	5	연료전지실
	1	5	5	수소 저장탱크
환기시스템 주변의 화재 및 폭발	2	3	6	연료전지실
	2	5	10	수소 저장탱크
운항중 너울	1	4	4	선체(전기추진실, 배터리실)
정박중 너울	1	4	4	선체(전기추진실, 배터리실)
선박 및 부유물에 의한 충돌	1	4	4	선체(전기추진실, 배터리실)
구조물(다리 등)에 의한 충돌	2	5	10	수소 저장탱크
화재 및 외부 온도 상승으로 인한 수소 저장탱크 압력 상승에 의한 가스 누출	1	5	5	수소 저장탱크

2.3. 위험도 기반 구조 안전성 평가 절차

수소추진선박에 대한 위험도 기반 구조 안전성 평가의 절차 정립을 위하여 고려한 항목은 3 가지로 나뉘어진다. 첫째, 규정검토이다. 수소추진선박에 대한 구조 안전성 검토를 위한 유한요소해석 시 적용될 하중조건을 고려하기 위해 '알루미늄선의 구조기준'에 근거하여 설계하중을 계산하였다. 또한 위험구역 선정을 위한 '선박용 연료전지 시스템 지침'에서 제시하는 위험구역 선정 기준을 통해 수소추진선박의 위험구역을 선정하였다. 둘째, 위험도 분석이다. 앞서 규정을 통해 선정한 위험구역과 위험 시나리오에 따른 영향 구역을 고려하여 위험 상황에 따른 영향 구역을 분석하였다. 위험구역과 위험 시나리오에 따라 수소추진선박 탑승객의 안전을 위해 수소 저장탱크, 연료전지실, 여객실, 선체에 대한 구조 안전성이 우선적으로 고려되어야 한다고 판단하였다. 셋째, 유한요소해석이다. 수소추진선박의 설계도면인 중앙횡단면도, 강재배치도, 일반배치도 그리고 선박 소재를 반영하여 수소추진선박의

유한요소모델을 제작하였다. 유한요소모델에 한국선급의 '선급 및 강선규칙 적용지침'에서 제시하는 경계조건을 적용하고, 규정검토 시 계산된 설계하중을 하중조건으로 적용하였다. 따라서 '알루미늄선의 구조기준'의 설계하중을 반영한 수소추진선박의 유한요소해석의 응력 및 변형 결과를 분석하여 위험 시나리오가 발생할 수 있는 경우를 고려하였다. 또한 규정의 제 5 장 '국부강도'에 따라 판과 보강재에 대한 허용응력을 유한요소해석 응력 결과와 비교하여 구조적으로 안전한지 검토하였다. 위험도 기반 구조 안전성 평가 절차는 그림 8 과 같다.

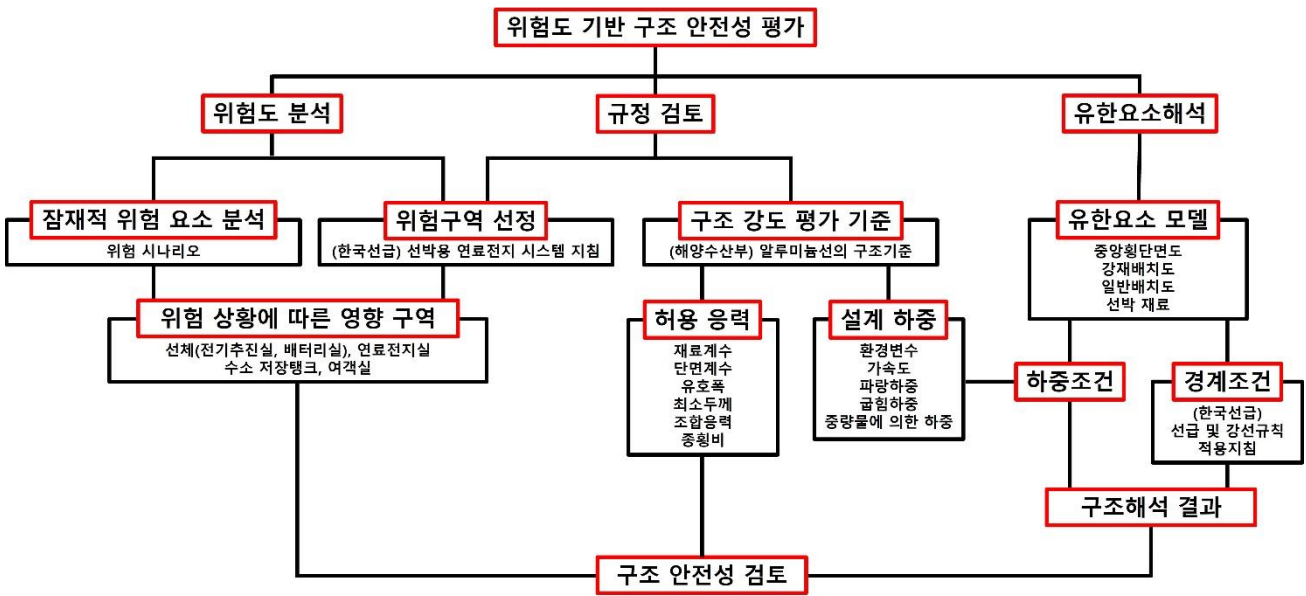


그림 8. 위험도 기반 구조 안전성 평가 절차

3. 유한요소해석을 통한 수소추진선박 구조 안전성 평가

3.1. FE 모델

본 해석에서 사용한 유한요소모델은 상용 모델링 소프트웨어 CATIA V5 와 구조해석 소프트웨어 MSC. Patran/Nastran 2023 을 사용하여 제작하였다. 구조해석에 사용된 수소추진선박의 모델은 세호마린솔루션즈 측에서 제공한 중앙횡단면도와 강재배치도를 반영하였다. 이때, 선박의 외판의 경우 2D 요소인 쉘 요소(shell element)로 설정할 것을 고려하여 surface 로 모델링하였다. 또한 보강재의 경우 중앙횡단면도와 강재배치도에서 제시하는 형상과 치수를 반영하기 위해 1D 요소인 빔 요소(beam element)로 설정할 것을 고려하여 curve 로 모델링하였다. Patran 에서 meshing 작업 시 surface 와 curve 사이에서 교점으로 접하는 부분에서 생성될 절점(node)을 고려하여 접선과 접점에 해당하는 지점마다 surface 와 curve 를 나누어 모델링하였다. CATIA V5 를 통해 모델링한 전선 모델은 그림 9 와 같으며 완성된 모델은 그림 10 과 같이 Patran 으로 import 시켜주었다. 그 후 meshing 작업을 통해 선박이 하나의 사물체로 인식할 수 있도록 그림 11 과 같이 4 개의 절점을 가지는 Quad4 요소와 3 개의 절점을 가지는 Tria3 요소로 배치했다. 또한 그림 12 와 같이 보강재를 구현하기 위한 빔 요소를 설정했다. 국부 부재 검토 및 형상 구현에 적합하도록 section 간 거리 470mm 를 고려하여 쉘 요소와 빔 요소의 절점간 거리(element length)는 235mm 로 설정하였고 절점의 개수는 총 24,578 개이며 요소의 개수는 총 33,868 개이다. 알루미늄 구조기준 제 2 편 제 1 장 제 5 조(재료의 규격)에 따라 수소추진선박 외판의 소재는 알루미늄 합금 가공경화형 압연재인 Aluminum 5083-H321 을 적용하였다[14]. 또한 수소추진선박 보강재의 경우 알루미늄 합금 압출재인 Aluminum 6061-T6(용체화 처리 후 인공시효경과처리)를 적용하였다[15]. Aluminum 5083-H321 과 Aluminum 6061-T6 에 대한 물성 정보는 표 17 과 같다. 선박의 판에 대한 두께는 중앙횡단면도를 반영하여 bottom 과 side 에 대한 판은 6mm 그 외 판의 두께는 5mm 로 설정하였다. 수소추진선박에 대한 판의 두께는 그림 13 에 나타냈다.

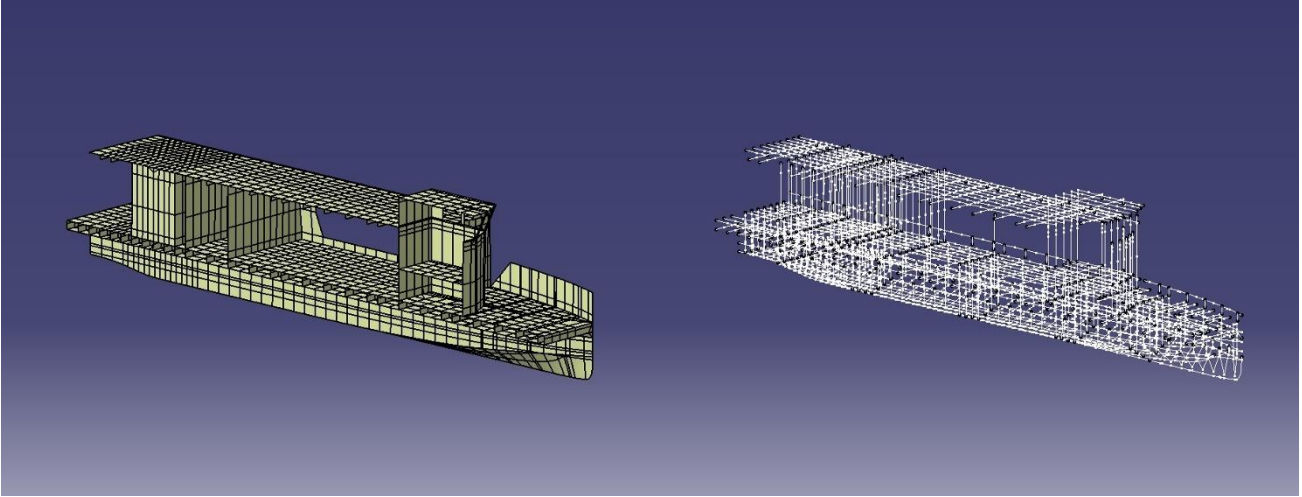


그림 9. CATIA V5 를 통해 모델링한 수소추진선박의 모델(좌: 외판, 우: 보강재)

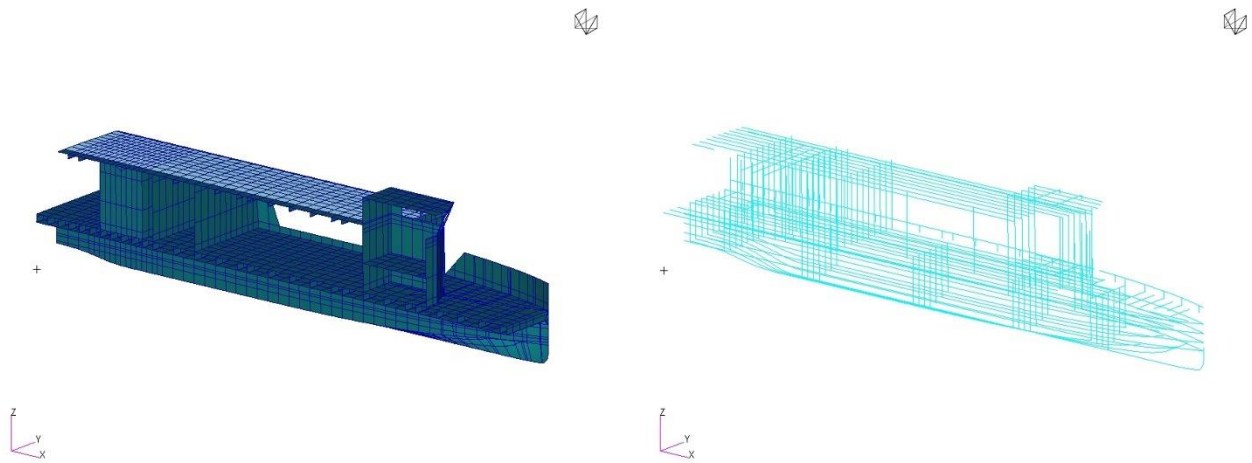


그림 10. Patran 으로 import 한 수소추진선박 모델(좌: 외판, 우: 보강재)

