



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](#)

공학박사 학위논문

유체-구조 연성 해석기법을 이용한
원양어선의 침수·침몰사고의
원인규명에 대한 연구

Cause Investigation on Flooding and Sinking Accident of
Pelagic Fishing Vessel using FSI Analysis Technique




2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과
이 재 석

본 논문을 이재석의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장	박 석 주	(인)
위원	현 범 수	(인)
위원	남 종 호	(인)
위원	조 종 래	(인)
위원	이 상 갑	(인)



2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	viii
초 록	x
1. 서 론	1
2. 유체-구조 연성 해석기법과 해상상태 분석 및 구현	10
2.1 유체-구조 연성 해석기법	10
2.2 해상상태 분석 및 구현	16
3. 선형 및 구조도 분석과 실선 모델링	23
4. 실선 침수·침몰 시뮬레이션 시나리오 및 유체 모델링	32
5. 실선 침수·침몰 시뮬레이션	45
5.1 Case 1-0 : 우현 선수각도 44°로 우현파랑 받으며 항해	49
5.2 Case 1-1 : 피항 개시 후 8° 우현 경사	55
5.3 Case 1-2 : 좌현횡파에 의한 20° 우현 경사	62
5.4 Case 1-3 : 좌현횡파에 의한 25~30° 우현 경사	73
5.5 Case 1-4 : 좌현횡파에 의한 35° 우현 경사	82
5.6 Case 2-0 : 어획물 좌현 이동 시 좌현횡파에 일시 평형	88
5.7 Case 2-1 : 우현횡파에서 좌현 측 5°~10° 경사	99
5.8 Case 2-2 : 우현횡파에서 좌현 측 30°~35° 경사	105

5.9 Case 2-3 : 우현횡파에서 좌현 측 45°~55° 경사	115
5.10 Case 2-4 : 우현횡파에서 좌현 측 60°~70° 경사	125
5.11 Case 2-5 : 우현횡파에서 좌현 측 80° 이상 경사	131
5.12 고찰	135
6. 결론	136
References	138
감사의 글	141



List of Tables

Table 1 Significant wave and wind speed time histories at accident region (December 1, 2014)	18
Table 2 Comparison of hydrostatic characteristics of fishing vessel before accident with stability calculation	44
Table 3 Sea water inflow amount into compartments according to scenario	47
Table 4 Sea water inflow amount into exterior openings according to scenario	48



List of Figures

Fig. 1 Marine accidents according to type of KMST (KMST Judgment Report, 2000–2015)	2
Fig. 2 Marine accidents according to type of LMIS (LMIS Database, 1990–2000)	2
Fig. 3 Scenery of pelagic fishing vessel	3
Fig. 4 Location and depth of water of pelagic fishing vessel sinking accident	3
Fig. 5 AIS track of pelagic fishing vessel (2014. 12. 1 10:00 ~ 12. 1 13:00)	6
Fig. 6 Euler-Lagrange penalty coupling algorithm (Aquelet et al., 2006)	8
Fig. 7 Sketch of contact algorithm with a dashpot (Aquelet et al., 2006)	13
Fig. 8 Pressure distribution and response according to depth of seawater	14
Fig. 9 Global wave simulation sample	16
Fig. 10 Sea weather simulation results according to time	17
Fig. 11 Significant wave and wind speed time histories at accident region (December 1, 2014)	17
Fig. 12 Irregular wave and wind simulation	19
Fig. 13 Air and seawater model for irregular wave and wind simulation	20
Fig. 14 Irregular wind simulation response	21
Fig. 15 Irregular wind simulation response	22

Fig. 16	Schematic diagram of main stern structure and seawater inflow openings and paths	23
Fig. 17	Overall structures and their characteristics of pelagic fishing vessel	26
Fig. 18	Dead weight distribution on day of sinking accident	27
Fig. 19	Total weight and deadweight of main tank	28
Fig. 20	Deadweight modeling of fuel oil and fish catch	29
Fig. 21	Full-scale ship and longitudinal section modeling	29
Fig. 22	Modeling of sea water inflow openings and flow paths	30
Fig. 23	Fish bunk structure modeling	31
Fig. 24	Sewage internal and external structure modeling	31
Fig. 25	Full-scale ship drifting simulation scenarios, ship and sea modeling	32
Fig. 26	Full-scale ship drifting simulation behavior according to stem wave direction	34
Fig. 27	Yawing angle response in ship drifting simulation according to stem direction	34
Fig. 28	Sea water and ship model in Case 1 scenario	39
Fig. 29	Sea water and ship model in Case 2 scenario	42
Fig. 30	Floating simulation and hydrostatic characteristic calculation of fishing vessel before accident	43
Fig. 31	Survivor statements	45
Fig. 32	Initial seawater inflow state in Cases 1-0 and 1-1	46
Fig. 33	Rolling response of fishing vessel according to scenario through full-scale flooding and sinking simulation	49
Fig. 34	Seawater inflow amount and trend response according to scenario through full-scale flooding and sinking simulation	49
Fig. 35	Rolling response of fishing vessel in Case 1-0	50
Fig. 36	Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-0	54

Fig. 37	Rolling response of fishing vessel in Case 1-1	55
Fig. 38	Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-1	59
Fig. 39	Inflow of fish catch and sea water into processing and working space through broken wood partitions	61
Fig. 40	Initial seawater inflow state in Case 1-2	62
Fig. 41	Rolling response of fishing vessel in Case 1-2	63
Fig. 42	Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-2	67
Fig. 43	Sea water inflow behavior through hatch cover	70
Fig. 44	Sea water inflow behavior into steering room	72
Fig. 45	Sea water inflow scenery into steering room at starboard side heeling angle 20°	73
Fig. 46	Initial seawater inflow state in Case 1-3	73
Fig. 47	Rolling response of fishing vessel in Case 1-3	74
Fig. 48	Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-3	78
Fig. 49	Sea water flow and inflow behavior in working space	81
Fig. 50	Initial seawater inflow state in Case 1-4	82
Fig. 51	Rolling response in Case 1-4	83
Fig. 52	Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-4	87
Fig. 53	Initial seawater inflow state in Case 2-0a	88
Fig. 54	Rolling response of fishing vessel in Case 2-0	90
Fig. 55	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0a	94
Fig. 56	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0b	98
Fig. 57	Initial seawater inflow state in Case 2-1	99
Fig. 58	Rolling response of fishing vessel in Case 2-1	100
Fig. 59	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-1	104
Fig. 60	Initial seawater inflow state in Case 2-2	106
Fig. 61	Rolling response of fishing vessel in Case 2-2	106
Fig. 62	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-2	110

Fig. 63	Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-2	114
Fig. 64	Initial seawater inflow state in Case 2-3	115
Fig. 65	Rolling response of fishing vessel in Case 2-3	116
Fig. 66	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-3	120
Fig. 67	Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-3	124
Fig. 68	Initial seawater inflow state in Case 2-4	125
Fig. 69	Rolling response in Case 2-4	126
Fig. 70	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-4	130
Fig. 71	Initial seawater inflow state in Case 2-5	131
Fig. 72	Rolling response in Case 2-5	132
Fig. 73	Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-5	134



Cause Investigation on Flooding and Sinking Accident of Pelagic Fishing Vessel using FSI Analysis Technique

Lee, Jae-Seok

Department of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Pelagic fishing vessel was fully flooded through the openings and was sunk down to the bottom of sea due to the very rough sea weather on the way of evasion after fishing operation in the Bearing Sea with many crews dead and/or missed. In this study, full-scale ship flooding & sinking simulation was carried out, and sinking process and cause was analyzed for the precise and scientific investigation of sinking accident using highly advanced M&S(Modeling and Simulation) system of FSI(Fluid-Structure Interaction) analysis technique. For the objective secure of weather and sea states during sinking accident in the Bering Sea, time-based wind and wave simulation at the region of sinking accident was carried out and analyzed, and weather and sea states were realized by simulating the

irregular strong wave and wind spectrums. Simulation scenarios were made up and full-scale ship and fluid(air and sea water) modeling was performed for flooding · sinking simulation, by investigating the hull form, structural arrangement and weight distribution, the exterior inflow openings and interior flooding paths through its drawings, and by estimating the main tank capacities and their loading status. It could be confirmed that the accident ship was flooding and sunk down from the full-scale ship flooding and sinking simulation behaviors using FSI analysis technique with a little bit different situation from the general capsized and sinking accident due to the simple loss of stability, in that the stern part subsided under the surface with the center of gravity descended a little bit down due to the seawater inflow in the engine room and fish holds, and with continued large angle of heel at the same time of submerged stern part under the surface even though its heel was progressed greatly.

KEY WORDS : Pelagic Fishing vessel, Full-Scale Ship Flooding · Sinking Simulation, Fluid-Structure Interaction(FSI) Analysis Technique, Highly Advanced M&S(Modeling and Simulation) System, Cause Investigation of Accident

유체-구조 연성 해석기법을 이용한 원양어선의 침수·침몰사고의 원인규명에 대한 연구

이 재 석

한국해양대학교 대학원
조선해양시스템공학과



초 록

원양어선은 베링해에서 황천에서 조업 후 피항하던 중 개구부를 통한 침수로 인하여 침몰하였으며 많은 선원들이 사망하고 실종되었다. 본 연구에서는 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction, FSI) 해석기법의 고도 정밀 M&S(highly advanced Modeling and Simulation) 시스템을 사용하여 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고의 과정 및 원인을 정확하고 과학적으로 분석하고자 하였다. 베링해 침몰사고 시의 기상 및 해상상태를 객관적으로 확보하기 위하여 침몰사고 지역의 시간대별 기상 및 해상 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고 당시 파랑과 강풍 등을 분석하고, 불규칙 파랑과 강풍 스펙트럼을 사용하여 구현하였다. 원양어선 사고선박의 선체 도면 등을 통하여 선박의 선형, 배치 및 중량 분포와 외부 해수 침수 개구부 및 선내 침수 경로를 분석하고 주요 탱크들의 용적과 그들의 중량 분포를 추정하여 침수·침몰 시뮬레이션을 위한 시나리오를 작성하고,

사고선박 원양어선의 전선과 유체(공기 및 해수)를 상세 모델링을 하였다. 본 연구를 통하여 사고선박의 경우 급격하게 횡경사가 진행되어도 전복에 의한 침몰이 아니라 기관실과 어창에 유입된 다량의 해수로 인하여 무게중심이 다소 아래로 내려가 선미부가 수면 아래로 잠기면서 선미의 침수가 병행한 대각도의 횡경사로 이어진 사고로써, 단순한 복원성 상실로 인한 전복으로 침몰하는 것과는 다른 현상으로 침몰되었다고 수치 시뮬레이션의 거동으로 확인할 수 있었다.

KEY WORDS : 원양어선, 실선 침수·침몰 시뮬레이션, 유체-구조 연성 해석기법, 고도 정밀 M&S 시스템, 사고 원인규명.



1. 서론

국내외 해난사고 사례를 이용하여 사고원인을 분석하는 경우에는 어떤 원인으로 어떤 유형의 사고가 빈번하게 발생하는지를 파악하기 위함이다. 대양에서 발생한 사고로 선박이 침몰되거나, 선원들이 생존하지 못한 사고는 원인의 파악이 매우 어렵다. 또한 민형사상 혹은 환경오염에 대한 책임소재로 인하여 사고 당사자들이 정확한 사고 경위를 진술하지 않는 경우도 많다. 국내의 경우 해양안전심판원에 재결이 요청된 사고에 대해서만 그 원인이 파악되어 있고, 국외의 경우에도 마찬가지로 각국 정부 및 선급에 의해 자세히 조사된 사고만이 그 원인이 기술되어 있다.

국내의 경우 Fig. 1에서와 같이 2000년부터 2015년까지의 해양안전심판원의 해난사고 유형별 재결서에 의하면 충돌(collision) 사고가 절반에 가깝고, 화재 폭발(fire and explosion), 침몰(sinking), 좌초(grounding), 기관고장(engine damage), 사망 부상(death and injury), 전복(capsize), 접촉(contact) 등의 순서로 발생하였다. 로이드 해사정보서비스(Lloyd Maritime Information Service, LMIS) 데이터베이스는 총톤수 100톤 이상의 선박 사고 데이터를 전 세계적으로 수집한 데이터베이스로서 국외 사고통계자료 중에서 가장 방대한 양을 담고 있는 데이터베이스이다. Fig. 2는 1990년부터 2000년까지의 총 23,067건의 방대한 사고 데이터를 사고 유형별로 충돌, 좌초, 화재 폭발, 접촉, 침수, 침몰 전복 순서로 분류하고 있다.

국내에서는 인명 사망·부상 사고의 경우 인명 안전에 중점을 두기 위해 별도의 사고 유형으로 분류해 놓지만 LMIS 데이터베이스에서는 사고 유형이라기 보다는 사고 피해 분류에 속하는 것으로 되어있다. 또한 기관손상 사고의 경우는 사고 유형이라기보다는 단순 고장으로 분류하여 사고 유형에 포함되어 있지 않다. 침수 사고의 경우 대부분 충돌, 접촉, 좌초, 화재 등의 사고로 인해 해수가 유입되어 발생하는 2차적인 사고로 분류되어 국내에서는 별도의 사고 유형

으로 분류하고 있지 않으나 국제 선박 규정을 제·개정하는데 중요한 요인이 되기 때문에 LMIS 데이터베이스에서는 별도의 사고 유형으로 분류해 놓았다.

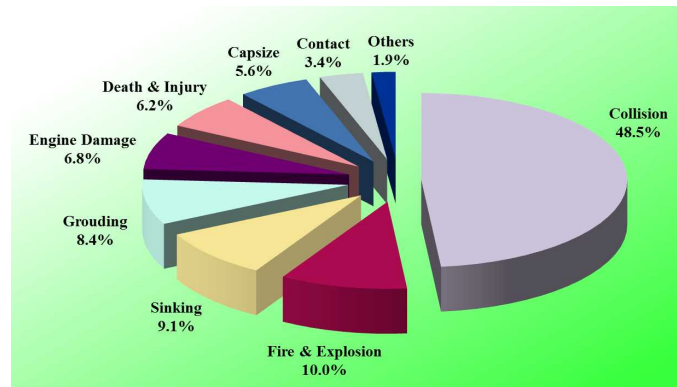


Fig. 1 Marine accidents according to type of KMST (KMST Judgment Report, 2000-2015)

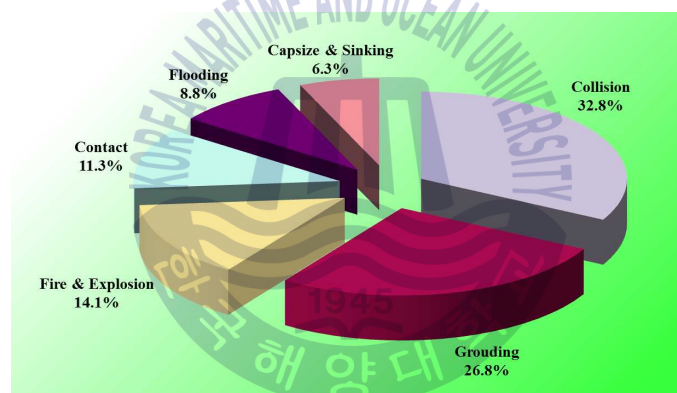


Fig. 2 Marine accidents according to type of LMIS (LMIS Database, 1990-2000)

선박의 침몰은 선내의 침수가 동반되어야 가능하며 충돌 및 좌초사고 등으로 인하여 선박이 전복되거나 복원성 부족으로 인한 선회 시 전복도 발생할 수 있다. 또한 충돌 및 좌초 사고 등으로 선박에 파손이 발생하여 침수가 발생할 수도 있고, 기상악화로 인한 강풍과 강한 파랑 등에 의해 부적절한 선체 외부 개구부 등으로 침수도 발생할 수 있다. LMIS 데이터베이스에서는 침몰 전복을 하나의 유형으로 분류하였지만 해양안전심판원의 재결서의 분류에는 별도로 분류하고 있다. 전 세계적으로 해난사고를 줄이기 위한 노력은 끊임없이 기울여 왔지만 여전히 막대한 인명 피해와 재산상 손실, 해양오염이라는 큰 재앙까지 초래하고 있다.

2014년 12월 1일 17:06경(현지시각), 북태평양 러시아 베링해에서 조업 중이던 Fig. 3의 원양어선(총톤수 1,753톤, 길이 76.17m, 너비 13.00m, 깊이 8.40m, 1978년 1월 1일 건조)이 기상악화로 어획물처리실(processing and working space), 어창(fish hold) 등에 다량의 해수가 유입되어 침몰되고 승선원 60명 중 선원 53명이 사망 및 실종되었다. 침몰사고 위치는 Fig. 4에서와 같이 북위 61도 54분, 서경 177도 09분이었고, 침몰사고 시의 수심은 약 117m인 것으로 알려져 있다. 또한 현지 기상상태는 북동풍($70^{\circ} \sim 80^{\circ}$) 25m/s, 파고 5.5m(주기 8초), 수온 1~2°C인 것으로 알려져 있다.



Fig. 3 Scenery of pelagic fishing vessel

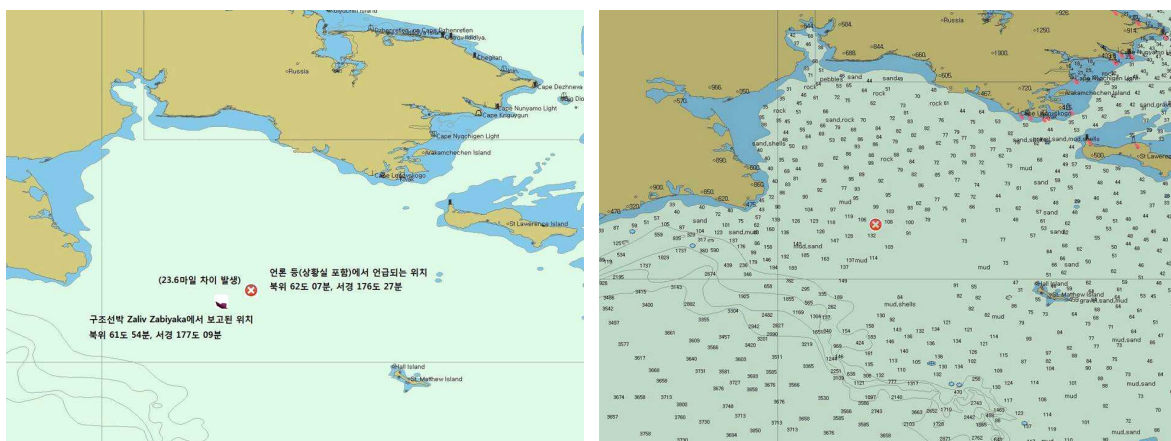


Fig. 4 Location and depth of water of pelagic fishing vessel sinking accident

일반적으로 해난사고는 생존자들의 진술과 항해장비 등의 기록들에 의해 원인을 정확히 추정할 수 있다. 그러나 본 원양어선 사고선박의 침몰사고는 러시

아 감독관과 6명의 외국선원들과 사고선박의 표류 시 통신하였거나 근접하였던 원양어선들의 선장 등의 진술이 원인규명을 위한 참조자료이긴 하지만 긴박한 상황에서 각자의 위치와 역할이 다르다보니 전반적으로 사고에 대한 일관성과 정확성이 부족하여 사고원인을 규명하기에는 미흡하였다. 해양안전심판원의 특별조사부가 사고선박 관계자의 조사·면담 등의 조사 자료를 토대로 침몰사고의 명확한 사고원인을 규명하기 위하여 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 사고 진행과정을 재현할 필요가 있다. 특별조사부의 조사 자료 등을 바탕으로 침수·침몰사고에 이르기까지의 해수 유입과 선체경사 등의 사고 경과를 다음과 같이 요약하였다.

- 11:00 경 양망을 시작하여 11:35에 양망을 완료하고 피쉬병커(fish bunker)의 해치커버(hatch cover)를 개방하고, 어획물 약 20톤을 투하하면서 다량의 해수가 해치커버로 유입됨
- 12:00 경 해치커버의 불완전한 폐쇄로 해수가 유입되었고, 12:06 경 피항을 개시하였으며 다량의 해수가 유입된 후 선체가 약 30° ~ 40° 우현으로 경사됨
 - Fig. 5의 원양어선의 항적에서 11:24 경까지는 선미가 풍상을 향하고 있었고 12:00까지의 항적자료는 없으나 12:00 경 선수방위 66°, 침로방향 43°로 운항하였음
- 13:00 경 유입된 해수가 타기실로 유입되어 좌현 전타 상태의 조타기가 작동불능 되어 선박이 좌선회를 계속하자 엔진을 멈추었으며, 이후 높은 파도에 의해 피쉬병커를 통하여 지속적으로 어획물처리실로 해수가 유입됨
- 14:00 경 어획물 등으로 처리실내 빌지웰(bilge well)이 막혀 배수펌프가 작동불능 되었으나, 연료유와 어획물을 좌현으로 이동하고 인근 조업어선에서 지원받은 잠수펌프로 해수를 배출하면서 선체가 일시 평형을 유지함
- 15:00 경 좌현으로 경사됨에 따라 좌선회하고 우현 측에서 높은 파도를 맞아 좌현으로 급격히 경사되었고, 15:30 경 좌현 선미부터 침몰이 시작되고

뒹개가 탈락된 좌현 측 오물배출구(sewage outlet)를 통해 다량의 해수가 계속 유입되어 복원력이 상실되어 선미부터 침몰되면서 선체는 좌현으로 급경사됨

- 16:00 경 인근 조업어선들이 구조 차 접근하고 16:49 경 VMS 신호가 소실 되었으며, 17:06 선체는 완전히 침몰되었고 17:30 경 인근 조업어선에 의해 선원들이 구조됨



이러한 기상악화 상태에서 조업 중이던 원양어선 사고선박의 침수에 의한 전복 및 침몰사고의 원인규명과 과정을 보다 과학적이고 정확하게 분석하기 위한 도구나 기법이 필요하다. 최근 대용량의 전산시스템의 개발과 더불어 LS-DYNA 코드(LSTC, 2013)와 같은 고도 비선형 동적 상용해석 프로그램이 크게 발전됨에 따라 내충격 응답과 관련된 실험이나 시험을 보조하거나 대체할 수 있는 단계에 있다. 이러한 고도 정밀 M&S(highly advanced Modeling and Simulation) 시스템을 이용하여 자동차의 충돌사고 시 차체에 발생하는 대변형과 파단 등의 고도 비선형과 파단조건을 적절히 고려하는 시뮬레이션을 수행하여 충돌사고 원인을 정확하게 규명하고 충돌설계에도 적용하고 있다.

그러나 해난사고는 일반적으로 자동차나 비행기 등의 사고와는 달리 공기 밀도보다 약 1,000배가 큰 유체(해수)에서 발생하므로 이러한 유체에서의 사고 손상거동을 합리적으로 구현하여야 실제적이고 정확하게 추정할 수 있다. 실선(full-scale ship) 충돌, 좌초, 침수, 전복 및 침몰 시뮬레이션을 LS-DYNA 코드의 유체-구조 연성(FSI; Fluid-Structure Interaction) 해석기법의 고도 정밀 M&S 기법을 사용하여 해수와의 다양한 연성효과(coupling effect)를 고려하고 항해하는 선박은 추진력(propulsion force)에 의해 항해하도록 수행함으로써 매우 실제적이고 정확한 해난사고 원인규명이 가능하다.

해수에서의 연성효과로서는 해수에서 부양(floating)되고, 6자유도의 운동(motion)도 하고, 선내에 해수도 침수(flooding)되고, 운항 중일 때 파도(wave)도 생성하고 그 영향도 받고, 두 물체가 근접할 경우에는 압착압력(squeezing pressure)이 발생하고, 두 물체가 스쳐 지나거나 안벽과 해저에 근접하게 운항할 경우에는 압력이 저하(banking effect)되는 등 해수에서의 연성효과를 정확히 재현하여야 해난사고의 원인을 정확하고 실제적으로 규명 및 분석할 수 있을 것이다. 또한 황천에서 발생하는 해난사고일 경우에는 강한 조류, 강풍 및 해일성 파도 등을 불규칙 스펙트럼을 사용하여 정확히 구현하여야 해난사고의 원인을 정확히 분석할 수 있을 것이다. 현재 본 연구진은 전 세계적으로 유일하게 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 사용하여 실선 충돌, 좌초, 전복, 침수 및 침몰 시뮬레이션을 수행하여 선박의 해난사고의 원인

규명과 과정과 원인을 분석하고 있다(Lee, 2012; Lee, 2014a & 2014b; Lee, 2015; Lee, 2016a~2016c; Lee et al., 2017a~2017d).

본 연구의 목적은 원양어선 사고선박이 황천에서 조업을 하고 피항하던 중 발생한 침몰사고를 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 사용하여 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고의 과정과 원인을 분석하면서 시뮬레이션 기법을 고도화하고자 하였다. 본 연구의 시뮬레이션 기법의 고도화에 가장 중요한 유체-구조 연성 해석기법으로서는 MMALE(Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법과 Fig. 6과 같은 Euler-Lagrange 연성 알고리즘(coupling algorithm)을 이용하여 신뢰성 높은 침수·침몰 시뮬레이션 응답해석을 수행하였다(Aquelet et al., 2003 & 2006).

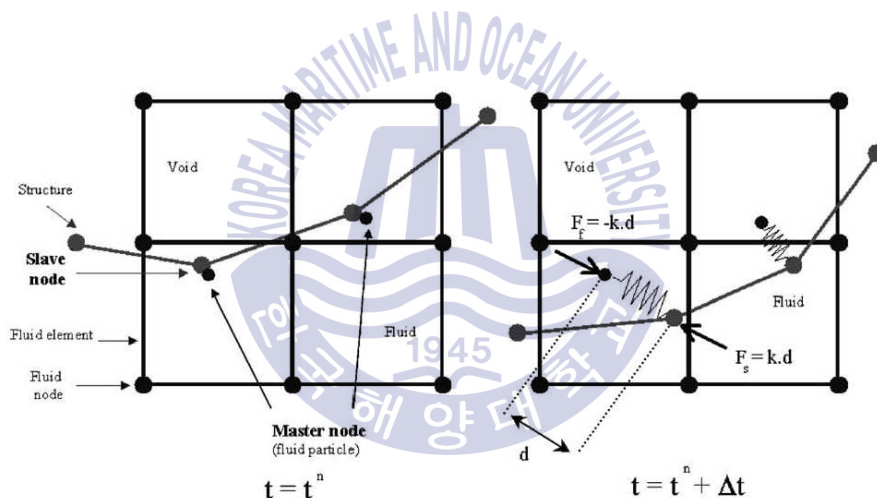


Fig. 6 Euler-Lagrange penalty coupling algorithm(Aquelet et al., 2006)

러시아 베링해 침몰사고 지역의 기상 및 해상상태를 객관적으로 확보하기 위하여 침몰사고 지역의 시간대별 해상 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고 당시 파랑과 강풍 등을 분석하였고, Bretschneider & Mitsuyasu 스펙트럼(Bretschneider, 1968, Mitsuyasu, 1970)과 von Karman 모델(Mucke, T. et al., 2012)을 사용하여 불규칙 파랑과 강풍을 구현하였다. 또한 사고선박의 선형, 선체 구조도 및 일반 배치도 등의 도면 등을 통한 선박의 선형과 중량 분포를 분석하고, 외부 침수 개구부 및 선내 침수경로와 선박복원성 계산서 등을 통한 어획량 및 연료유 등의 중량분포를 파악하여 침수·침몰 시뮬레이션 시나리오를 작성하였고, 이를

기반으로 하여 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 위한 사고선박의 전선과 유체(공기 및 해수)를 상세하게 모델링 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 해난사고의 유형과 해난사고의 원인 규명을 위한 과학적이고 체계적인 방법 등을 살펴보고 본 연구의 필요성과 목적에 대하여 기술하였다. 2장에서는 유체-구조 연성 해석기법을 소개하고, 해상상태를 분석하여 불규칙 파랑과 강풍을 구현하였으며 파랑 스펙트럼과 시뮬레이션 거동을 통하여 검증하였다. 3장에서는 사고선박의 선형과 구조도 등을 분석하여 실선 모델링을 구축하였다. 4장에서는 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 위한 시나리오와 유체 모델링을 수행하였다. 부양(floating) 시뮬레이션과 유체정역학적 특성치 프로그램 계산을 통한 유체정역학적 특성치들을 선박복원성 보고서와 비교 검토함으로써 본 연구의 유체-구조 연성 해석기법을 검증하였다. 5장에서는 각 시나리오에 따른 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 본 사고선박의 침몰사고에 이르기까지의 해수유입 및 선체경사 등을 고려한 사고경과와 원인을 분석하였다. 본 논문의 결론부인 6장에서는 본 연구를 통하여 도출된 주요한 결과를 요약하였다.

2. 유체-구조 연성 해석기법과 해상상태 분석 및 구현

2.1 유체-구조 연성 해석기법

수중 및 공기 중 폭발(UNDEX, AIREX), 슬로싱 및 슬래밍 등의 유체-구조 연성 문제는 일반적으로 LS-DYNA 코드의 MMALE 기법과 Fig. 6과 같은 Euler-Lagrange 연성 알고리즘을 이용하여 신뢰성 높게 내충격 응답해석을 수행할 수 있다. 유한요소 격자를 이동시키는 알고리즘(moving mesh algorithm)과 유체격자(fluid grid)와 구조물 격자(structure mesh)를 겹치게 하여 복잡한 구조물과의 유체를 연성하는 것을 편리하게 시뮬레이션 할 수 있다. 또한 VOF(Volume Of Fraction) 기법은 넓은 범위의 비선형 자유수면 문제를 해석하는 데 적합하다(Aquelet et al., 2003 & 2006).

유체-구조 연성 문제 등의 유한요소해석에서는 잘 알려져 있는 바와 같이 Lagrangian 방식과 Eulerian 방식의 2가지 관점에서의 정식화(formulation)가 가장 많이 사용되고 있다. Lagrangian 방식은 요소격자(mesh)가 대상체에 붙어 움직이면서 대상체와 같은 거동을 하는 것으로 구조 문제(structure problem)에 적합하다. 자유표면(free surface) 등의 경계를 표현하는 것이 자유롭고 작은 변형률의 문제에 있어 빠른 수렴과 정확한 결과를 주는 반면, 비선형 경계치 문제에서는 격자의 과도한 찌그러짐으로 인하여 오차가 증가하여 해석결과의 정밀도가 저하되거나 계산 시간간격이 극도로 짧아짐에 따라 해석이 중단되기도 한다. 이를 해결하기 위하여 자동 요소격자 재생성 기법(automatic and rezoning technique of mesh) 등을 적용한 updated Lagrangian 방식도 개발되었으나 재생성 과정에서의 보간(interpolation) 자체가 정확성을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

Eulerian 방식은 검사체적(control volume)을 생성하여 체적내의 유동변화와 같은 경계 형상변화가 최소인 유체 문제(fluid problem)에 적합하고 효율적이지

만 물질 유동이 많아 경계 형상변화가 과도한 경우에는 신뢰성이 저하되어 부적합한 것으로 평가된다. 여기서도 요소격자를 재생성 하는 기법들이 사용되지만 시행착오법에 기초한다. 계산 수행 중 과도한 요소격자의 변형이 발생했을 경우 계산을 중단하고 요소격자를 적절히 수정한 후 물성 데이터를 변형 요소에서 새롭게 수정된 요소로 변환하여 이동시켜 다시 계산을 수행하게 하는 ALE 기법이 제안되었다. 요소격자가 대상체에 붙어있는 Lagrangian 좌표계도 아니고 공간에 고정되어있는 Eulerian 좌표계도 아닌 새로운 기준(reference) 또는 ALE 좌표계에 의한 요소격자의 이동에 관한 smoothing 알고리즘과 데이터 변환과정인 이동(advection) 과정을 통하여 과도한 변형을 수반하는 문제와 연성문제에 있어 논리적인 해석방법을 제공하고 각 단계마다 다양하고 정밀도 높은 답을 얻을 수 있으나, 연산 분해(operator split) 기법에 따른 Lagrangian과 Eulerian(advection)의 2개 단계를 거치면서 계산을 수행하므로 연산 시간이 늘어나는 단점이 있다. 하지만 최적의 형상과 조건을 유지하면서 해석을 수행할 수 있으므로 긍정적 면이 더 크다고 할 수 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 ALE를 설명함에 있어 Lagrangian 좌표계(X_i)와 Eulerian 좌표계(x_i) 이외에 임의의 기준(arbitrary reference) 좌표계를 도입하고, 기준 좌표계에 대한 재료 도함수(material derivative)는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 재료의 시간 도함수와 기준 형상의 시간 도함수와의 관계를 대입함으로써 다음과 같은 ALE 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + w_i \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial x_i} \quad (1)$$

여기서, $w_i = v_i - u_i$ 는 재료 속도(material velocity) v_i 와 격자 속도(mesh velocity) u_i 와의 상대 속력(relative velocity) $w_i = v_i - u_i$ 이다.

ALE 지배방정식인 ALE 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes equation)은 다음과 같은 3가지 질량(mass), 운동량(momentum) 및 에너지(energy) 보존 방정식(conservative equation)에 의해 주어진다.

- 질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2)$$

• 운동량 보존 방정식

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

• 운동량 보존 방정식

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (4)$$

고정된 영역에서의 뉴턴유체(Newtonian fluid)의 유동을 지배하는 문제의 강형(strong form)은 지배 방정식과 적합한 초기 및 경계조건들로 구성된다. 여기서 ρ 는 밀도이고, 응력 텐서 σ_{ij} 는 식 (5)와 같다.

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (5)$$

여기서 p 는 압력이고, μ 는 동점성계수(dynamic viscosity)이다.

지배 방정식들은 식 (6) 및 (7)과 같은 각각 초기 및 경계 조건들에 의해 완성된다.

$$\sigma_{ij} n_j = 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (6)$$

$$v_i = U_i^0 \quad \text{on } \Gamma_2, \text{ where } \Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma, \Gamma_1 \cap \Gamma_2 = 0 \quad (7)$$

여기서 Γ 은 계산 영역의 전체 경계를 말하고, Γ_1 과 Γ_2 은 Γ 의 부분적인 경계들이고, n_i 는 경계에서의 바깥방향의 수직 단위벡터이다. δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이고, 속도장은 전체 영역 Ω 에서 초기에는 다음과 같이 알려져 있는 것으로 가정한다.

구조물이 비압축성에 가까운 유체에 고속으로 충격을 가하는 슬래밍이나 역으로 유체가 구조물에 고속으로 충격을 가하는 슬로싱과 같은 유체-구조 상호작용의 충격문제에 적합하고 LS-DYNA와 같은 외연적 코드(explicit code)에 사

용 가능한 유체-구조 연성 알고리즘 중에서 Fig. 6과 같은 Euler-Lagrange 페널티(penalty) 연성 알고리즘을 사용하는 것이 효율적이다. 이 알고리즘은 Fig. 7에서와 같은 Lagrangian 해석에 주로 사용되는 페널티 접촉(penalty contact)과 비슷한 페널티 연성 기법을 사용한다. 이러한 연성 알고리즘들에 적용되고 있는 페널티 스프링(spring)에 의하여 페널티 하중(penalty force)을 구하고, 특히 비압축성에 가까운 유체와의 충격에 의하여 고주파 진동을 유발하므로 유체와 구조의 상대속도에 따른 감쇠력(damping force)은 이러한 고주파 진동을 완화시킨다.