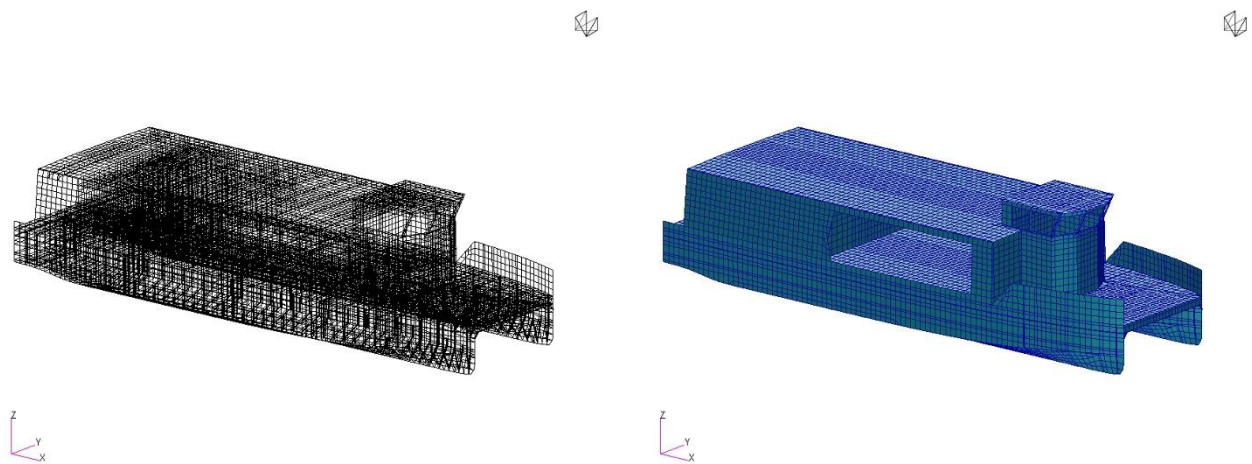


그림 11. 수소추진선박의 웰 요소

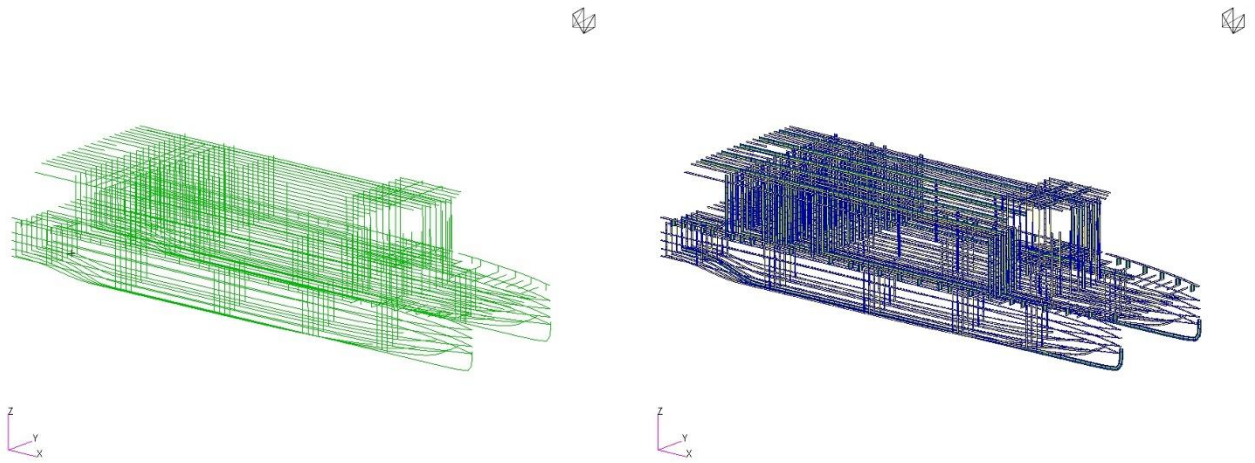


그림 12. 수소추진선박 빔 요소

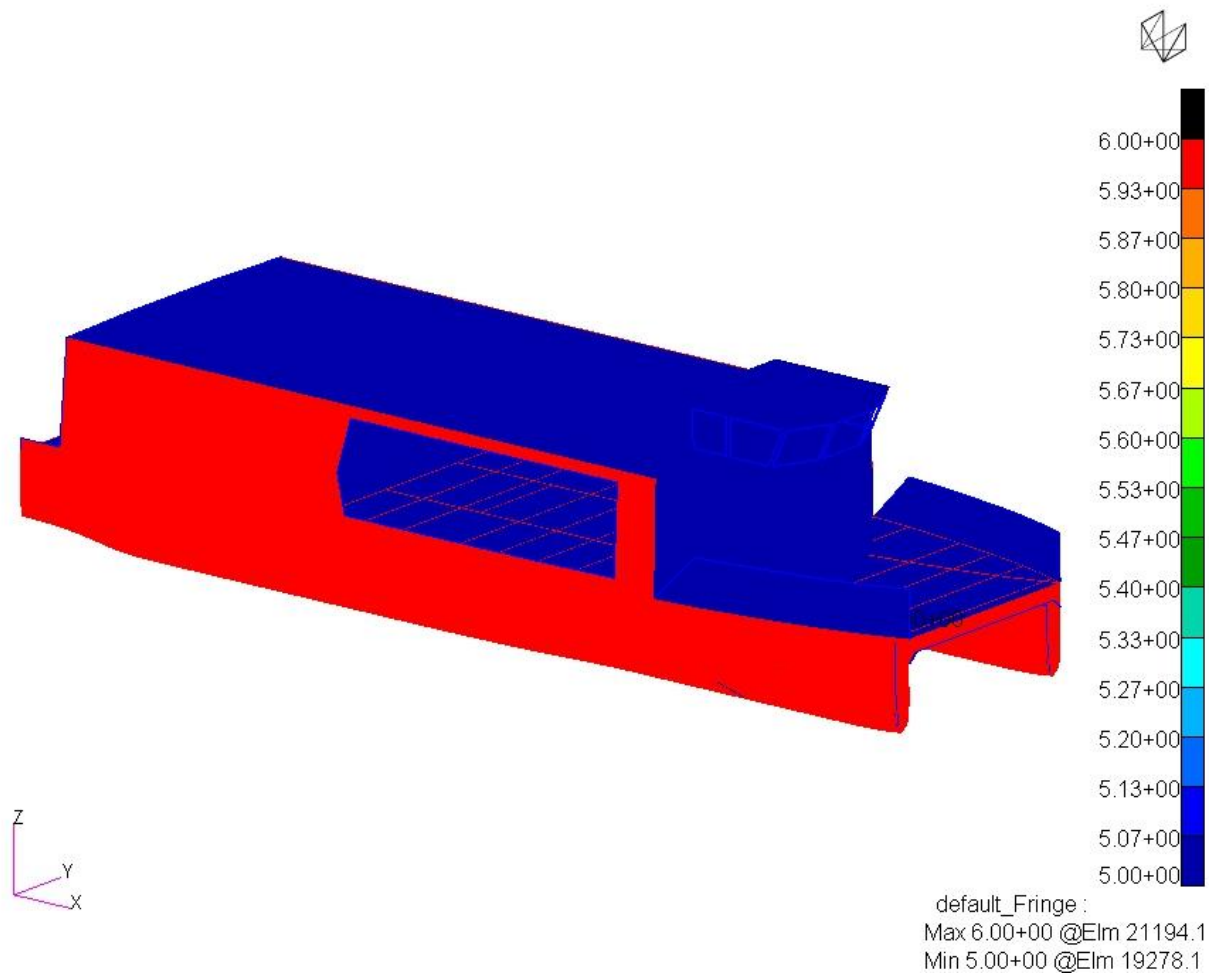


그림 13. 수소추진선박 판 두께

표 17. 구조 재료의 물리적 특성

Material	Elastic modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Poisson's ratio (-)	Density (tonne/mm ³)
Aluminum 5083 – H321	71.0	26.4	0.33	2.66×10 ⁻⁹
Aluminum 6061 – T6	68.9	26.0	0.33	2.70×10 ⁻⁹

3.2. 경계조건

수소추진선박 전선 모델의 경계조건은 한국선급의 '선급 및 강선규칙 적용지침' 제 3 편 '선체구조'에 제시된 전선구조모델에 대한 경계조건을 반영하여 설정하였다[16]. 따라서 전선모델에 대한 경계조건은 구속에 의한 응력 발생 방지를 위해 단순지지를 적용하였다. 또한 경계조건에서 발생하는 불평형력을 방지하기 위해 관성 제거(Inertia relief)를 적용하였다. 설정된 경계조건은 그림 14 와 같으며 각 위치에서의 설정된 구속조건은 표 18 과 같다.

표 18. 위치 별 경계조건

위치	항목	x	y	z
A, B	Translation	Fixed	Fixed	Fixed
	Rotation	-	-	-
C, D	Translation	-	Fixed	Fixed
	Rotation	-	-	-
E, F	Translation	-	Fixed	-
	Rotation	-	-	-

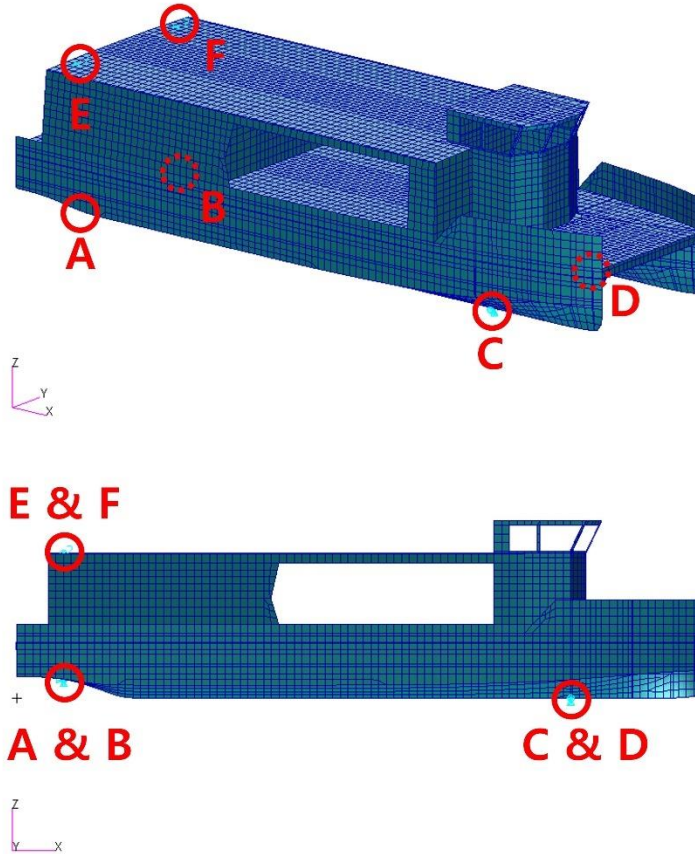


그림 14. 경계조건

3.3. 하중조건

'알루미늄선의 구조기준'을 통해 계산한 설계하중은 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력, 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력, 해수압력, 호강·새깅 굽힘모멘트, 횡방향 수직 굽힘모멘트, 쌍동선체 비틀림 모멘트이다. 유한요소모델에 적용한 각 설계하중은 아래와 같다.

1) 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력

선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 계산 값은 표 5 와 같다. 규정에서 제시된 슬래밍 압력의 작용 범위(l_p)는 선수로부터 0.5L 까지 적용된다고 계산되었다. 각 구역에 대한 계산된 슬래밍 압력을 선저에 적용하였다. 유한요소모델에 적용된 중요슬래밍 압력은 그림 15 와 같다.

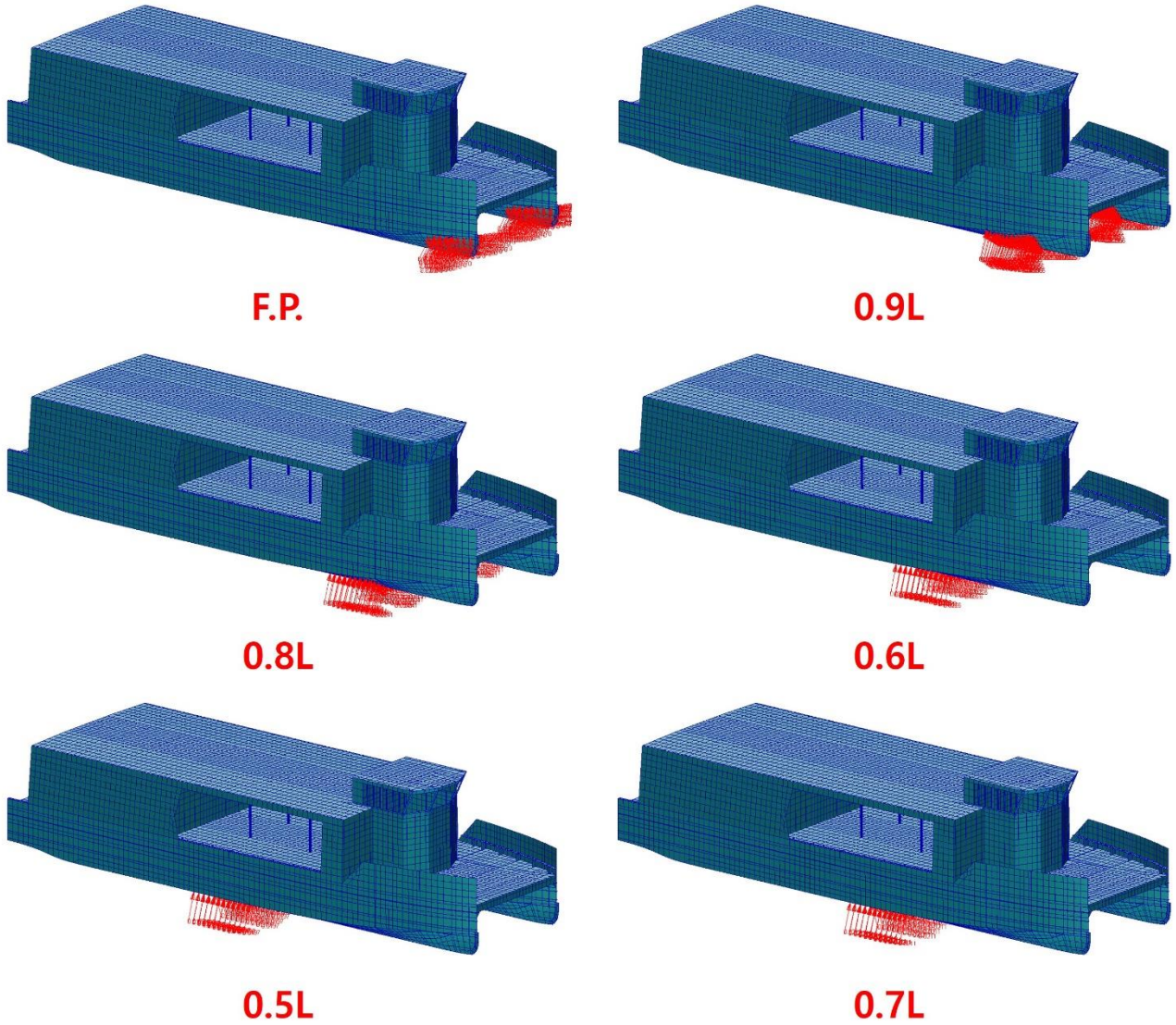


그림 15. 하중조건 적용(선저에 작용하는 슬래밍 압력)

2) 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력

쌍동선 연결구조에 작용하는 슬래밍 압력 계산 값은 표 7 과 같다. 규정에서 제시된 슬래밍 압력의 작용 범위(l_p)는 선수로부터 0.5L 까지 적용된다고 계산되었다. 각 구역에 대한 계산된 슬래밍 압력을 쌍동선의 연결구조에 적용하였다. 유한요소모델에 적용된 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력은 그림 16 과 같다.

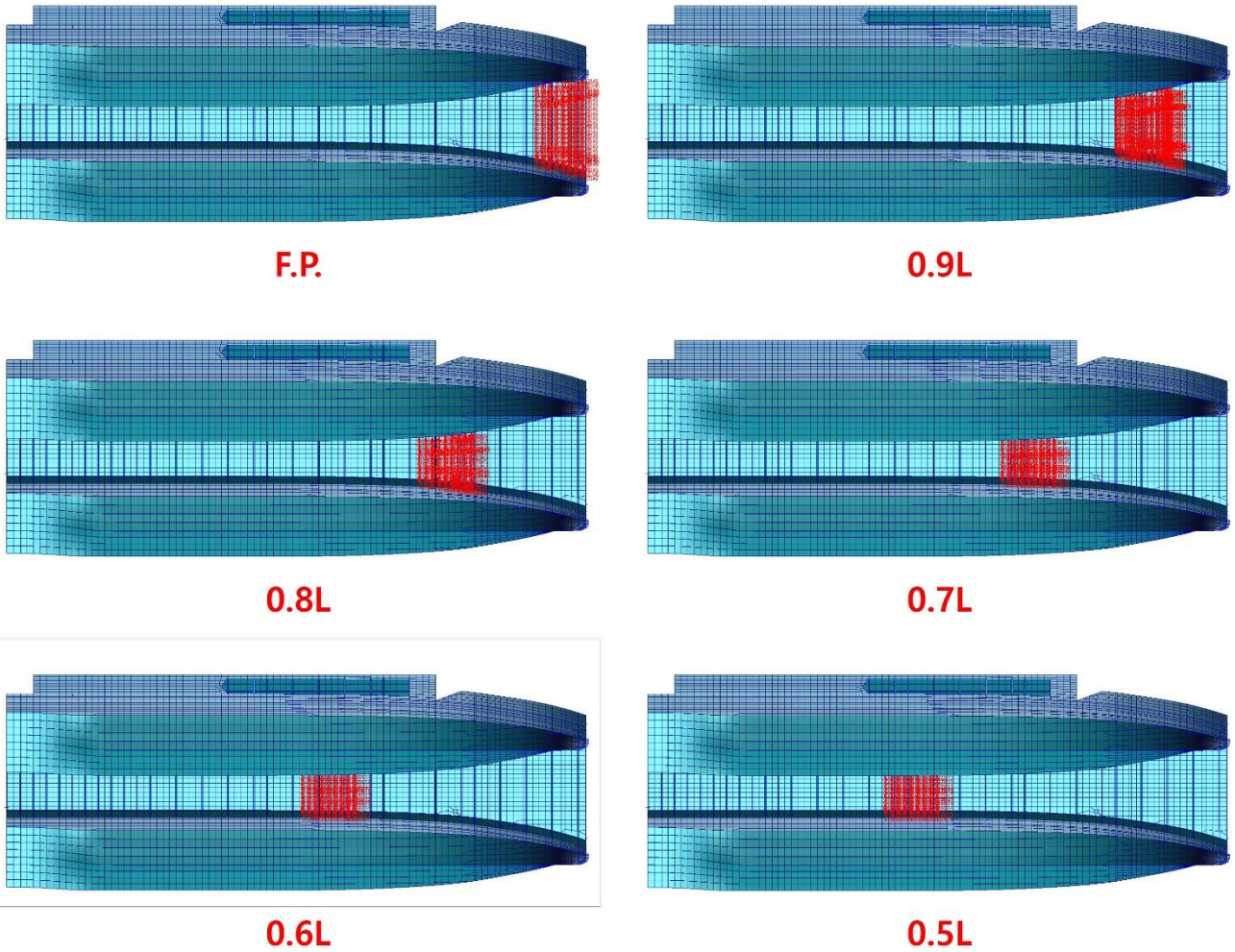


그림 16. 하중조건 적용(쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력)

3) 해수압력

해수압력 계산 값은 표 9 와 같이 수소추진선박의 흘수를 기준으로 상부와 그리고 선수에서 선미까지 나뉜다. 유한요소모델에 적용된 흘수를 기준으로 상부에 적용된 해수압력은 그림 17 과 같으며, 흘수를 기준으로 하부에 적용된 해수압력은 그림 18 과 같다.

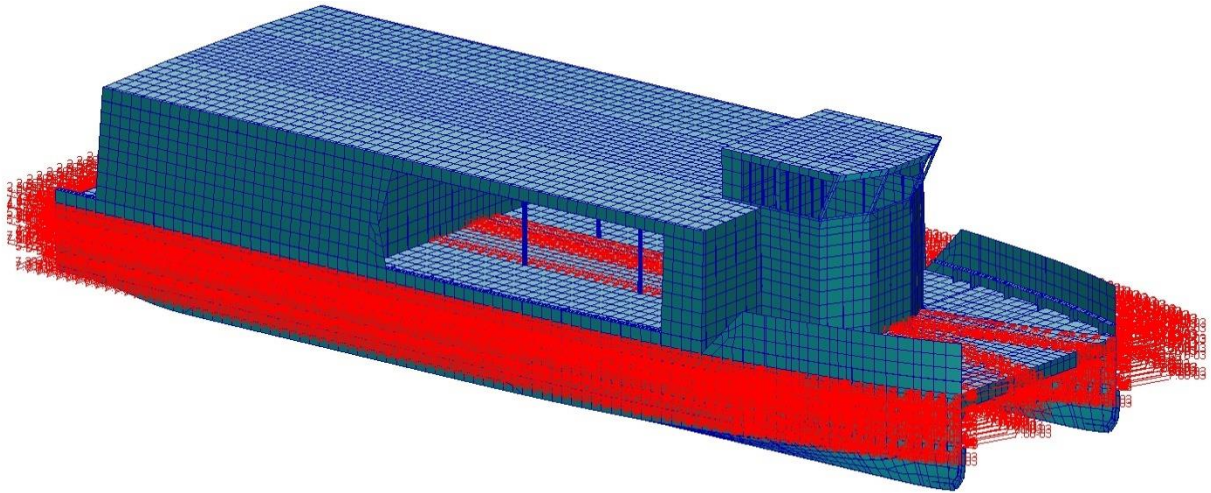


그림 17. 하중조건 적용(해수압력, 흘수 기준 상부)

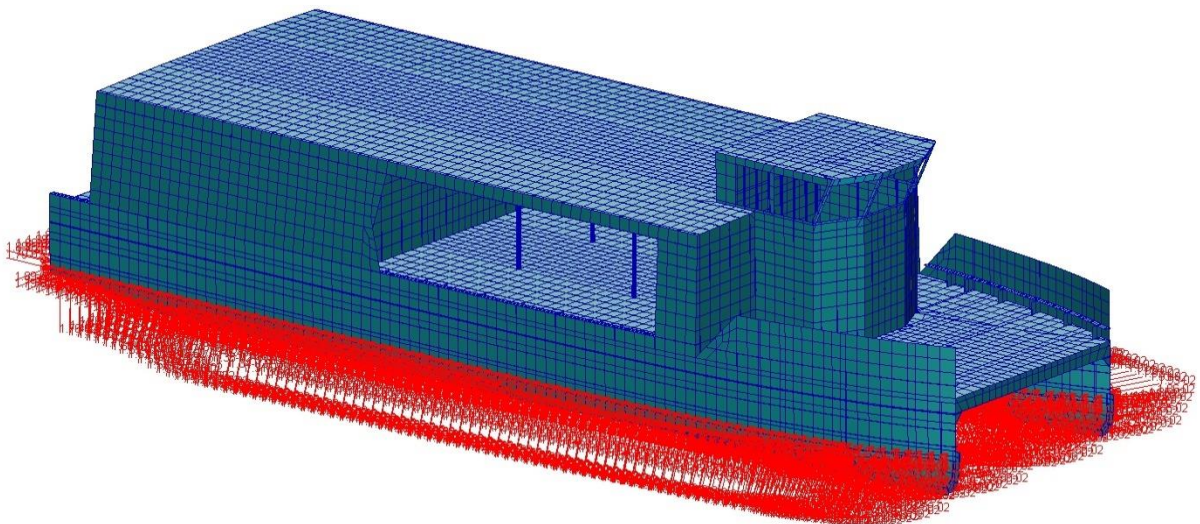


그림 18. 하중조건 적용(해수압력, 흘수 기준 하부)

4) 호킹·새깅 굽힘모멘트

호킹 및 새깅 굽힘모멘트에 대한 계산 값은 표 10 과 같다. 계산된 호킹 굽힘모멘트를 선체의 중앙부에 적용하였다. 유한요소모델에 적용된 호킹 굽힘모멘트는 그림 19 와 같다. 계산된 새깅 굽힘모멘트값을 선체의 선미부와 선수부에 적용하였다. 유한요소모델에 적용된 새깅 굽힘모멘트는 그림 20 과 같다.

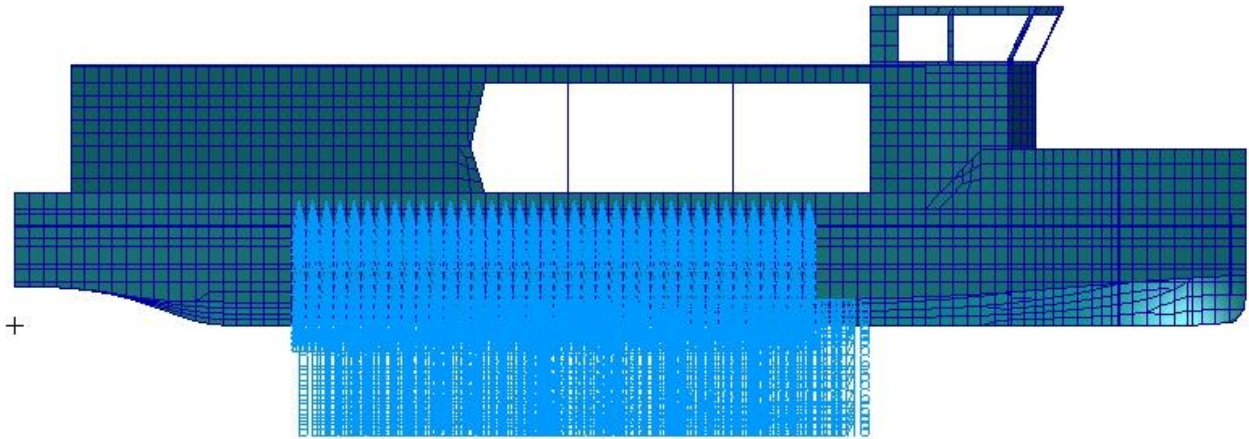


그림 19. 하중조건 적용(호킹 굽힘모멘트)

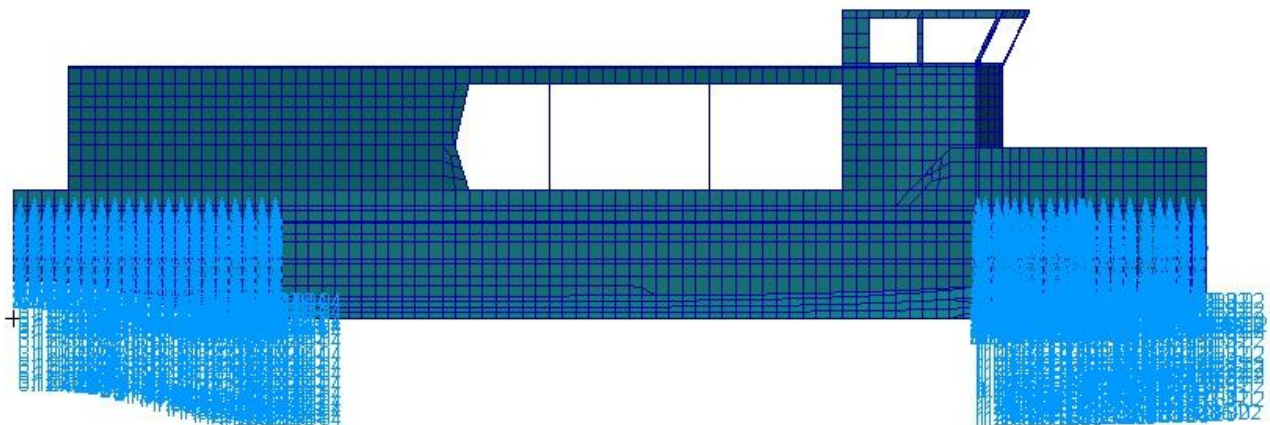


그림 20. 하중조건 적용(새깅 굽힘모멘트)

5) 쌍동선체 연결구조의 하중

쌍동선체 연결구조의 하중에 대한 계산 값은 표 11 과 같다. 쌍동선체 연결구조의 하중을 적용하기 위해 계산된 횡방향 수직 굽힘모멘트값을 선저에 적용하였다. 유한요소모델에 적용된 횡방향 수직 굽힘모멘트는 그림 21 과 같다.

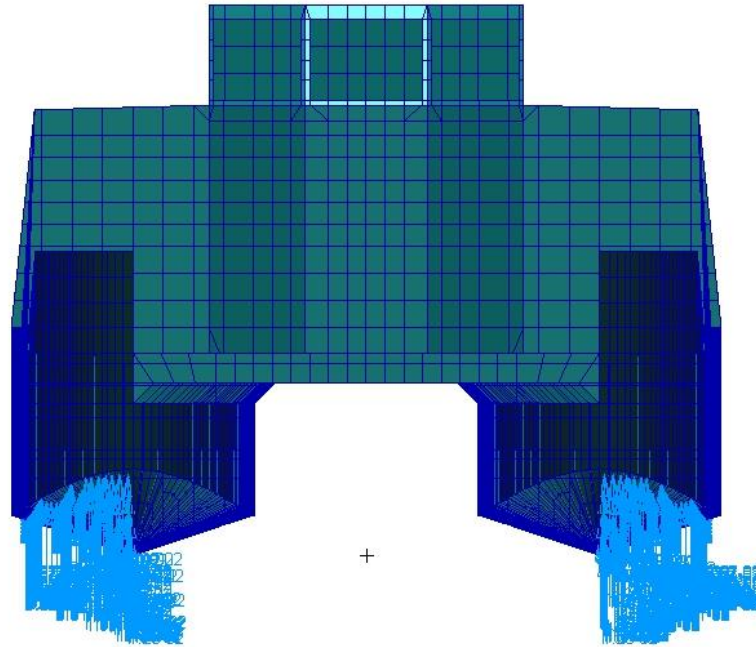


그림 21. 하중조건 적용(횡방향 수직 굽힘모멘트)

6) 쌍동선체 비틀림 모멘트

쌍동선체 비틀림 모멘트 하중에 대한 계산 값은 표 12 와 같다. 쌍동선체 비틀림 모멘트를 적용하기 위해 계산된 비틀림 모멘트값을 선저 종방향에 적용하였다. 유한요소모델에 적용된 비틀림 모멘트는 그림 22 와 같다.

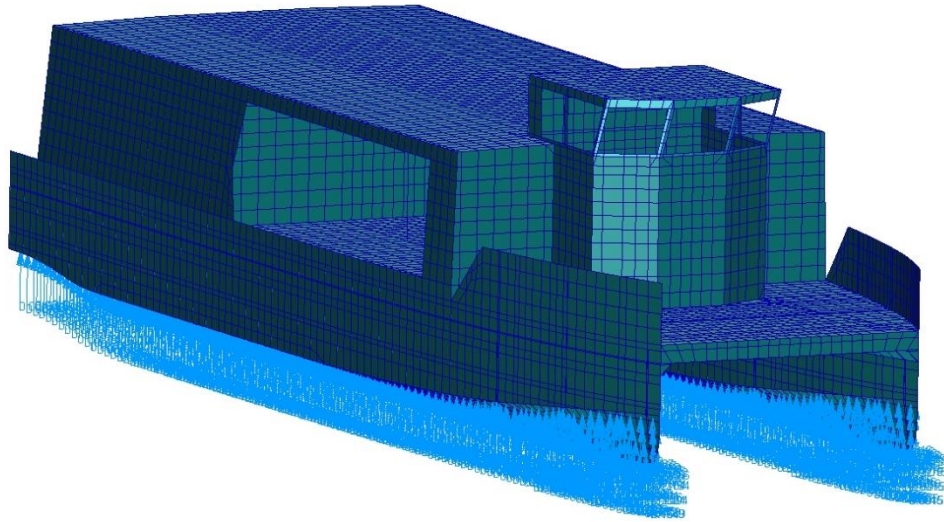


그림 22. 하중조건 적용(중비틀림 모멘트)

7) 수소 저장탱크에 의한 하중

Upper deck 에 위치한 수소 저장탱크에 의한 하중이다. 수소 저장탱크는 탱크 모듈을 포함하여 1 개당 약 0.3ton 이며 총 16 개로 4.8ton 이다. 탱크를 앞줄과 뒷줄에 4 개씩 2 층으로 배치하여 총 16 개를 위치시켰다. 계산된 수소 저장탱크에 의한 하중은 표 13 과 같으며, 유한요소모델에 적용된 수소 저장탱크에 의한 하중은 그림 23 와 같다. 규정에 따라 중량물에 의한 하중은 모든 하중조건 시 반영되어야 한다. 따라서 수소 저장탱크에 의한 하중은 파랑하중, 급침하중에 의한 하중조건 반영 시 함께 적용하였다.