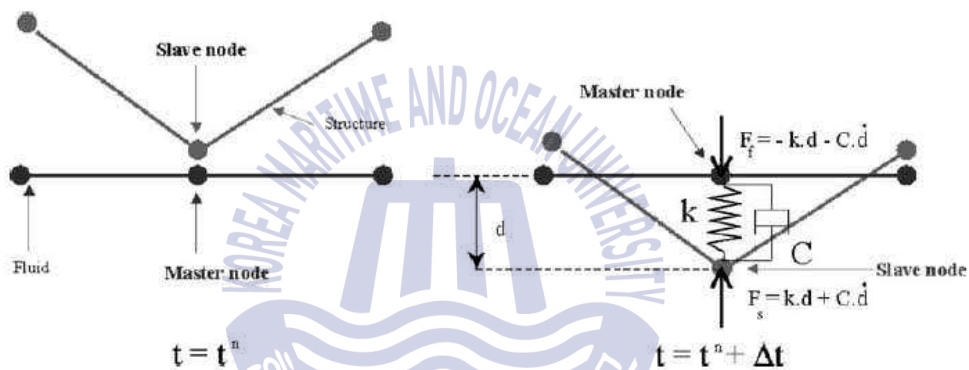


Fig. 7 Sketch of contact algorithm with a dashpot (Aquelet et al., 2006)

일반적으로 접촉면(contact interface)이 유체와 구조격자를 분리하여 유체-구조 연성문제를 취급하는 접촉문제와는 달리 유체영역의 Eulerian 또는 ALE 격자와, 구조물의 Lagrangian 격자의 2가지 요소격자를 중첩하여 취급한다. 일반적인 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 코드와 구조해석 코드와 같은 2개의 별개 코드들을 연성시키는 기존 알고리즘과는 달리 유체-구조 연성 문제를 2-way coupling 방식으로 완전히 연성시킨다.

본 연구에서와 같이 유한한 영역에서의 유체(공기와 해수)와 사고선박의 선체와의 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 선체의 부양과 선내 침수가 가능한 시뮬레이션을 수행하고 불규칙 파랑과 강풍을 구현하기 위해서는 해상에서의 실제 수압을 실제와 같이 정확히 구현하여야 하고, Fig. 6에서의 Euler-Lagrange

연성 알고리즘도 정확히 구현하여 연성해석을 효율적으로 사용하여야 한다. 공기와 해수의 상태방정식을 사용하여 해상에서의 수심에 따른 수압을 정확히 구현하기 위하여 LS-DYNA 코드의 INITIAL_HYDROSTATIC_ALE, EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 및 MAT_NULL의 옵션을 사용한다. 해수 수면에서의 공기압을 INITIAL_HYDROSTATIC_ALE의 PBASE 변수에 가함으로서 수심에 따른 수압을 정확히 구현할 수 있다. Fig. 8은 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 위한 공기 및 유체 모델에 대한 수심에 따른 수압의 분포와 응답을 보여주고 있다. 수압의 이론치와 잘 일치하고 있으며 시간의 경과에 따른 응답도 일관성이 있음을 알 수 있다.

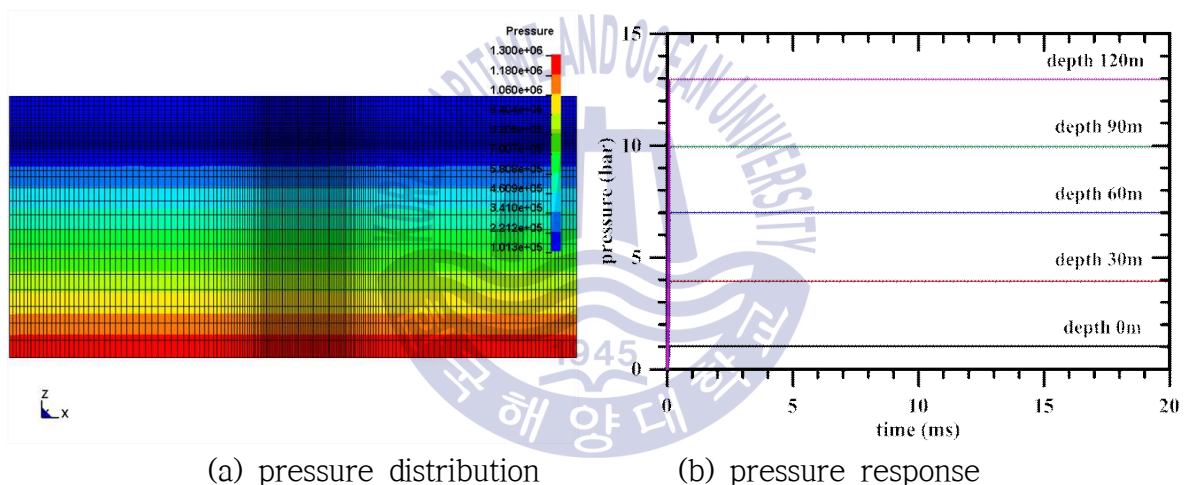


Fig. 8 Pressure distribution and response according to depth of seawater

유체-구조 연성 해석에 있어 유체 격자의 큰 일그러짐(distortion)을 피하기 위해 유체 격자의 재조정 단계에서 유체의 1차 또는 2차 이동 알고리즘인 Doner cell 또는 Van Leer 알고리즘을 사용하는 Eulerian 또는 ALE 정식화와 구조물에 대한 Lagrangian 정식화를 연계한 알고리즘이 Fig. 6의 Euler-Lagrange 페널티 연성 알고리즘이다. 유체와 구조의 연성 절점들에 작용하는 연성력(coupling force)을 구조물의 절점이 유체 속에 진입한 거리 (penetration)와 스프링 상수(spring constant)에 비례하는 페널티 연성 알고리즘을 사용하고, 폭발이나 슬래밍 등에 의한 유체로부터의 충격력은 매우 큰 변

동이 발생하므로 Fig. 6에서와 같이 댐퍼(damper)를 사용하여 이를 완화한다. 이러한 유체-구조 연성 알고리즘은 구조물에 유체가 누출(leakage)하는 문제가 발생하므로 이를 방지하는 것이 매우 중요하다. 유체의 1차 또는 2차 이동 알고리즘 등을 정의하는 CONTROL_ALE 옵션과 Fig. 6의 오일러-라그랑지 페널티 연성 알고리즘의 스프링 상수(PFAC) 및 댐핑계수(DAMP) 등의 변수들은 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 옵션에서 정의한다.



2.2 해상상태 분석 및 구현

원양어선의 거친 해상상태에서의 해일성 파도에 의한 침수·침몰사고 원인을 정확히 분석하기 위해서는 러시아 베링해 침몰사고 지역의 기상 및 해상상태를 객관적으로 분석하고 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 이용하여 침몰사고 당시의 해상상태 구현하여야 한다. 침몰사고 지역의 기상 및 해상상태를 객관적으로 확보하기 위하여 Fig. 9에서와 같이 침몰사고 지역의 시간대별 해상 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고 당시 파랑(최대, 유의 및 평균 파고, 파주기 및 파향)과 강풍(풍향, 풍속) 등을 분석하여 Fig. 10에 나타내었다.

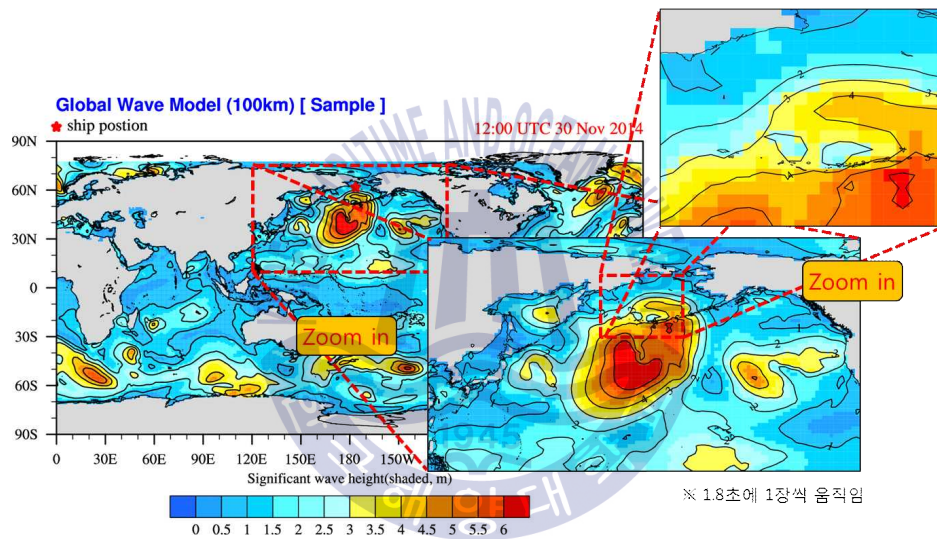
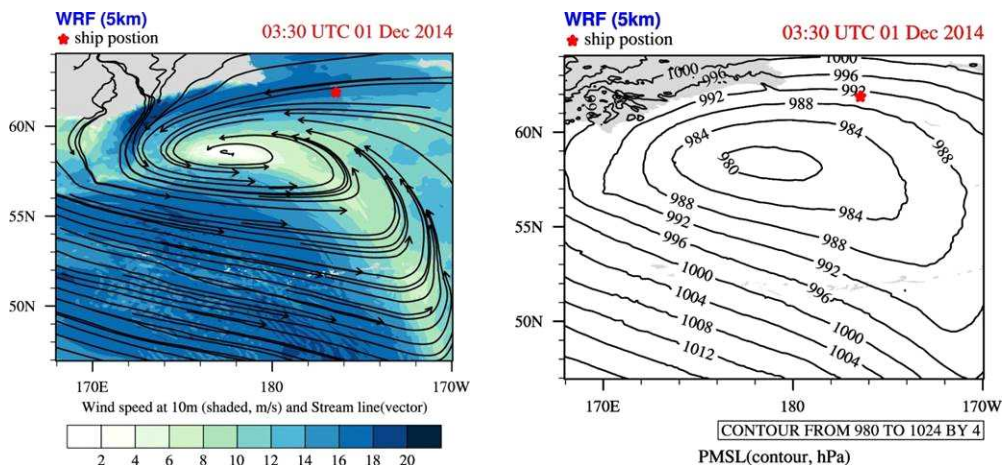


Fig. 9 Global wave simulation sample



(a) wind speed and vector

(b) sea level pressure

Fig. 10 Sea weather simulation results according to time (continued)

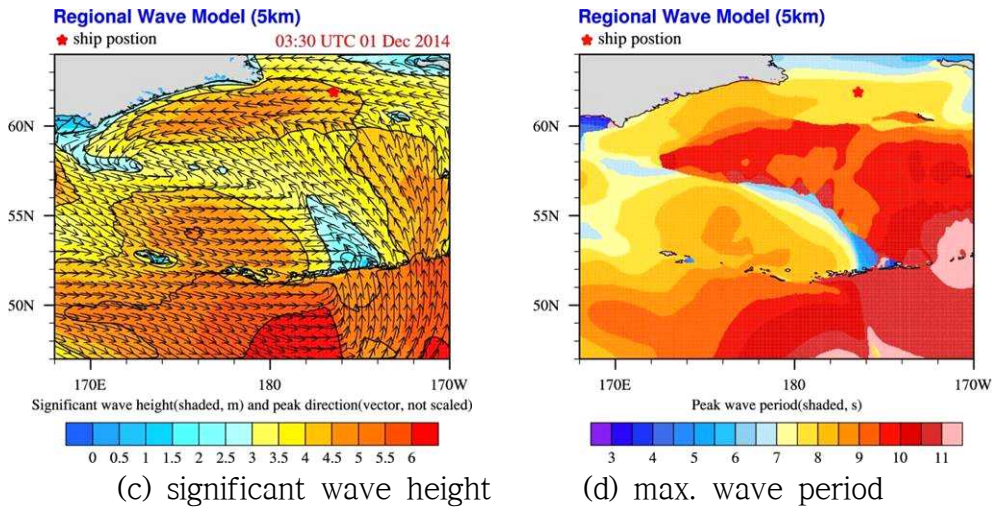


Fig. 10 Sea weather simulation results according to time

사고선박의 침몰사고 지역에서의 시간대별 유의파고 및 파향과 풍속 및 풍향의 시계열에 대한 그래프를 사고당일 동안에 대하여 Fig. 11에 나타내었고, 이를 침몰사고 당일의 시간대에 대하여 파주기까지 Table 1에 요약하였다. 침몰사고 당일 주변 해상은 약 4.0~4.5 m/sec의 유의파고가 약 110° 정도의 파향에, 파도주기는 약 8.0 sec를 유지하고 있었고, 풍속은 약 15.0 m/sec 정도에 약 75° 정도 전후의 풍향을 유지하고 있었음을 알 수 있다.

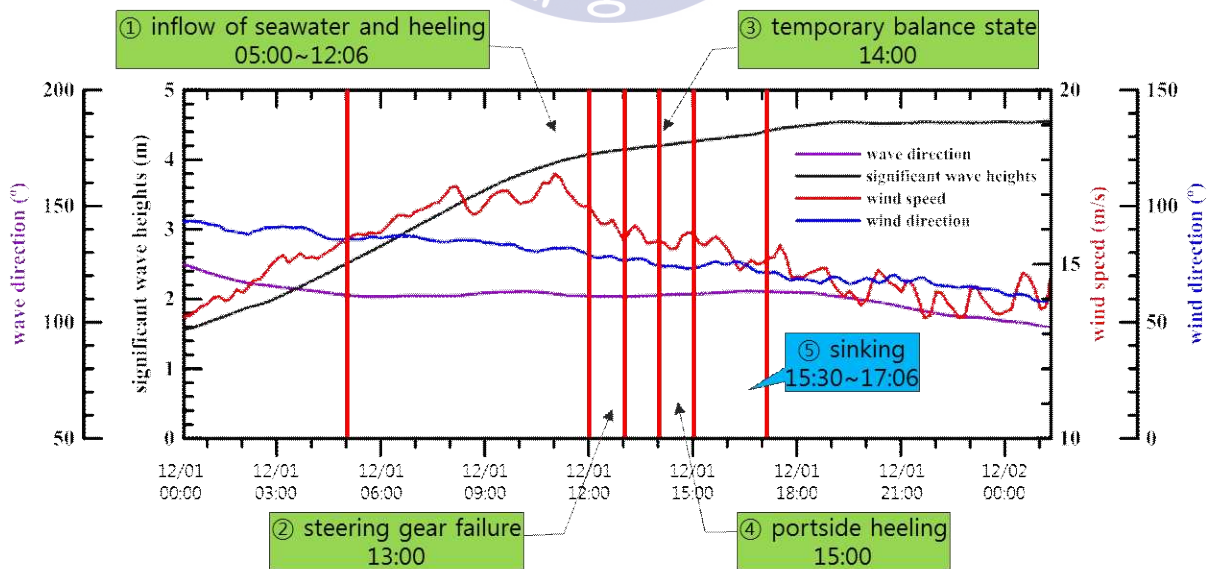


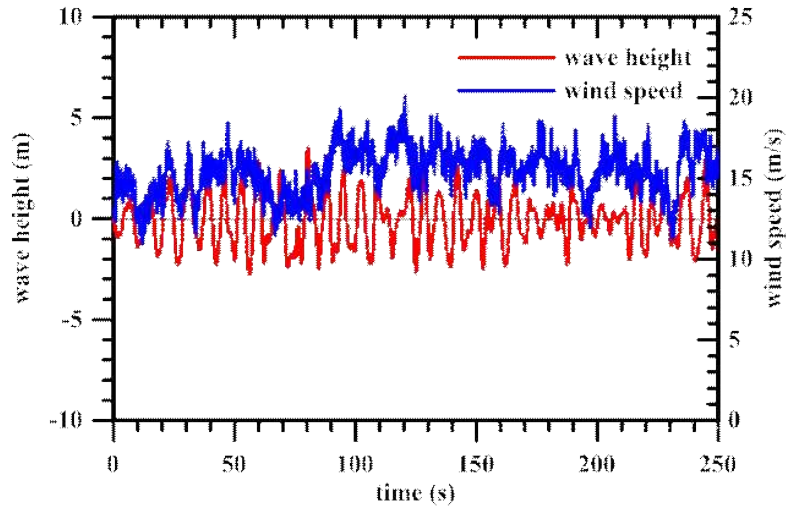
Fig. 11 Significant wave and wind speed time histories at accident region (December 1, 2014)

Table 1 Significant wave and wind speed time histories at accident region
(December 1, 2014)

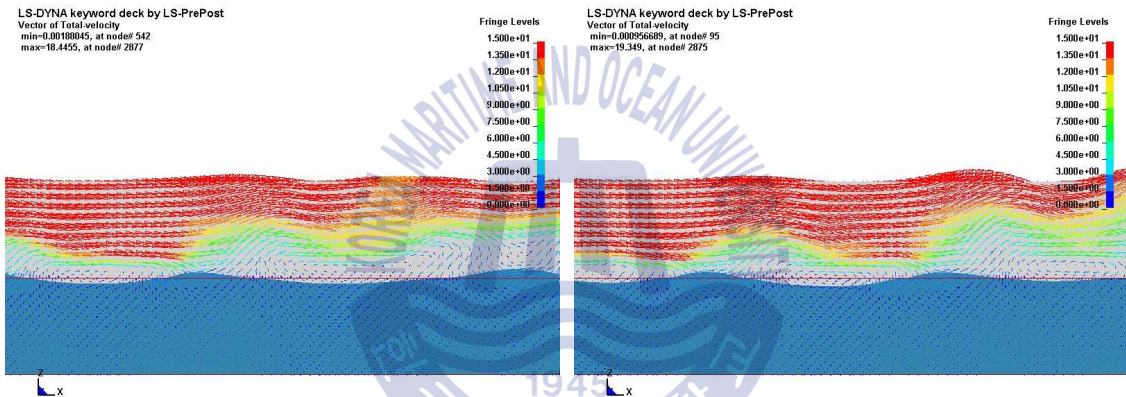
local time	situation	signif. wave(m)	wave direct.(°)	wave period(s)	wind speed(m/s)	wind direct.(°)	sea level pressure(hPa)
05:00	casting net	2.6	111.5	5.6	16.3	86.1°	998.0
11:00	hauling on net	4.0	112.0	7.4	17.5	82.2°	991.8
12:00	incomplete hatch cover closure	4.1	111.2	7.6	16.4	78.3°	991.0
12:06	avoidance commencement	4.1	111.2	7.6	16.2	78.3°	990.7
13:00	steering gear failure	4.2	111.2	7.7	16.0	77.5°	990.5
14:00	temporary balance state	4.2	111.9	7.8	15.6	74.5°	989.7
15:00	port rapid heeling	4.3	112.3	7.9	15.6	74.3°	991.2
15:30	sinking from port side	4.3	112.7	8.0	15.8	76.7°	990.9
16:49	VMS signal disappearance	4.4	113.3	8.1	15.1	71.9°	989.8
17:06	complete sinking	4.4	113.2	8.1	15.2	72.0°	989.6

- high seas watch : wind speed with 14m/s and during 3 hour above, significant wave with 3m above

침몰사고 당시의 해상상태를 유체-구조 연성 해석기법을 이용하여 불규칙 해 일성 파도와 불규칙 강풍의 시뮬레이션을 수행하여 해상상태를 구현하였다. Fig. 12(a)에서와 같이 불규칙 파랑은 Bretschneider & Mitsuyasu 스펙트럼을, 불규칙 강풍은 von Karman 모델을 사용하였다. Fig. 12(b)는 파주기 8.0sec의 유의파고 4.5m의 불규칙 파랑과 15m/sec의 불규칙 강풍의 시뮬레이션 응답 거동 보여주고 있다.



(a) irregular wave and wind spectrum



(b) irregular wave and wind simulation response behavior

Fig. 12 Irregular wave and wind simulation

이들의 응답과 불규칙 스펙트럼과의 비교 검토를 위하여 Fig. 13에서와 같이 수심 120.0m의 해수와 공기 모델을 사용하여 해일성 파랑과 강풍 시뮬레이션을 수행하였다. 공기와 해수의 좌우 경계는 SECTION_SOLID 옵션의 ELFORM(element formulation options) option 중에서 EQ. 11(1 point ALE multi-material element)을, AET(Ambient Element type) option 중에서는 EQ. 4(pressure inflow/outflow)을 사용하였다. 공기와 해수에서 수심에 따른 수압을 정확히 구현하기 위하여 좌우 경계에서는 INITIAL_HYDROSTATIC_ALE 옵션 대신에 ALE_ AMBIENT_HYDROSTATIC 옵션을 사용하였다. 강풍은 왼쪽 공기 경계에 SET_NODE를 선정하여 불규칙 강풍 스펙트럼을, 해일성 파랑은 왼쪽 해수 경계에 실제와 같이 조파기를 설치하고 불규칙 파랑 스펙트럼을 가하였다.

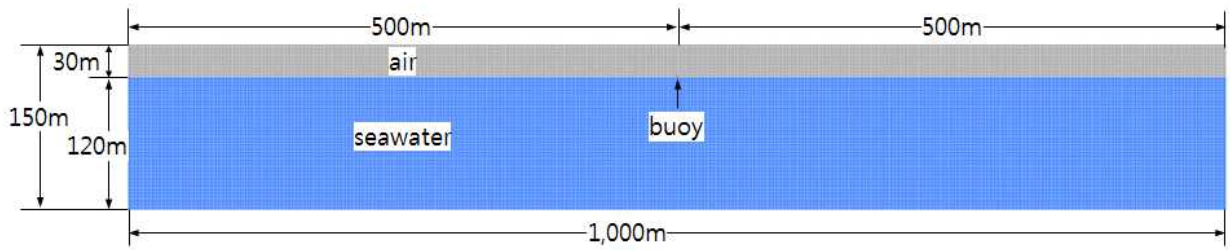
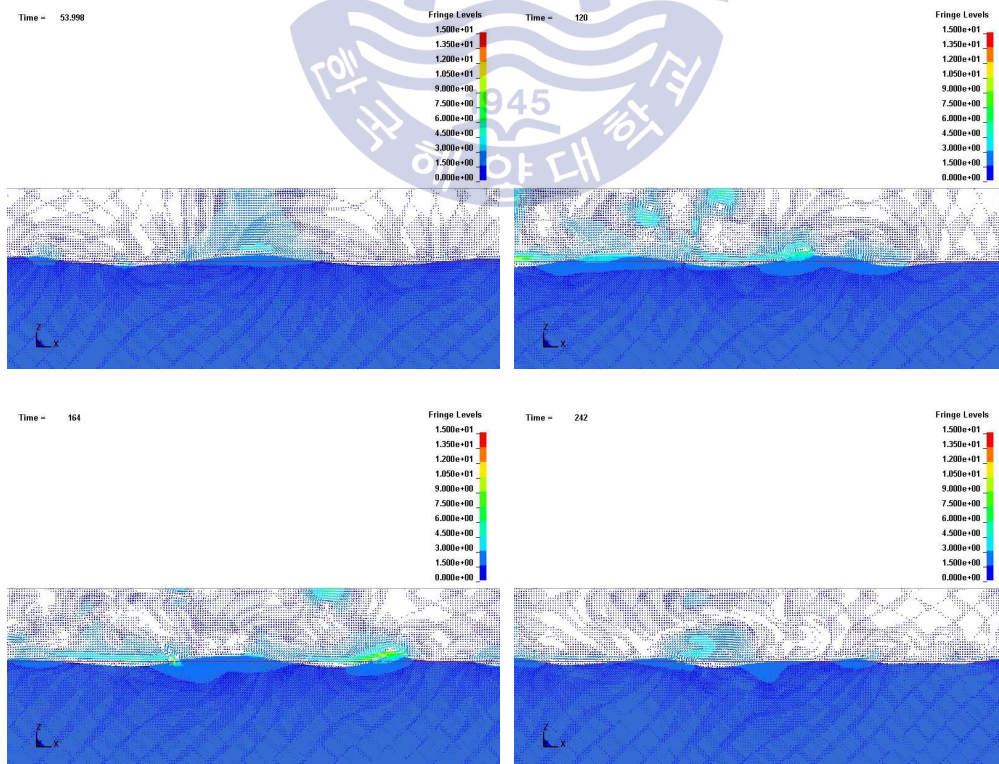


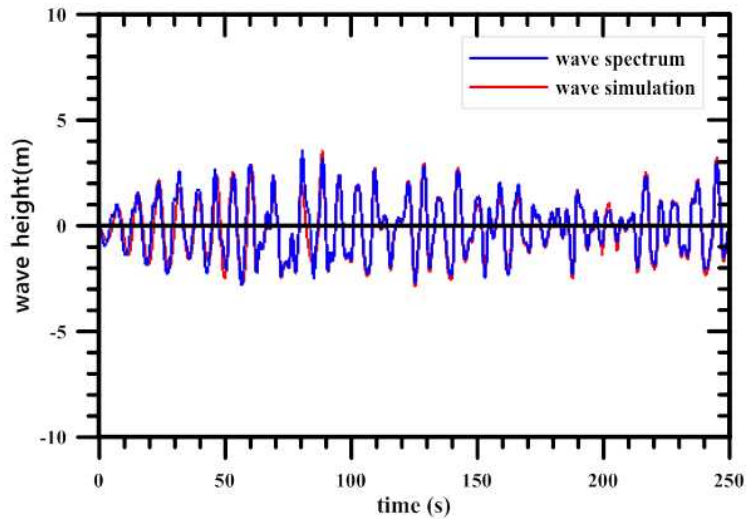
Fig. 13 Air and seawater model for irregular wave and wind simulation

Fig. 14에서는 Fig. 12(a)의 파주기 8.0sec의 유의파고 4.5m의 불규칙 파랑 스펙트럼을 가한 경계에서 500.0m 위치에서의 자유 수면에서의 부이(buoy)의 상하 위치응답과 스펙트럼과의 비교를 보여주고 있다. Fig. 15는 Fig. 12(a)의 15m/sec의 불규칙 강풍 스펙트럼에 대한 거리 500.0m에서의 자유 수면으로부터의 높이 10.0m에서의 바람속력 응답과 불규칙 스펙트럼과를 비교해 보여주고 있다. 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

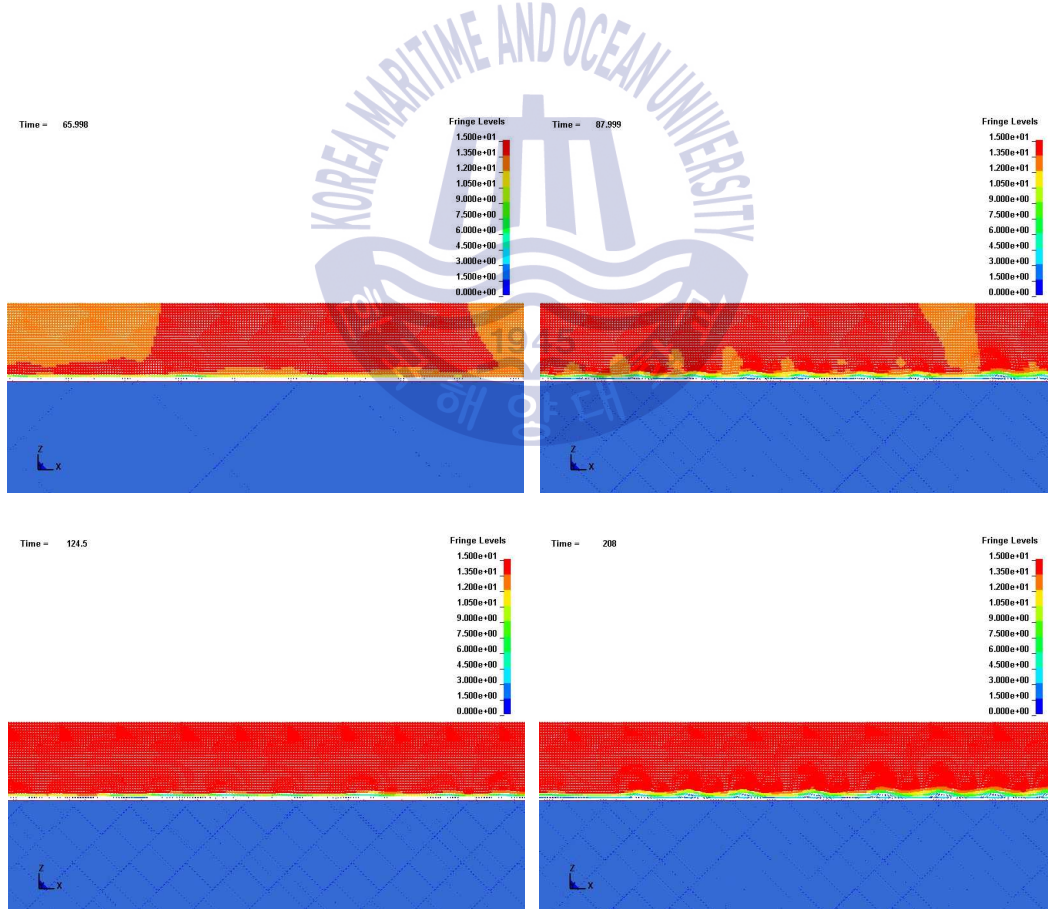


(a) irregular wave simulation response behavior

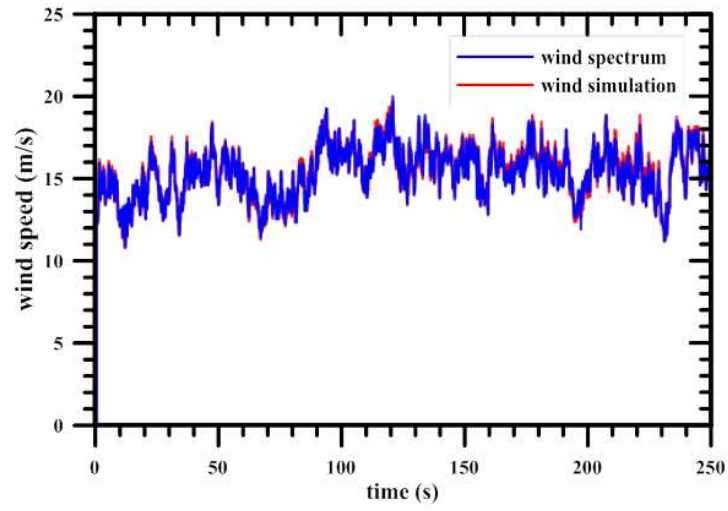
Fig. 14 Irregular wind simulation response (continued)



(b) comparison of irregular wave simulation response with spectrum
 Fig. 14 Irregular wind simulation response



(a) irregular wind simulation response behavior
 Fig. 15 Irregular wind simulation response (continued)

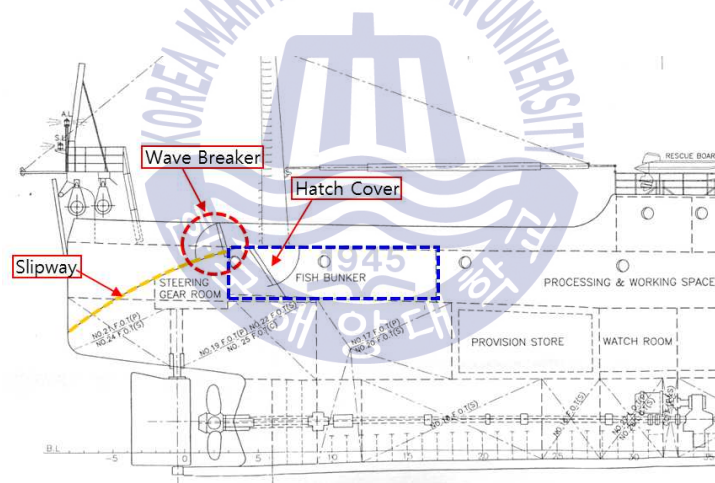


(b) comparison of irregular wind simulation response with spectrum
 Fig. 15 Irregular wind simulation response

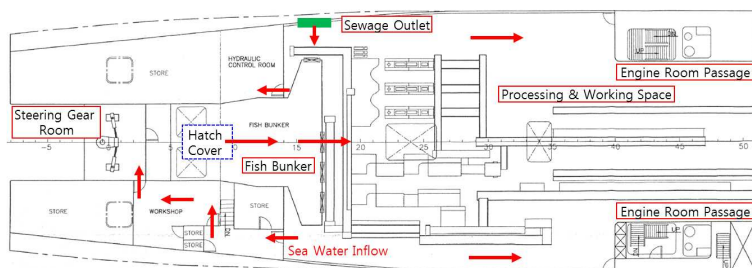


3. 선형 및 구조도 분석과 실선 모델링

사고선박의 선형, 선체 구조도 및 일반배치도 등의 도면과 복원성 계산서 등을 활용하였고, 해양안전심판원이 침몰사고 후 사고원인 규명을 위해 조사한 심문자료 등을 참조하였다. 또한 원양어선의 유사선 MYS YEAKTERINY과 자매선인 ORION-505를 부산 감천항 부두에 방선하여 선체구조 및 배치를 철저히 확인하였다. Fig. 16은 주요 선미 구조도와 어획물처리실의 해수유입 개구부(opening)와 내부경로의 개략도를, Fig. 17은 유사선과 자매선의 사진들을 통하여 사고선박의 전반적인 구조도와 그들의 특징을 보여주고 있다.



(a) stern construction profile



(b) seawater inflow openings and paths in working space

Fig. 16 Schematic diagram of main stern structure and seawater inflow openings and paths



(a) scenery of stem and stern



(b) stern slipway and wave breaker door



(c) outside and inboard scenery of hatch cover

Fig. 17 Overall structures and their characteristics of pelagic fishing vessel
(continued)



(d) scenery of wave breaker door, hatch cover and deck strip

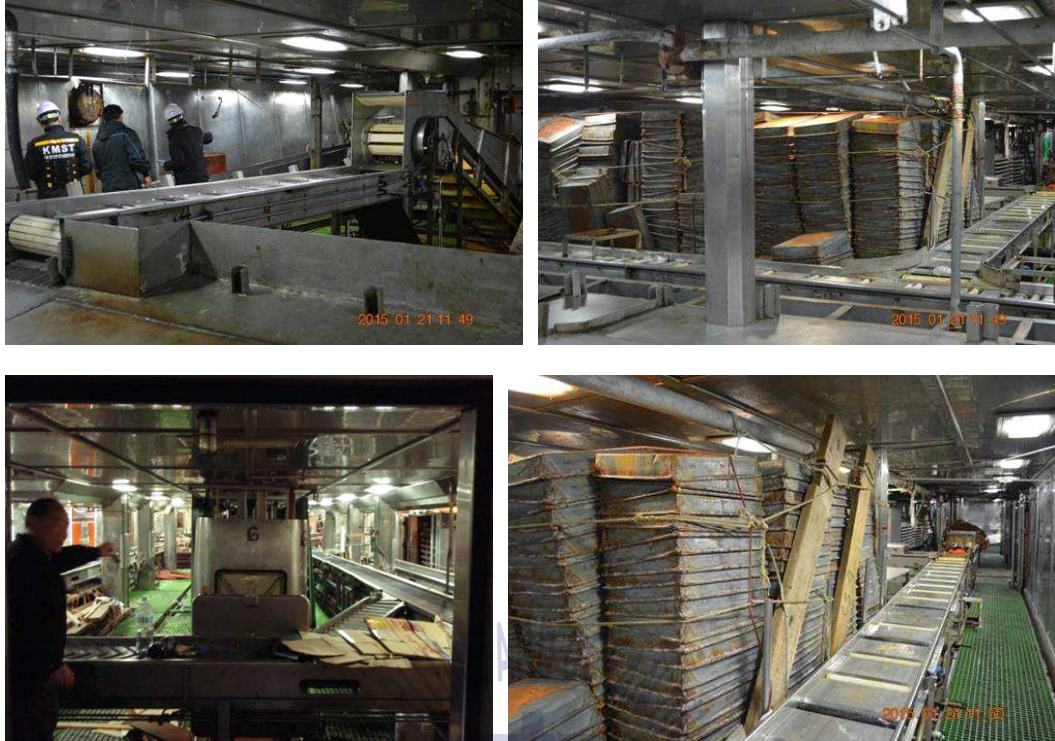


(e) inboard and outside scenery of sewage outlet



(f) scenery of fish bunker

Fig. 17 Overall structures and their characteristics of pelagic fishing vessel
(continued)



(g) scenery of processing and working space



(h) scenery of hatch cover of working space and fish hold

Fig. 17 Overall structures and their characteristics of pelagic fishing vessel

선박도면 및 복원성 계산서를 확인하면 원양어선의 주요 용적은 다음과 같다. 어창 1,106.5m³, 연료유 768.08m³, 윤활유 17.80m³, 청수 138.78m³, 평형수 123.90m³. 침몰사고 당일의 어획량 잔량은 315.2톤(적재 가능량 42%, 총 적재량 750톤), 연료유는 527.7톤, 윤활유는 5.1톤, 청수는 100.0톤, 어구 및 선원 등은 94.0톤 정도로 추정하였다. Fig. 18에 원양어선의 주요 용적 탱크와 적재상태를 요약하여 나타내었고, 만재상태와 침몰사고 당시의 중량 상황을 비교하였다. 침몰사고 당시 만재상태에 비하여 약 154.5톤 정도 중량이 더 크게 나타났다.

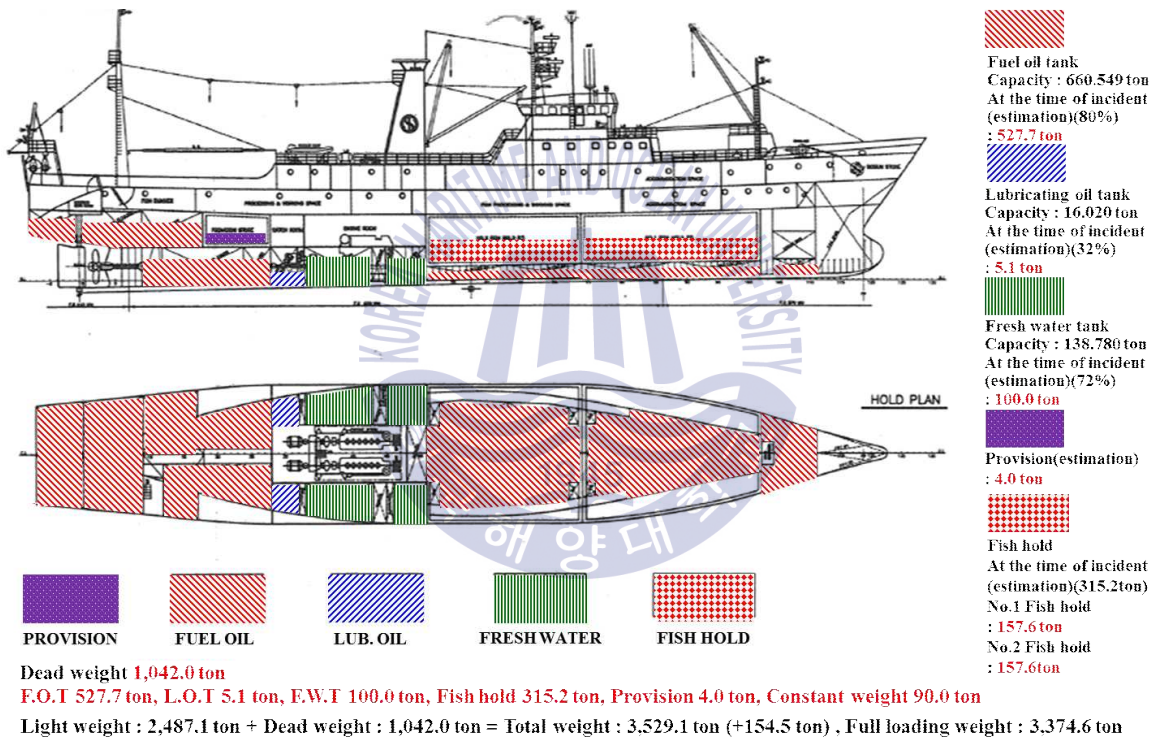
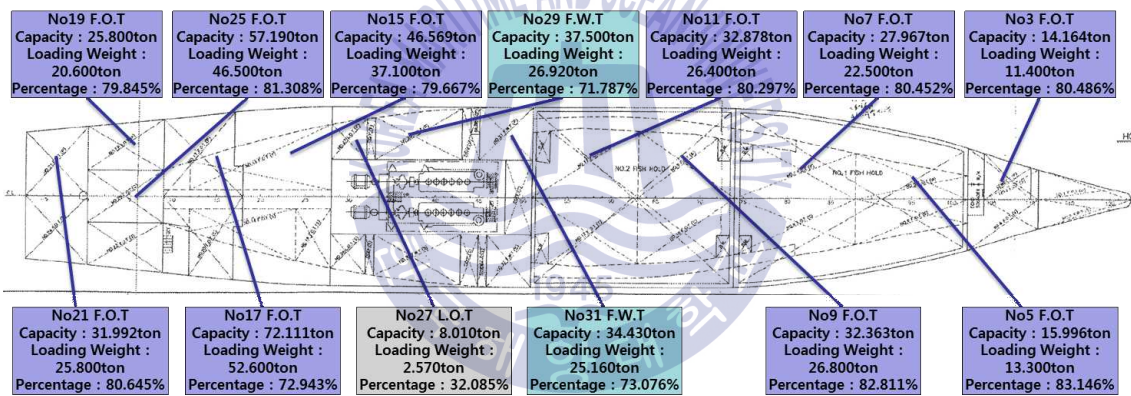


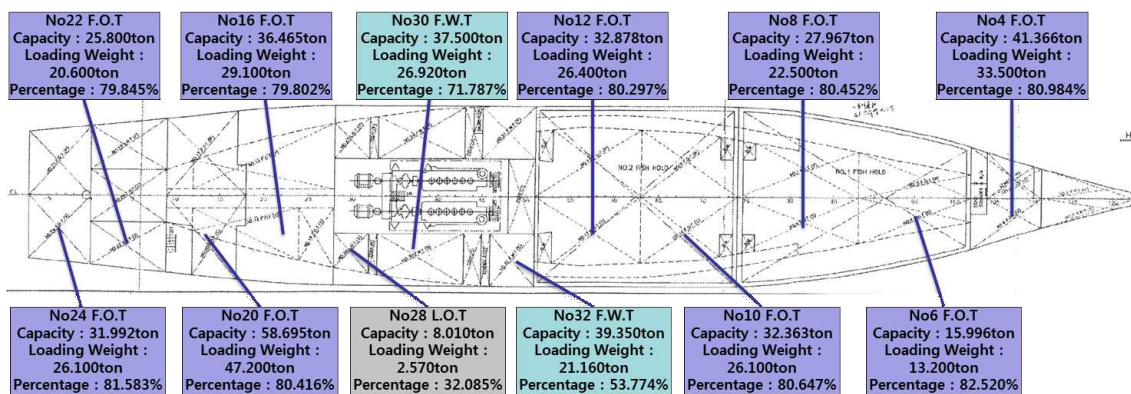
Fig. 18 Dead weight distribution on day of sinking accident

Fig. 19는 주요 용적탱크의 총 적재중량과 침몰사고 당일 각각 적재된 중량과 크기 및 비율을 나타내었고, Fig. 20은 실제 사고선박의 전선 모델링에서의 각 탱크에 적재되어 있는 연료유 등의 중량물들을 보여주고 있다. 연료유 및 청수 등의 유체는 MMALE인 유체로 모델링되어 국부적으로 슬로싱이 발생되도록 하였으며, 총 용적의 90% 이내인 경우에는 복원성 계산에서도 자유 수면효과의 영향을 고려하였다.

본 사고선박의 침수·침몰 시뮬레이션을 위한 전선 모델링은 선체 전체의 형상, 경하상태의 중량분포, 복원성 계산서에서의 각 탱크들의 용적들을 분석하고 해수가 침수할 개구부와 선내 전과되어가는 내부 구조들을 충분히 파악하여 수행하였다. Fig. 21과 22는 각각 사고선박의 전선 및 종단면의 모델링과 사고선박의 해수의 외부 유입구 및 내부 구조의 모델링을 보여주고 있다. Fig. 23과 24는 각각 피쉬병커의 구조 모델링과 오물배출구의 내부 및 외부구조 모델링을 보여주고 있다. 오물배출구는 선내 제2갑판(second deck) 상에서 0.8m 상단에 놓여있다고 알려져 있으나 자매선 ORION-505호의 방선과 사진으로 확인한 바에 의하면 갑판 상에 놓여 있었던 것으로 확인하였다. 해치커버의 크기는 길이 2.5m × 폭 1.8m이다.

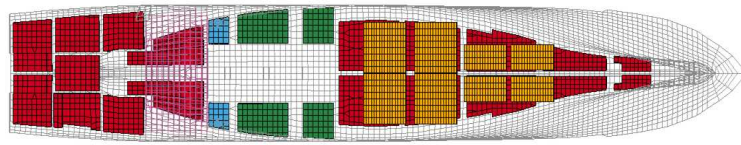


(a) port

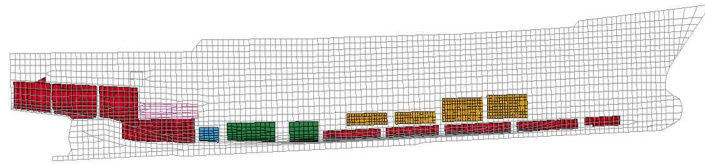


(b) starboard

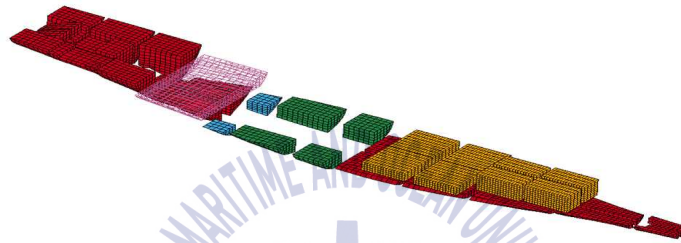
Fig. 19 Total weight and deadweight of main tank



(a) plan view



(b) elevation view



(c) iso view

Fig. 20 Deadweight modeling of fuel oil and fish catch

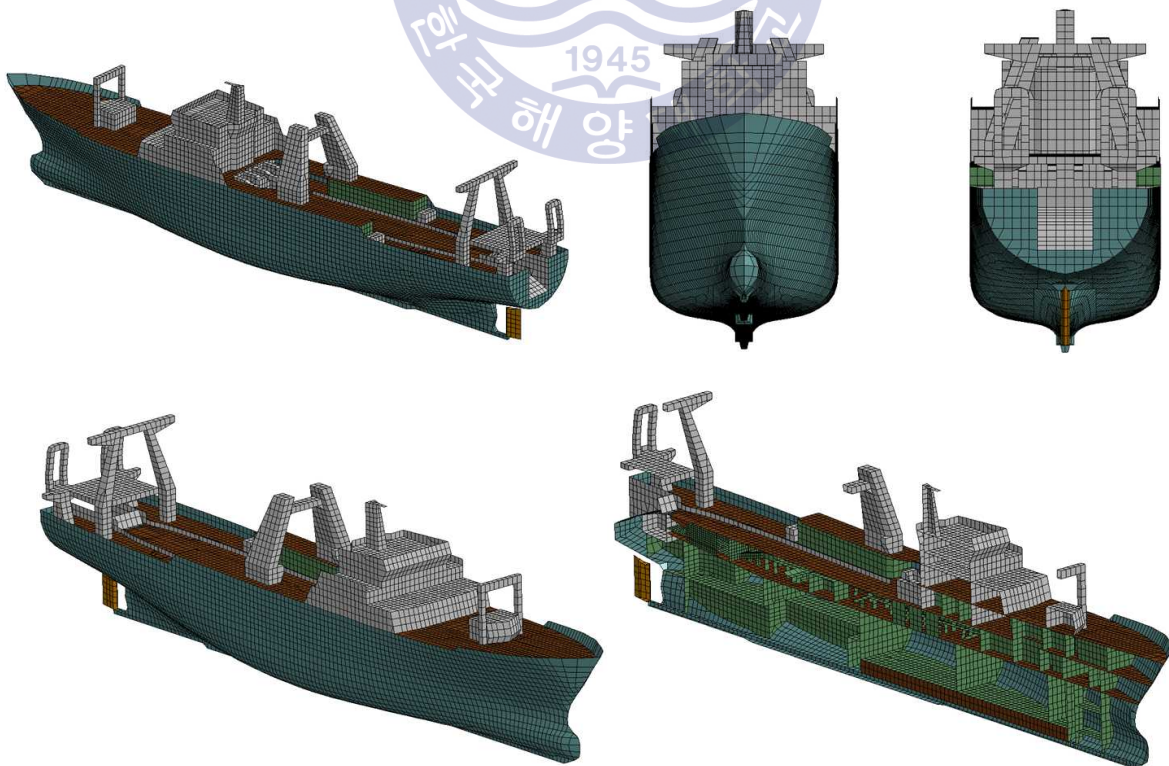


Fig. 21 Full-scale ship and longitudinal section modeling

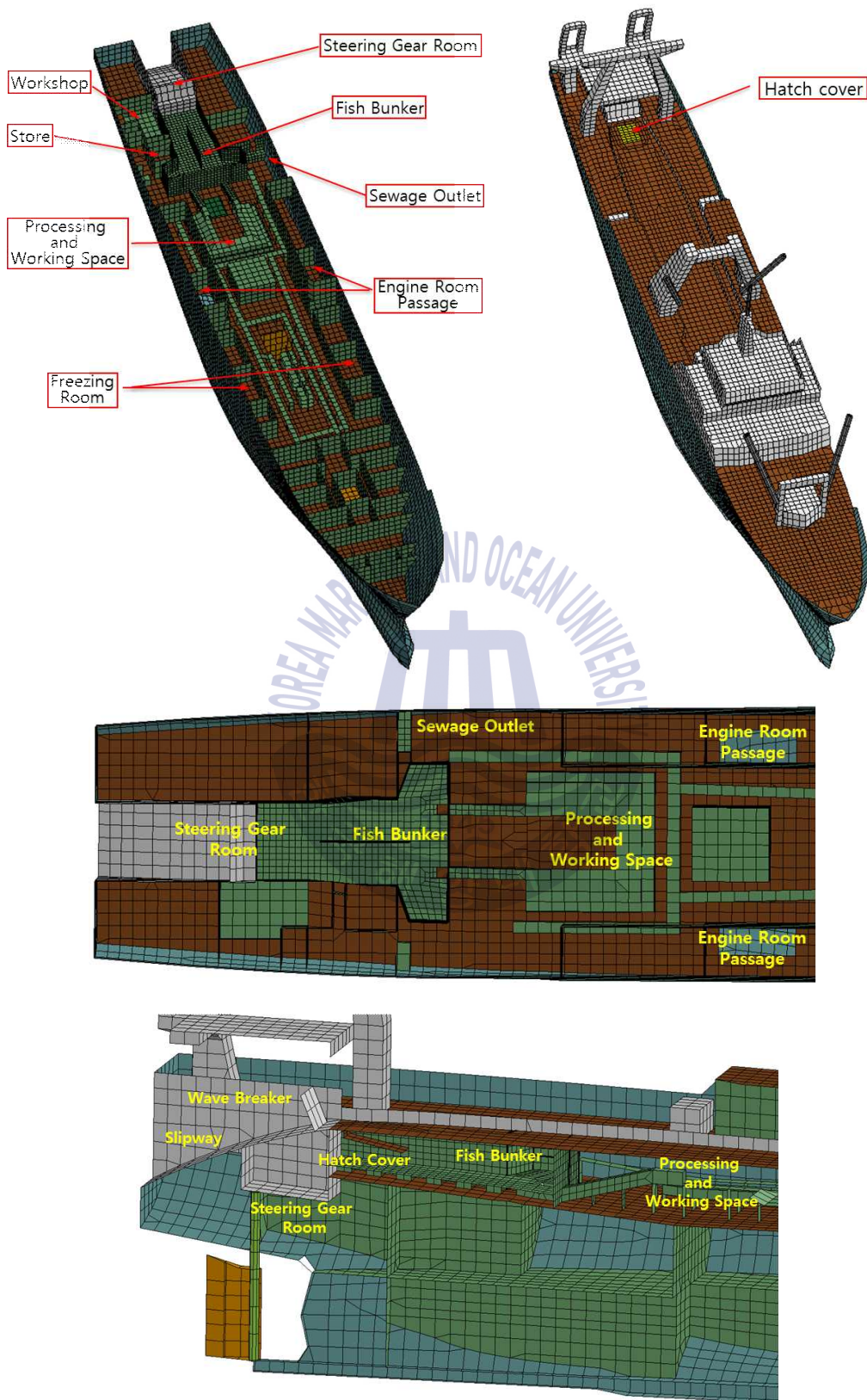


Fig. 22 Modeling of sea water inflow openings and flow paths

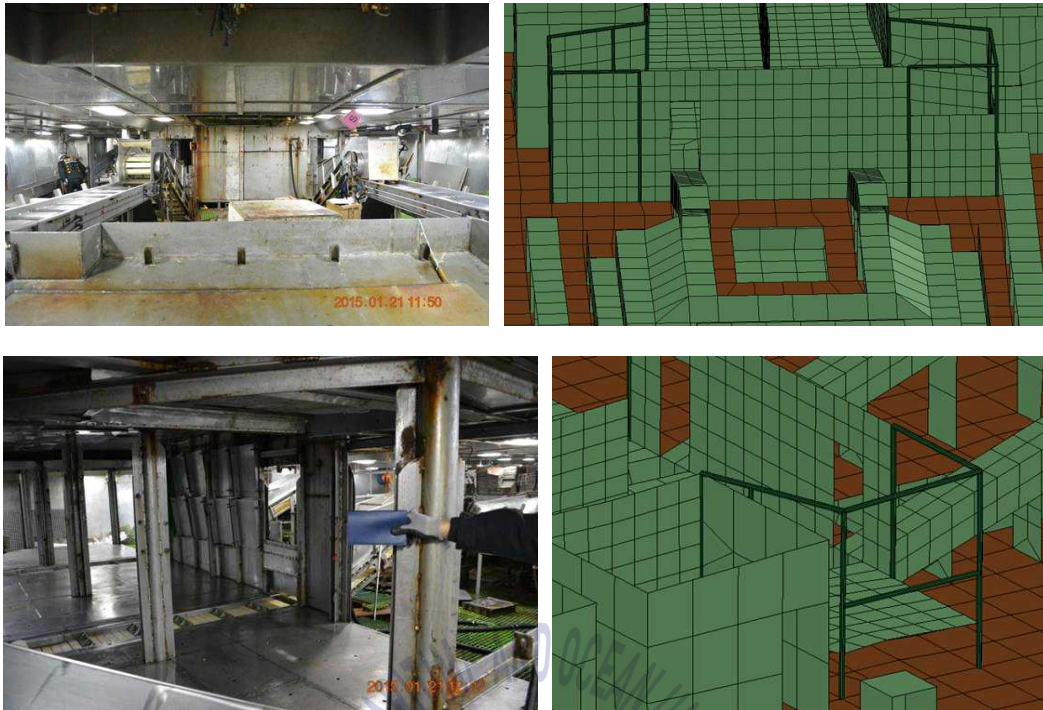


Fig. 23 Fish bunk structure modeling

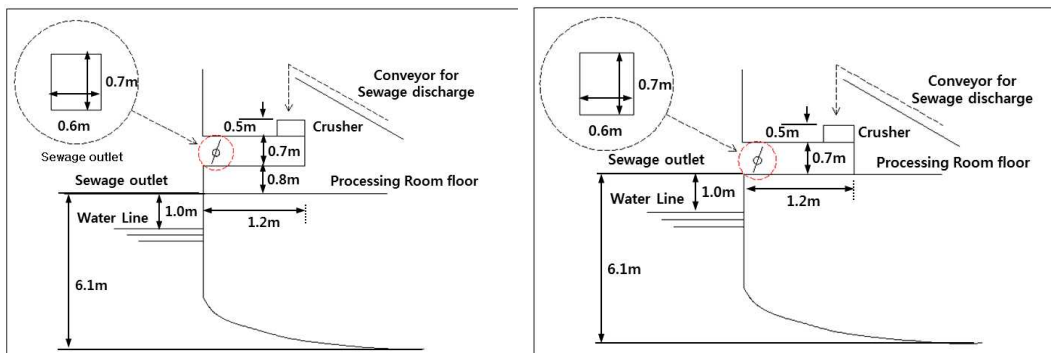
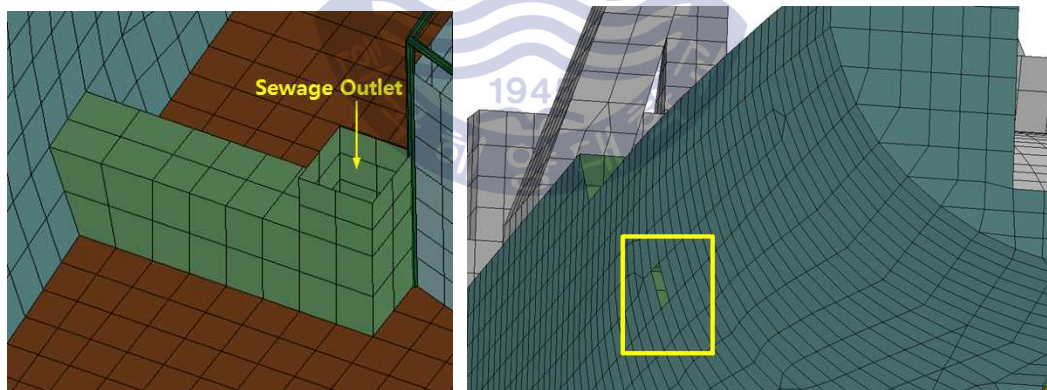


Fig. 24 Sewage internal and external structure modeling

4. 실선 침수·침몰 시뮬레이션 시나리오 및 유체 모델링

사고선박의 실선 침수·침몰 시뮬레이션 시나리오를 현실성 있게 설정하기 위하여 침몰사고 경과와 해양안전심판원이 침몰사고 원인을 규명하기 위해 조사한 질문조사 등의 조사자료 등을 충분히 분석하고, Fig. 11과 Table 1에서의 선박의 선수방향, 유의파고, 파도 방향, 파도주기 및 풍속 등을 고려하였다.

피항하던 중 타기실에 해수가 대량 유입되어 조타기 불능상태에서 표류하게 되는 상황에서 선미 트림된 사고선박이 강풍과 거친 파도를 받는 해상상태에서는 어느 정도 일정한 각도를 유지하게 된다. 이를 위하여 Fig. 25에서와 같이 좌현 선미각도 각각 45° , 60° 및 80° 의 강풍과 파도를 받는 해상상태에서의 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 표류 시뮬레이션을 수행하여 추정하였으며, 선수동요(yawing) 거동과 응답을 각각 Fig. 26과 Fig. 27에 보여주고 있다.

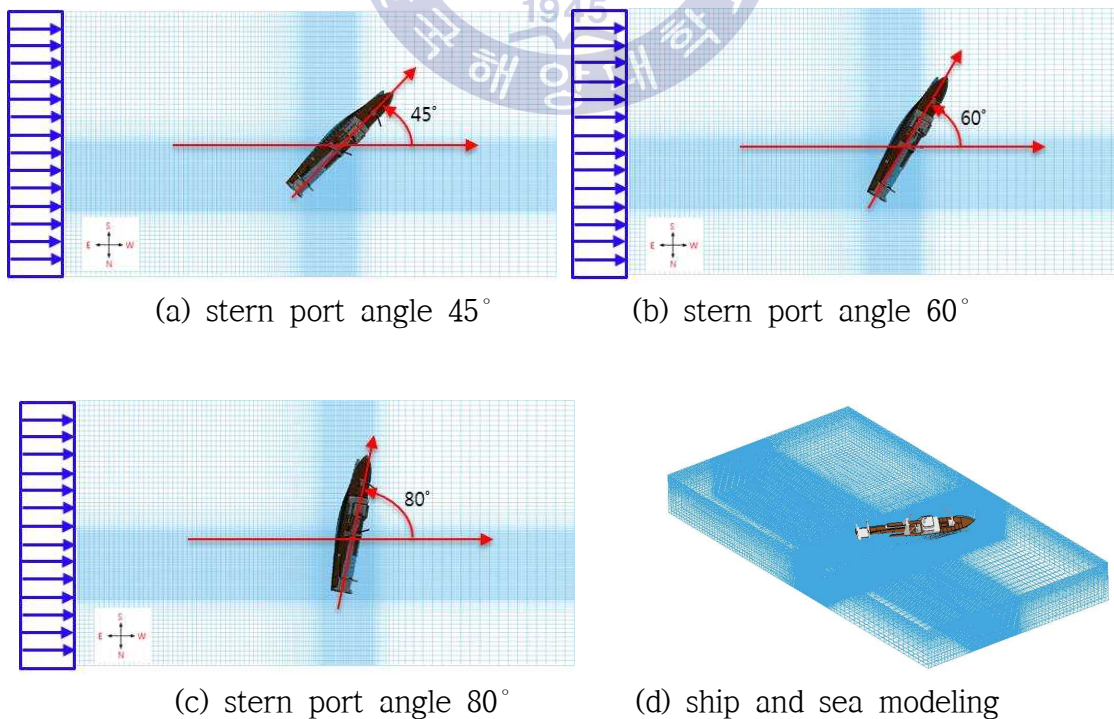
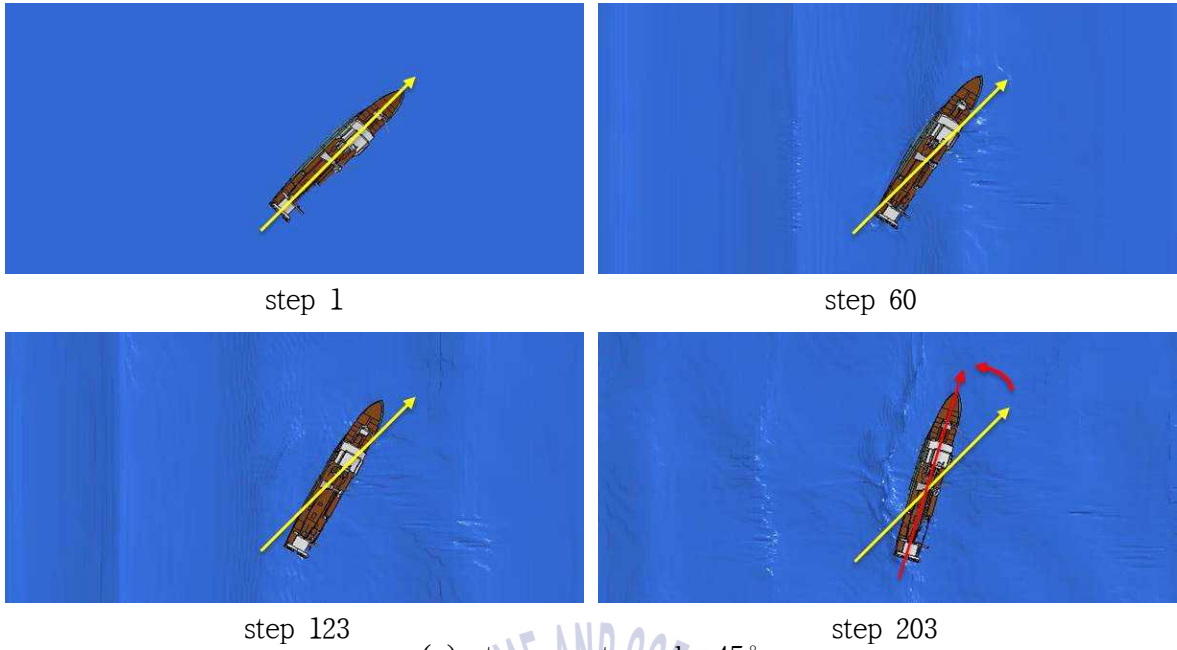
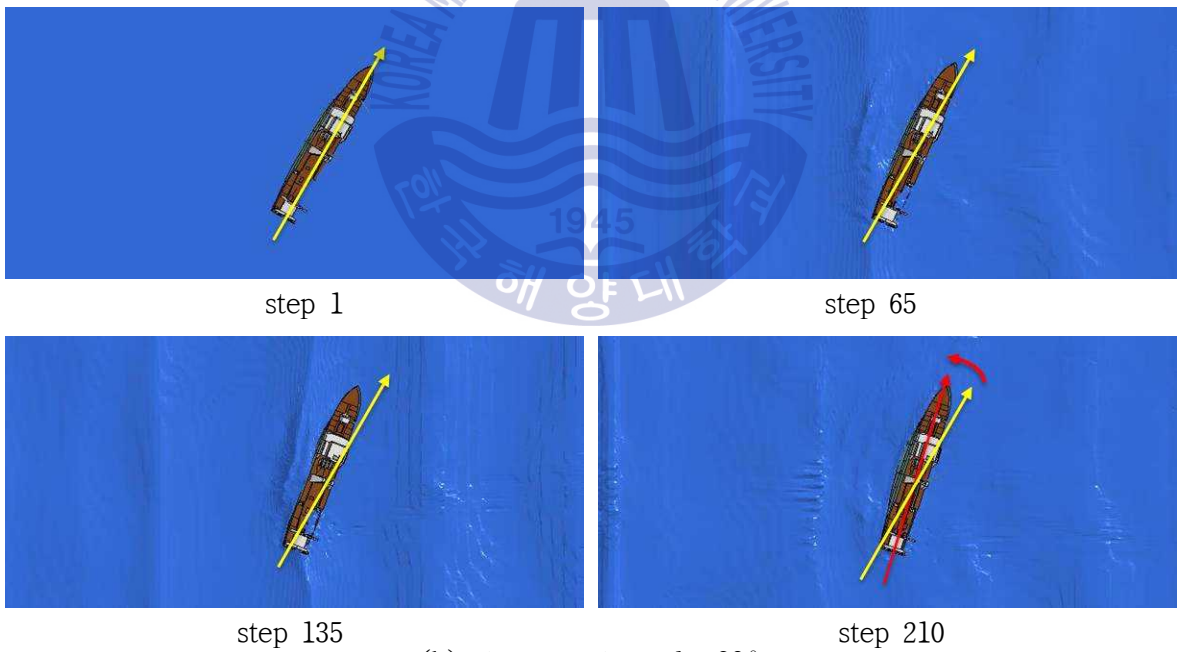


Fig. 25 Full-scale ship drifting simulation scenarios, ship and sea modeling



(a) stern port angle 45°



(b) stern port angle 60°

Fig. 26 Full-scale ship drifting simulation behavior according to stem wave direction (continued)

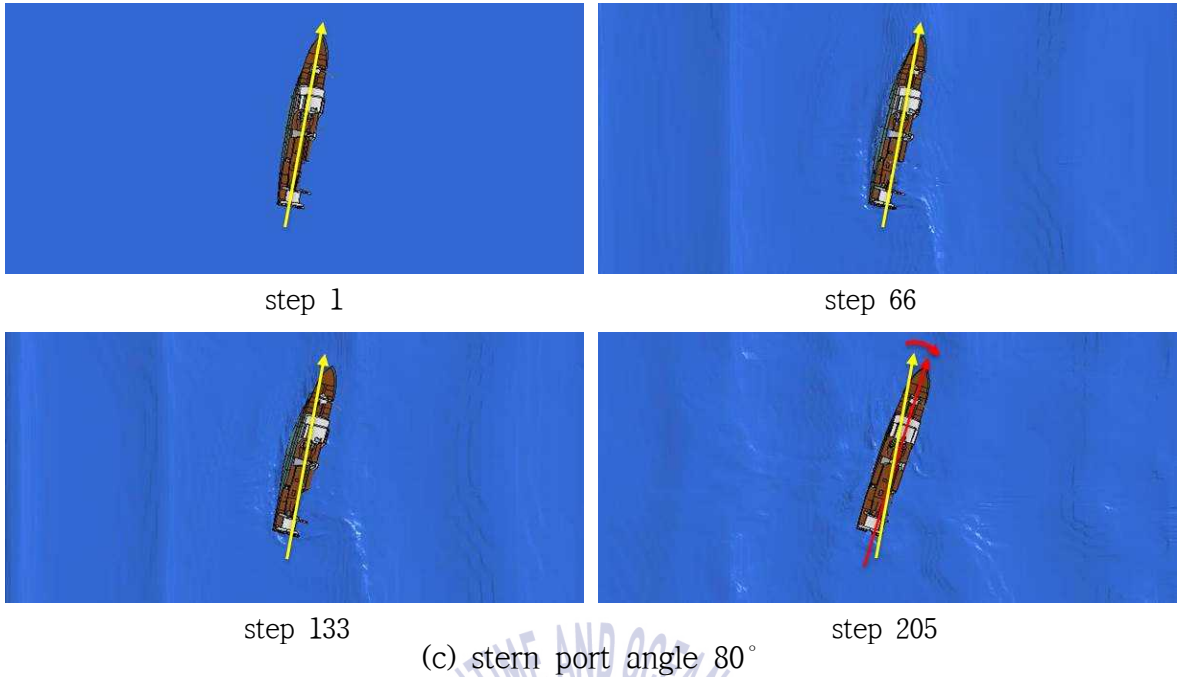


Fig. 26 Full-scale ship drifting simulation behavior according to stem wave direction

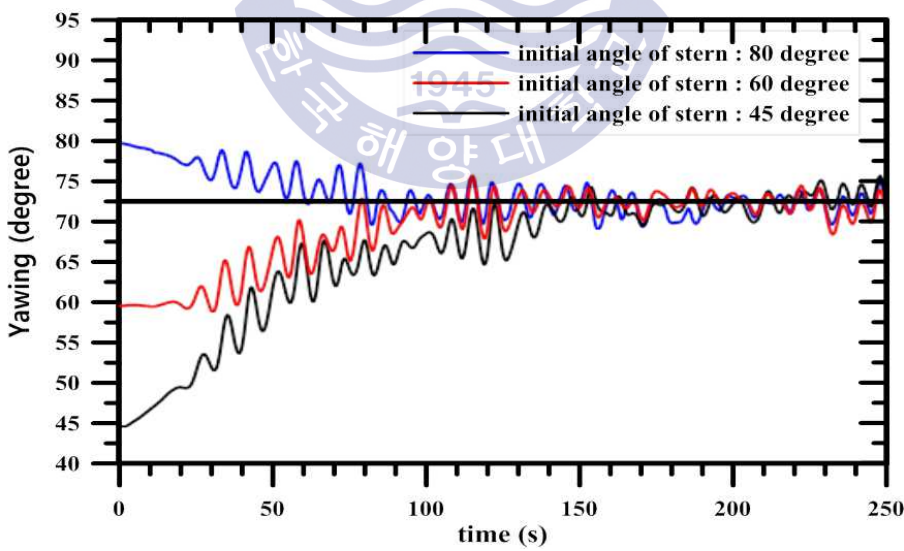


Fig. 27 Yawing angle response in ship drifting simulation according to stem direction

조타기 불능상태에서 표류하게 되는 사고선박은 다양한 초기 선수방향에서 Fig. 29 및 30에서와 같이 시간이 경과하면 불규칙 해상상태에서 좌현 선미각

도 약 72.5° 각도로 수렴하게 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 사고선박이 크게 선미 트림되어 있어 큰 파도에 의해 이 각도로 수렴하는 것으로 판단된다. 표류중인 상황에서는 좌우현 약 72.5° 선미각도의 파도를 만나는 침수·침몰 시뮬레이션 시나리오를 고려하였다.