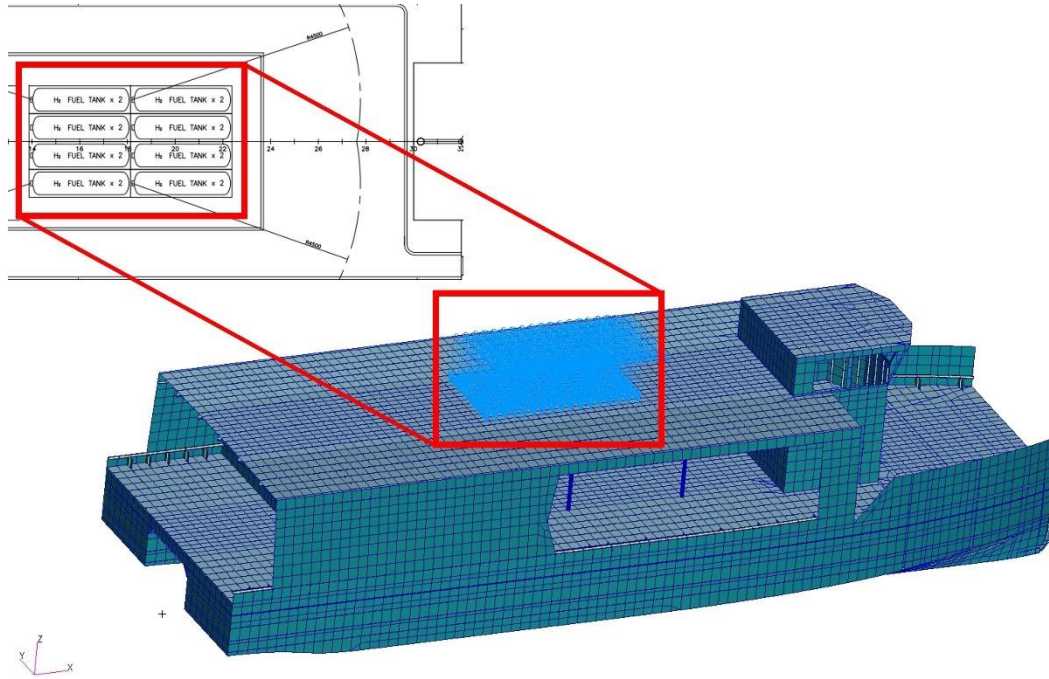


그림 23. 하중조건 적용(수소 저장탱크에 의한 하중)

8) 탑승객의 의한 하중

여객실의 탑승객 40 명이 위치했을 경우에 대한 하중을 고려할 때, 한 사람당 체중은 80kg 으로 가정한다. 탑승객에 의한 총 질량은 3.2 톤으로 여객실에 해당하는 구역에 총 31.39kN 의 하중을 부여하였다. 유한요소모델에 적용된 탑승객에 의한 하중은 그림 24 와 같다. 중량물에 의한 하중은 규정에 따라 모든 하중조건 시 적용하여야 하므로 탑승객에 의한 하중은 파랑하중, 굽힘하중에 의한 하중조건 적용 시 함께 적용하였다.

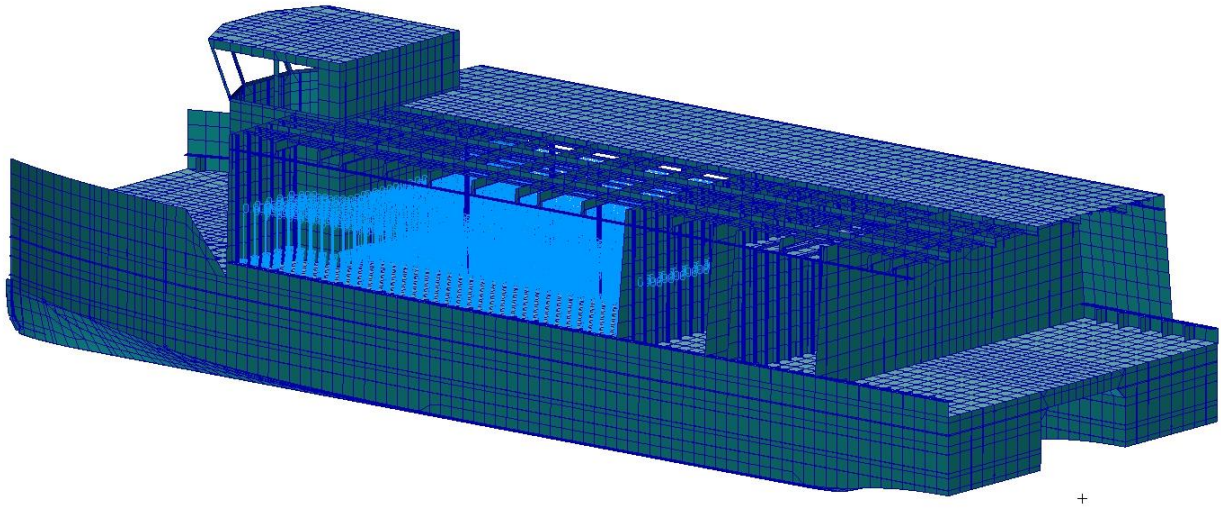


그림 24. 하중조건 적용(탑승객에 의한 하중)

4. 수소추진선박 유한요소해석 결과 및 분석

4.1. FEM 결과 분석

1) 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력

선수수선부터 0.5L 까지 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력에 대한 수소추진선박 유한요소해석의 응력 및 변위 결과는 그림 25~30 과 같다. 선수수선에서 발생한 최대 응력은 선수의 선체 보강재에서 40.5MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 선수의 외판에서 3.17mm 가 발생했다. 0.9L 에서 발생한 최대 응력은 선체 보강재에서 29.5MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 갑판 위의 판에서 2.50mm 가 발생했다. 0.8L 에서 발생한 최대 응력은 선체 빔 요소에서 54.0MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 갑판 위의 판에서 2.16mm 이 발생했다. 0.7L 에서 발생한 최대 응력은 선저 빔 요소에서 60.9MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 여객실의 벽면에서 1.17mm 이 발생했다. 0.6L 에서 발생한 최대 응력은 수소 저장탱크 아래의 빔 요소에서 47.1MPa 이 발생했으며, 최대 변위는 슬래밍 압력이 가해진 선저의 빔 요소에서 1.63mm 가 발생했다. 0.5L 에서 발생한 최대 응력은 선저 빔 요소에서 55.8MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 연료전지실의 천장과 빔 요소에서 1.70mm 가 발생했다. 수소추진선박의 셸 요소와 선체 보강재 그리고 빔 요소에 대한 응력 및 변위에 대한 결과는 표 19 와 같다.

표 19. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과

항목	구간	셸 요소	선체 보강재	빔 요소	단위
Stress result (Von-Mises)	F.P.	40.1	36.5	26.6	MPa
	0.9L	29.5	29.5	25.1	
	0.8L	21.1	21.1	54.0	
	0.7L	15.9	15.9	60.9	
	0.6L	28.6	28.6	47.1	
	0.5L	12.8	12.5	55.8	
Deformation result	F.P.	3.17	2.03	2.31	mm
	0.9L	2.50	0.927	1.91	
	0.8L	2.16	1.03	1.20	
	0.7L	1.17	0.797	1.07	
	0.6L	1.63	1.59	1.63	
	0.5L	1.70	0.53	1.70	

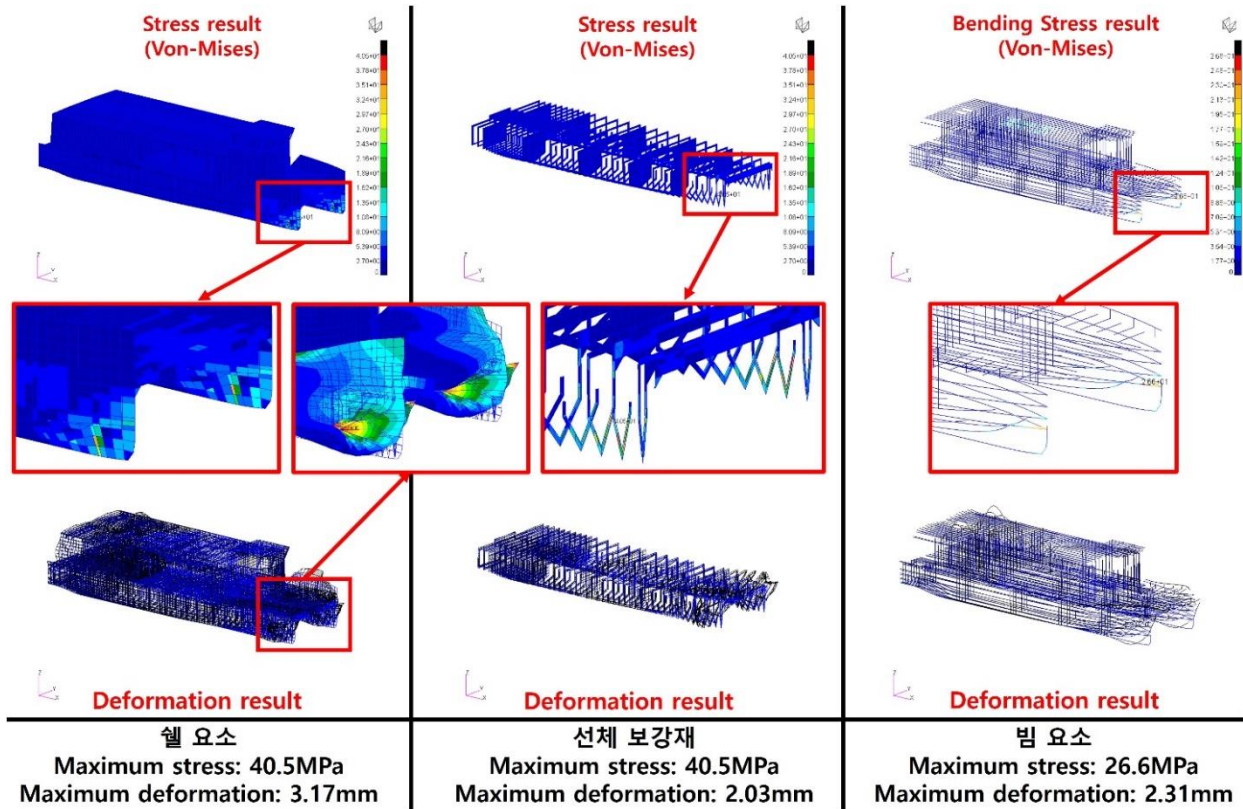


그림 25. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(F.P.)

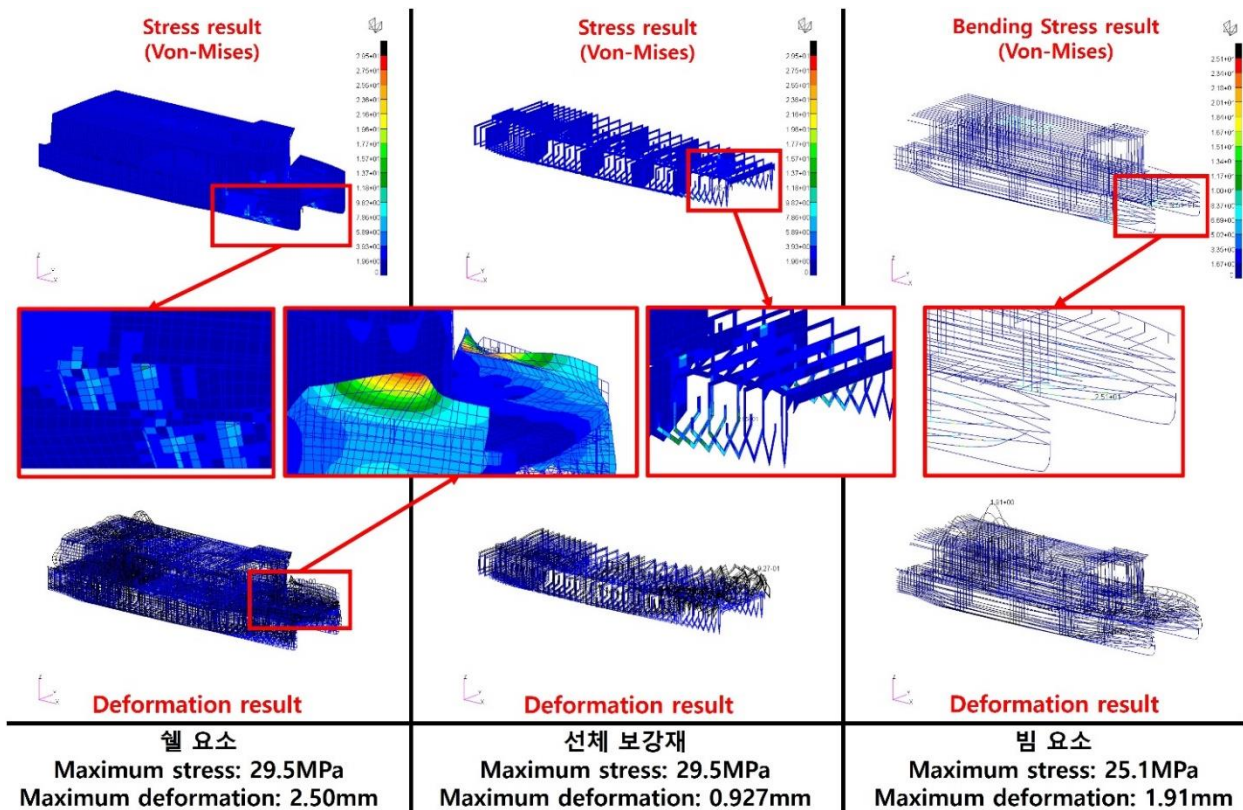


그림 26. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.9L)

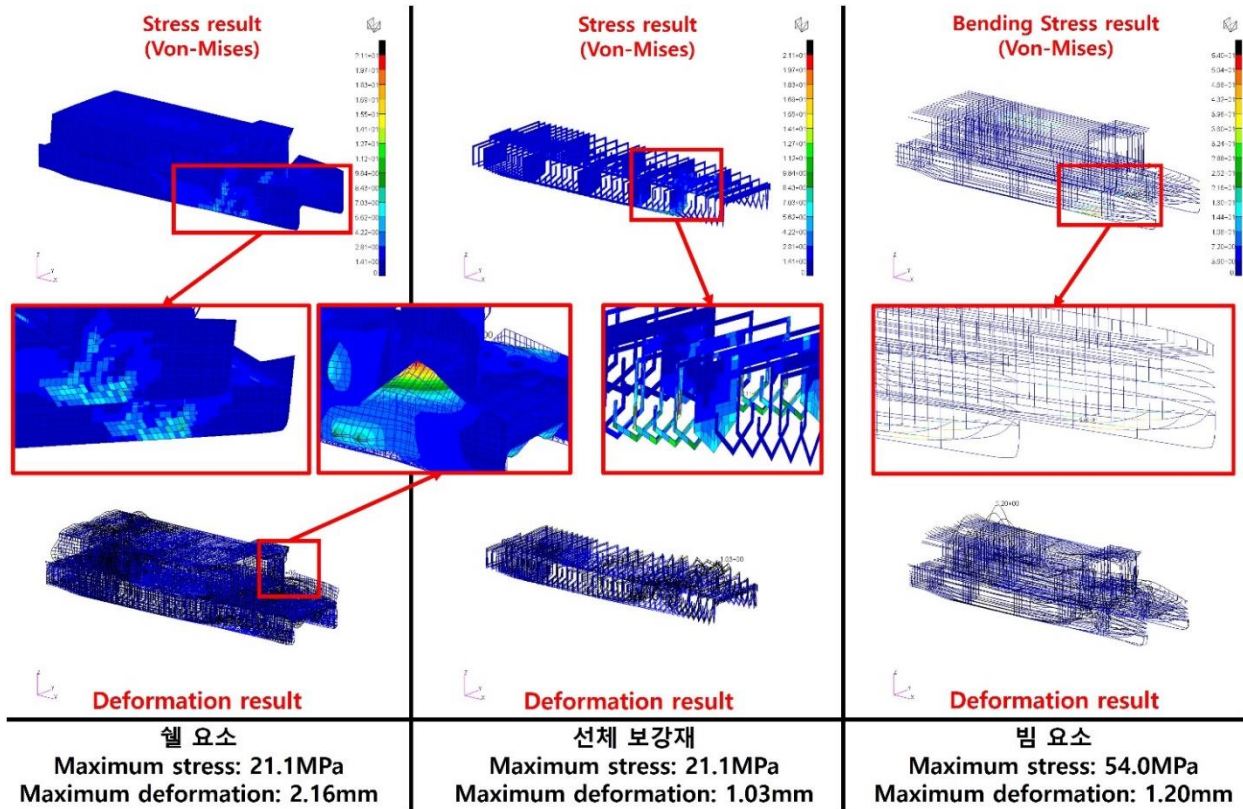


그림 27. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.8L)