FSI 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 이용한 사고선박의 침수·침몰 시뮬레이션은 방대한 계산시간과 용량이 요구되므로 어획물을 투하한 후 피항 시의 과정과 어획물과 연료유를 좌현으로 이동시킨 후 침몰 시까지의 과정으로 크게 2가지 시나리오를 설정하고 각 단계별로 어획물처리실 뿐만 아니라 기관실과 어창에도 해수가 유입되어 침몰하는 과정을 구체적으로 세분화하였다. 이러한 시뮬레이션의 시나리오는 수행 가능하여야 하고 시나리오의 설정이 현실 가능하도록 다음과 같이 설정하였다.

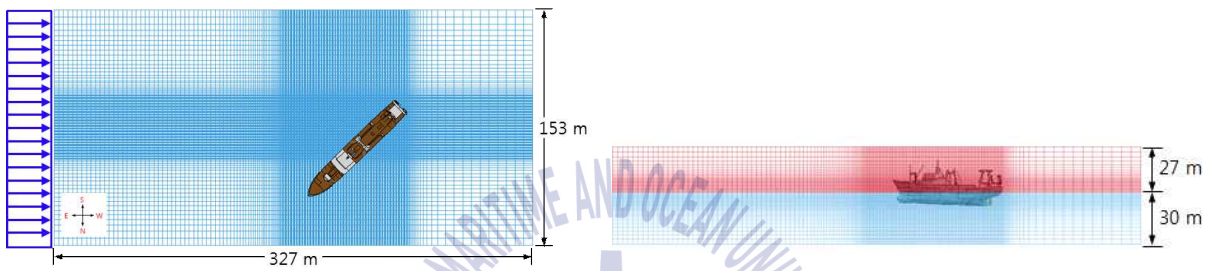
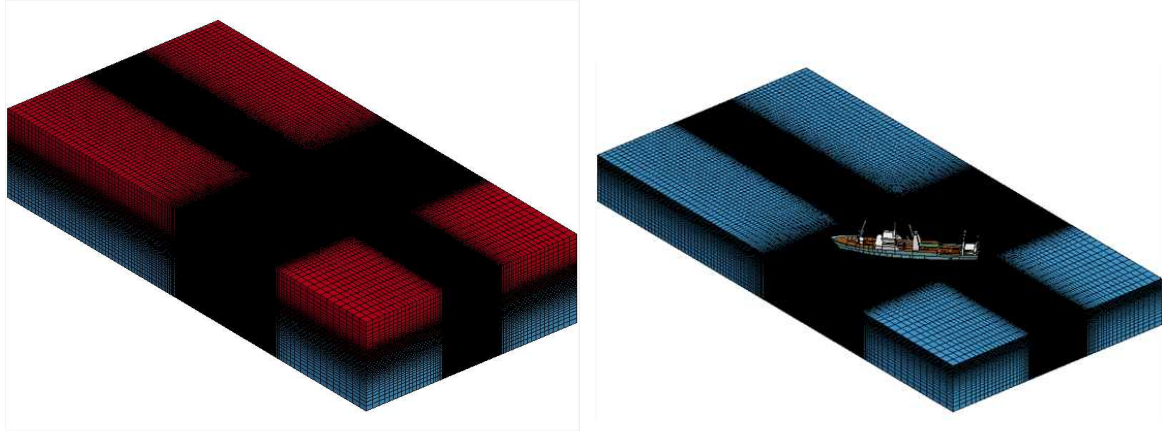
- Case 1 : 과도한 조업활동과 기상악화로 인해 어획물 투하 시 선내로 해수가 다량 유입되었고, 피항 시 좌현횡파에 의해 우현 횡경사가 발생한 경우
 - Case 1-0 : 어획물 투하 시 다량의 해수가 유입되었고 해치커버를 불완전하게 폐쇄한 상태로 선체가 우현 선수각도 44° 로 우현횡파를 받으며 항해하는 경우
 - Case 1-1 : 나바론으로 피항하기 위하여 선회하여 좌현 선미각도 20° 로 좌현횡파를 받으면서 항해하던 중 나무칸막이가 파손되어 어획물과 해수가 어획물처리실로 쏟아지고 지속적으로 해수가 유입되는 경우
 - Case 1-2 : 좌현 선미각도 20° 의 좌현횡파를 받으며 피항하면서 지속적으로 해수가 유입되어 선체가 20° 정도까지 우현으로 경사하고 타기실에도 다량의 해수가 유입되는 경우
 - Case 1-3 : Case 1-2에서 조타기가 작동 불능되어 좌현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 받으면서 표류 중 불완전하게 폐쇄된 해치커버와 덮개가 파손된 오물배출구를 통해 지속적으로 해수가 유입되어 선체가 $25\sim 30^\circ$ 정도까지 우현으로 경사하는 경우

- Case 1-4 : Case 1-3에 이어 좌현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 받으면서 표류 중 해치커버와 오물배출구를 통해 지속적으로 해수가 유입되어 선체가 35° 정도까지 우현으로 경사하고 배수펌프를 이용하여 해수를 배출하여 더 이상 우현으로 경사하지 않는 경우
- Case 2 : 연료유, 어획물을 좌현 측으로 일부 이동하고, 배수펌프로 해수를 배출하여 일시적인 평형상태에서 선체를 선회하여 우현횡파에 의해 좌현으로 급경사가 발생하여 침몰한 경우
 - Case 2-0a : 연료유, 어획물을 좌현 측으로 일부 이동하고, 배수펌프로 해수를 배출하고 좌현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 받으면서 선체는 일시 평형 유지
 - Case 2-0b : 좌현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 받으면서 일시적으로 평형상태를 유지하다가 오물배출구를 통해 지속적으로 해수가 유입되면서 선체가 우현으로 약간 경사하는 경우
 - Case 2-1 : Case 2-0에 이어 선체를 좌선회하여 우현 선미각도 72.5° 로 우현횡파를 받으면서 선체가 좌현으로 경사하기 시작하여 $5^\circ \sim 10^\circ$ 정도까지 경사한 경우
 - Case 2-2 : Case 2-1에 이어 선체가 우현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 계속 받으면서 해수가 계속 유입되어 선체가 좌현으로 $30^\circ \sim 35^\circ$ 정도로 경사가 발생하고 선미가 침하하는 경우
 - Case 2-3 : Case 2-2에 이어 선체가 우현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 받으면서 해수가 계속 유입되어 선체가 계속 좌현으로 $45^\circ \sim 50^\circ$ 정도로 경사가 발생하고 선미가 크게 침하하는 경우
 - Case 2-4 : Case 2-4에 이어 선체가 우현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를 계속 받으면서 해수가 더욱 크게 유입되어 선체는 좌현으로 60° 이상으로 경사하고 선미부터 침하하는 경우
 - Case 2-5 : Case 2-4에 이어 선체가 우현 선미각도 72.5° 로 좌현횡파를

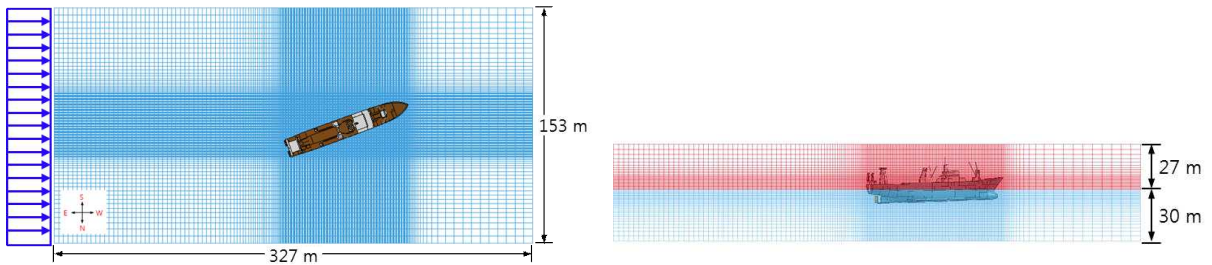
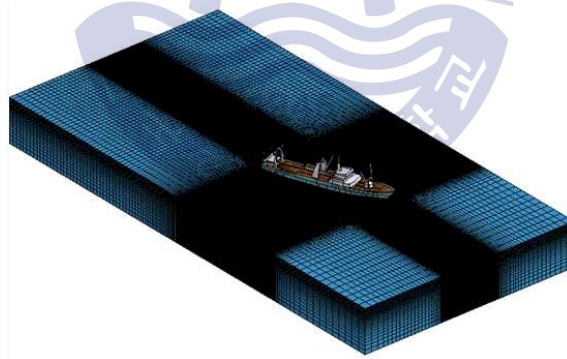
계속 받으면서 해수가 더욱 크게 유입되어 선체는 좌현으로 90° 정도로 경사하고 전선이 완전 침몰하는 경우

본 사고선박의 FSI 해석기법을 사용한 침수·침몰 시뮬레이션은 앞에서 언급한 바와 같이 공기와 해수에 MMALE 기법을 적용한다. Fig. 28(a)는 공기를 포함하거나 제거한 Case 1-0의 해수 및 전선모델과 공기와 해수영역의 크기를 보여주고 있으며 우현 선수각도 44°의 우현회파를 받고 있는 것을 보여주고 있다. Fig. 28(b)~(d)는 각각 Case 1-1~Case 1-4 시나리오의 해수와 전선모델을, Fig. 29는 각각 Case 2-0a와 2-0b 및 Case 2-1~Case 2-5 시나리오의 해수와 전선모델을 보여주고 있다.



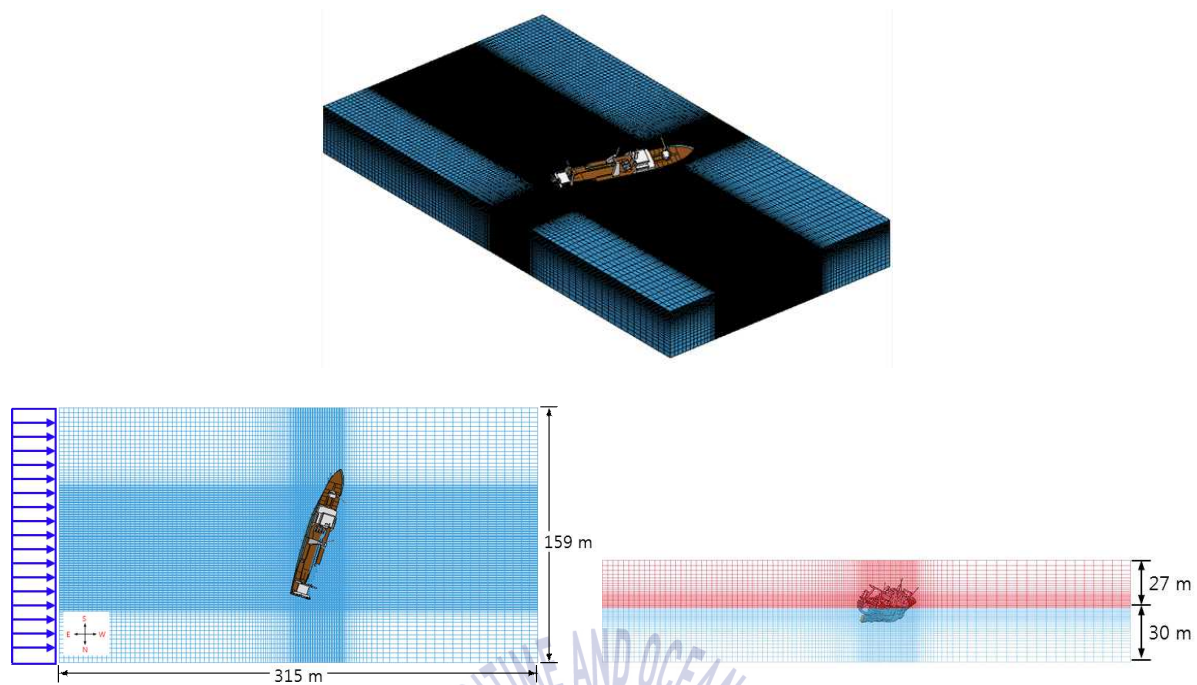


(a) Case 1-0

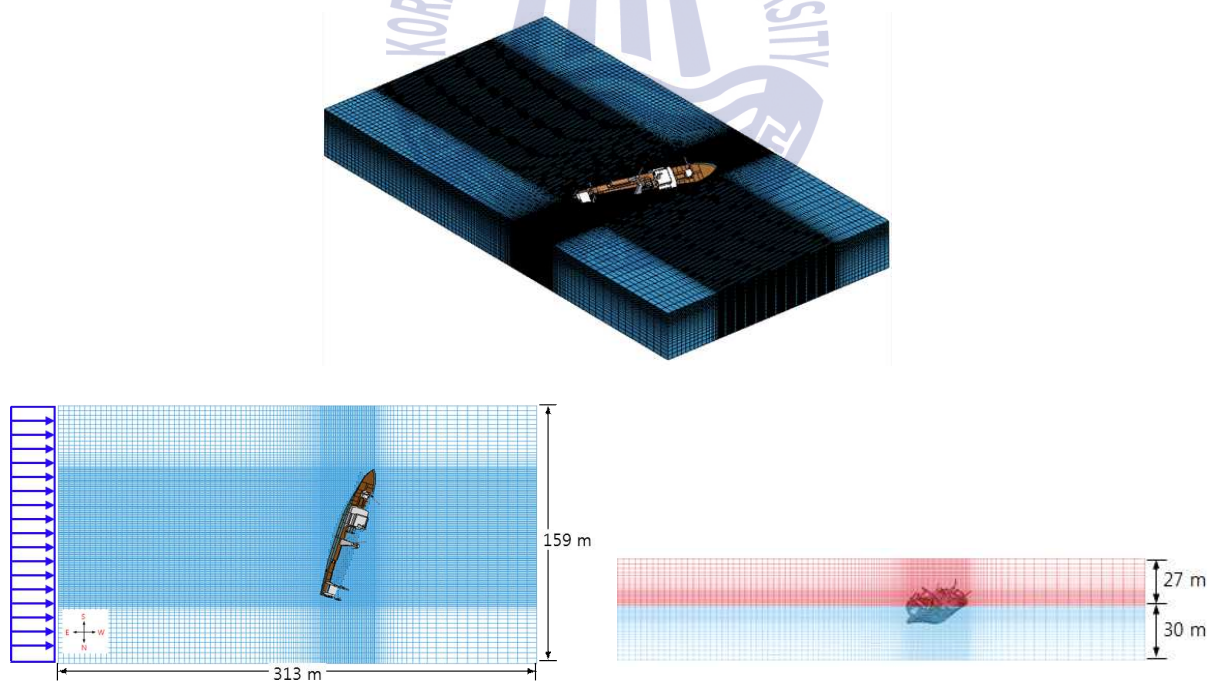


(b) Case 1-1 and Case 1-2

Fig. 28 Sea water and ship model in Case 1 scenario (continued)

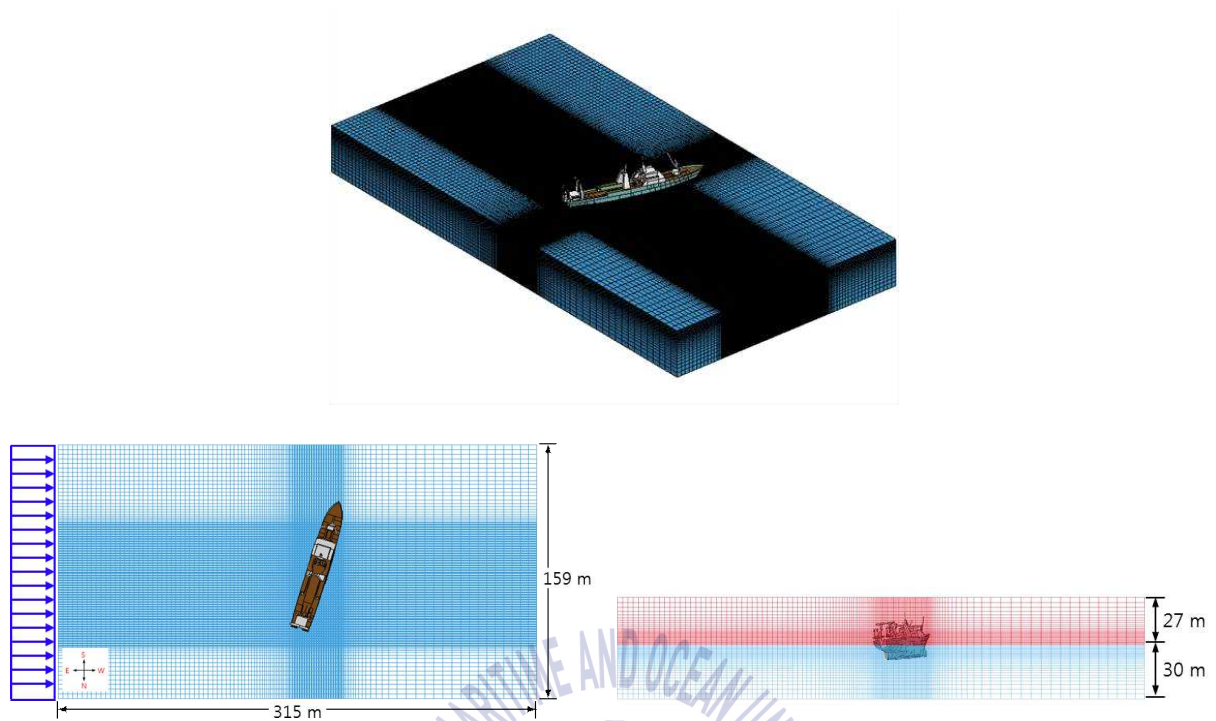


(c) Case 1-3

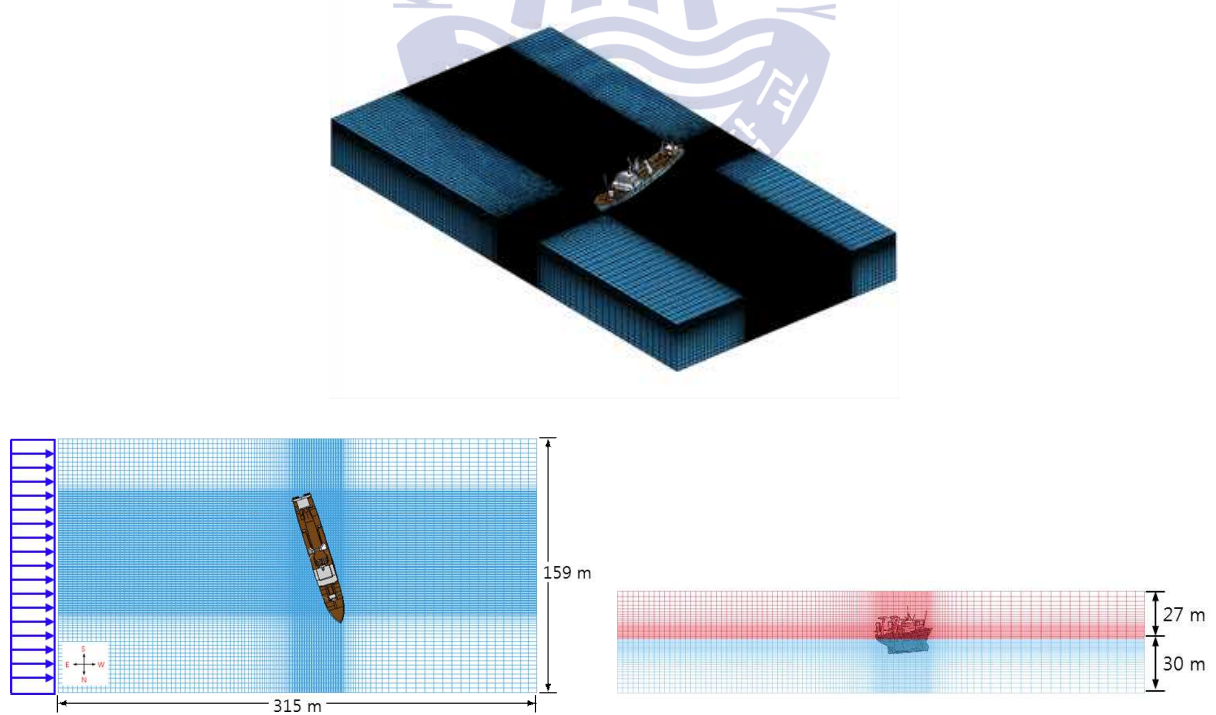


(d) Case 1-4

Fig. 28 Sea water and ship model in Case 1 scenario

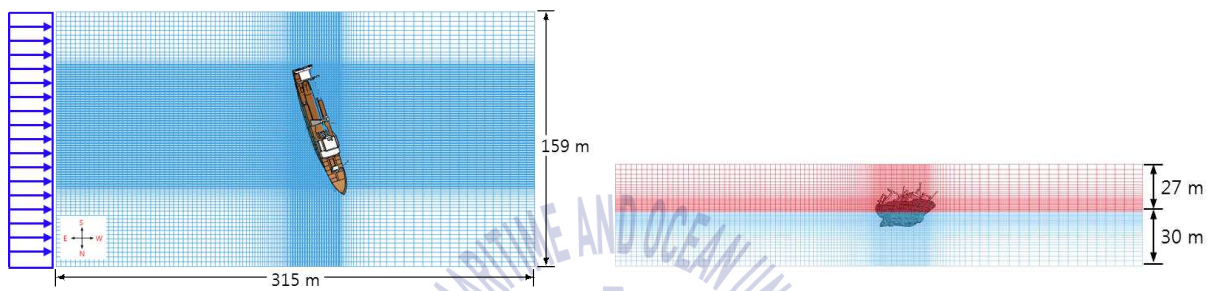
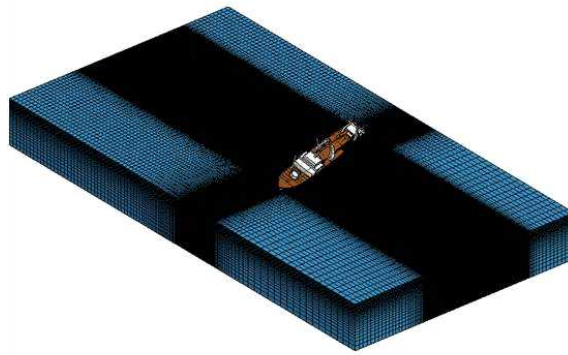


(a) Case 2-0a and Case 2-0b

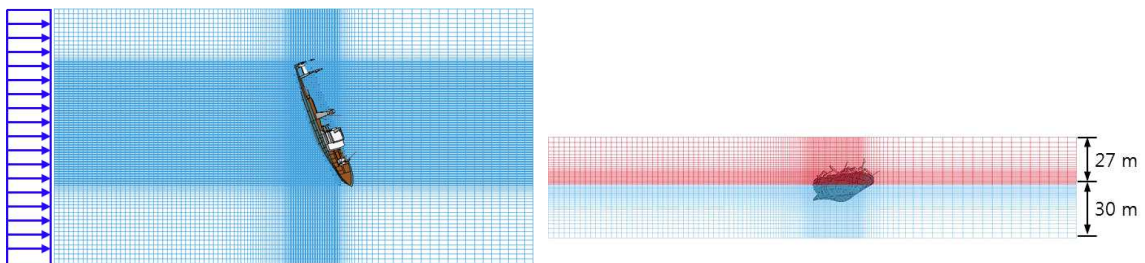
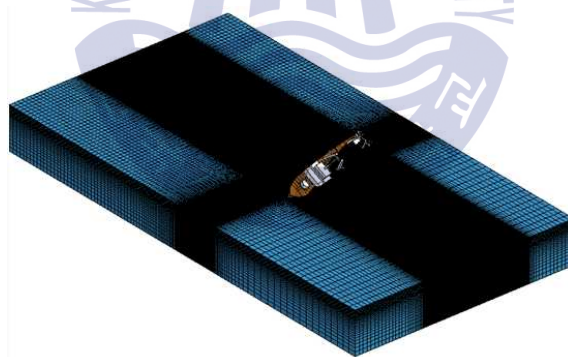


(b) Case 2-1

Fig. 29 Sea water and ship model in Case 2 scenario (continued)

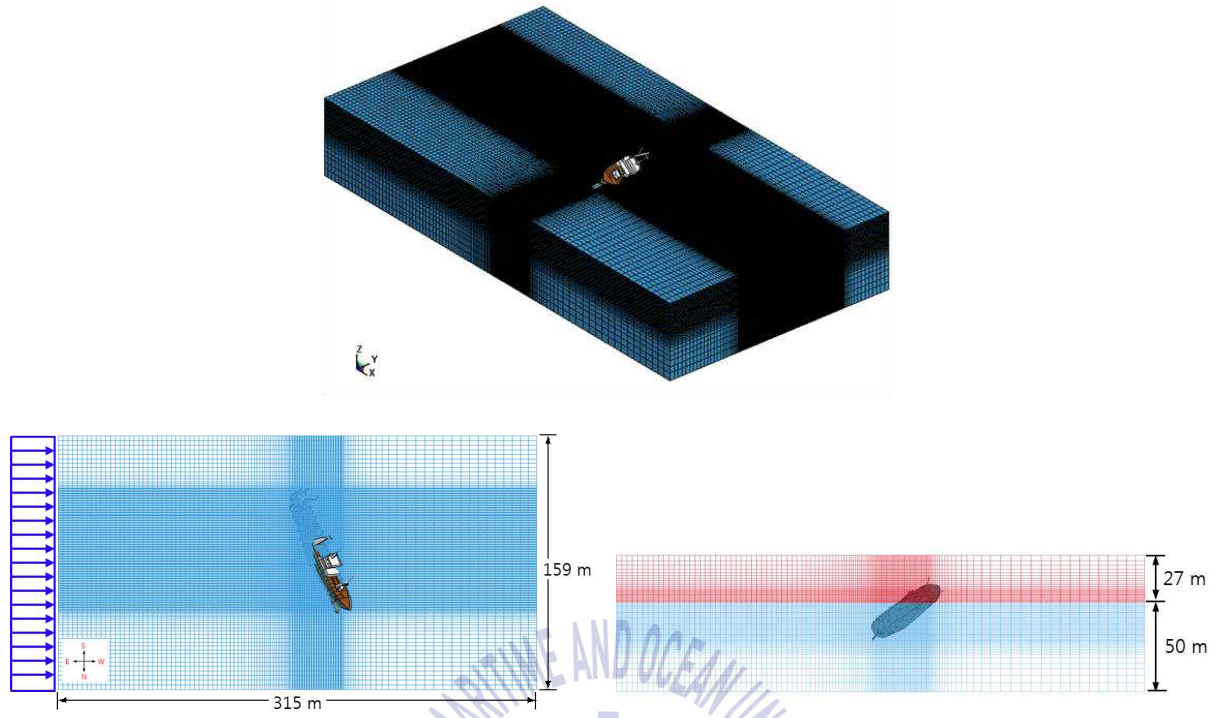


(c) Case 2-2

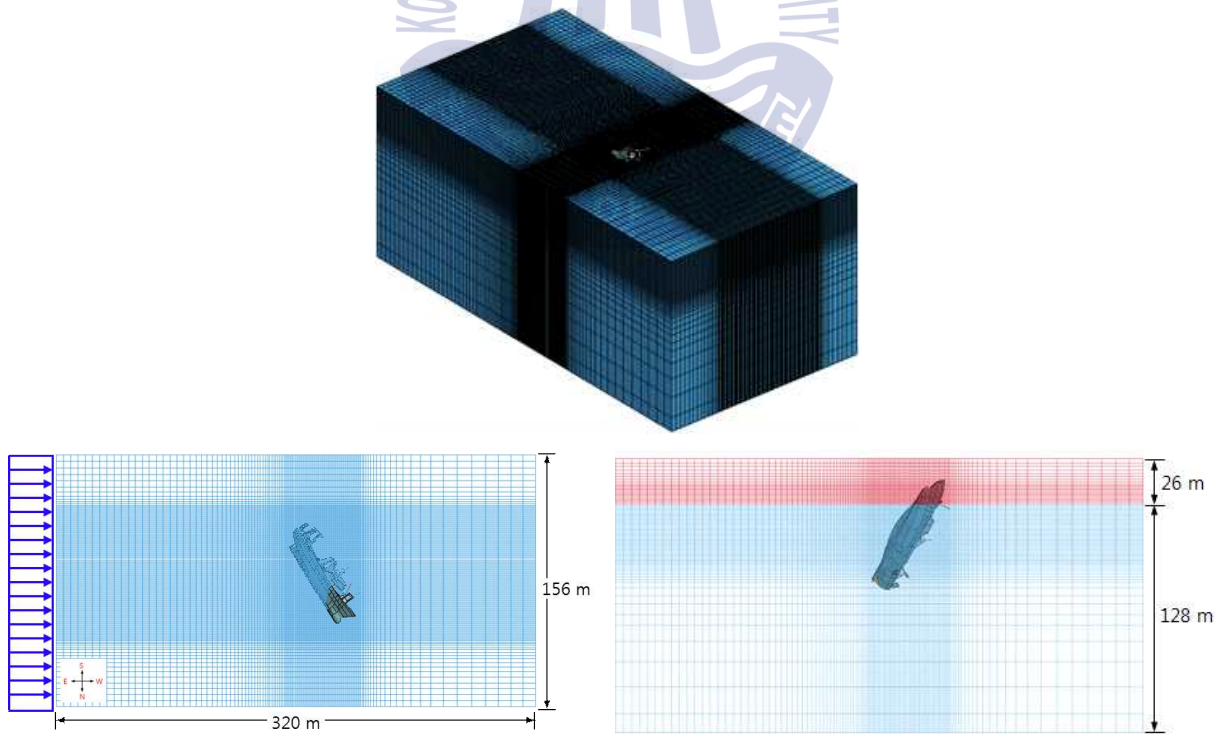


(d) Case 2-3

Fig. 29 Sea water and ship model in Case 2 scenario (continued)



(e) Case 2-4



(f) Case 2-5

Fig. 29 Sea water and ship model in Case 2 scenario

사고선박의 선형, 선체 구조도 및 일반배치도 등의 도면과 선박 복원성 계산서 등을 통한 선박의 선형과 중량분포를 분석하고 어획량 및 연료유 등의 중량 분포도 파악하여, 유체정역학적 특성치 프로그램(hydrostatic characteristic program)과 유체-구조 연성 해석기법의 실선 부양(floating) 시뮬레이션을 수행하여 정확히 추정하였다. Fig. 30은 사고 직전 사고선박의 중심, 부심, 부면심 및 선수미 흘수 등의 유체정역학적 특성치를 보여주고 있으며, Table 2는 KST-SHIP 복원성 계산과 추정치를 비교해 주고 있으며 정확히 추정하고 있음을 알 수 있다.

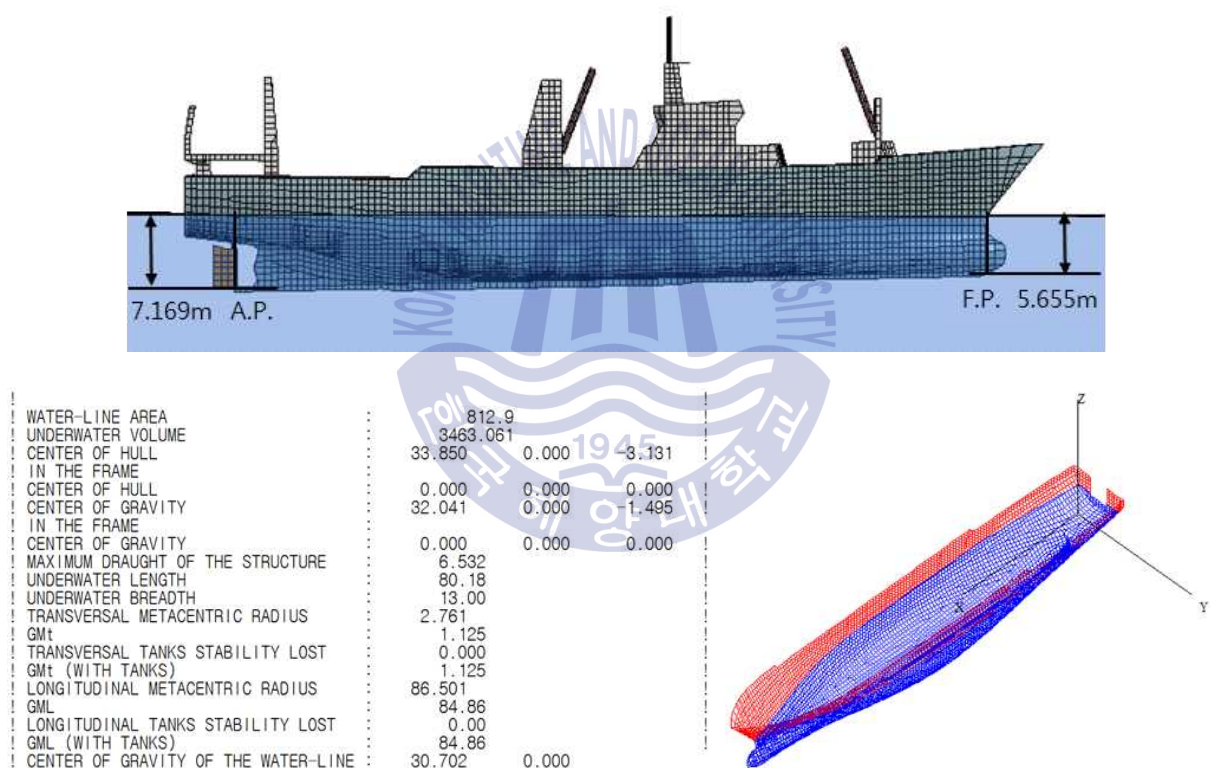
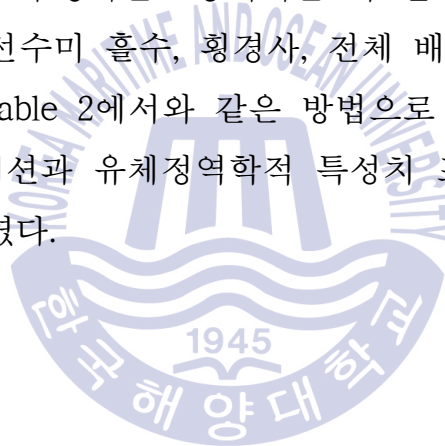


Fig. 30 Floating simulation and hydrostatic characteristic calculation of fishing vessel before accident

Table 2 Comparison of hydrostatic characteristics of fishing vessel before accident with stability calculation

equivalent draft	6.532 m		
item	KST-SHIP stability calculation	hydrostatic characteristic program calculation	error
displacement	3,550.000 ton	3,549.638 ton	-0.362 ton (-0.01 %)
volume	3,463.415 m ³	3,463.061 m ³	-0.354 m ³ (-0.01 %)
LCG (from AP)	32.030 m	32.041 m	0.011 m (0.03 %)
GM	1.129 m	1.125 m	-0.004 m (-0.35 %)
KMT	6.166 m	6.162 m	-0.004 m (-0.06 %)

본 장에서 설정한 시나리오에 따라 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하는 5장에서는 각 단계 별 사고선박의 선체 거동에 따른 초기 자세인 선수미 흘수, 횡경사, 전체 배수량, 선내 해수의 구획별 침수량 등을 Fig. 30과 Table 2에서와 같은 방법으로 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 부양 시뮬레이션과 유체정역학적 특성치 프로그램 계산결과를 비교 검토하여 정확히 추정하였다.