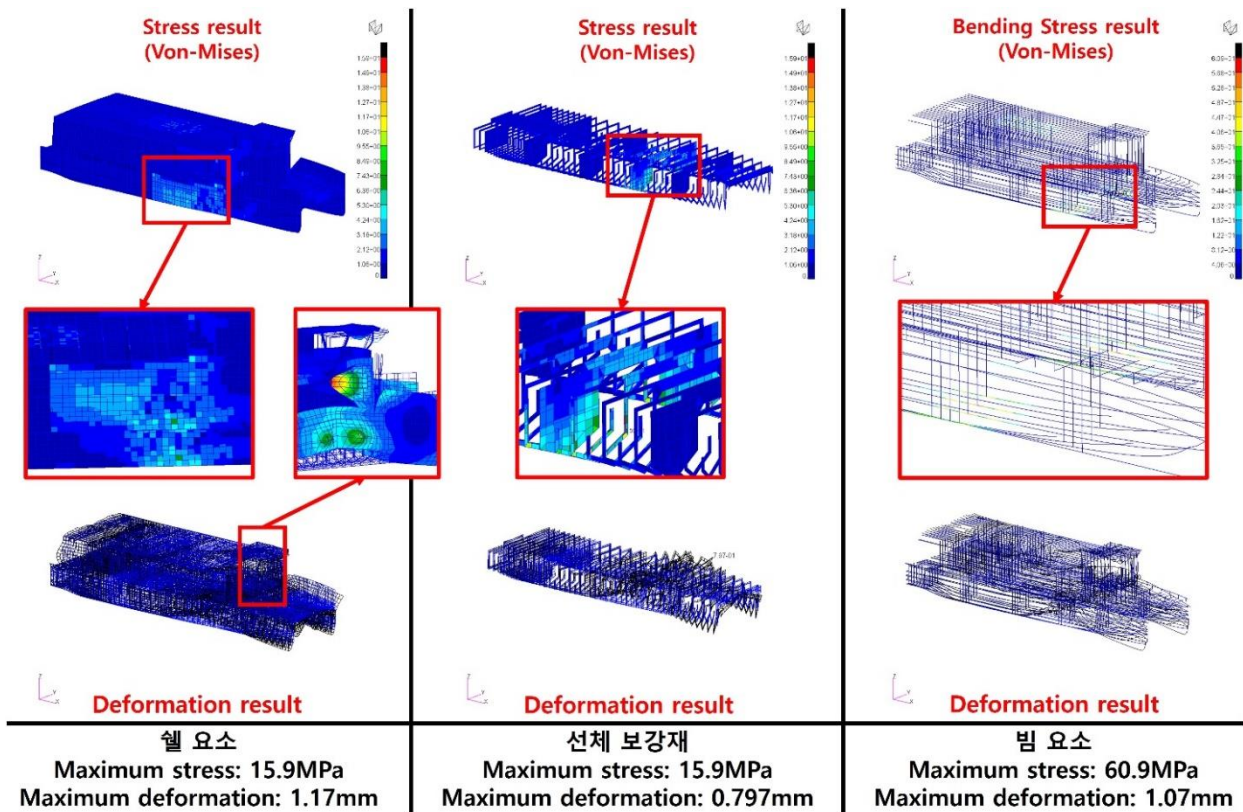


그림 28. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.7L)

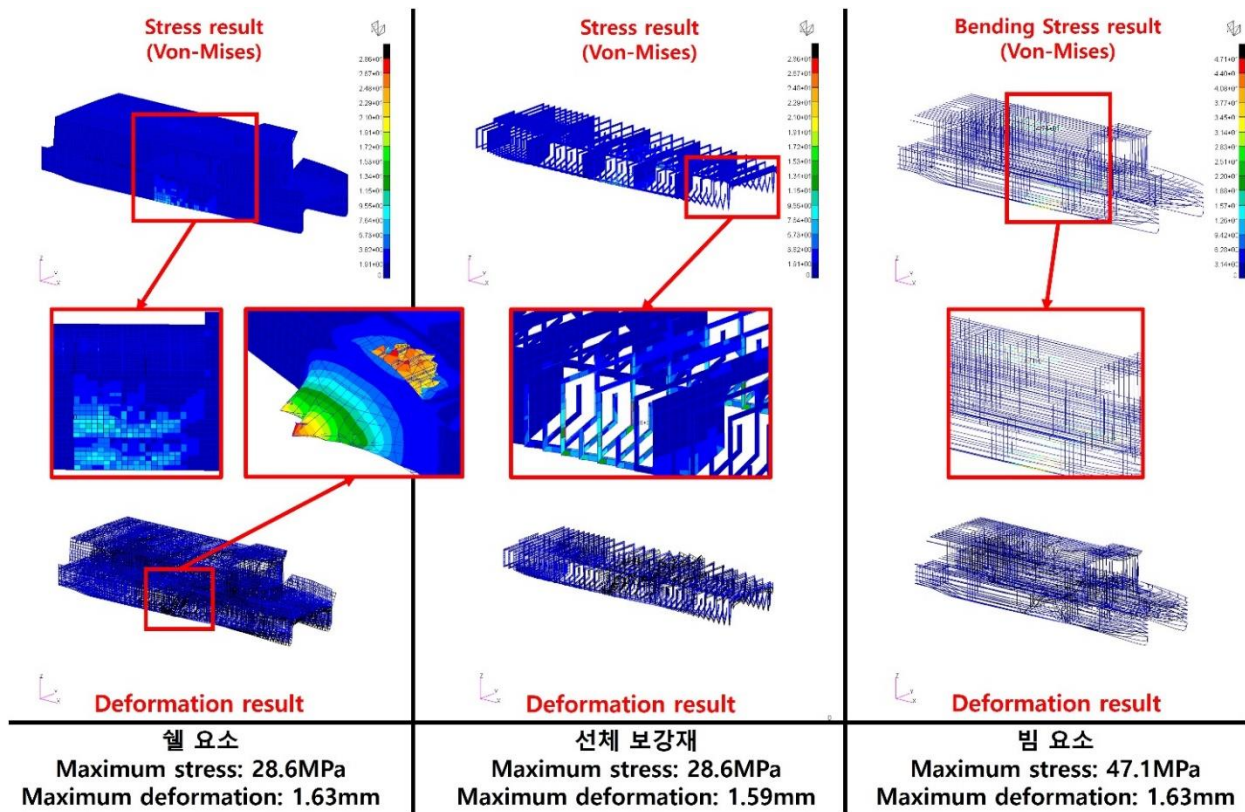


그림 29. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.6L)

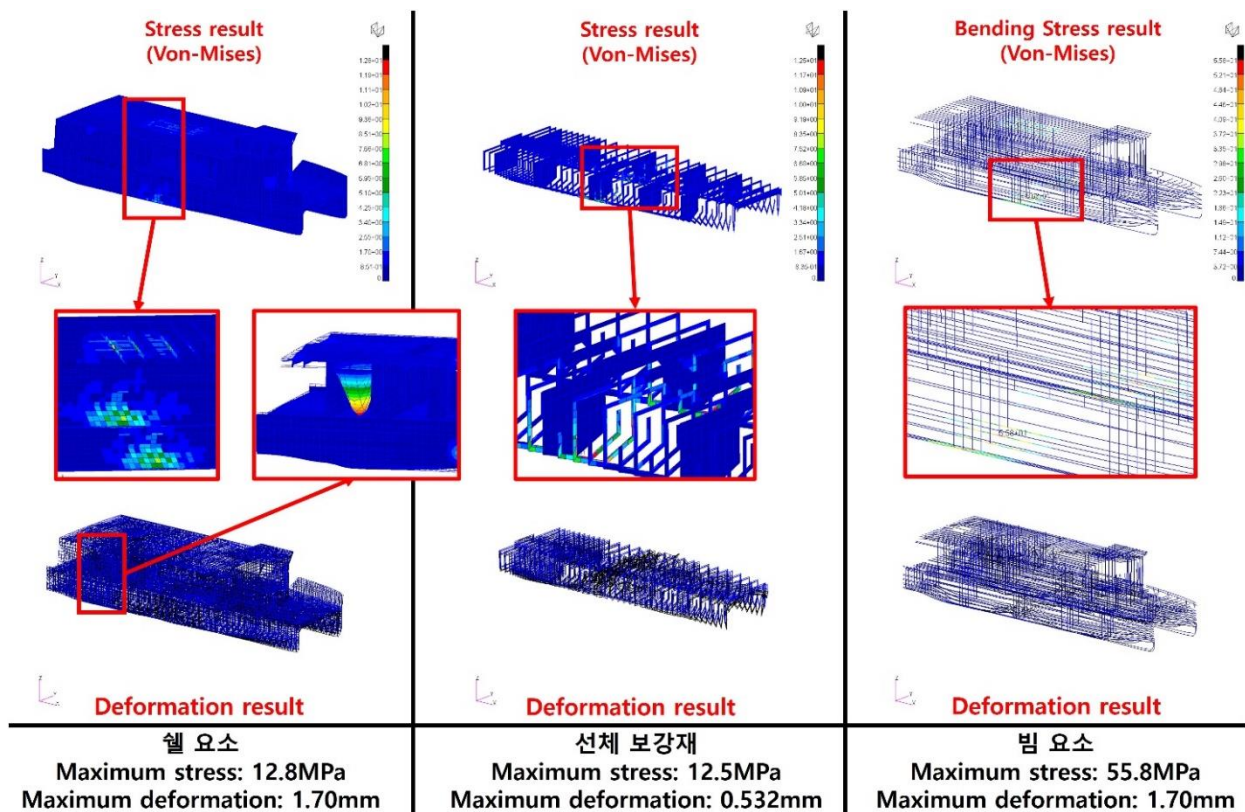


그림 30. 선저에 작용하는 중요슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.5L)

2) 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력

선수수선부터 0.5L 까지 쌍동선 연결구조에 작용하는 슬래밍 압력에 대한 수소추진선박 유한요소해석의 응력 및 변위 결과는 그림 31~36 과 같다. 선수수선부터 0.5L 까지 발생한 최대 응력 및 변위는 모두 쌍동선 연결구조의 아래 판에서 발생되었다. 선저에 작용한 중요슬래밍 하중의 유한요소해석 결과에 비하여 큰 응력 결과를 얻은 이유는 쌍동선 연결구조 아래 판의 경우 종방향 보강재를 설계하지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 응력을 낮추기 위해 종방향 보강재를 설치한다면 응력을 감소시킬 수 있을 것이라고 판단된다. 수소추진선박의 쉘 요소와 선체 보강재 그리고 빔 요소에 대한 응력 및 변위에 대한 결과는 표 20 과 같다.

표 20. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과

항목	구간	셸 요소	선체 보강재	빔 요소	단위
Stress result (Von-Mises)	F.P.	191	78.2	48.0	MPa
	0.9L	195	76.1	47.5	
	0.8L	142	50.5	47.0	
	0.7L	127	43.8	46.8	
	0.6L	57.7	18.9	45.8	
	0.5L	59.6	17.8	45.8	
Deformation result	F.P.	52.7	1.99	3.89	mm
	0.9L	48.2	1.62	2.41	
	0.8L	37.3	1.04	1.25	
	0.7L	32.4	0.94	0.88	
	0.6L	13.0	0.38	0.86	
	0.5L	12.6	0.38	0.86	

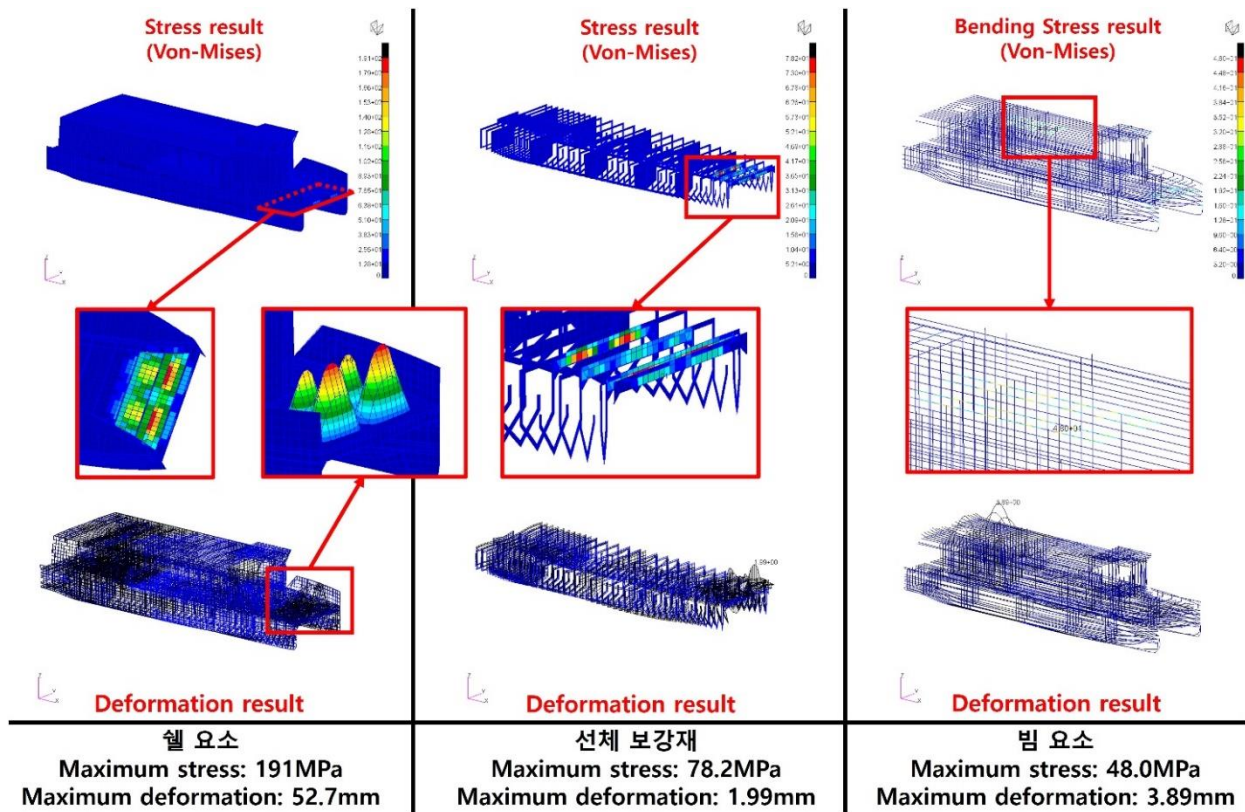


그림 31. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(F.P.)