5. 실선 침수·침몰 시뮬레이션

사고선박의 침수 및 침몰하는 과정을 4장에서 언급한 2가지 시나리오로 나누어 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 31에서의 생존자들의 진술서에서와 같이 어획물의 양망 후 해치커버를 열고 투하하면서 다량의 해수도 유입되었고 Fig. 32에서와 같이 불완전하게 해치커버를 닫았을 때의 상황인 시나리오 Case 1-0 및 1-1의 초기상태를 추정하였다. 외부로부터 해수가 유입되는 개구부는 해치커버와 오물배출구로서 각 시나리오에 따라 어획물처리실에 해수가 유입되고 각 구획내의 해치와 출입문 등의 내부 개구부를 통하여 침수되었다. 각 시나리오에 따른 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 선체의 횡요 및 종요운동의 응답을 이용하여 각 구획 내의 침수량을 추정하였다.

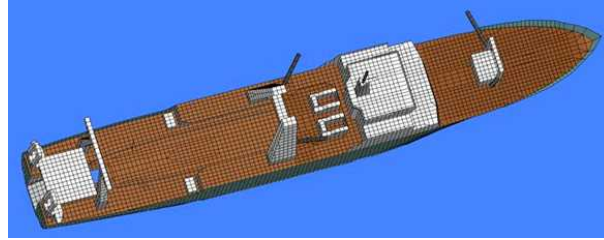
문 : 제501오룡호가 침몰하게 된 과정을 말씀해주세요.

답 : 피쉬폰드 해치커버를 개방하고 어획물을 쏟아 부으려고 하는데 파도가 많이 넘쳐서 자신의 종아리(약 50CM) 정도까지 물이 차오른 후, 어획물고기와 같이 모두 피쉬폰드 해치로 들어갔고 올랐는데 모두 피쉬, 그 후로도 약 10회 정도 물이 넘어와서 많은 양의 해수가 모두 피쉬폰드 해치문으로 들어갔습니다. 많은 양의 해수가 해치커버로 유입된 후 해치커버를 닫았습니다. 해치커버를 닫았을때, 저는 갑판에 있을 때 선체가 약간 우현으로 기울었고,

문 : 피쉬병커를 통하여 해수가 들어왔을 때 처리실의 어느 위치까지 침수되었나요?

답 : 피쉬병커와 처리실 사이의 칸막이로부터 선수 방향으로 약 7~8미터 되는 지점까지 침수되었습니다.

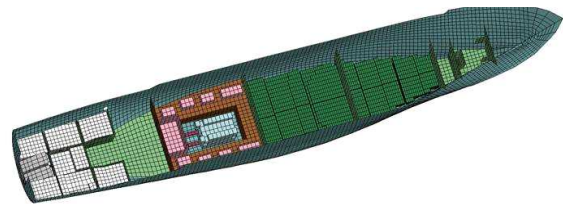
Fig. 31 Survivor statements



(a) overall view of fishing vessel



(b) processing and working space



(c) engine room and fishing hold

Fig. 32 Initial seawater inflow state in Cases 1-0 and 1-1

Table 3은 각 시나리오 별 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 사고선박의 해치커버와 오물배출구를 통하여 어획물처리실, 어창 및 기관실 등의 각 구획에 유입된 해수 침수량과 침수율을 요약하였다. 그리고 각 시나리오 별 해치커버와 오물배출구를 통한 파주기 당 해수 유입량과 총 유입량을 분석하여 Table 4에 요약하였다. 또한 양망 완료 후 어획물을 투하하고 불안전하게 폐쇄된 피쉬병커의 해치커버로 해수가 유입되기 시작한 12:00 경부터 침몰사고에 이르는 17:19 경까지의 각 시나리오 별 선체 횡요(rolling) 응답은 Fig. 33에, 해수 유입량 및 추세 곡선은 Fig. 34에 나타내었다.

Table 3 Sea water inflow amount into compartments according to scenario

Case (heeling angle)		fish bunker 98ton (96m ³)	working space 921ton (899m ³)	engine room 298ton (291m ³)	fishing hold 1 483ton (471m ³)	fishing hold 2 651ton (635m ³)	total amount (increment) (ton)	flooding time
1-0	much sea water inflow during catch drop after hauling on net	50 (51%)	30 (3%)	-	-	-	80	11:35
	under starboard side wave with stem starboard angle 44°(0°)	50 (51%)	30 (3%)	-	-	-	80	12:00
1-1	8° starboard side heeling after avoidance commencement(0°)	50 (51%)	30 (3%)	-	-	-	80	12:06
	8° starboard side heeling after avoidance commencement(5°)	85 (87%)	45 (5%)	-	-	-	130(+50)	12:13
	starboard side heeling after wood partition broken(8°)	22 (23%)	128 (14%)	-	-	-	150(+20)	12:15
1-2	20° starboard side heeling under port side wave(10°)	23 (24%)	157 (17%)	-	-	-	180(+30)	12:18
	20° starboard side heeling under port side wave(20°)	25 (26%)	265 (28%)	-	-	-	290(+110)	12:30
1-3	25°~30° starboard side heeling under port side wave(25°)	26 (27%)	315 (34%)	-	24 (5%)	30 (5%)	395(+105)	12:40
	25°~30° starboard side heeling under port side wave(30°)	49 (50%)	354 (38%)	-	30 (6%)	38 (6%)	471(+76)	12:47
1-4	35° starboard side heeling under port side wave(35°)	64 (65%)	441 (47%)	-	33 (7%)	50 (8%)	588(+117)	12:55
	35° starboard side heeling under port side wave(35°)	64 (65%)	441 (47%)	-	33 (7%)	50 (8%)	588	13:10
2-0	a temporary balance under port side wave moving port side(0°)	8 (8%)	99 (11%)	-	33 (7%)	50 (8%)	195	14:15
	b starboard side heeling under port side wave after balance(3°)	10 (10%)	143 (16%)	-	36 (8%)	53 (8%)	225(+30)	14:40
2-1	5°~10° port side heeling under starboard side wave(5°)	12 (12%)	229 (25%)	-	50 (10%)	79 (12%)	370(+145)	15:15
	5°~10° port side heeling under starboard side wave(10°)	20 (20%)	285 (31%)	-	60 (12%)	90 (14%)	455(+85)	15:27
2-2	30°~35° port side heeling under starboard side wave(30°)	42 (43%)	345 (37%)	72 (24%)	88 (18%)	124 (19%)	671(+216)	16:04
	30°~35° port side heeling under starboard side wave(35°)	55 (56%)	347 (38%)	85 (29%)	100 (21%)	136 (21%)	723(+52)	16:10
2-3	45°~55° port side heeling under starboard side wave(45°)	90 (92%)	409 (44%)	144 (48%)	114 (24%)	150 (23%)	907(+184)	16:24
	45°~55° port side heeling under starboard side wave(55°)	93 (95%)	486 (53%)	199 (67%)	123 (25%)	157 (24%)	1,058(+151)	16:32
2-4	60°~70° port side heeling under starboard side wave(60°)	96 (98%)	547 (59%)	216 (72%)	181 (37%)	210 (32%)	1,250(+192)	16:40
	60°~70° port side heeling under starboard side wave(70°)	96 (98%)	667 (72%)	237 (80%)	231 (48%)	309 (47%)	1540(+290)	16:50
2-5	80° above port side heeling under starboard side wave(90°)	97 (99%)	763 (83%)	265 (89%)	326 (67%)	459 (71%)	1910(+370)	17:02
	sinking down to bottom of sea water	98 (99%)	810 (88%)	279 (94%)	385 (80%)	558 (86%)	2,130(+220)	17:09
	complete flooding	98 (100%)	921 (100%)	298 (100%)	483 (100%)	651 (100%)	2,451(+321)	17:19

Table 4 Sea water inflow amount into exterior openings according to scenario

Case (heeling angle)		flooding time	flooding (ton)	inflow (ton)	duration (minute)	Number (No.)	mean inflow (ton/No.)	hatch cover ton/No. (total ton)	sewage outlet ton/No. (total ton)
1-0	much sea water inflow during catch drop after hauling on net	11:35	80	80	15	112	0.72	0.72 (80.0)	0.00 (0.0)
	under starboard side wave with stem starboard angle 44°(0°)	12:00	80	0	-	-	-	-	-
1-1	8° starboard side heeling after avoidance commencement(5°)	12:13	130	50	7	52	0.96	0.87 (45.3)	0.09 (4.7)
	starboard side heeling after wood partition broken(8°)	12:15	150	20	2	15	1.34	1.20 (17.9)	0.14 (2.1)
1-2	20° starboard side heeling under port side wave(10°)	12:18	180	30	3	22	1.36	1.21 (26.7)	0.15 (3.3)
	20° starboard side heeling under port side wave(20°)	12:30	290	110	12	90	1.21	1.06 (95.0)	0.15 (15.0)
1-3	25°~30° starboard side heeling under port side wave(25°)	12:40	395	105	10	75	1.40	1.12 (84.0)	0.22 (21.0)
	25°~30° starboard side heeling under port side wave(30°)	12:47	471	76	7	52	1.82	1.32 (68.4)	0.50 (7.6)
1-4	35° starboard side heeling under port side wave(35°)	12:55	588	117	8	60	1.95	1.35 (81.0)	0.60 (36.0)
2-0	a temporary balance under port side wave moving port side(0°)	14:15	195	-393	-	-	-	-	-
	b starboard side heeling under port side wave after balance(3°)	14:40	225	30	25	188	0.16	0.00 (0.0)	0.16 (30.0)
2-1	5°~10° port side heeling under starboard side wave(5°)	15:15	370	145	35	262	0.55	0.35 (92.6)	0.20 (52.4)
	5°~10° port side heeling under starboard side wave(10°)	15:27	455	85	12	90	0.95	0.60 (54.0)	0.35 (31.0)
2-2	30°~35° port side heeling under starboard side wave(30°)	16:04	671	216	27	202	1.17	0.67 (135.2)	0.40 (80.8)
	30°~35° port side heeling under starboard side wave(35°)	16:10	723	52	6	45	1.36	0.70 (31.5)	0.45 (20.5)
2-3	45°~55° port side heeling under starboard side wave(45°)	16:24	907	184	14	105	1.75	1.05 (110.3)	0.70 (73.7)
	45°~55° port side heeling under starboard side wave(55°)	16:32	1,058	151	8	60	2.84	1.60 (96.0)	0.92 (55.0)
2-4	60°~70° port side heeling under starboard side wave(60°)	16:40	1,250	192	8	60	3.20	1.80 (108.0)	1.40 (84.0)
	60°~70° port side heeling under starboard side wave(70°)	16:50	1,540	290	10	75	3.86	2.08 (156.0)	1.78 (134.0)
2-5	80° above port side heeling under starboard side wave(90°)	17:02	1,910	370	12	90	4.11	2.21 (198.9)	1.90 (171.1)
	sinking down to bottom of sea water	17:09	2,130	220	7	53	4.15	2.23 (118.2)	1.92 (101.8)
	complete flooding	17:19	2,451	321	10	75	4.28	2.57 (192.8)	1.71 (128.2)
total amount				2,451	-393			1,791.8 (60.0%)	1,052.2 (40.0%)

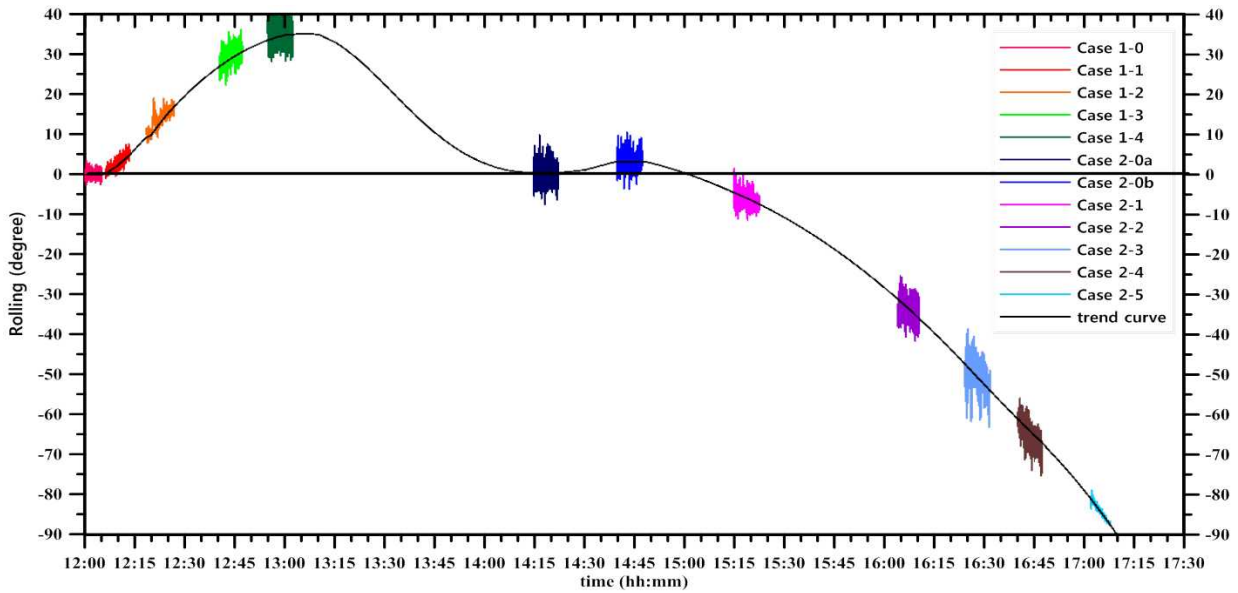


Fig. 33 Rolling response of fishing vessel according to scenario through full-scale flooding and sinking simulation

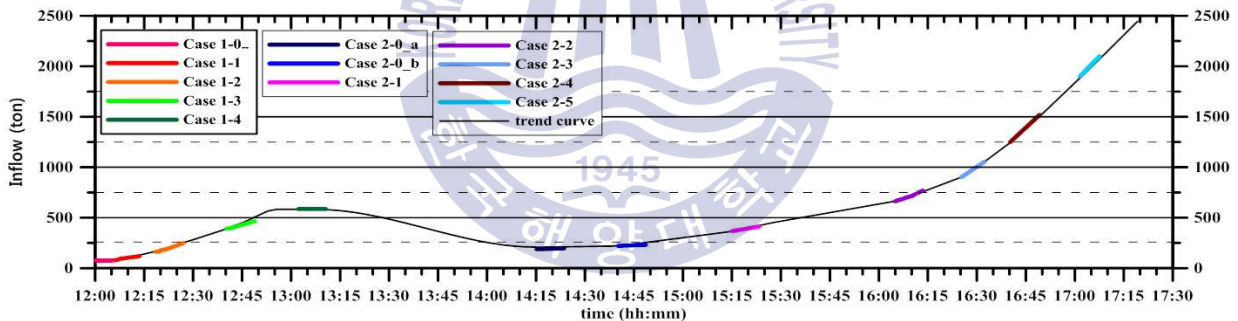


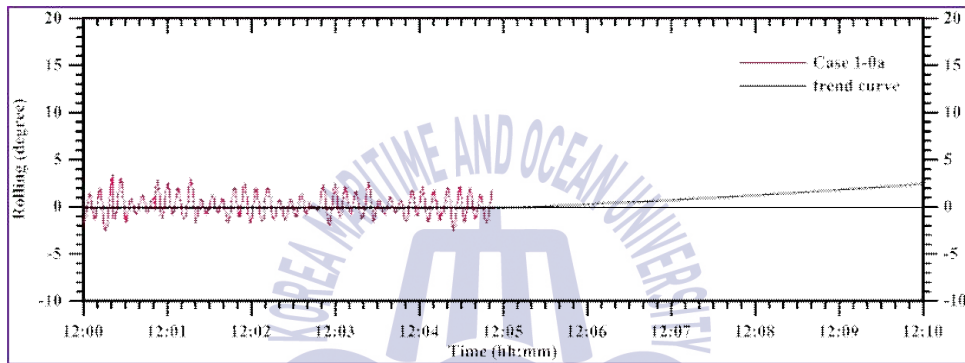
Fig. 34 Seawater inflow amount and trend response according to scenario through full-scale flooding and sinking simulation

5.1 Case 1-0 : 우현 선수각도 44° 로 우현파랑 받으며 항해

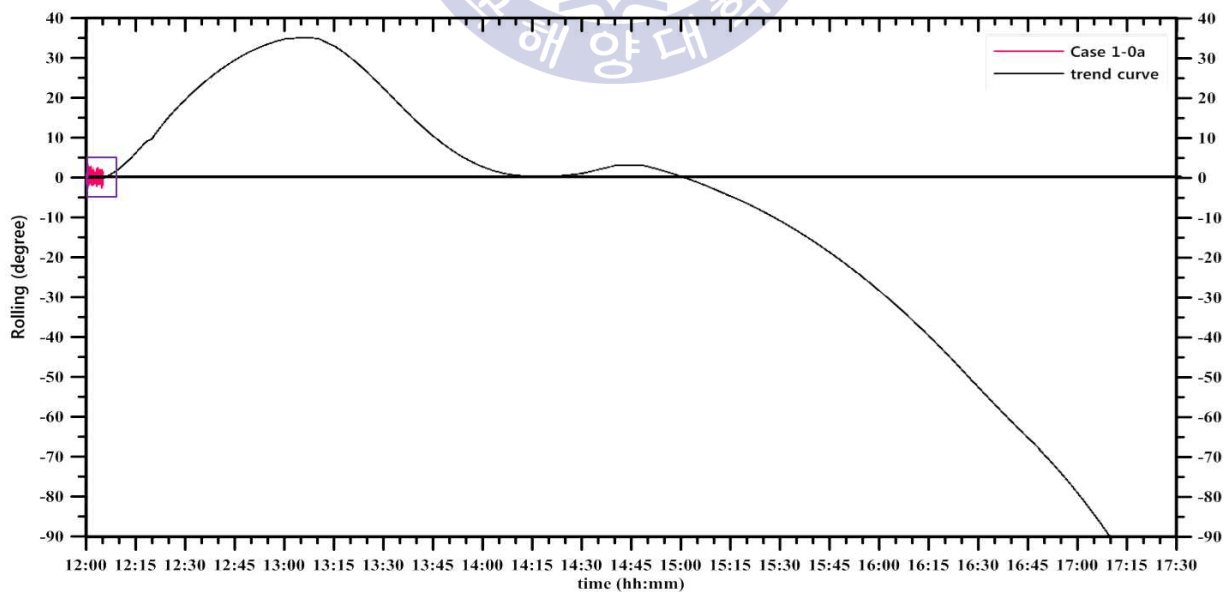
Case 1-0은 양망 후 피쉬병커 해치커버를 열고 약 20톤의 어획물을 피쉬병커에 투하 시 약 80톤의 해수가 다량 유입되어 Fig. 32와 Table 3 Case 1-0에서와 같이 피쉬병커에 약 50톤, 어획물처리실 바닥에 약 30톤 정도의 해수가 유입된 상태에서 해치커버를 불완전하게 폐쇄한 상태로 Fig. 28(a)와 같이 선수방위 66° , 침로방향 43° 로 운항하는 경우로서 우현 선수각도 44° 의 우현파랑을

받으며 항해하는 경우의 시나리오로서 FSI 해석기법의 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하였다.

우현 선수각도 44° 로 우현파랑을 받으며 항해하는 사고선박은 Fig. 35의 횡요 응답과 Fig. 36의 실선 침수·침몰 시뮬레이션의 거동에서와 같이 선체는 작은 각도의 종요(pitching)와 횡요가 발생하였고, 파도는 상갑판 위로는 거의 덮치지 않아 불완전하게 폐쇄된 해치커버와 좌현의 오물배출구를 통해서만 해수가 침수되지 않았다는 것을 확인할 수 있었다.

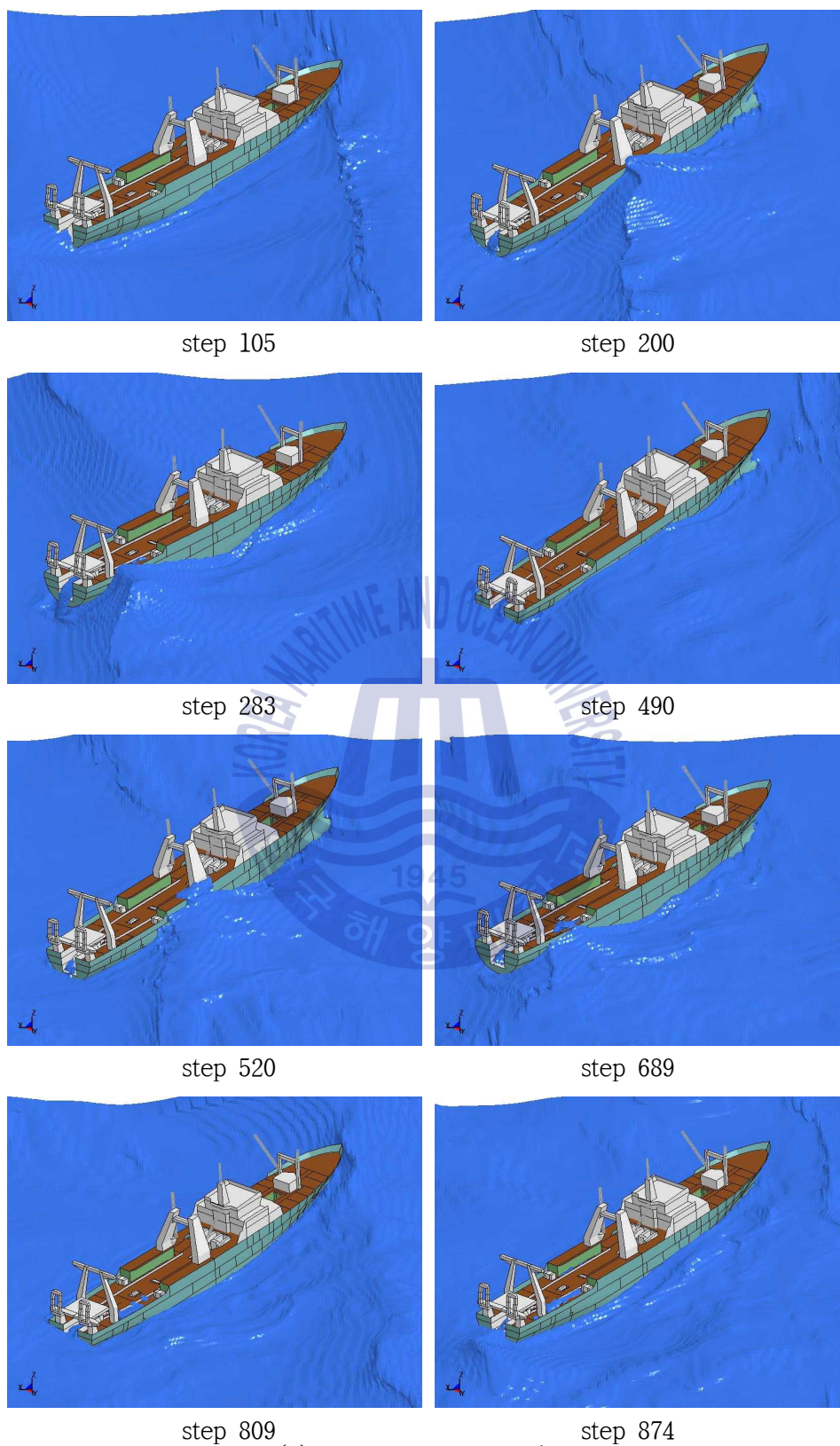


(a) zoom view of rolling response in Case 1-0



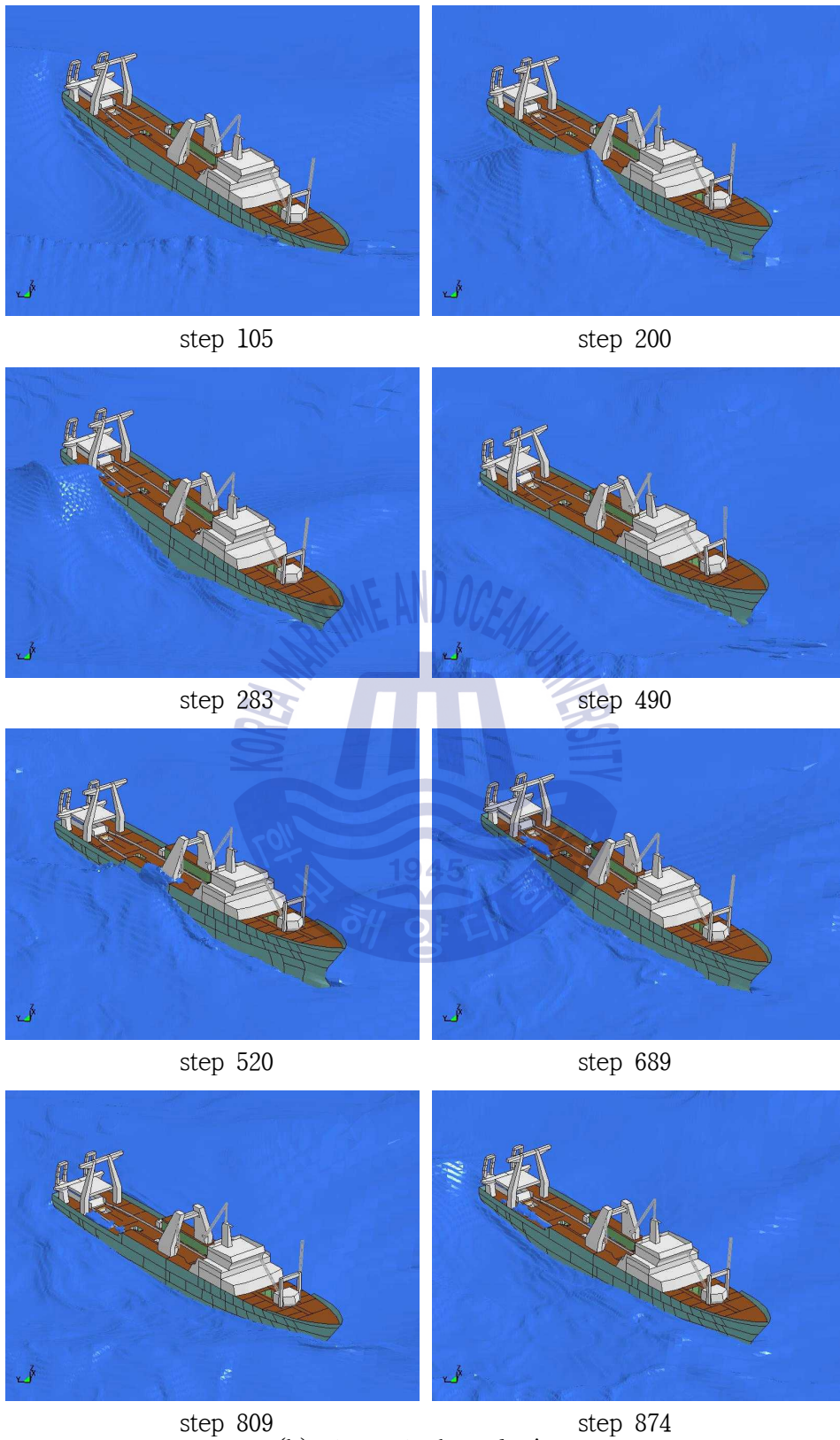
(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 35 Rolling response of fishing vessel in Case 1-0



(a) stern starboard view

Fig. 36 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-0 (continued)



(b) stem starboard view

Fig. 36 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-0 (continued)

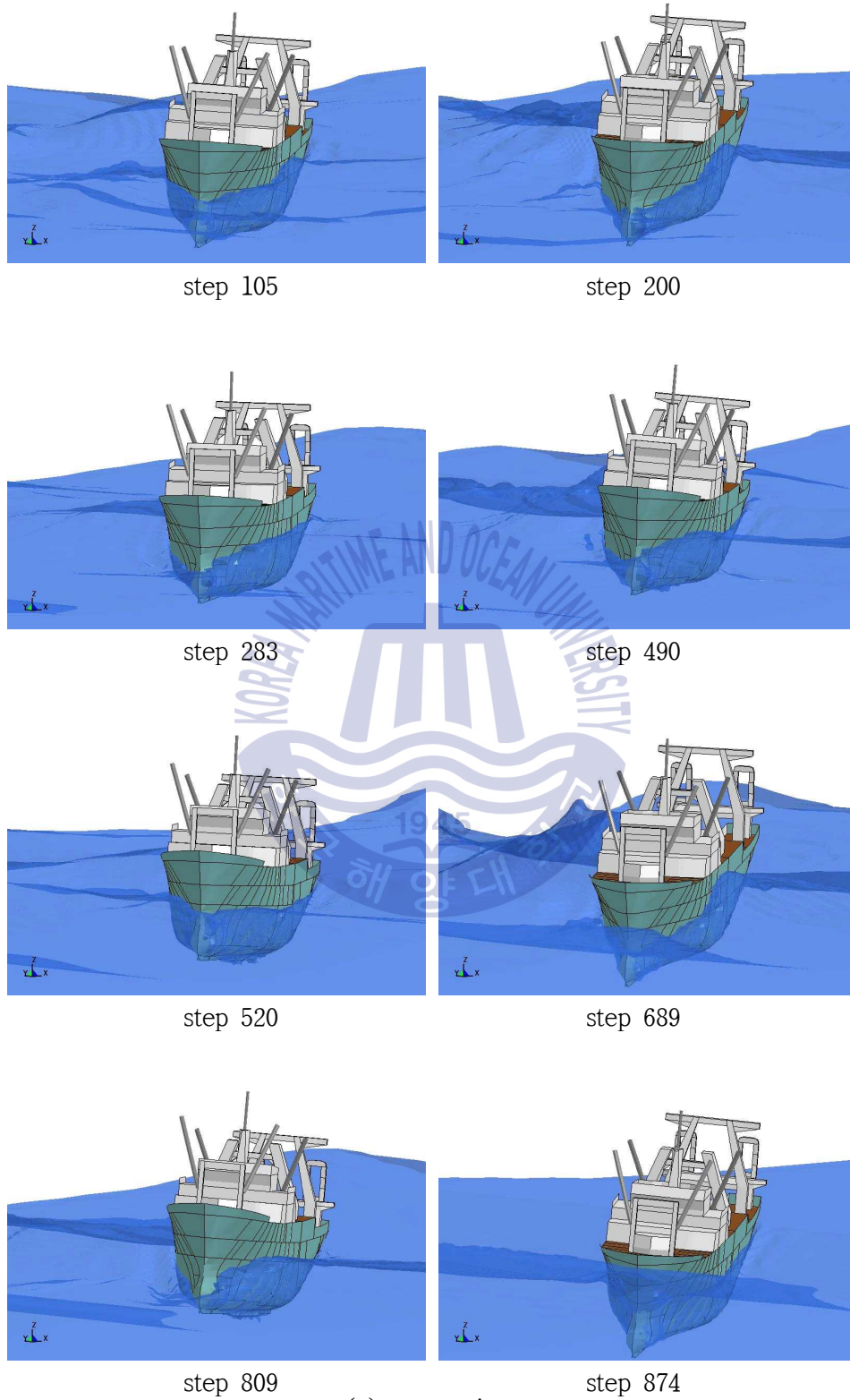


Fig. 36 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-0 (continued)

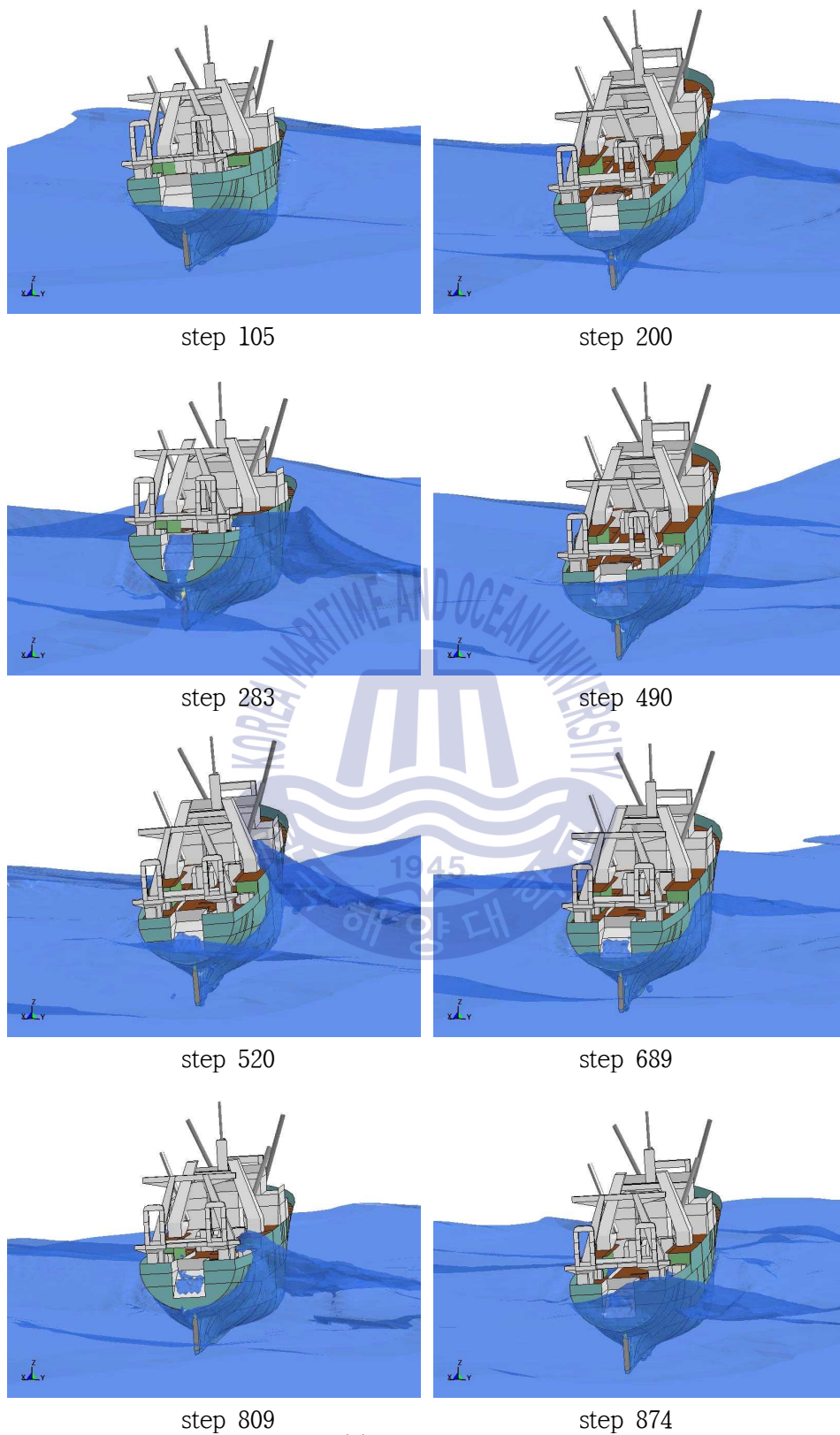
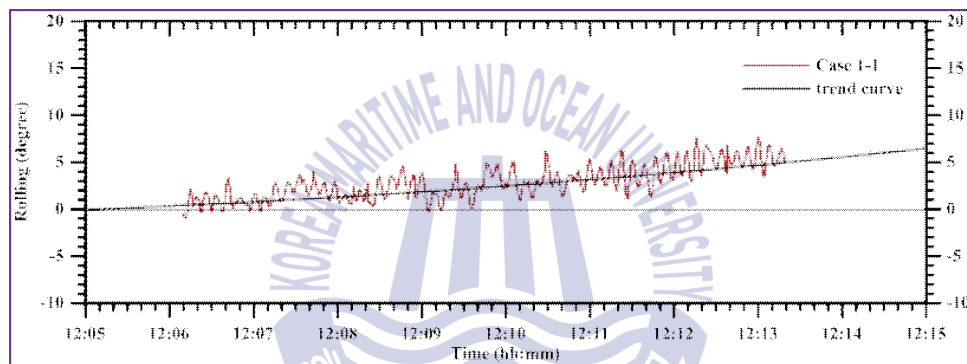


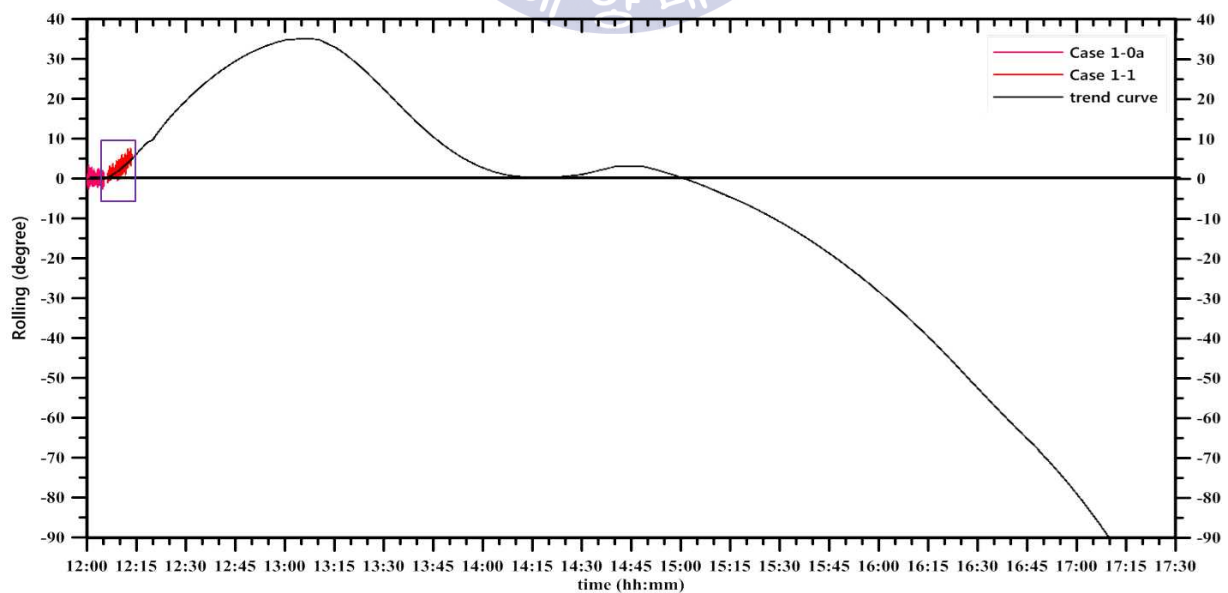
Fig. 36 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-0

5.2 Case 1-1 : 피항 개시 후 8° 우현 경사

Case 1-1은 피항을 위하여 선회하여 Fig. 28(b)에서와 같이 270° 각도로 피항하고 있는 사고선박이 좌현 선미각도 20°로 좌현파랑을 받고 운항하는 시나리오로서 초기 해수 유입상태는 Case 1-0과 같이 Fig. 32와 Table 3 Case 1-1의 초기단계와 같다. 불완전하게 폐쇄된 해치커버를 통하여 해수가 계속적으로 유입되어 선체가 약 5° 정도 우현으로 경사하는 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 횡요 응답과 실선 침수·침몰 시뮬레이션의 거동을 각각 Fig. 37과 Fig. 38에 나타내었다.