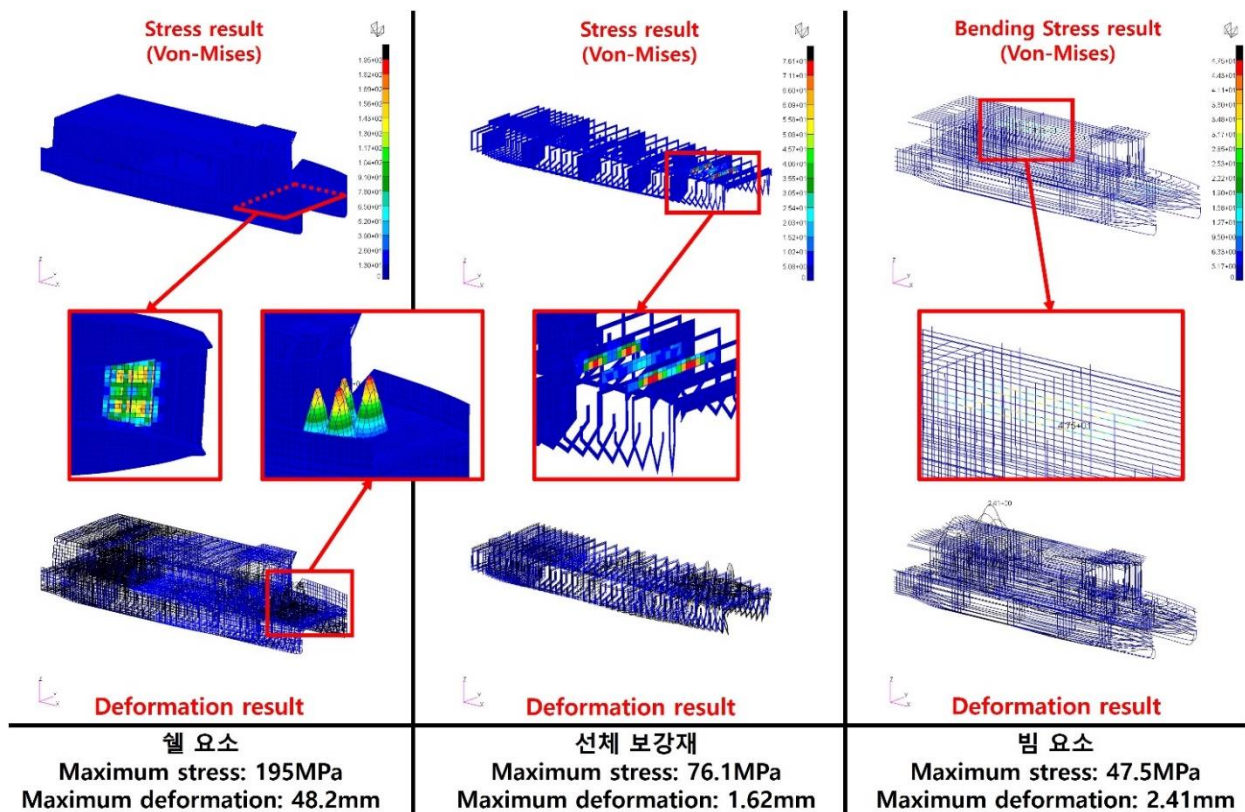


그림 32. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.9L)

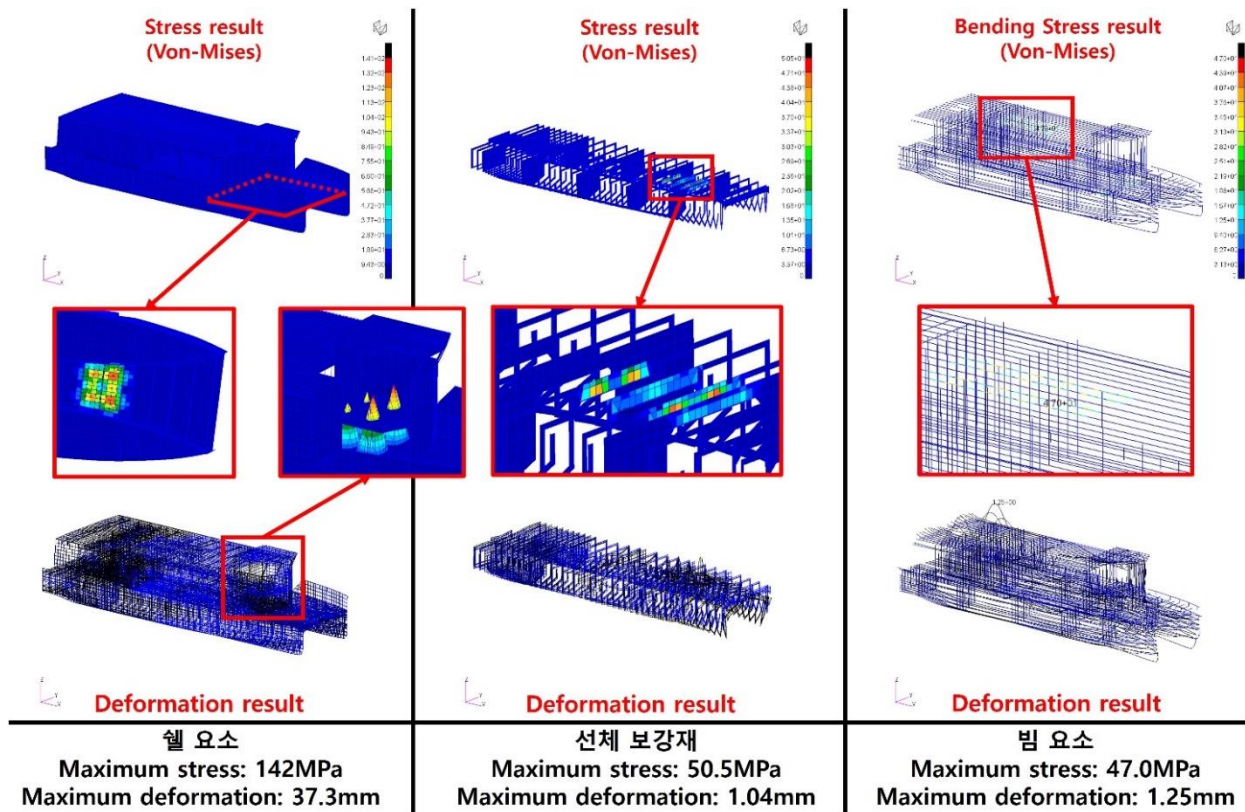


그림 33. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.8L)

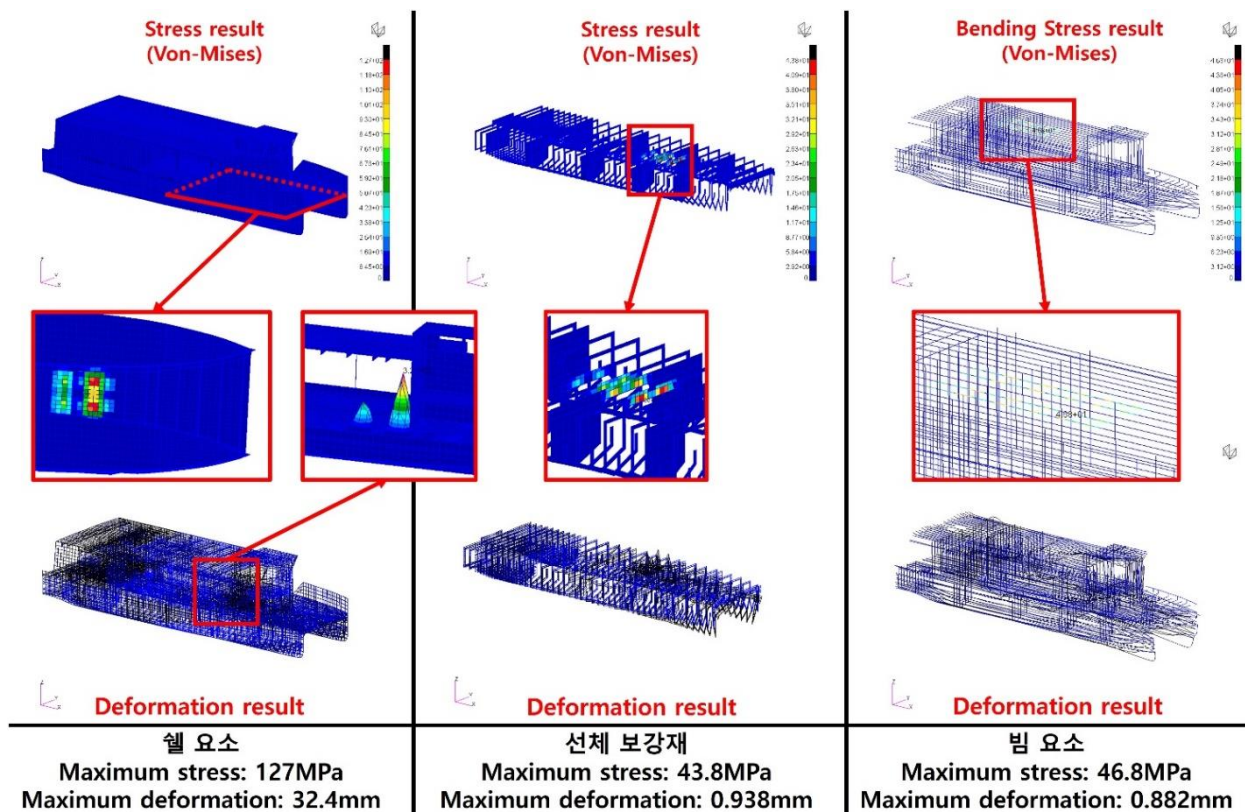


그림 34. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.7L)

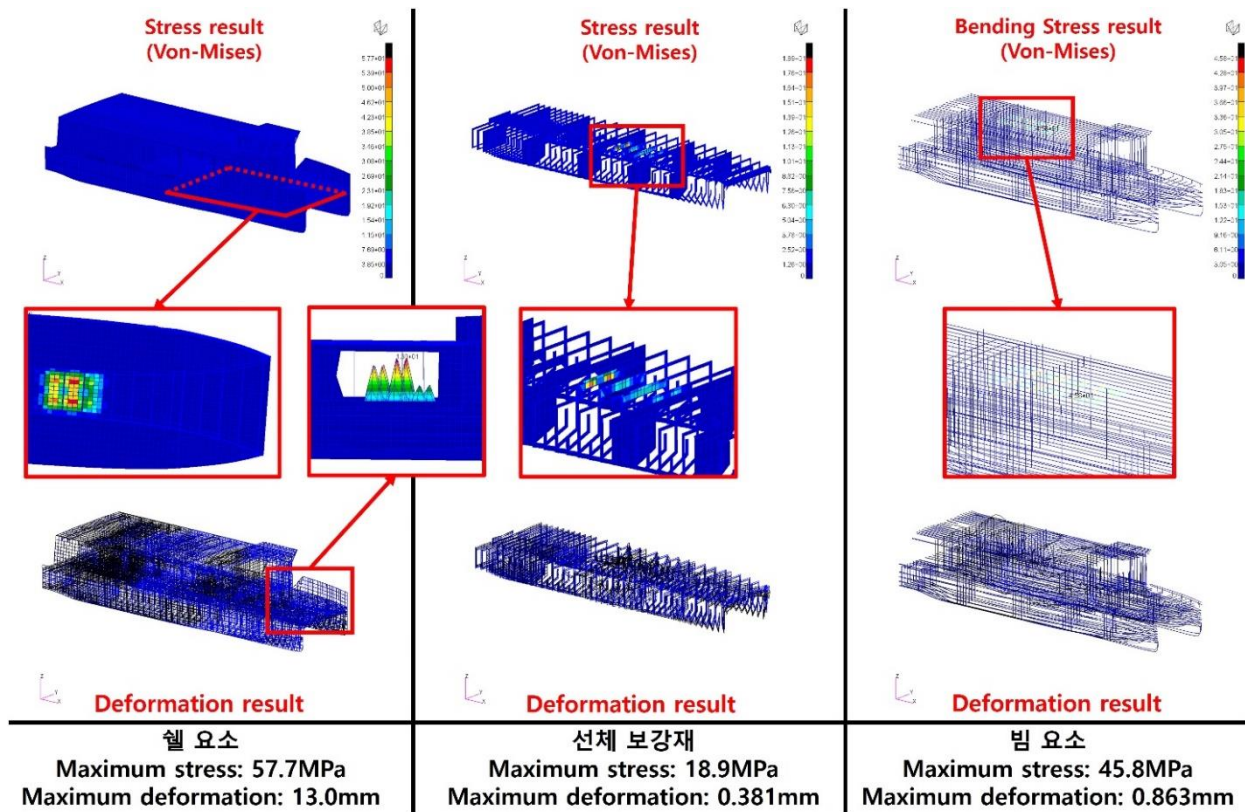


그림 35. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.6L)

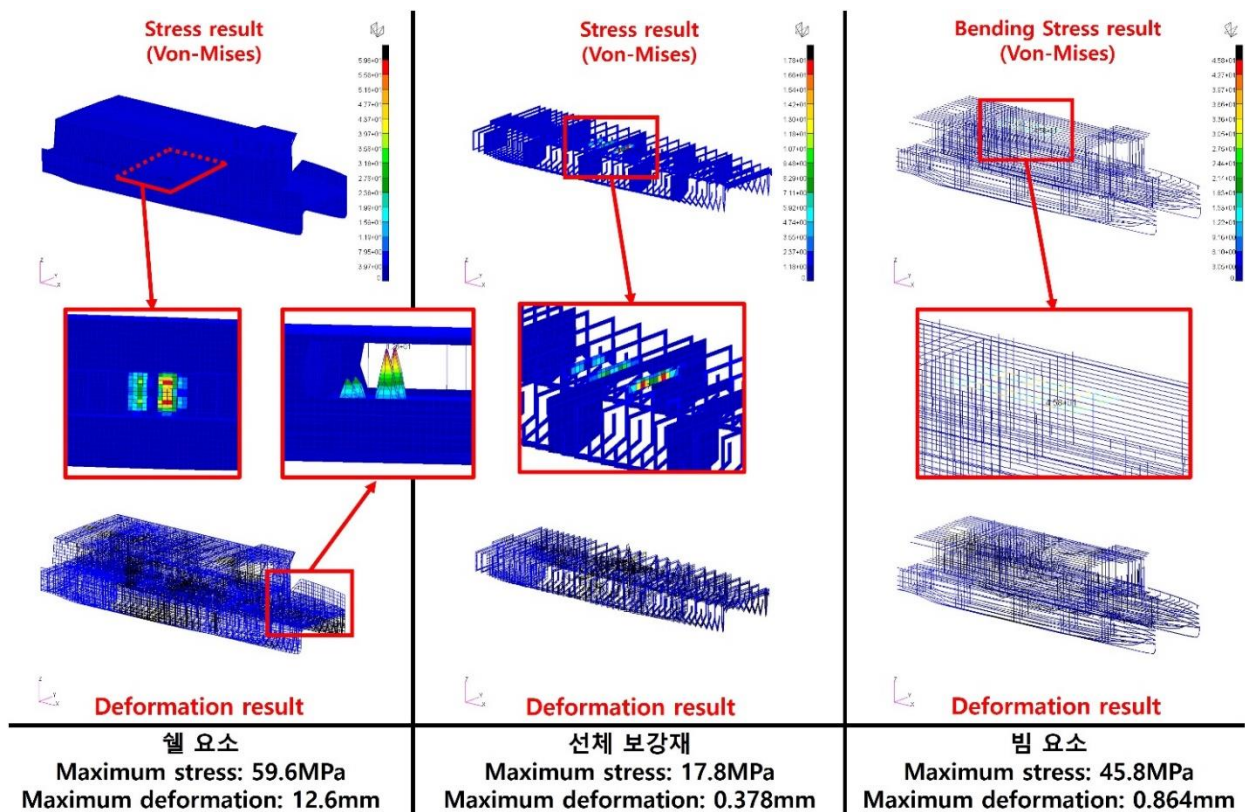


그림 36. 쌍동선 연결구조의 슬래밍 압력 유한요소해석 결과(0.5L)

3) 해수압력

해수압력에 대한 셸 요소, 선체 보강재, 빔 요소에 발생한 응력 및 변위 결과는 그림 37 과 같다. 최대 응력은 선체 빔 요소에서 155MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 연료전지실의 천장과 빔 요소에서 18.1mm 가 발생했다. 해수압력의 계산 값에 따라 적용된 하중은 해수면으로부터 낮아질수록 더 높은 압력을 가지며 선미에서 선수로 갈수록 더 높은 압력이 계산되었다. 따라서 선수의 빔 요소 중 해수면으로부터 가장 낮은 곳에 위치한 빔 요소에서 가장 큰 응력 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 또한 연료전지실의 천장 판과 빔 요소의 경우 횡방향으로는 보강을 했지만 종 방향으로는 보강하지 않음으로 인하여 최대 변위가 해당 위치에서 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 연료전지실의 천장에 빔 요소를 종방향으로 추가로 설치한다면 최대 변위를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

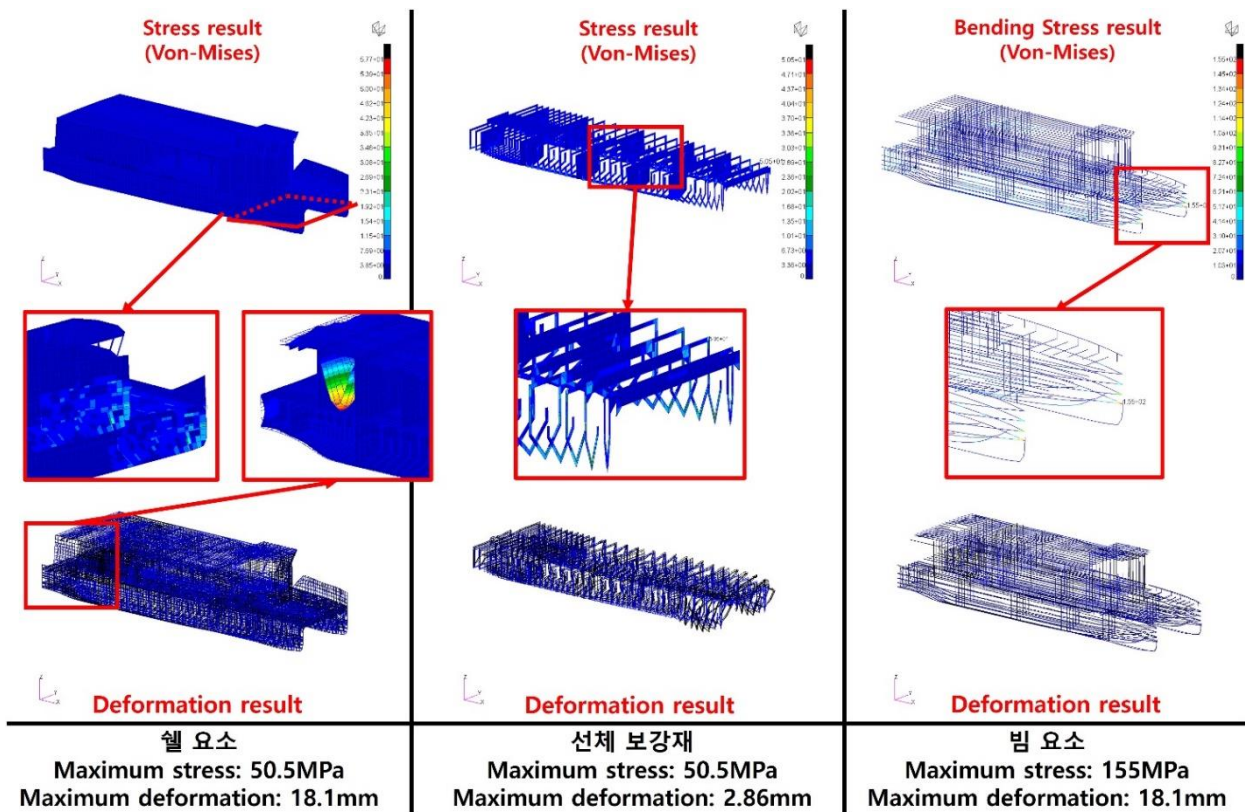


그림 37. 해수압력 유한요소해석 결과

4) 호킹·새깅 굽힘모멘트

호킹 굽힘모멘트에 대한 셸 요소, 선체 보강재, 빔 요소에 발생한 응력 및 변위 결과는 그림 38 과 같다. 최대 응력은 선체 중앙부 빔 요소에서 92.0MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 선저의 셸 요소에서 13.3mm 가 발생했다. 새깅 굽힘모멘트에 대한 셸 요소, 선체 보강재, 빔 요소에 발생한 응력 및 변위 결과는 그림 39 와 같다. 최대 응력은 선체 선미부의 빔 요소에서 53.9MPa 이 발생되었으며, 최대 변위는 선수부의 쌍동선 연결구조 아래 판에서 11.0mm 가 발생했다.

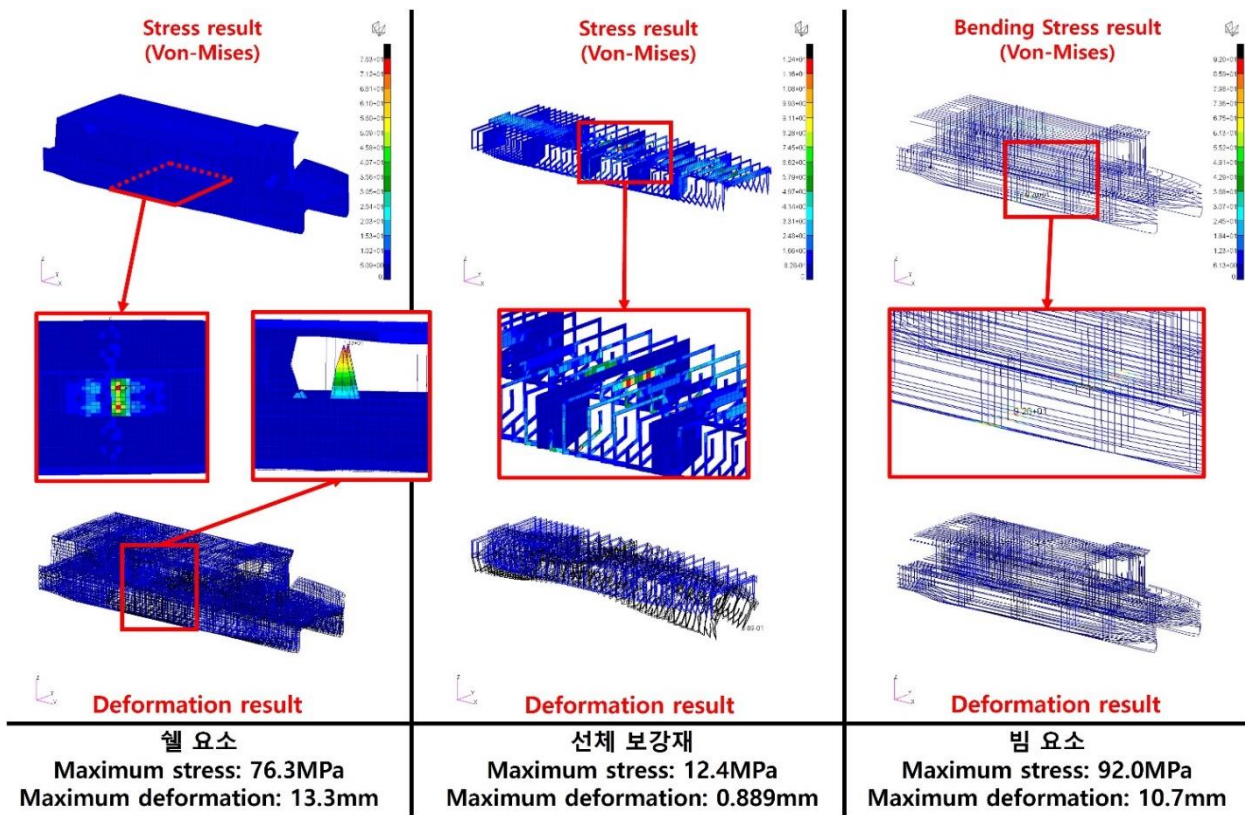


그림 38. 호킹 굽힘모멘트 유한요소해석 결과

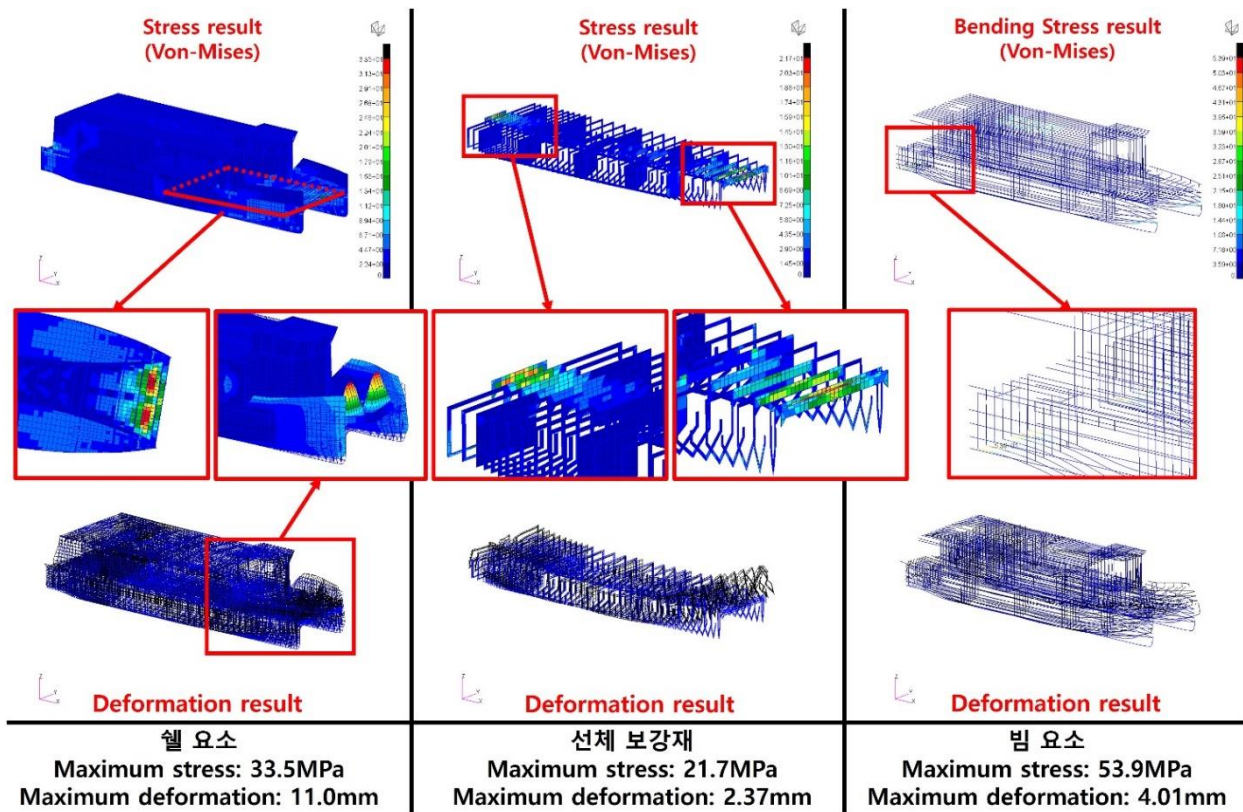


그림 39. 새깅 굽힘모멘트 유한요소해석 결과

5) 쌍동선체 연결구조의 하중

쌍동선체 연결구조의 하중인 횡방향 수직 굽힘모멘트에 대한 셸 요소, 선체 보강재, 빔 요소에 발생한 응력 및 변위 결과는 그림 40 과 같다. 최대 응력과 변위는 연료전지실 천장의 빔 요소에서 150MPa, 26.5mm 가 발생했다. 하중조건인 횡방향 수직 굽힘모멘트를 고려했을 때, 쌍동선의 종방향 중심에 해당하는 연료전지실의 중앙 판과 천장의 보강재에서 최대 응력 및 변위가 발생했다고 판단된다.