(a) zoom view of rolling response in Case 1-1



(b) rolling response according to scenario through flooding·sinking simulation

Fig. 37 Rolling response of fishing vessel in Case 1-1

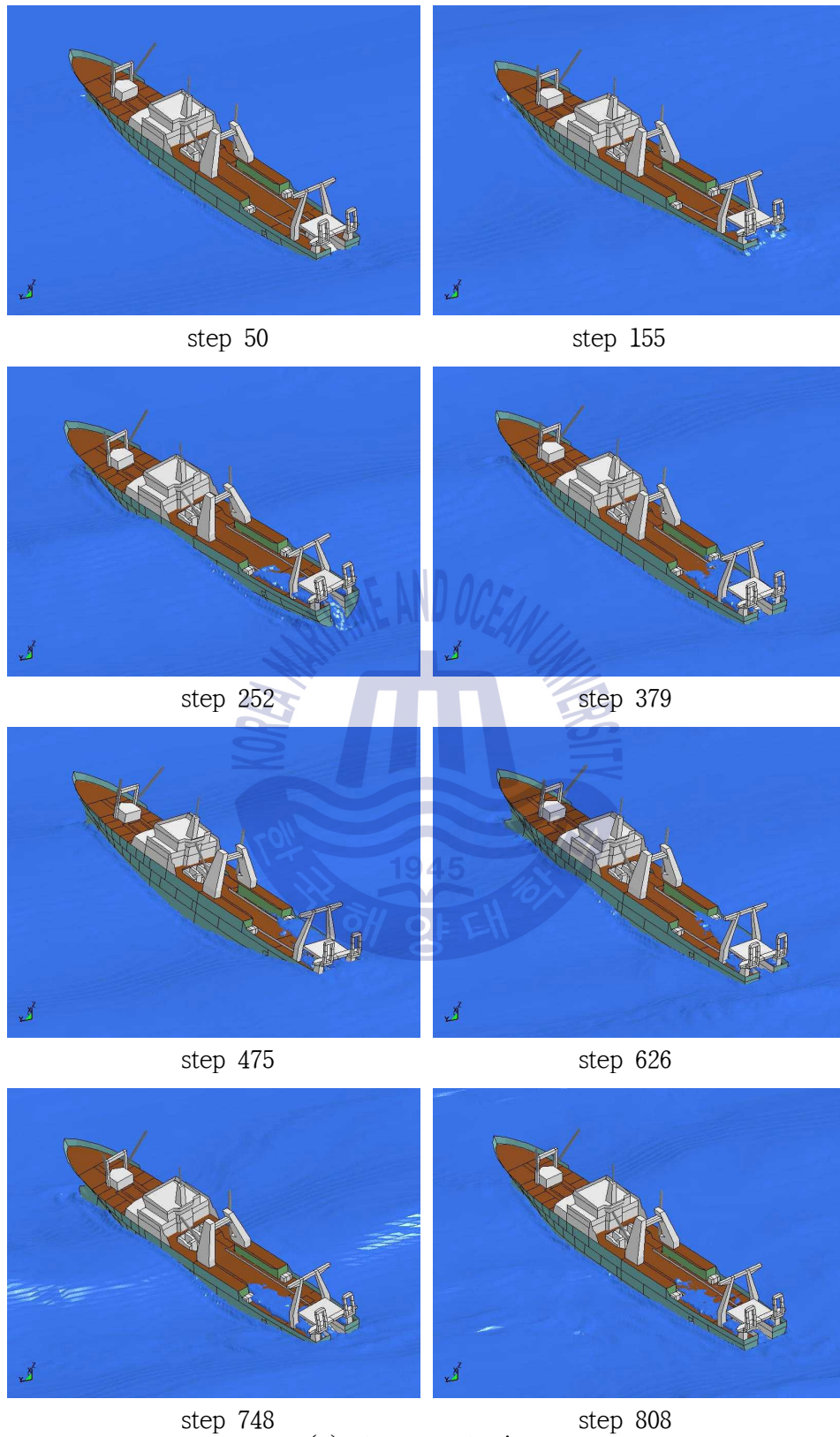
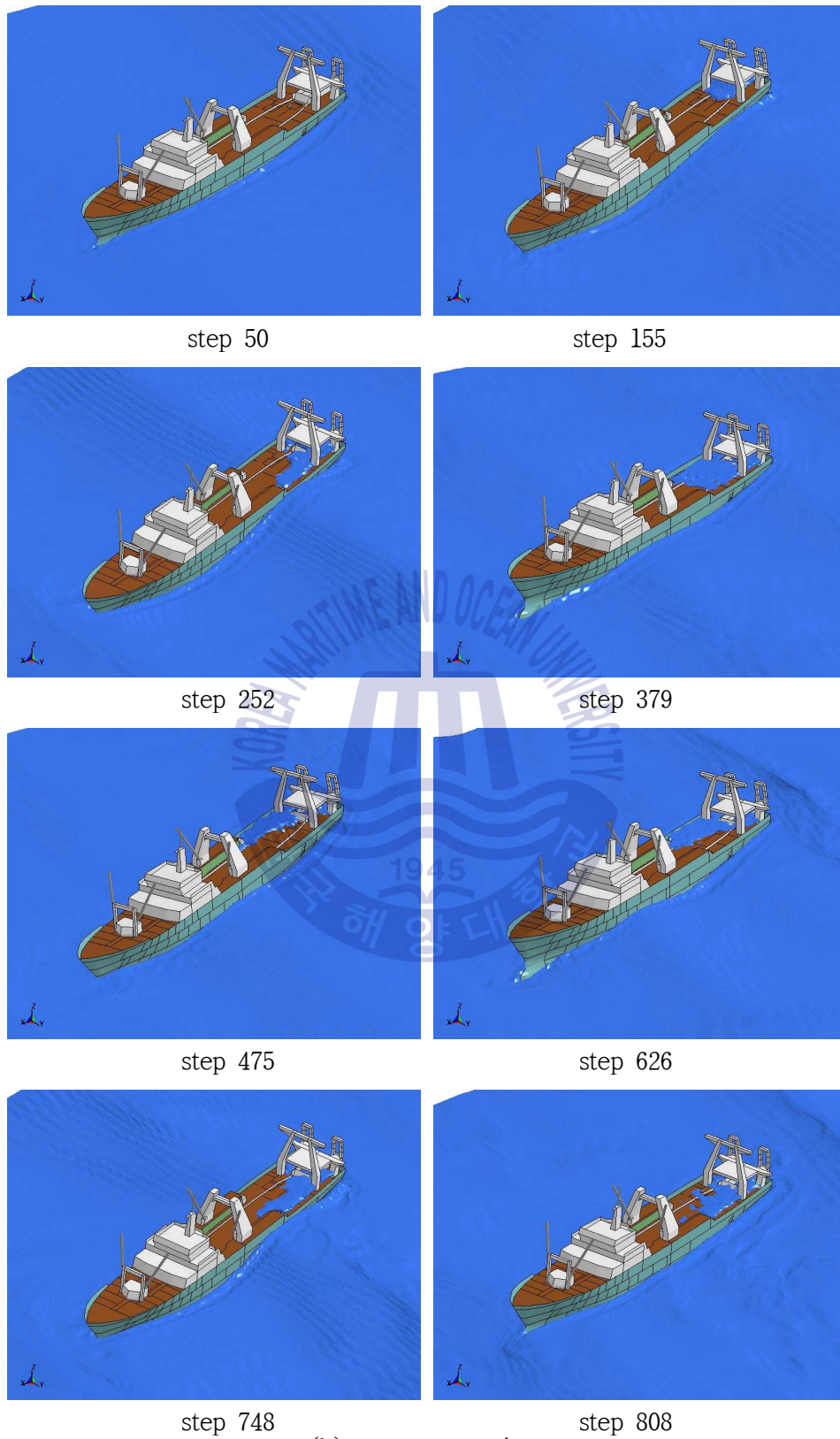


Fig. 38 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-1 (continued)



(b) stem port view

Fig. 38 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-1 (continued)

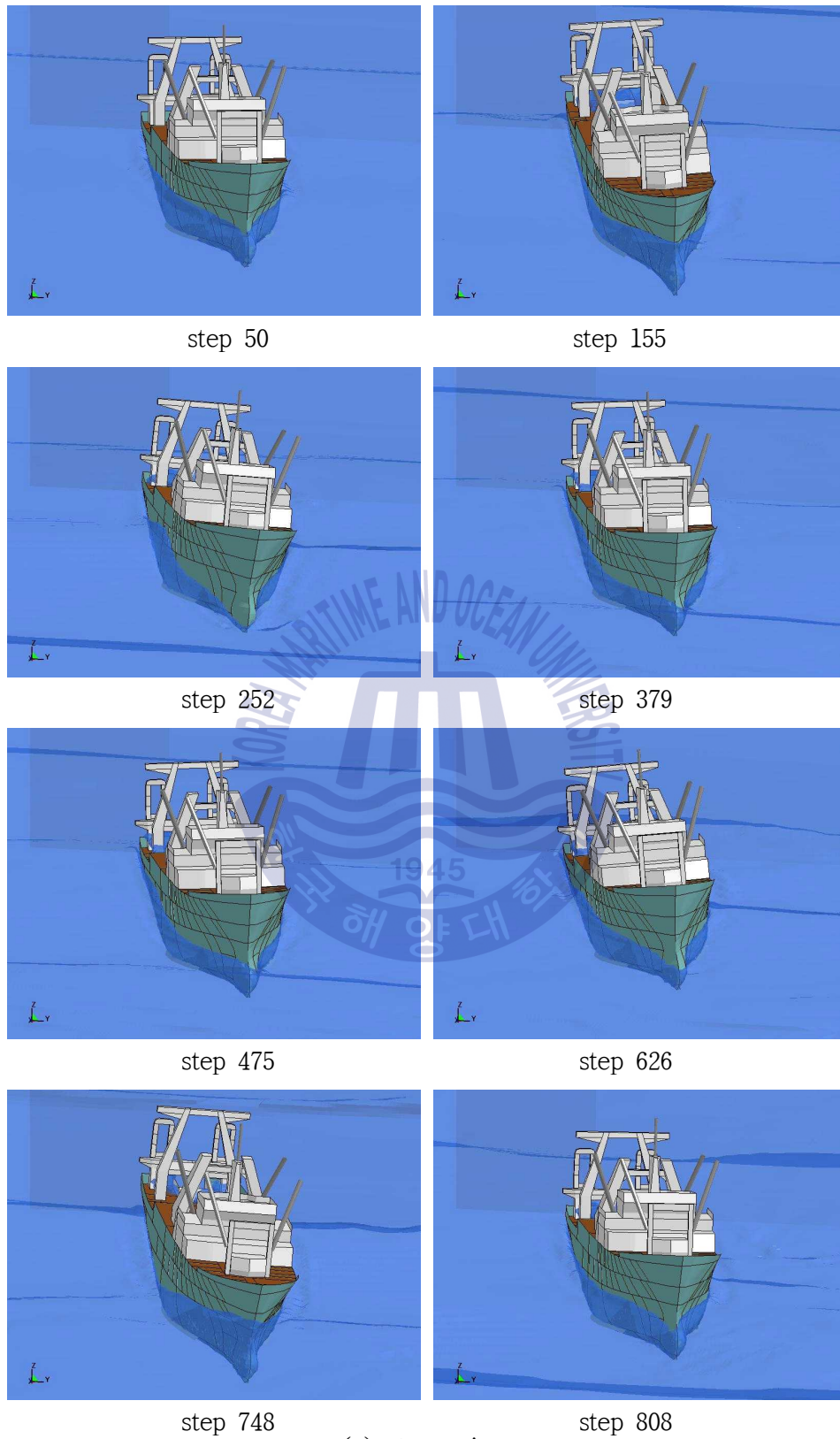


Fig. 38 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-1 (continued)

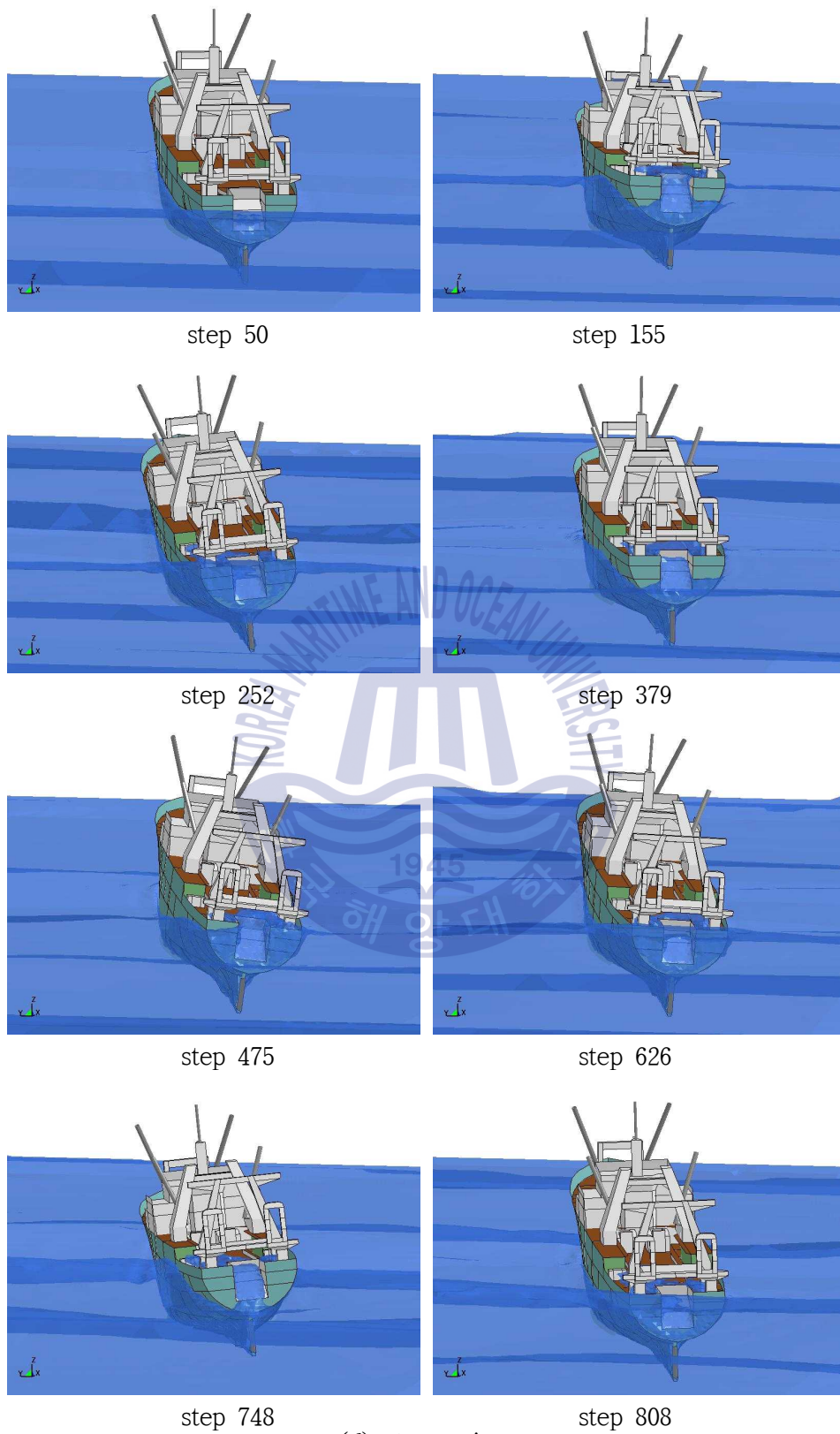


Fig. 38 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-1

Fig. 37의 횡요 응답과 Fig. 38의 침수·침몰 시뮬레이션의 거동에서 알 수 있듯이 좌현 선미각도 20° 로 좌현파랑을 받으며 운항하면서 중요와 횡요운동이 반복되면서 선미 우현이 해수면에 주기적으로 일부 잠기고 파도가 선미 갑판부를 덮치면서 불완전하게 폐쇄된 해치커버를 통하여 해수가 침수되었고 파도가 좌현 선측을 스쳐 지나가듯이 부딪치면서 오물배출구를 통해서도 일부 해수가 유입되었으며 횡요도 점점 증가하고 있음을 알 수 있다.

이어서 피쉬병커에 가득 유입되었던 해수와 어획물 20톤이 나무 칸막이를 파손시키고 어획물처리실로 유입되면서 선체가 우현으로 8° 정도 더 경사하게 되는 실선 침수·침몰 시뮬레이션도 수행하였으며, Fig. 39는 어획물과 해수가 피쉬병커의 나무 칸막이를 파단 시키며 어획물처리실로 유입되는 거동을 보여주고 있다. Fig. 39에서와 같이 피쉬병커에 가득찬 해수와 어획물이 선체의 반복적인 횡요와 중요운동으로 나무 칸막이가 파손되어 어획물처리실로 쏟아져 들어오는 침수 시뮬레이션 거동을 통해서 확인할 수 있다. 또한 나무 칸막이가 파단 되어 해수가 어획물처리실로 쏟아져 나와 어획물처리실의 우현의 빌지웰 쪽으로 모이면서 우현으로 보다 더 크게 약 8° 정도 더 횡경사가 발생하게 되었다. Table 3과 4의 Case 1-1의 경우에서와 해치커버와 오물배수구를 통하여 각각 63.2톤과 6.8톤이 유입되었고 피쉬병커와 어획물처리실에 각각 22톤과 128톤이 침수되어 있었다.

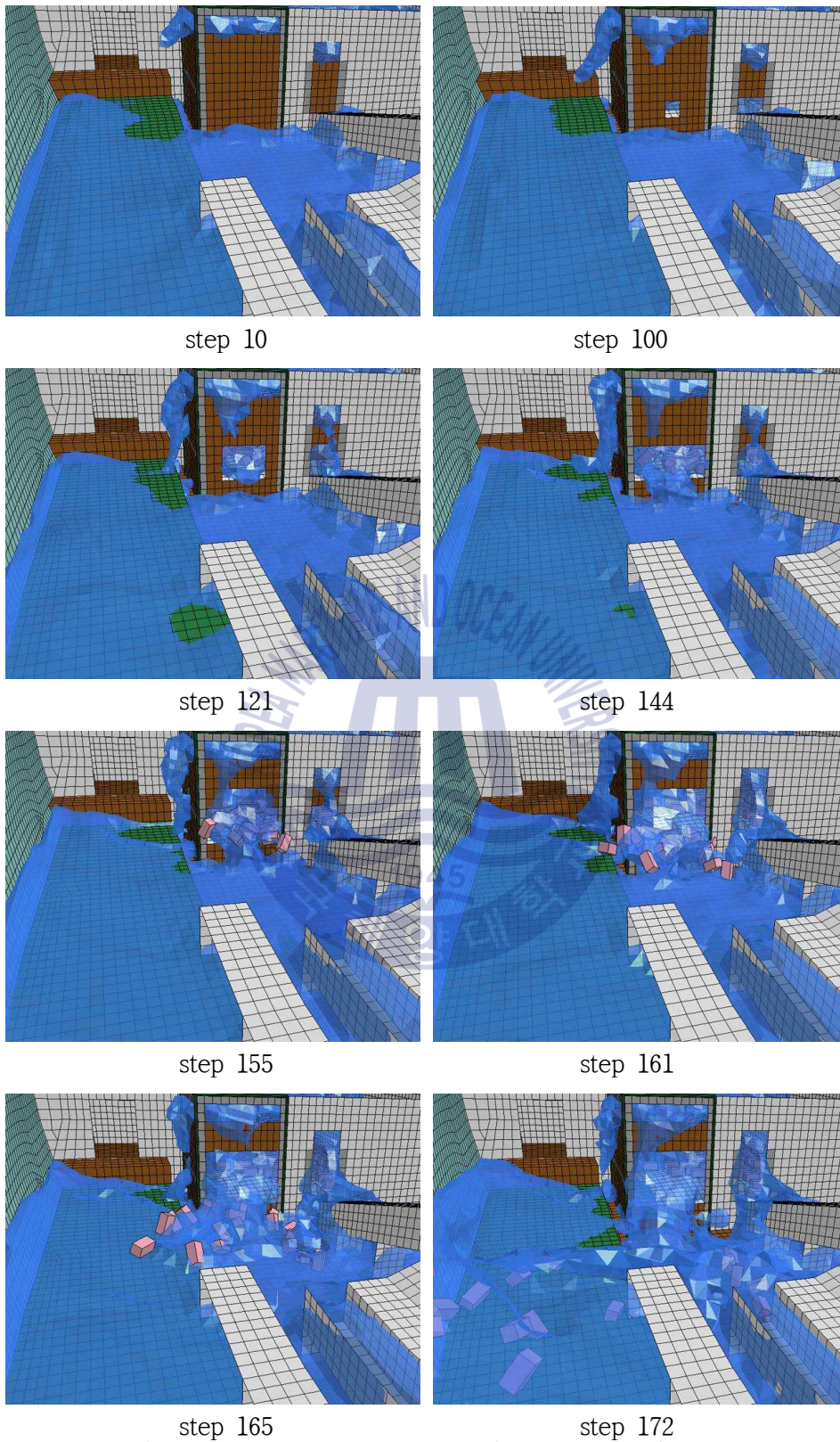


Fig. 39 Inflow of fish catch and sea water into processing and working space through broken wood partitions

5.3 Case 1-2 : 좌현횡파에 의한 20° 우현 경사

Case 1-2는 Case 1-1에 이어 불완전하게 폐쇄된 해치커버와 오물배출구를 통해 약 100톤의 해수가 유입되어 Fig. 40과 Table 3 Case 1-2에서와 같이 약 180톤 정도의 해수가 침수되어 피쉬병커와 어획물처리실 바닥에 각각 약 23톤과 157톤 정도 깔려있는 초기상태에서 Fig. 28(b)와 같이 좌현 선미각도 20°로 좌현파랑을 받고 있는 시나리오이다.

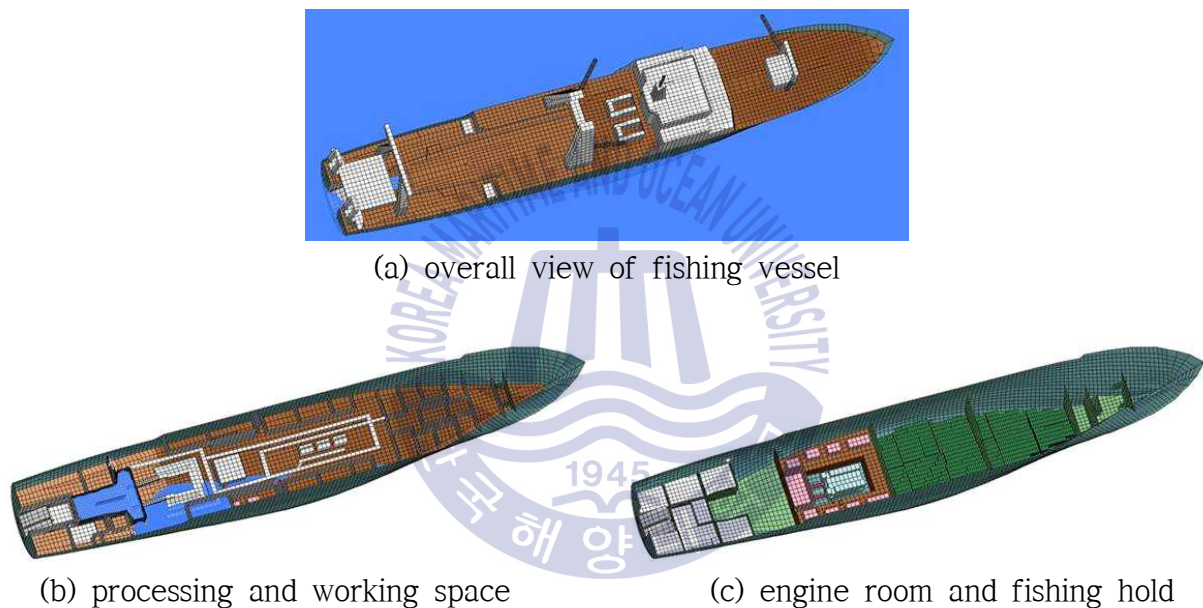
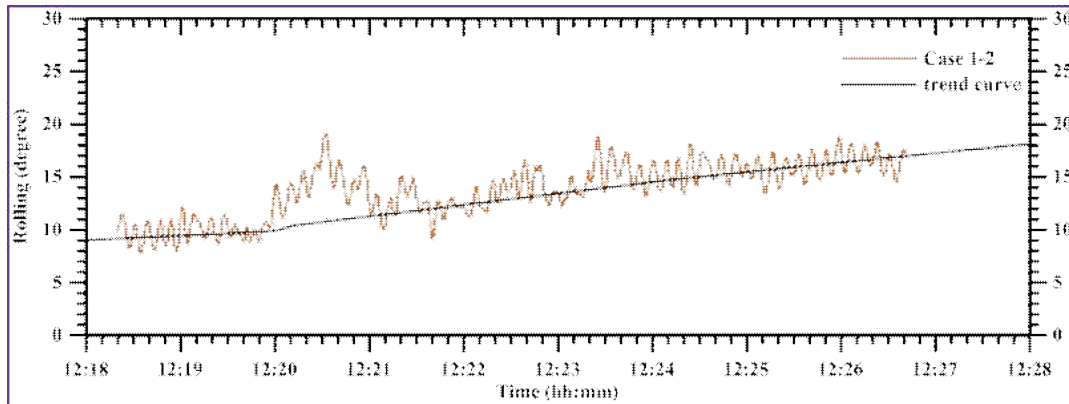
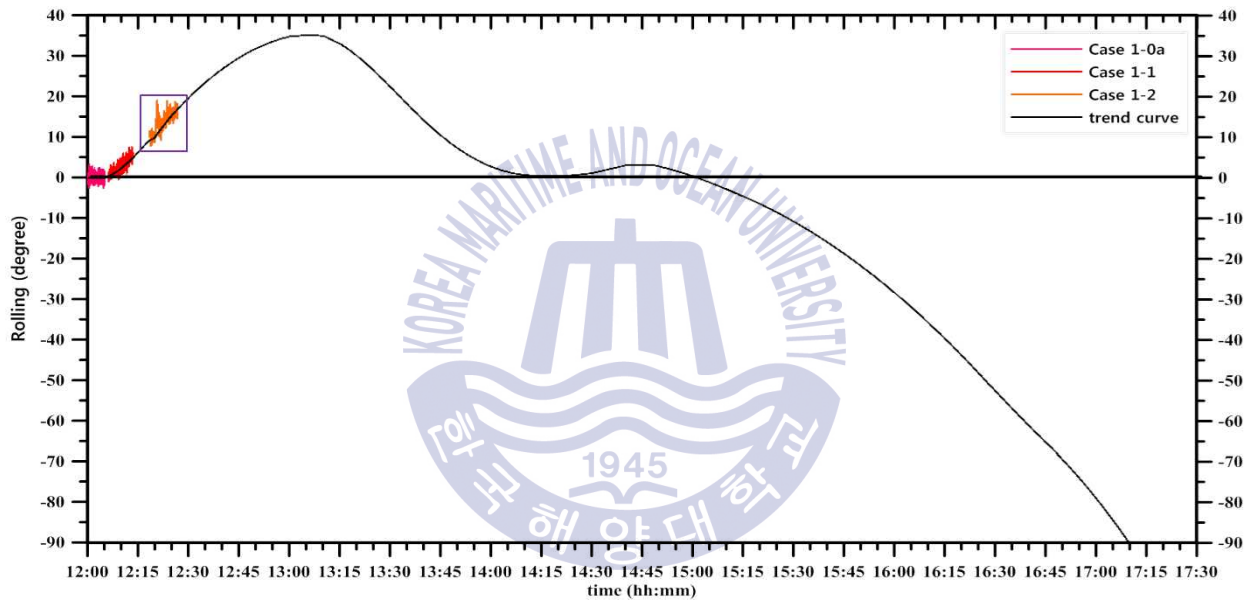


Fig. 40 Initial seawater inflow state in Case 1-2

Case 1-2는 선체가 횡경사가 점점 증가되고 중요와 횡요운동을 반복하면서 선미우현이 수면에 주기적으로 일부 잠기고 파도가 선미 갑판부를 덮치게 되며 해치커버와 오물배출구를 통하여 해수가 유입됨에 따라 선체가 약 20° 정도 우현으로 경사하는 시나리오로서 FSI 해석기법의 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 횡요 응답과 실선 침수·침몰 시뮬레이션의 거동을 각각 Fig. 41과 Fig. 42에 나타내었다.