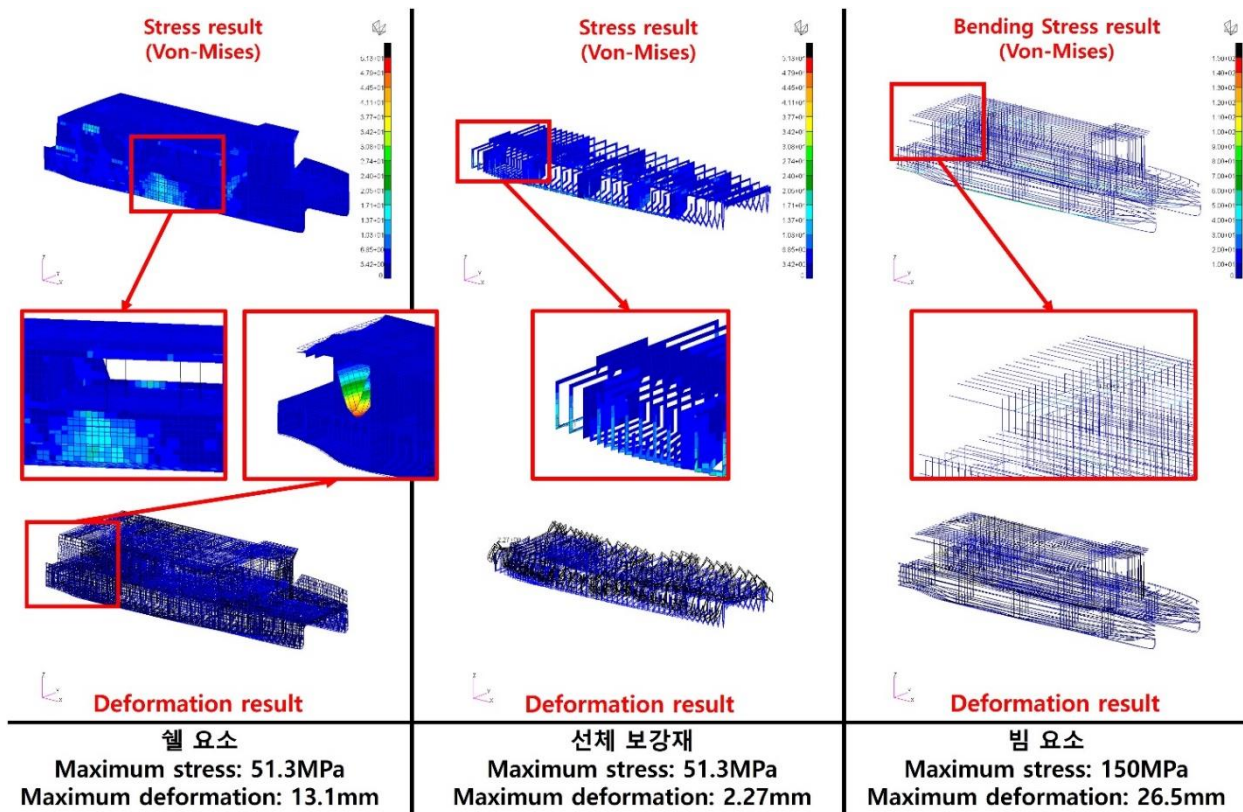


그림 40. 횡방향 수직 굽힘모멘트 유한요소해석 결과

6) 쌍동선체 종비틀림 모멘트

쌍동선체 종비틀림 모멘트 하중에 대한 셸 요소, 선체 보강재, 빔 요소에 발생한 응력 및 변위 결과는 그림 41 과 같다. 최대 응력은 선미 빔 요소에서 158MPa 이 발생했으며, 최대 변위는 연료전지실의 천장 빔 요소에서 13.1mm 가 발생했다. 종비틀림 모멘트는 한쪽 선체에 대해서 선수부터 선미까지 하중 적용 값이 점차 커지게 적용하였으며, 반대쪽 선체에 대해서는 선미부터 선수까지 하중 적용 값이 점차 커지게 적용하였다. 이에 따라 선미부의 빔 요소에서 최대 응력을 가진다고 판단된다. 또한 비틀림에 의해서 종방향 빔 요소가 없는 연료전지실의 천장에서 가장 큰 변위 값을 가진다고 판단된다.

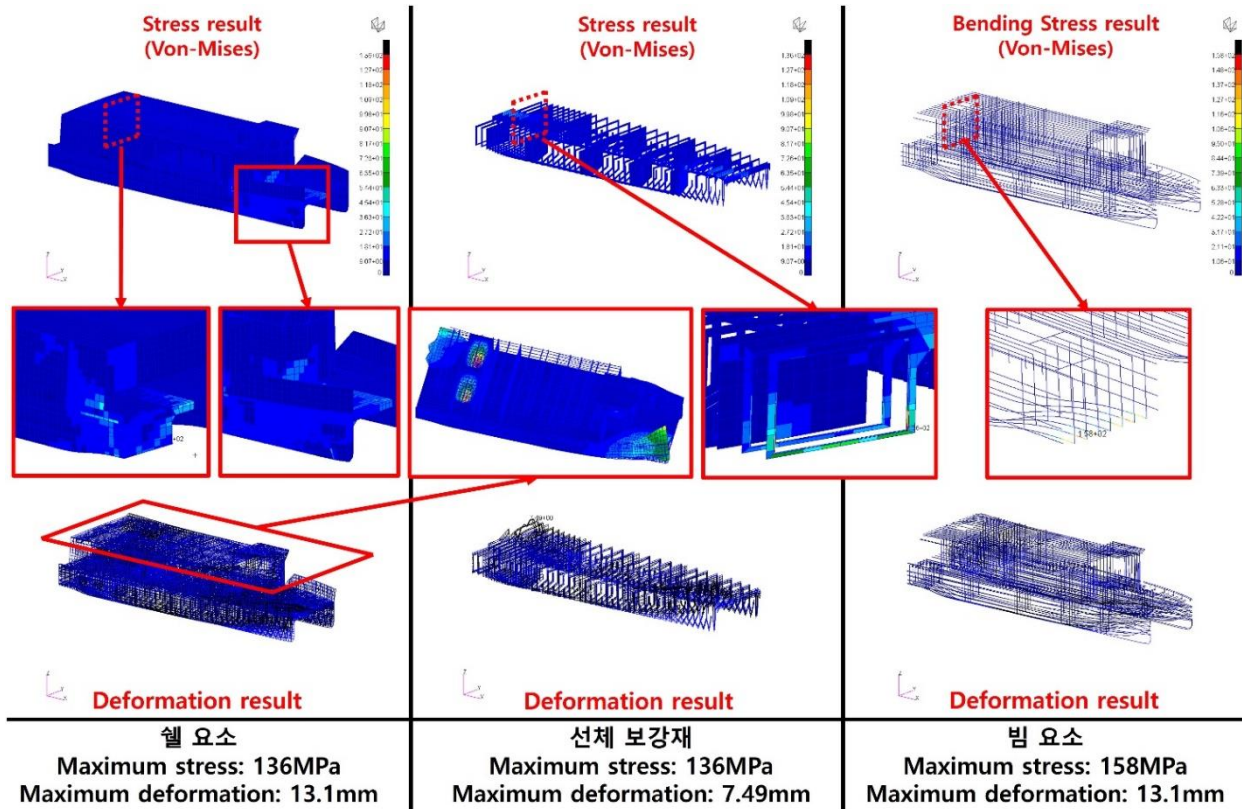


그림 41. 중비틀림 모멘트 유한요소해석 결과

4.2. FEM 결과 분석 및 보완

알루미늄선의 구조기준에서 제시된 설계하중을 고려하여 하중조건을 적용했을 때 발생하는 응력 결과를 허용응력과 비교하여 구조 안전성을 확인하였다. 한국선급 선체 구조에 대한 규정 중 알루미늄판에 대한 허용응력은 214.3MPa 로 계산되었다[17]. 허용응력과 비교했을 때, 모든 설계하중에 대한 유한요소해석 결과의 최대 응력 결과가 낮으므로 구조적으로 안전하다고 판단된다. 한국선급 선체 구조에 대한 규정 중 보강재에 대한 허용응력은 166.7MPa 로 계산되었다. 허용응력과 비교했을 때, 모든 설계하중에 대한 유한요소해석의 최대 응력 결과가 낮으므로 구조적으로 안전하다고 판단된다. 하나, 2.2 장의 위험구역 및 잠재적 위험 요인 분류에서 위험 상황에 따른 영향 구역에 대해 분석했을 때 아래와 같은 보완점이 필요할 것으로 판단된다.

- 1) 해당 수소추진선박은 쌍동선 연결부 하단의 경우 종방향 보강재가 없다. 따라서 쌍동선 하단의 연결부에 슬래밍 하중이 발생하는 경우에 대한 구조해석 응력 및 변형 결과가 최대 195MPa, 52.7mm 가 계산되었다. 규정에 따른 허용응력 214.3MPa 를 넘지 않지만,

쌍동선체 연결구조의 경우 선체끼리의 연결 및 여객실의 안전에 직접적인 영향을 준다. 따라서 연결부의 하단에 보강재를 추가한다면 응력을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

- 2) 연료전지실 천장의 경우 수소가스 누출 시 원활한 환기를 위해 그림 42 와 같이 중심을 기준으로 선박의 측면까지 100mm 의 높이 차이를 갖도록 기울어지게 설계되었다. 허나 횡방향 수직 굽힘모멘트의 유한요소해석 결과의 경우 해당 위치에서 26.5mm 의 변위가 발생되었다. 또한 해수압력의 조건에서 18.1mm 의 변위가 발생함을 구조해석을 통해 확인하였다. 연료전지실 천장 중심을 기준으로 선박 측면까지 100mm 의 높이 차이가 나는 것을 고려한다면, 26.5mm 는 26.5%에 해당한다. 따라서 수소가스의 원활한 환기 및 수소가스에 의한 폭발을 방지하기 위해 연료전지실 천장에 종방향 보강재 추가가 필요한 것으로 판단된다.

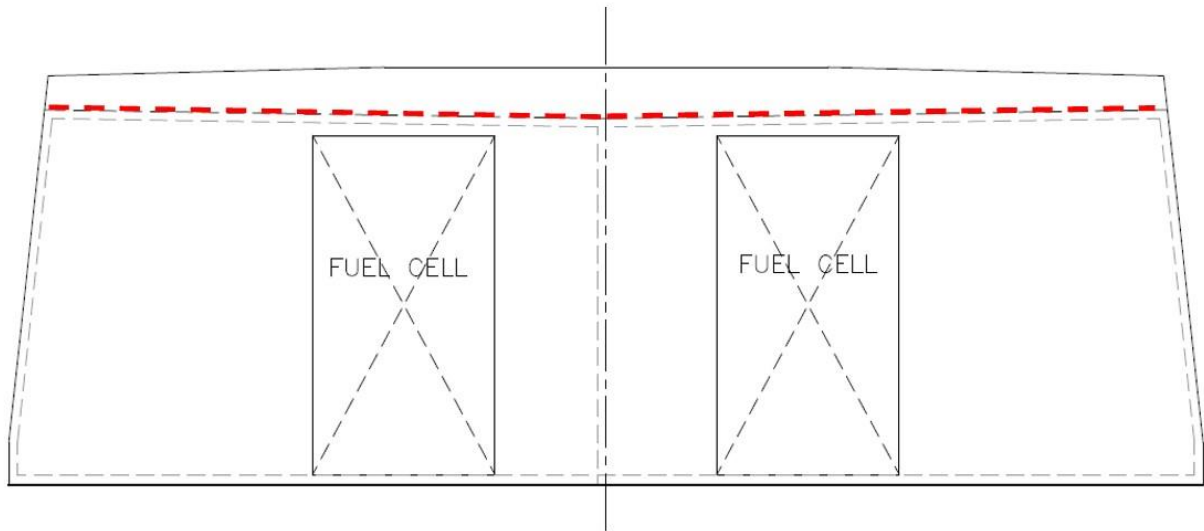


그림 42. 연료전지실의 수소 가스 환기를 위해 설계된 천장

5. 결론

본 논문은 수소추진선박에 대한 구조 안전성 평가 시 탑승객의 안전을 고려하기 위해 위험구역을 구분하고, 위험 시나리오에 따라 영향을 받는 구역을 분석하였다. 그 후 구조 안전성 평가 시 해당 구역이 구조적으로 충분한 강도를 갖는지 검토하였다. 위 과정을 통해 여객형 수소추진선박의 위험도 기반 구조 안전성 평가에 대한 기초 연구가 될 수 있도록 하는 것이 본 논문의 목적이다. 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 검토된 위험구역과 위험 시나리오에 따라 승객의 안전을 위해서 우선적으로 안전성을 확보할 구역은 수소 저장탱크, 연료전지실, 여객실, 선체라고 판단하였다.
- 2) '알루미늄선의 구조기준'에서 제시하는 설계하중(선저와 쌍동선 연결구조에 작용하는 슬래밍 압력, 해수압력, 호강·새깅 모멘트, 횡방향 수직 굽힘모멘트, 종비틀림 모멘트 설계하중)을 계산하여 수소추진선박에 대한 유한요소해석 시 하중조건으로 적용하여 구조 안전성 평가를 수행하였다.
- 3) 한국선급 선체 구조에 대한 규정 중 알루미늄판에 대한 허용응력은 214.3MPa, 보강재에 대한 허용응력은 166.7MPa 이며 모든 하중조건에 대한 유한요소해석의 응력 결과는 이를 넘지 않았다. 하지만 수소추진선박의 연료전지실의 수소가스 누출 시 수소가스의 원활한 환기를 위해 기울어지게 설치된 천장에서 26.5mm 의 변위가 발생함을 확인하였다. 이는 분석된 위험 상황 중 수소가스 공급 배관 파손, 환기시스템 주변의 화재 및 폭발에 대한 위험도 지수를 고려했을 때 방지해야 하는 상황이다. 따라서 연료전지실의 천장에 종방향 보강재를 추가로 배치해야 한다고 판단하였다.
- 4) 쌍동선체 연결구조의 슬래밍 압력에 대한 유한요소해석 응력 및 변위 결과를 분석했을 때, 해석 조건에 따른 결과 중 가장 큰 응력 및 변위 결과 값을 가짐을 확인하였다. 이는 연결구조의 하단 판의 경우 종방향 보강재를 배치하지 않았기 때문으로 분석되며 여객실, 배터리실, 연료전지실의 안전을 위해 보강해야 함을 확인하였다.

참고문헌 목록

- [1] IMO(2023), Resolution Resolution MPEC.304(72), Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.
- [2] E. C. Choi and J. S. Lee, The Economic Impacts of the Development of the Hydrogen Ship on the National Economy using Input-Output Analysis, *Journal of The Korean Data Analysis Society*, Vol. 21, No. 6, 2019, 2995-3006.
- [3] SWITCH MARITIME. <https://www.switchmaritime.com/>
- [4] L.E. Klebanoff, J.W. Pratt, C.B. LaFleur, Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, Issue 1, 2017, 757-774
- [5] O. Haase, S. Apenbrink, S. R. Krebs, P. Segieth and G. Holbach, Design and system integration of a hybrid inland push boat powered by hydrogen fuel cells and Li-ion NMC batteries and the challenge of providing a bunkering infrastructure, *Journal of Ship Technology Research*, Vol. 67, No. 2, 2020, 61-68
- [6] 손홍관, 최재학, 이현구, 함정을 포함한 선박 전기추진기술의 현황 및 수소연료전지선박 적용방안, *대한조선학회지*, Vol. 56, No. 1, 2019, 25-31
- [7] 김수남, 박영호, DC 전기추진선 기술동향, *전기의 세계*, Vol. 67, No. 6, 2018, 25-31
- [8] 이제명, 김정현, 김슬기, 김태욱, 김명성, 수소연료전지선박 개요 및 기술개발 동향 소개, *대한조선학회지*, Vol. 56, No. 1, 2019, 3-9
- [9] 오규형, 이성은, 김태훈, 수소가스 폭발 화재의 특성에 관한 연구, *한국화재소방학회 학술대회 논문집*, Vol. 1, 2004, 64-69
- [10] Ministry of Oceans and Fisheries, 2020. Structural standards for aluminum ships.
- [11] Korean Register of Shipping, 2023, Guidance for Fuel Cell Systems on Board of Ships, Korean Register: Busan
- [12] 표돈영, 김양화, 임옥택, 수소충전소의 안전성 평가 연구, *한국가스학회 학술대회논문집*, Vol. 30, No. 6, 2019, 499-504
- [13] 김광식, 이장현 Burak Ozturk, 황세윤, 선박해양 시스템의 확률론적 위험도 평가 기법에 관한 연구, *한국 CDE 학회 학술발표회 논문집*, 2013, 429-432

- [14] J. K. Paik, Mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys 5083 and 5383, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2009, 39-49
- [15] Hellier A. K., Chaphalkar P. and Prusty G. B., Fracture Toughness Measurement for Aluminium 6061-T6 using Notched Round Bars, Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM9), 2017
- [16] Korean Register of Shipping, Rules and Guidance for the classification of steel ships, Pt. 3, Ch. 3-2, 133-138