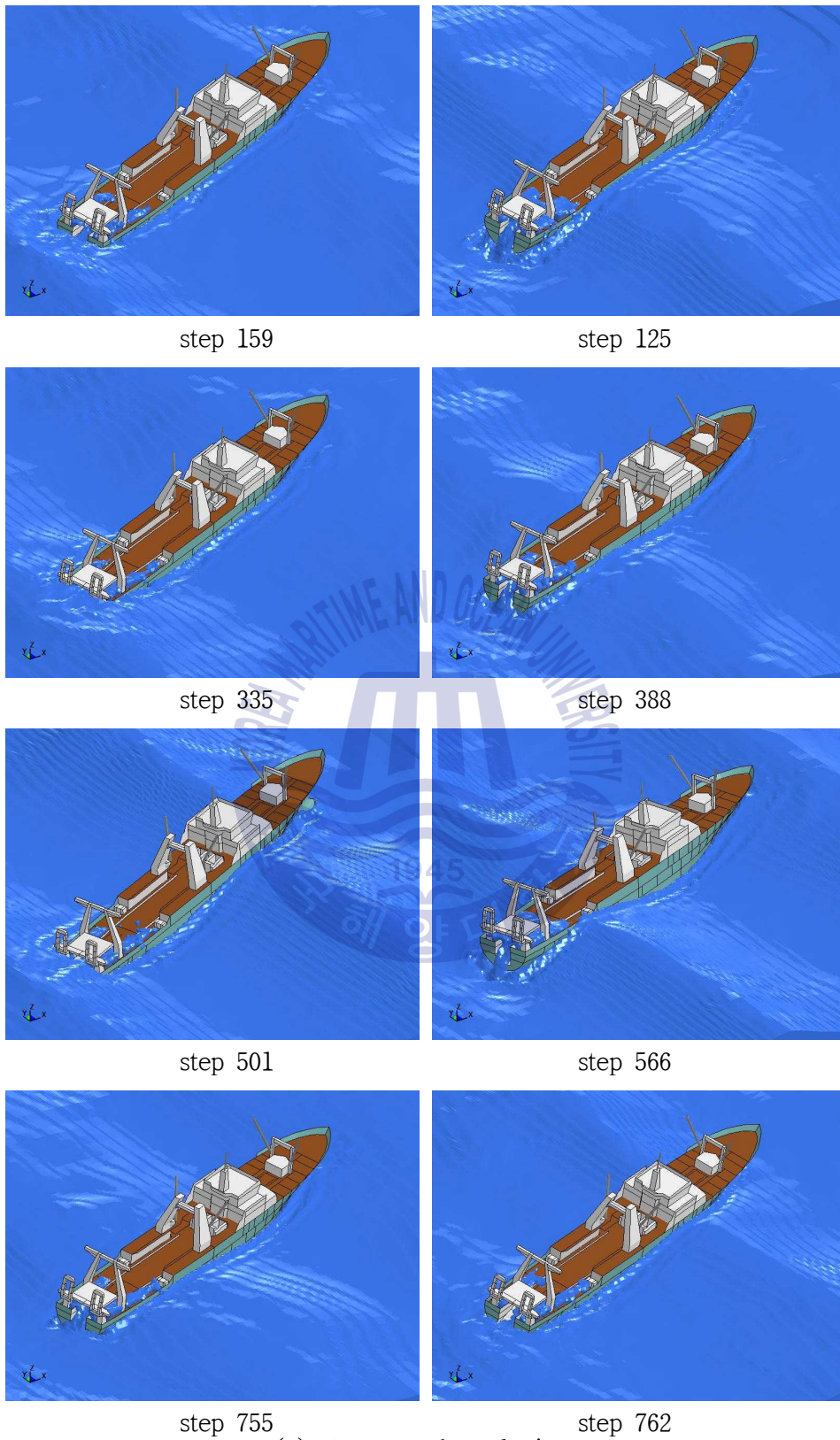


(a) zoom view of rolling response in Case 1-2



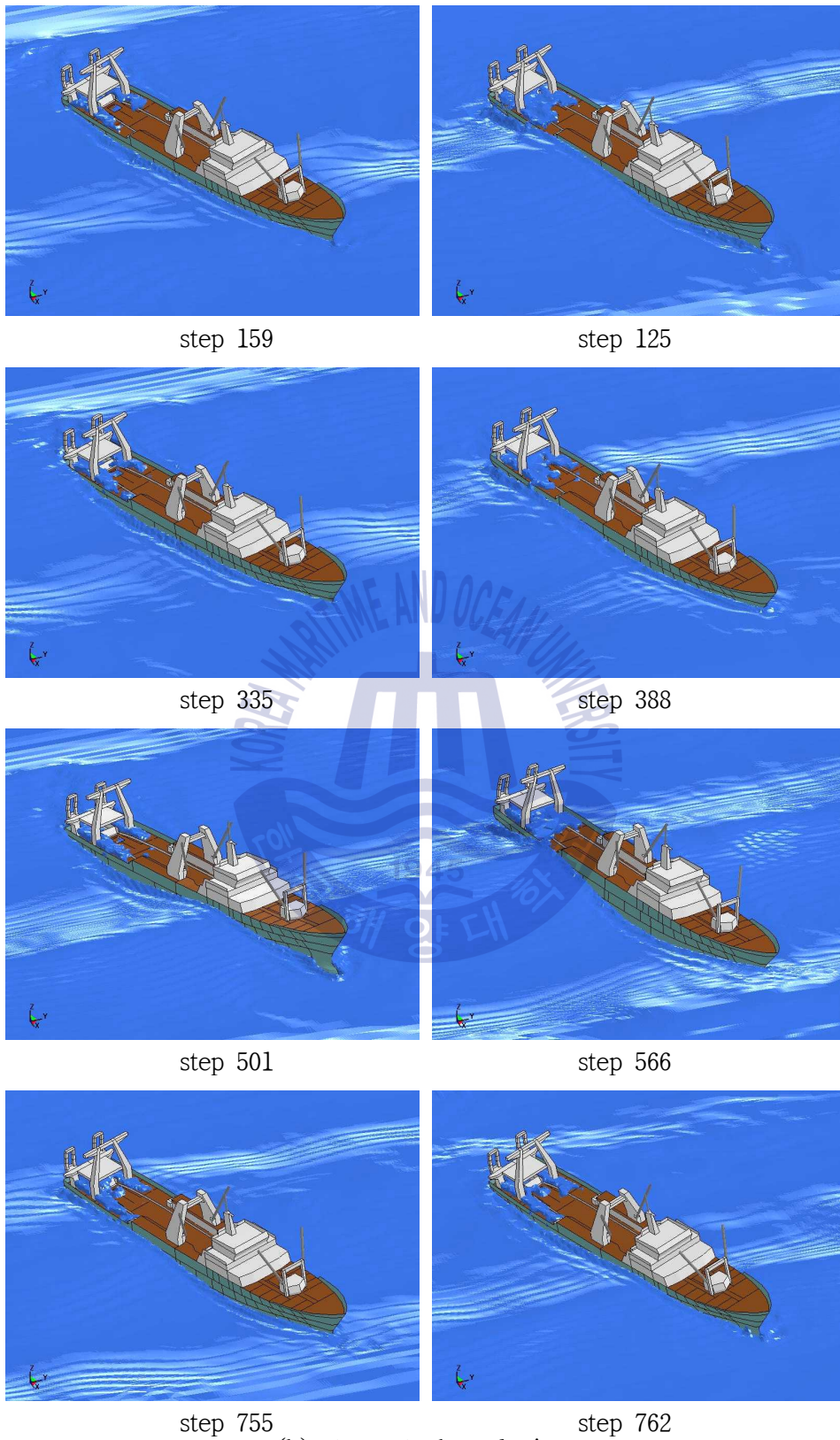
(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 41 Rolling response of fishing vessel in Case 1-2



(a) stern starboard view

Fig. 42 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-2 (continued)



(b) stem starboard view

Fig. 42 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-2 (continued)

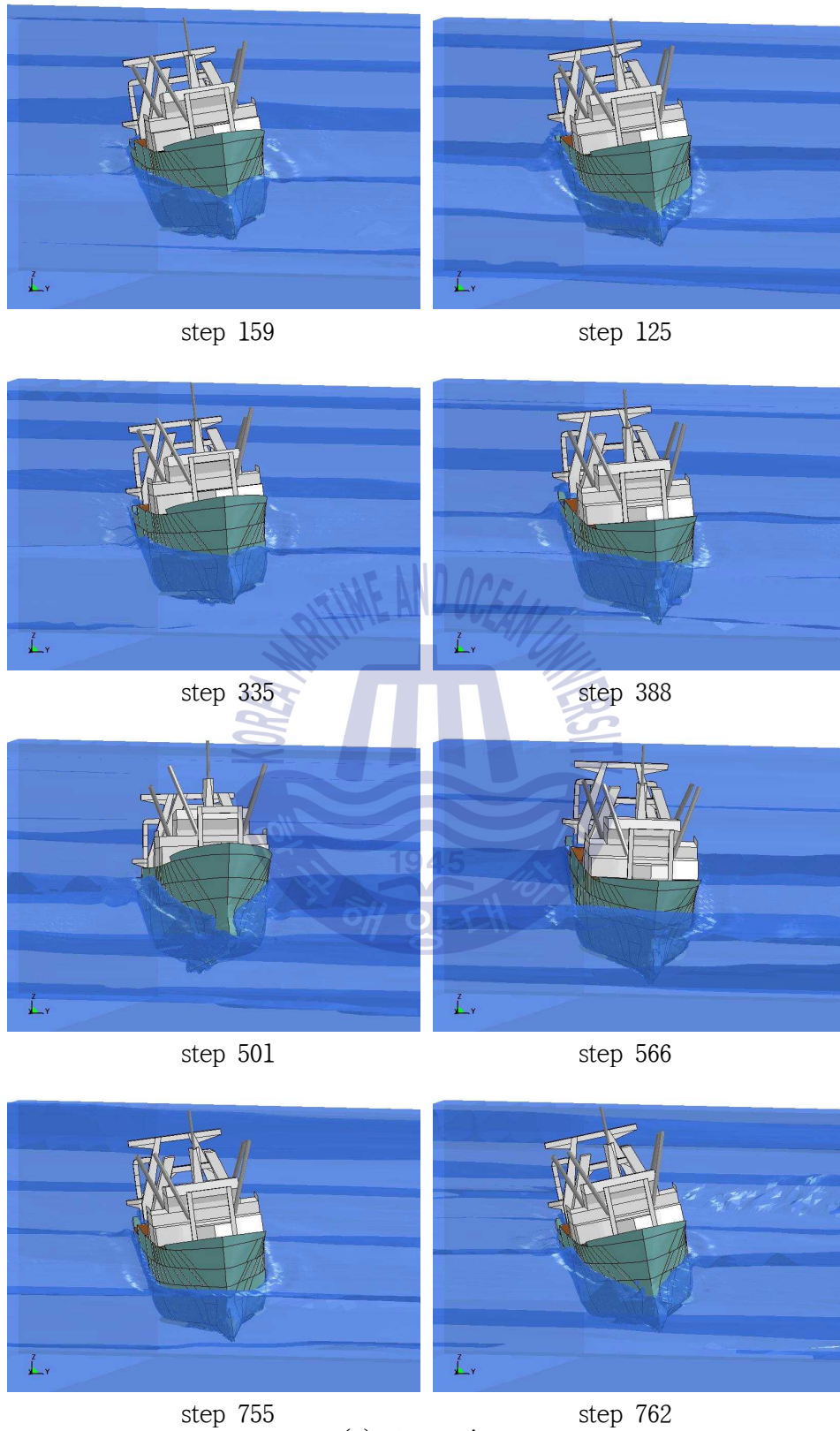


Fig. 42 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-2 (continued)

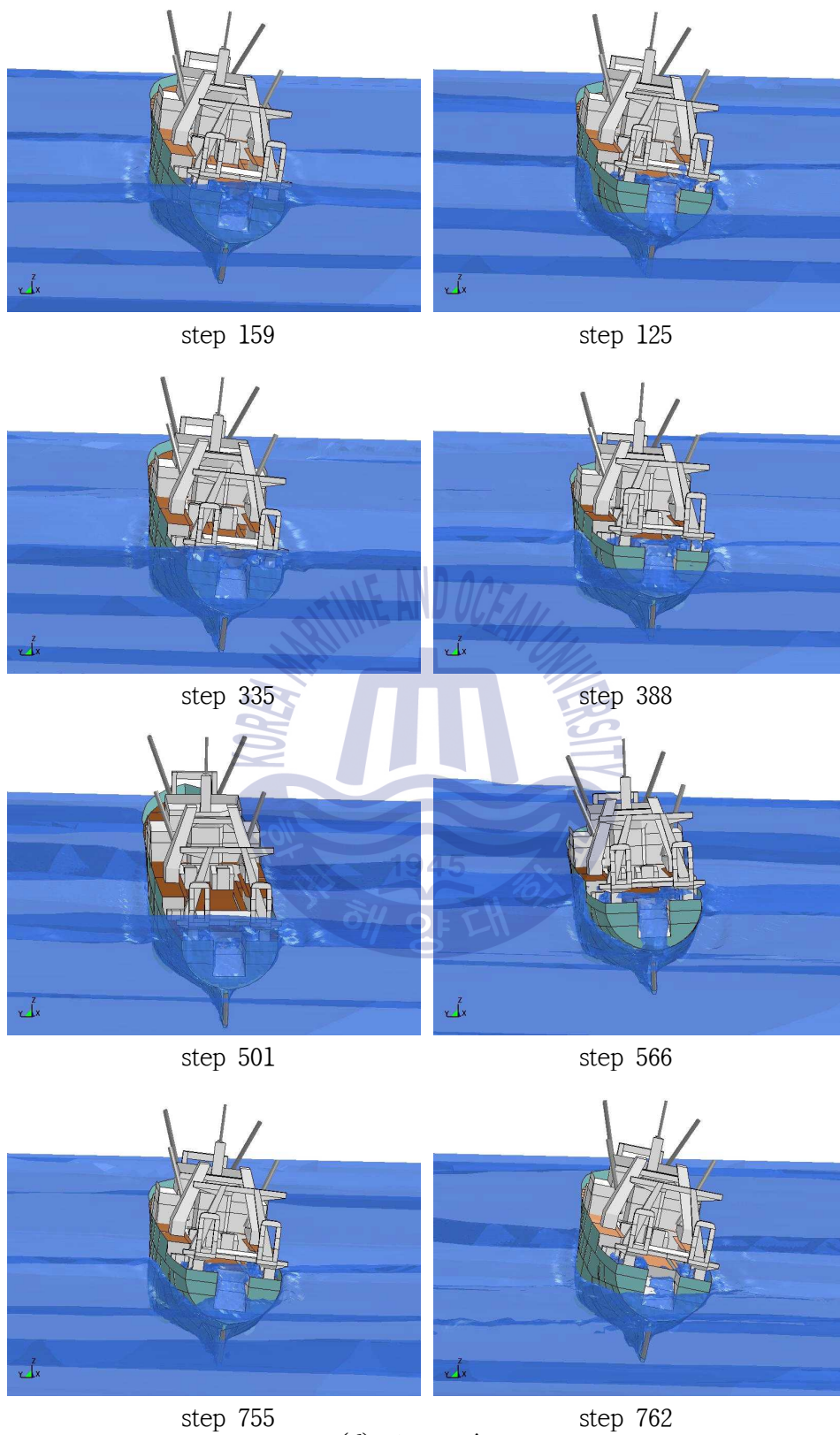
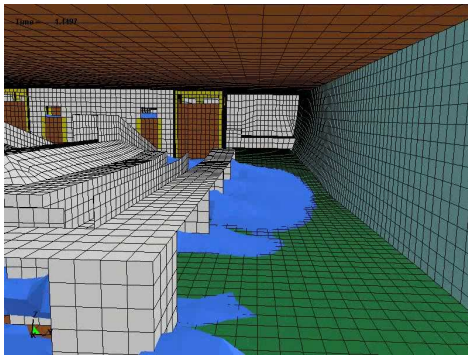


Fig. 42 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-2

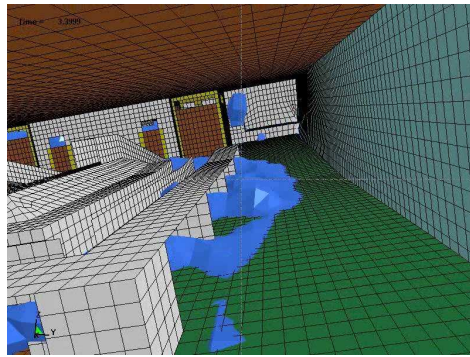
Case 1-2의 횡요 응답과 실선 침수·침몰 시뮬레이션 거동에서 좌현 선미각도 20° 의 파도를 받고 있는 사고선박은 중요와 횡요운동을 하면서 파도가 선미 갑판부를 주기적으로 덮치고 있음을 알 수 있다. 선미좌현의 오물배출구는 선체가 우현으로 횡경사 되어있어 수면과는 다소 높은 위치에 있지만 파도가 좌현선미에 예각으로 부딪치면서 Fig. 43(a)와 같이 해수가 일부 유입되었고, 파도가 선미 갑판부를 덮치면서 Fig. 43(b)와 같이 해치커버를 통하여 해수가 주로 유입되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 44는 선미 트림된 선체가 횡요와 중요운동을 반복하면서 피쉬병커 후미의 타기실로 해수가 유입되고 있는 것을 보여주고 있다. 선체가 약 20° 정도 우현으로 경사하였을 때 타기실에 약 70% 정도 해수가 유입되어 조타기가 불능 정지되었다는 것을 Fig. 45에서 추정할 수 있다. Table 3과 4의 Case 1-2의 경우에서와 같이 해치커버와 오물배수구를 통하여 각각 121.2톤과 18.3톤이 유입되었고 피쉬병커와 어획물처리실에 각각 25톤과 265톤이 침수되었다.

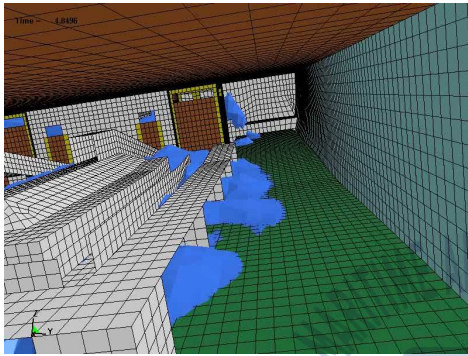




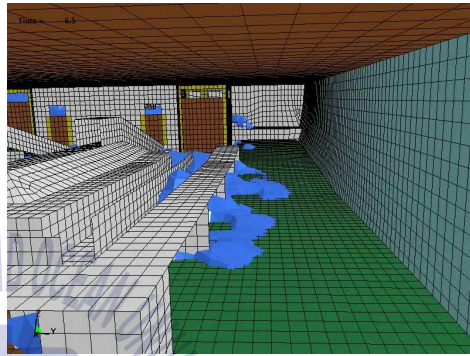
step 130



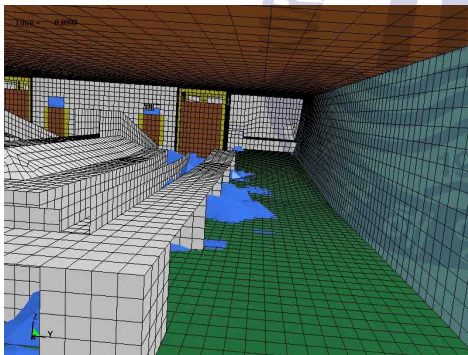
step 244



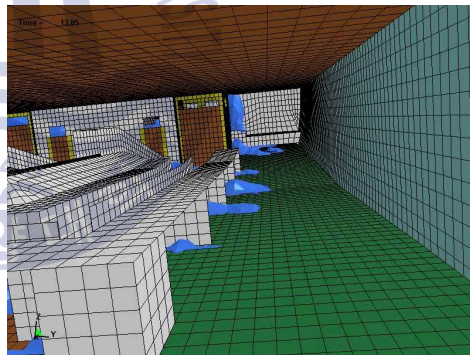
step 383



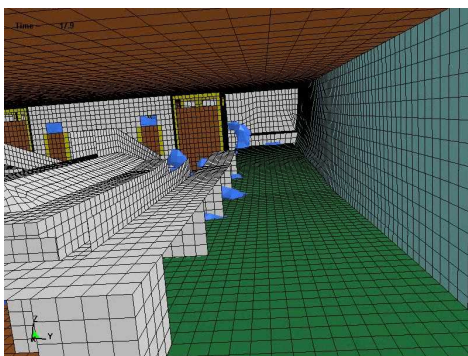
step 463



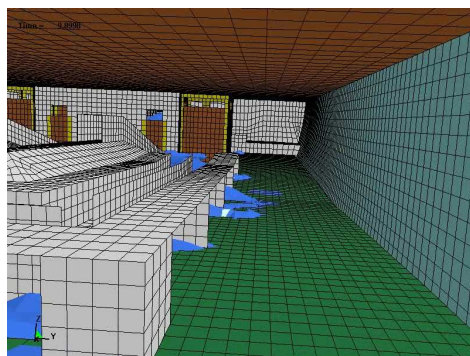
step 551



step 625



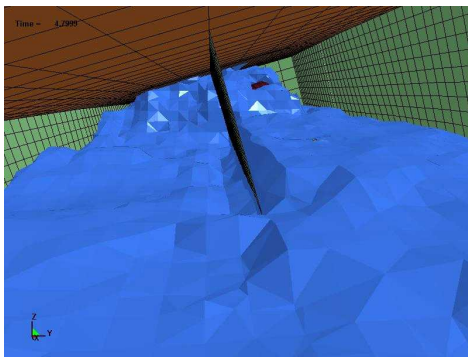
step 715



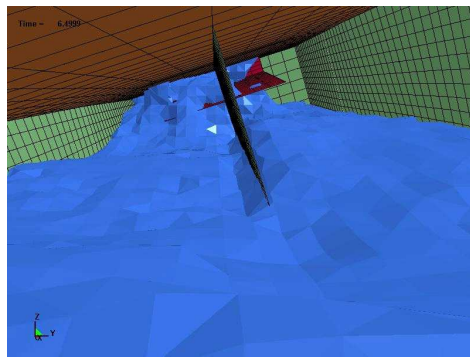
step 811

(a) sewage outlet

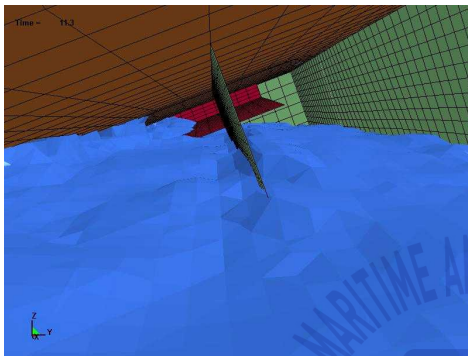
Fig. 43 Sea water inflow behavior through openings (continued)



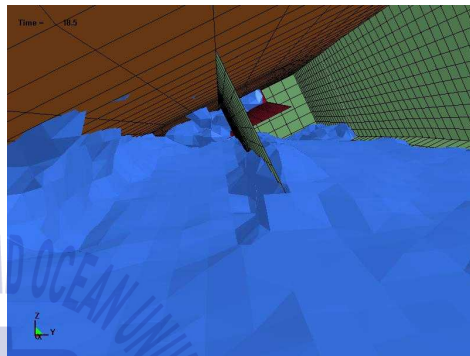
step 28



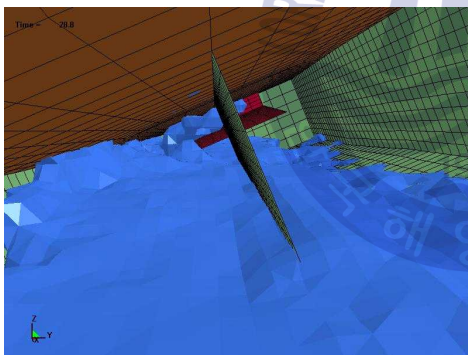
step 68



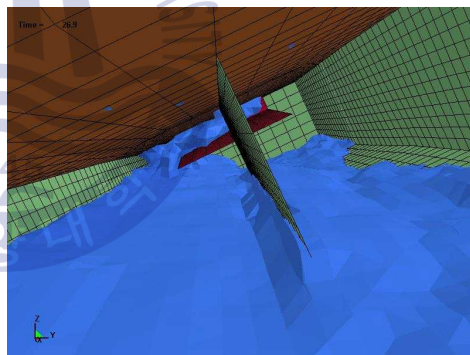
step 125



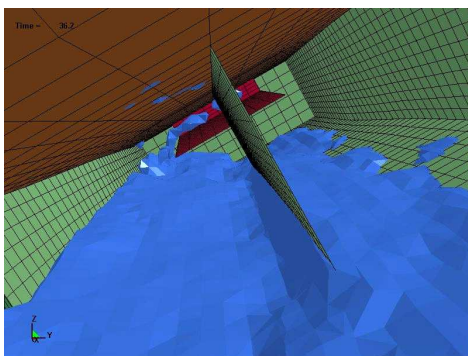
step 183



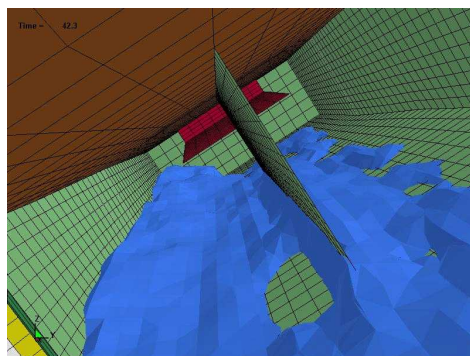
step 245



step 309



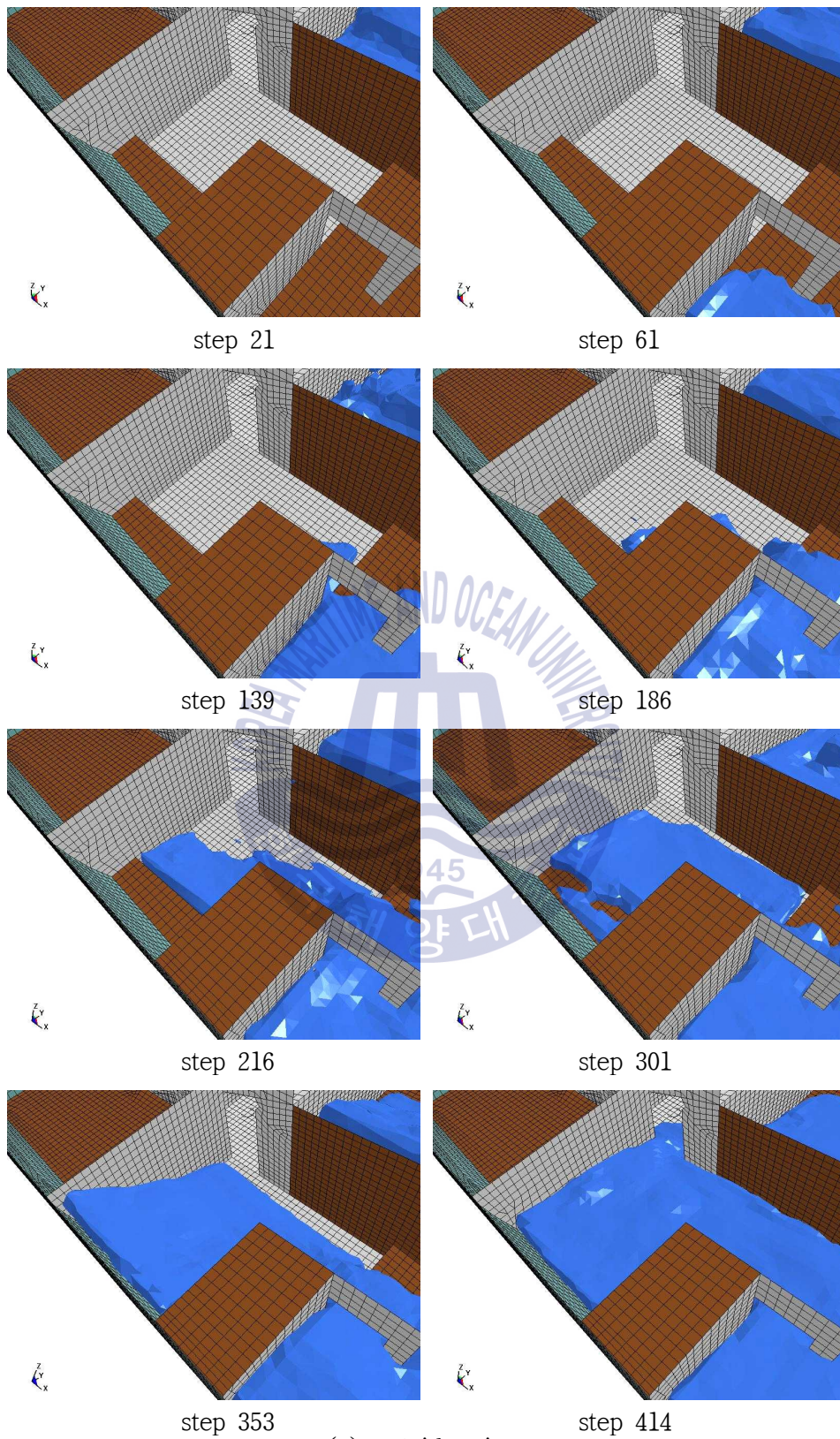
step 362



step 423

(b) hatch cover

Fig. 43 Sea water inflow behavior through hatch cover



(a) outside view

Fig. 44 Sea water inflow behavior into steering room (continued)

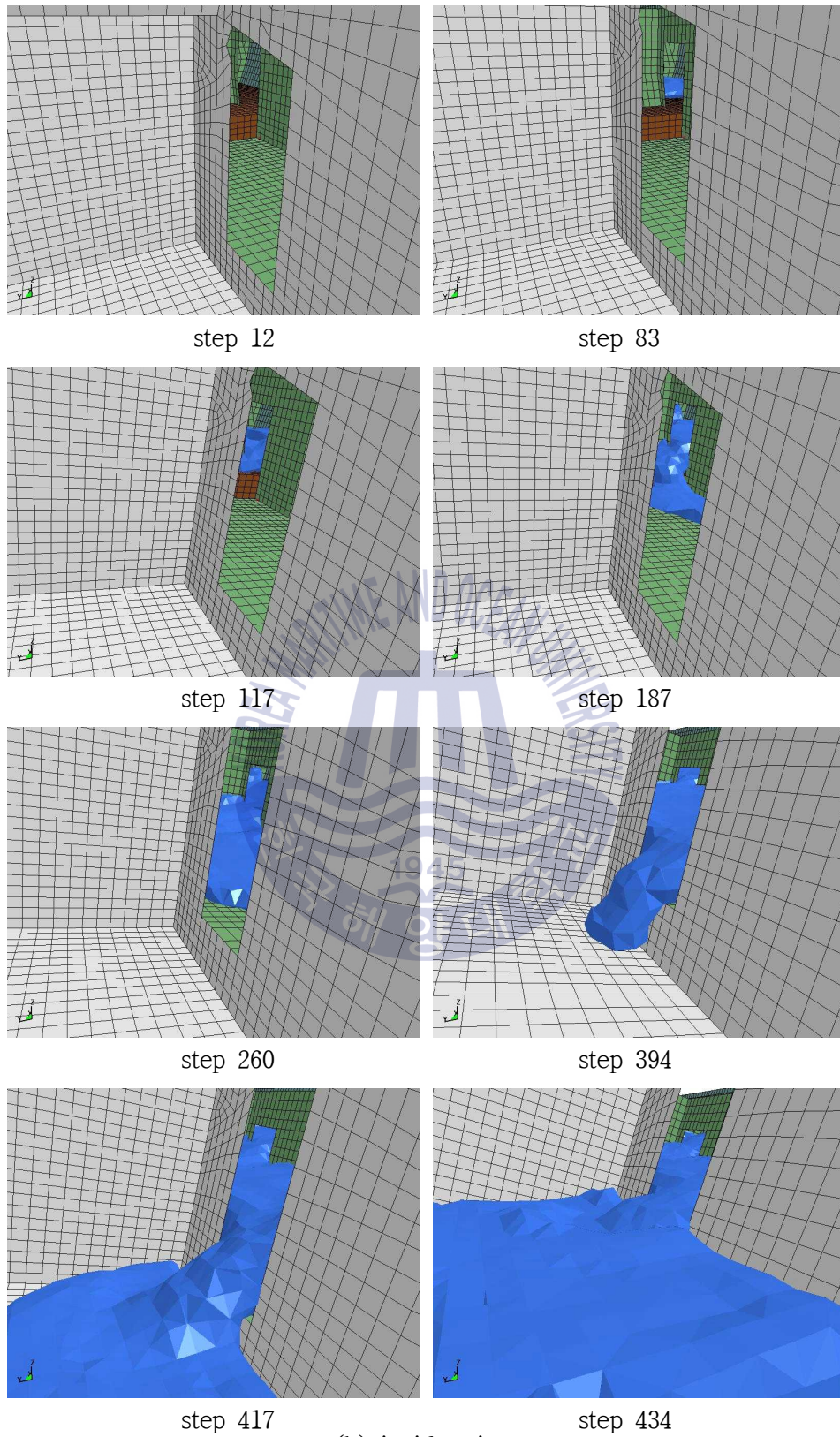


Fig. 44 Sea water inflow behavior into steering room

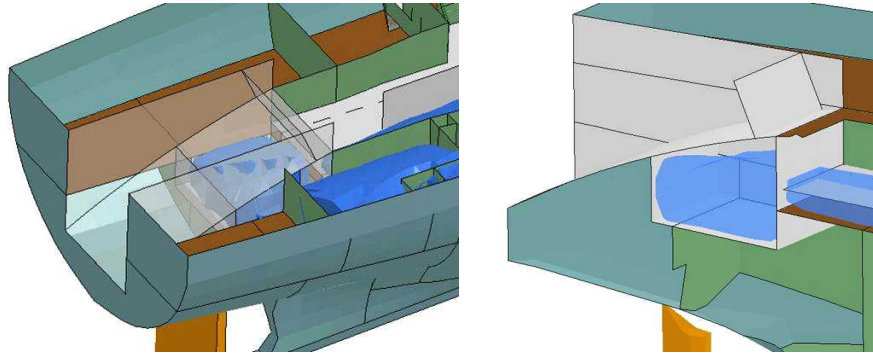
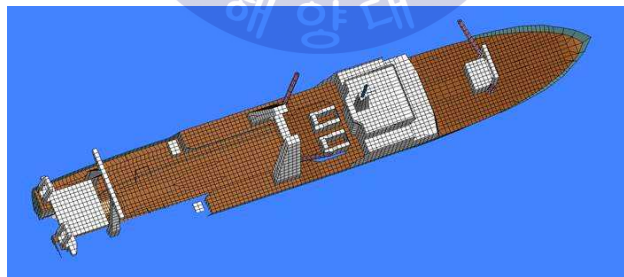


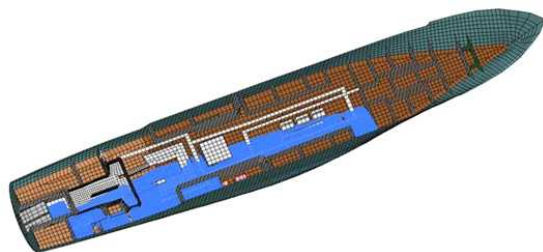
Fig. 45 Sea water inflow scenery into steering room at starboard side heeling angle 20°

5.4 Case 1-3 : 좌현횡파에 의한 $25\sim 30^\circ$ 우현 경사

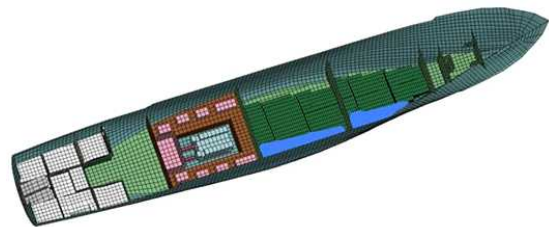
Case 1-3은 시나리오 Case 1-2에 이어 해치커버와 오물배출구를 통해 약 105톤의 해수가 더 유입되어 Fig. 46과 Table 3 Case 1-3에서와 같이 약 395톤 정도의 해수가 피쉬병커와 어획물처리실 바닥에 각각 약 26톤과 315톤 정도, 어창에 약 54톤 정도 침수된 선체가 25° 정도 우현으로 경사한 해수 유입상태에서 Fig. 28(c)에서와 같이 좌현 선미각도 72.5° 로 좌현과랑을 받으면서 표류하고 있는 시나리오이다.



(a) overall view of fishing vessel



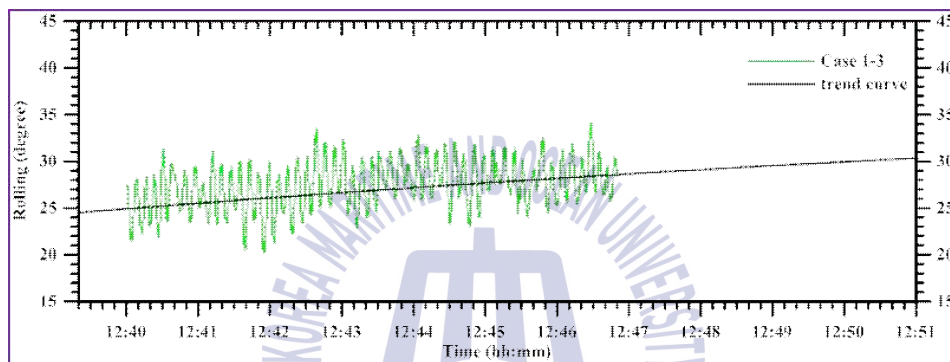
(b) processing and working space



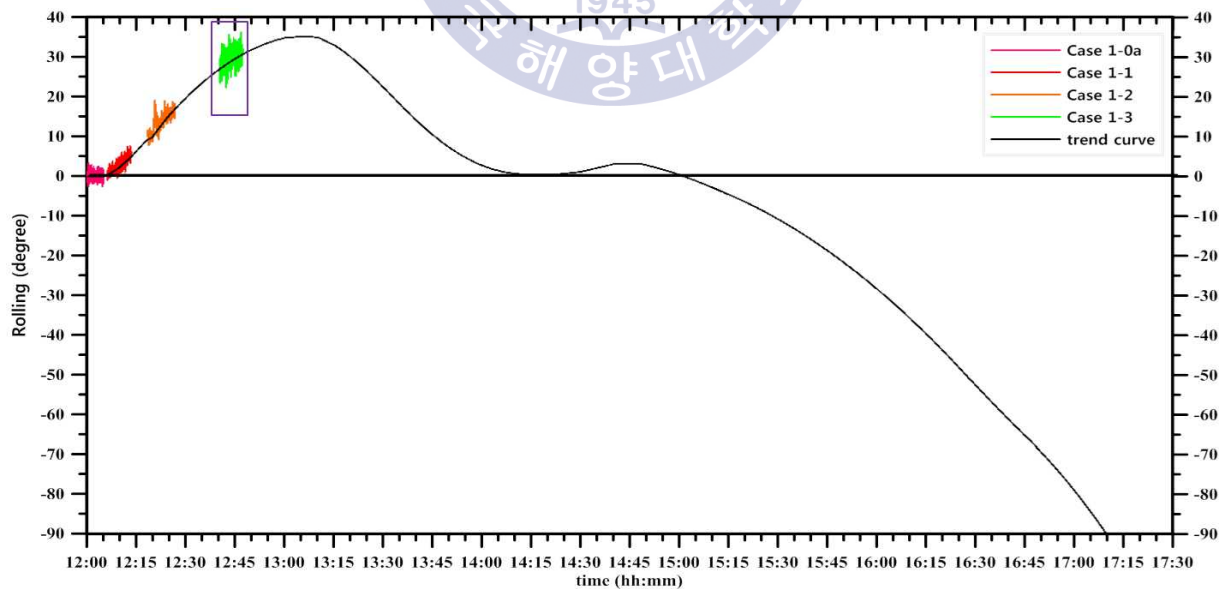
(c) engine room and fishing hold

Fig. 46 Initial seawater inflow state in Case 1-3

선체가 25° 정도 우현으로 경사한 상태에서 좌현 선미각도 72.5°로 좌현과랑을 받으면서 해치커버와 오물배출구를 통해 계속 해수가 유입되어 선체가 30° 정도의 각도로 우현으로 경사하는 시나리오를 FSI 해석기법의 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 황요 응답과 실선 침수·침몰 시뮬레이션의 거동을 각각 Fig. 47과 Fig. 48에 나타내었다. 어획물처리실의 선수 쪽에 위치한 1번 및 2번 어창 해치를 통해 해수가 조금 더 유입되는 어획물처리실 및 어창 내의 해수유동 및 침수·침몰 시뮬레이션 거동도 Fig. 49에 나타내었다.

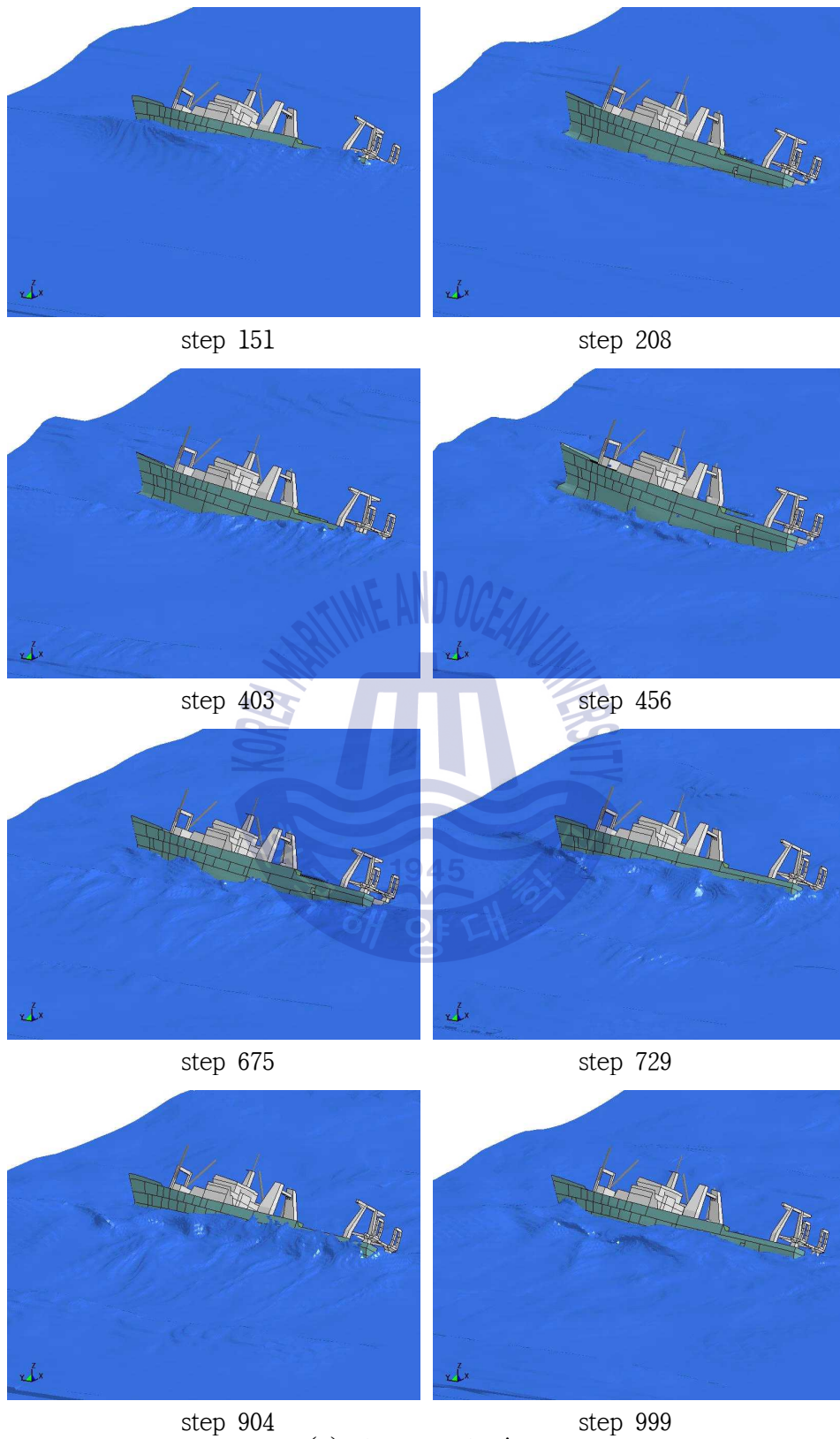


(a) zoom view of rolling response in Case 1-0



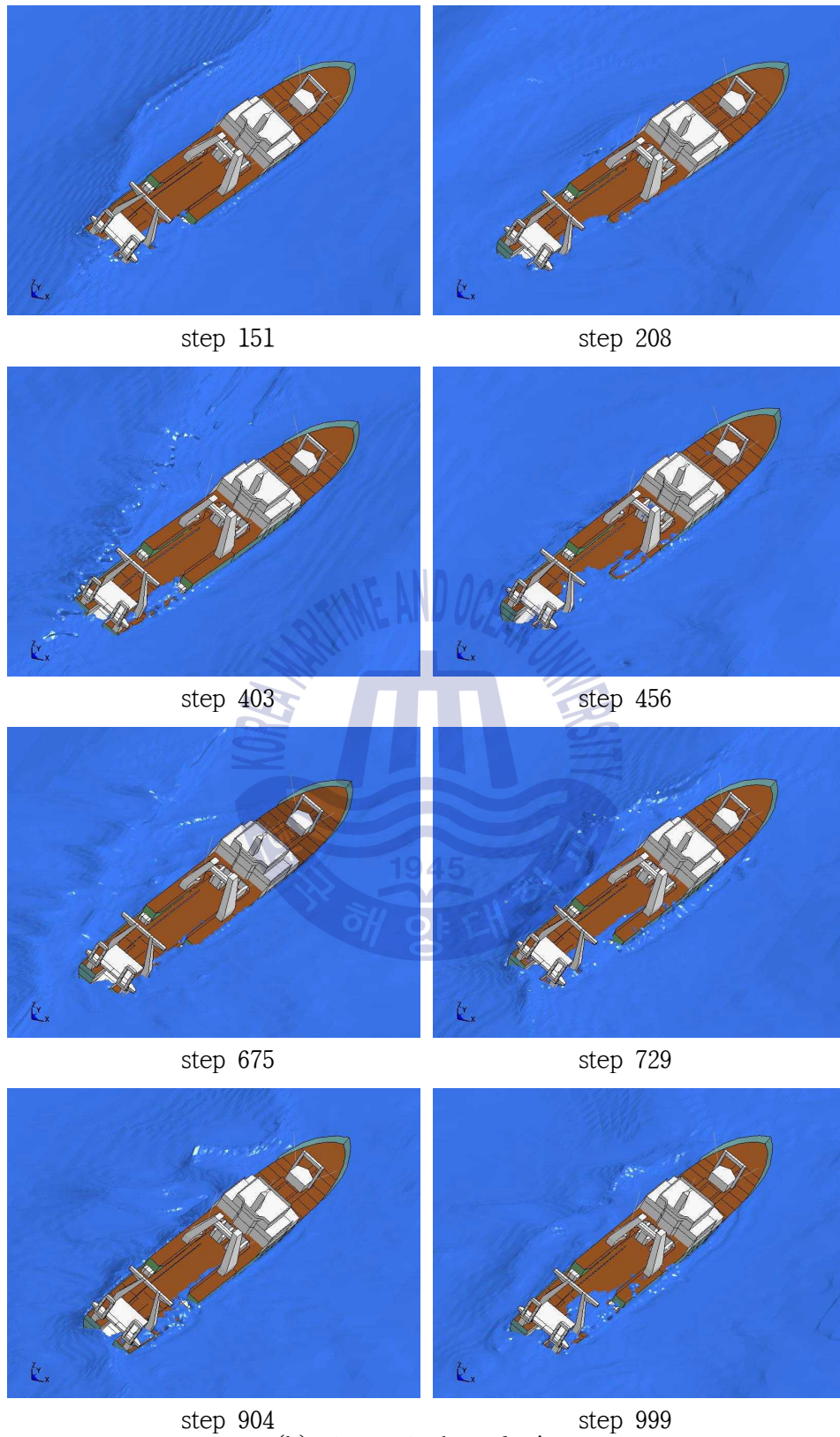
(b) rolling response according to scenario through flooding·sinking simulation

Fig. 47 Rolling response of fishing vessel in Case 1-3



(a) stern port view

Fig. 48 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-3 (continued)



(b) stern starboard view

Fig. 48 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-3 (continued)

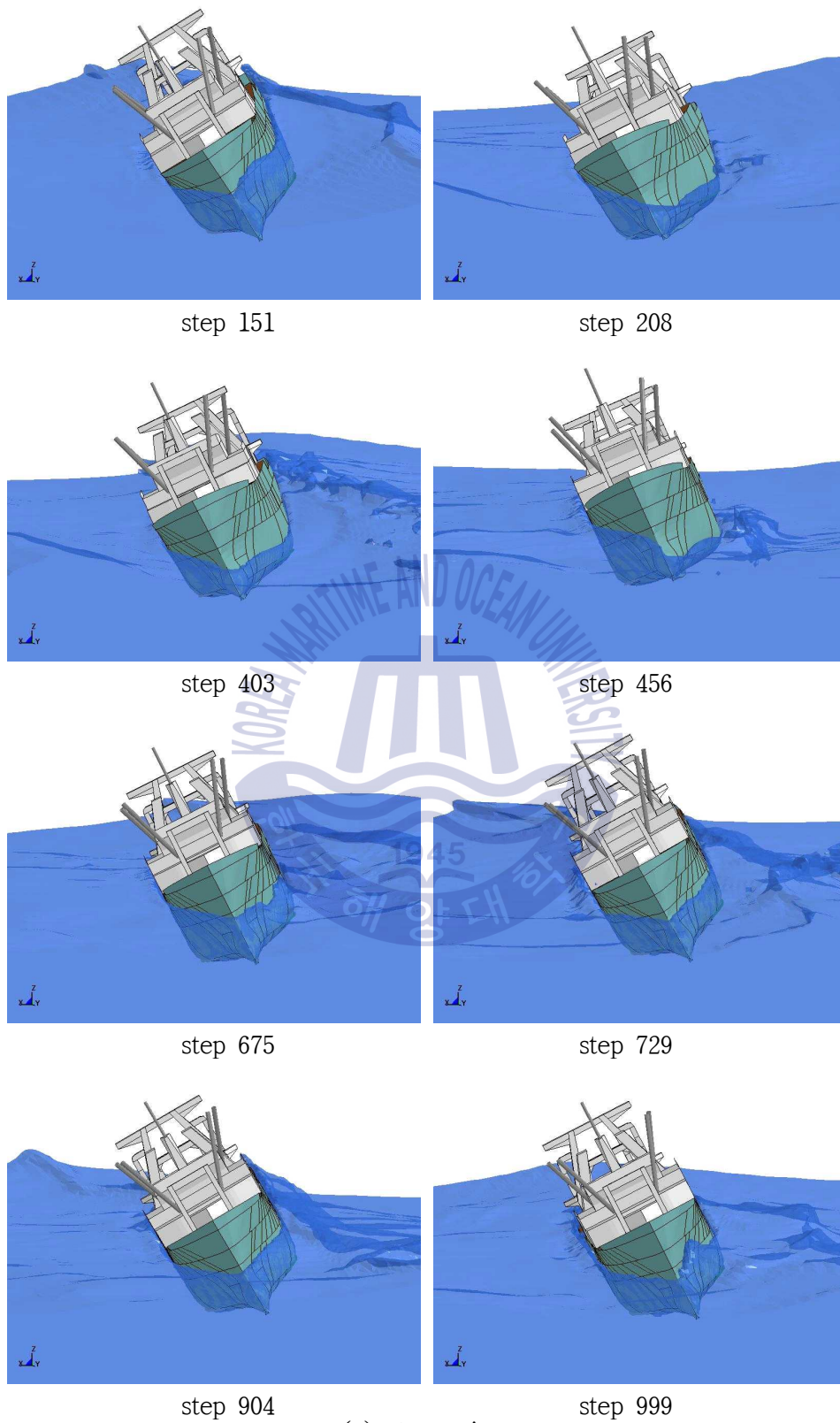
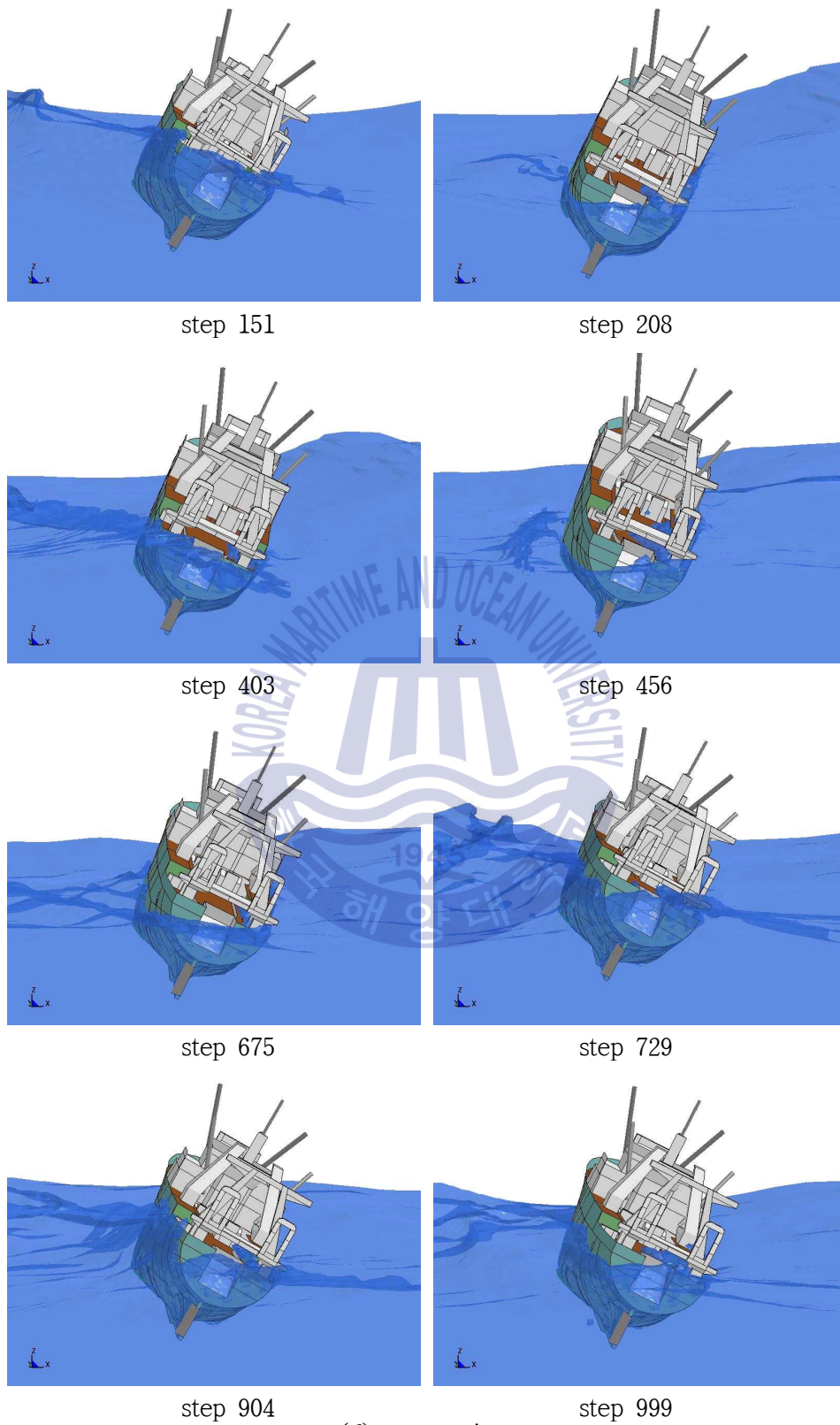


Fig. 48 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-3 (continued)

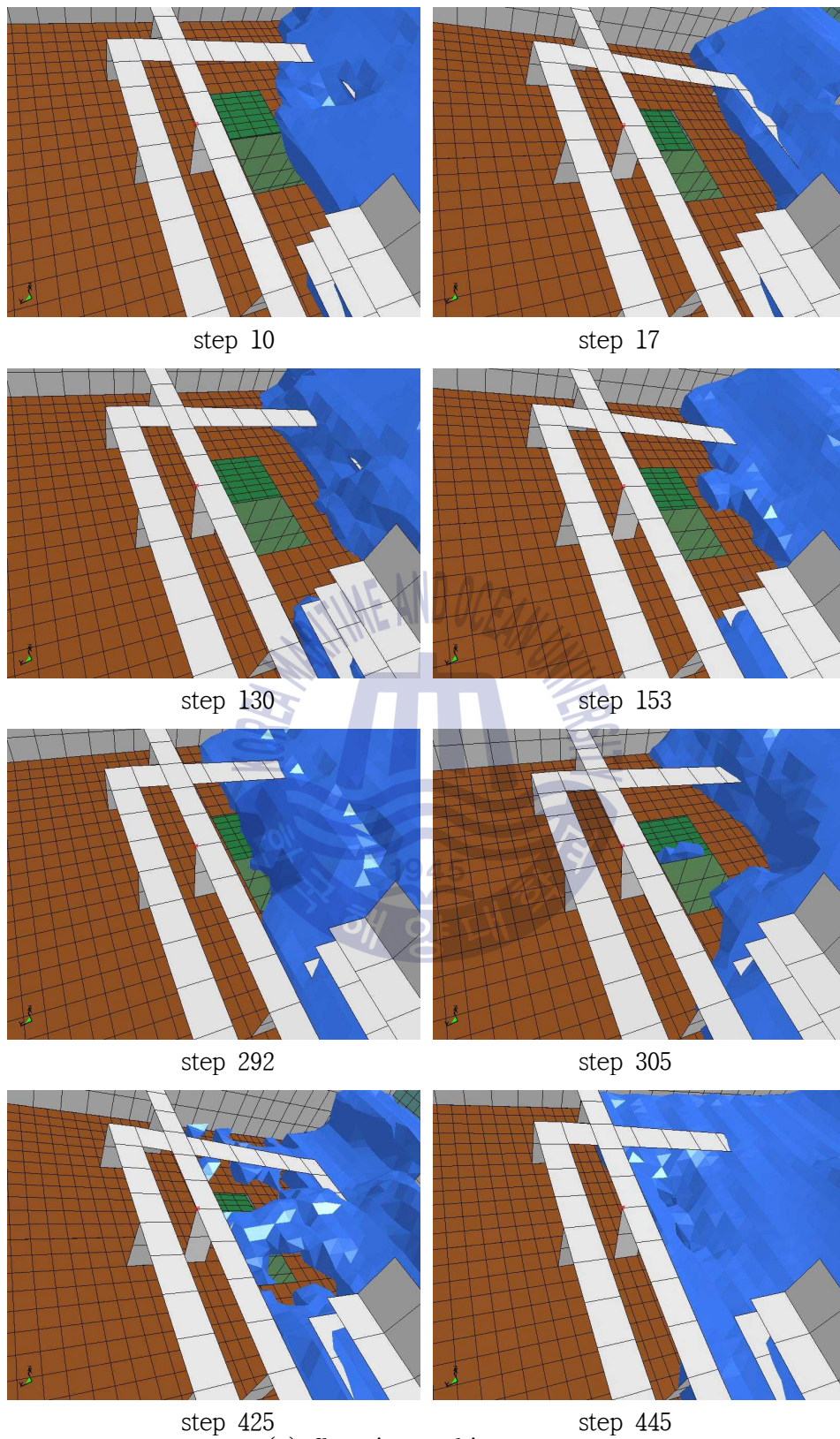


(d) stern view

Fig. 48 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-3

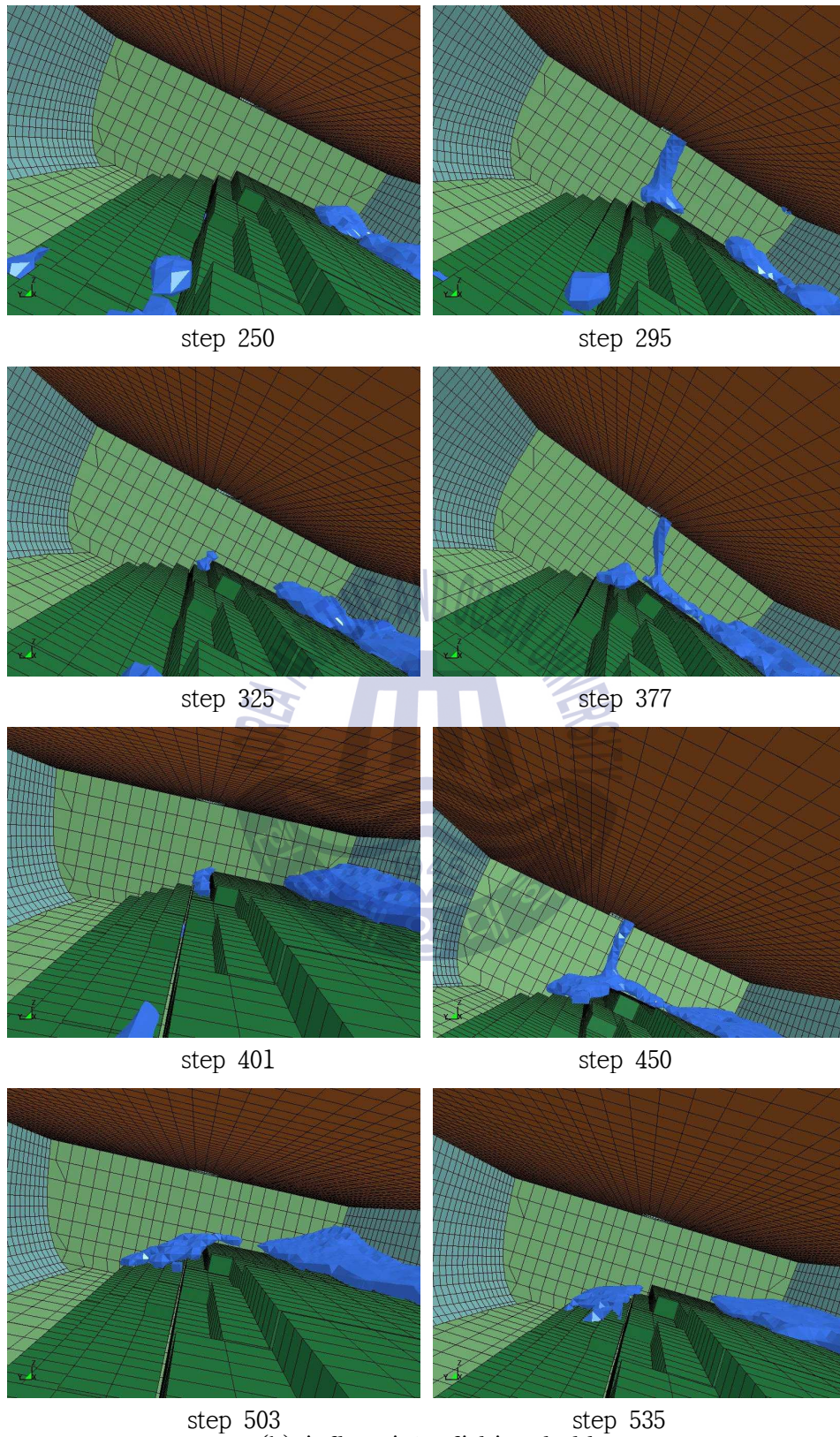
Case 1-3에서 선체가 25° 정도 우현으로 경사한 상태에서 좌현 선미각도 72.5°로 좌현과랑을 받으면서 해치커버와 오물배출구를 통해 계속 해수가 유입되어 선체가 30° 정도의 각도로 우현으로 경사하는 것을 Fig. 48의 침수·침몰 시뮬레이션 거동을 통해 확인할 수 있다. 우현으로 경사하면서 파도에 의해 우현선미가 횡요와 중요에 의해 수면에 잠기면서 해치커버를 통해 해수가 유입하고, 좌현 선측외판을 파도가 크게 치면서 오물배출구를 통해 주기적으로 해수가 크게 유입되어 어획물처리실의 해수의 침수가 증가하였다.

30° 정도의 각도로 우현으로 경사지면서 기관실 출입문 앞에 유입된 해수는 배수시키고 출입문을 닫아 수밀시켰지만, 어획물처리실의 선수 쪽에 위치한 어창 해치를 통해 해수가 조금 더 유입되었다는 것을 Fig. 49의 어획물처리실 및 어창내의 해수유동 및 침수 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있다. Table 3과 4의 Case 1-3에서와 같이 각 구획별 해수의 침수량은 약 181톤 정도 증가하였고, 해치커버와 오물배출구를 통하여 각각 148.4톤과 28.6톤이 유입되었고 피쉬병커와 어획물처리실 및 어창에 각각 49톤, 354톤 및 68톤이 침수되었다.



(a) flow in working space

Fig. 49 Sea water flow and inflow behavior in working space (continued)



(b) inflow into fishing hold

Fig. 49 Sea water flow and inflow behavior in working space

5.5 Case 1-4 : 좌현횡파에 의한 35° 우현 경사

Case 1-4는 Case 1-3에 이어 해치커버와 오물배출구를 통해 약 117톤의 해수가 더 유입되어 Fig. 50과 Table 3 Case 1-4에서와 같이 약 588톤 정도의 해수가 피쉬병커와 어획물처리실 바닥에 각각 약 64톤과 441톤, 어창에 약 83톤 정도 침수된 선체가 35° 정도 우현으로 경사한 상태에서 Fig. 28(d)에서와 같이 좌현 선미각도 72.5°로 우현파랑을 받으면서 표류하고 있는 시나리오이다.

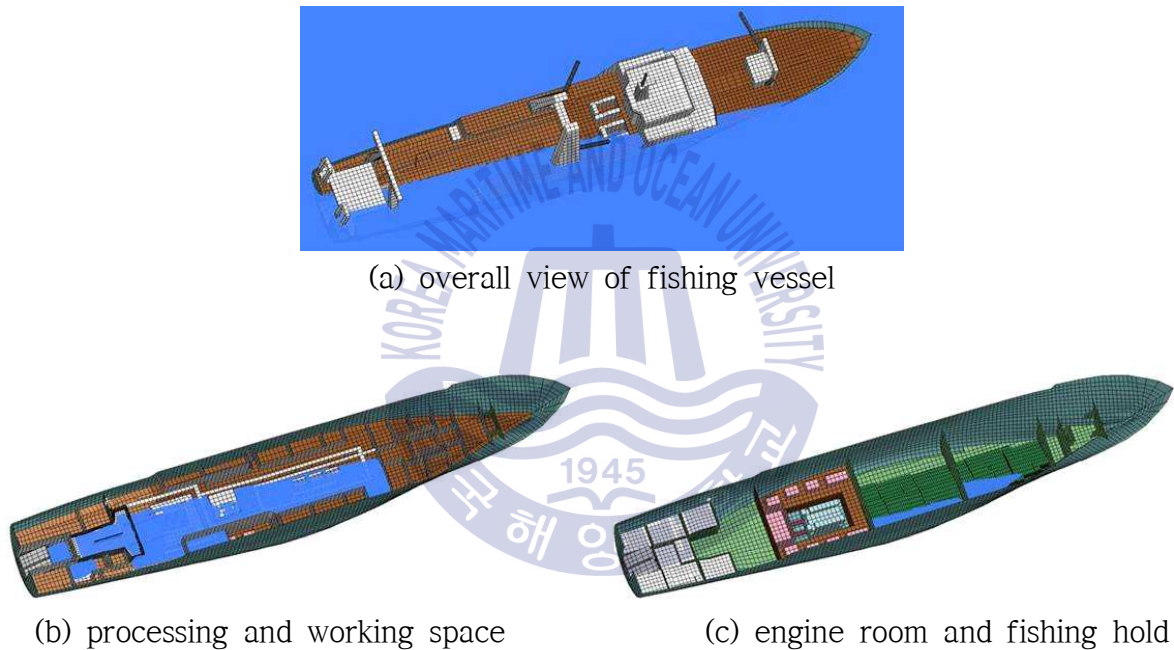
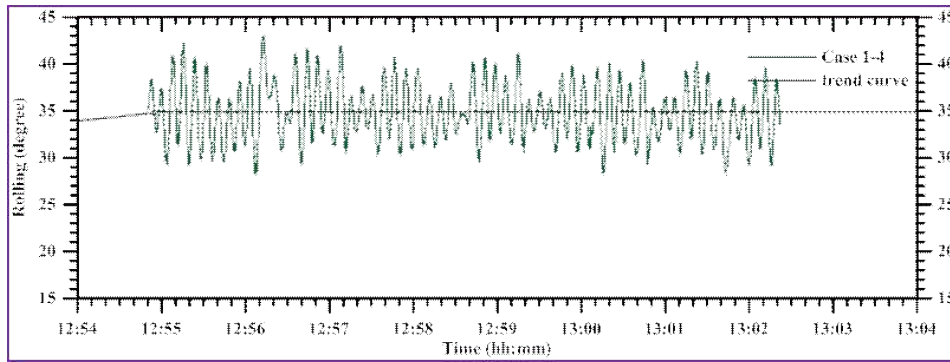
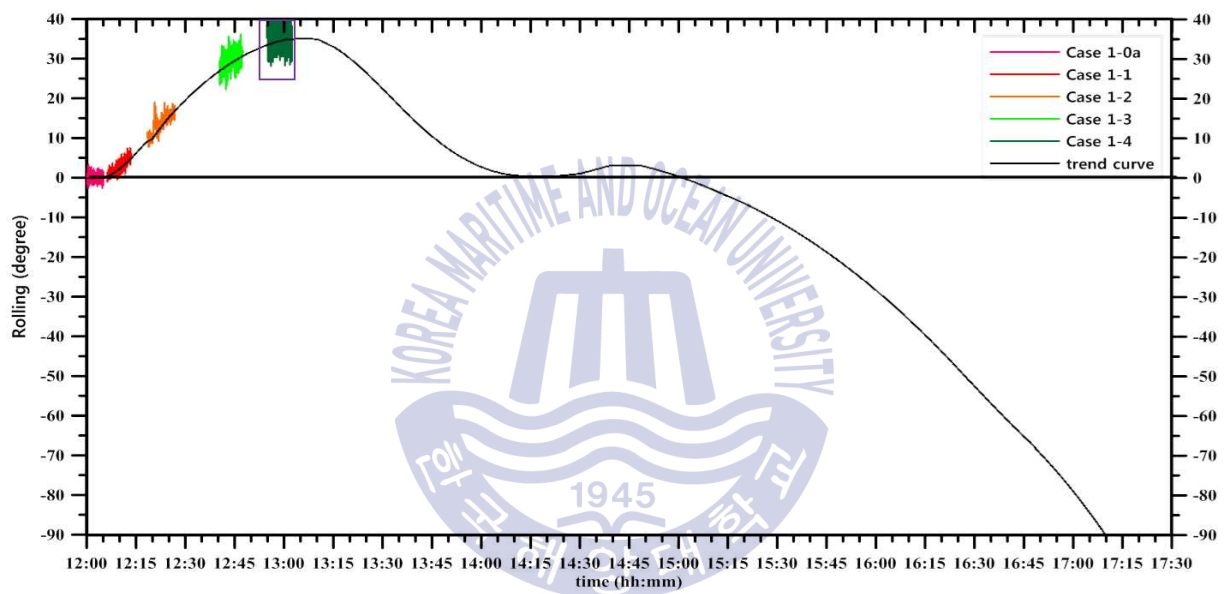


Fig. 50 Initial seawater inflow state in Case 1-4

인근 조업어선을 통해 지원받은 펌프로 선체에 침수된 해수를 약 2/3 정도 배수하기 시작하여 선체가 일시적으로 우현으로 더 이상 경사하지 않는 시나리오에 대하여 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 중요 응답과 실선 침수·침몰 시뮬레이션의 거동을 각각 Fig. 51과 Fig. 52에 나타내었다. 선체 내부의 해수가 일시적으로 더 이상 증가하지 않고 경사가 유지되는 것을 확인할 수 있다.

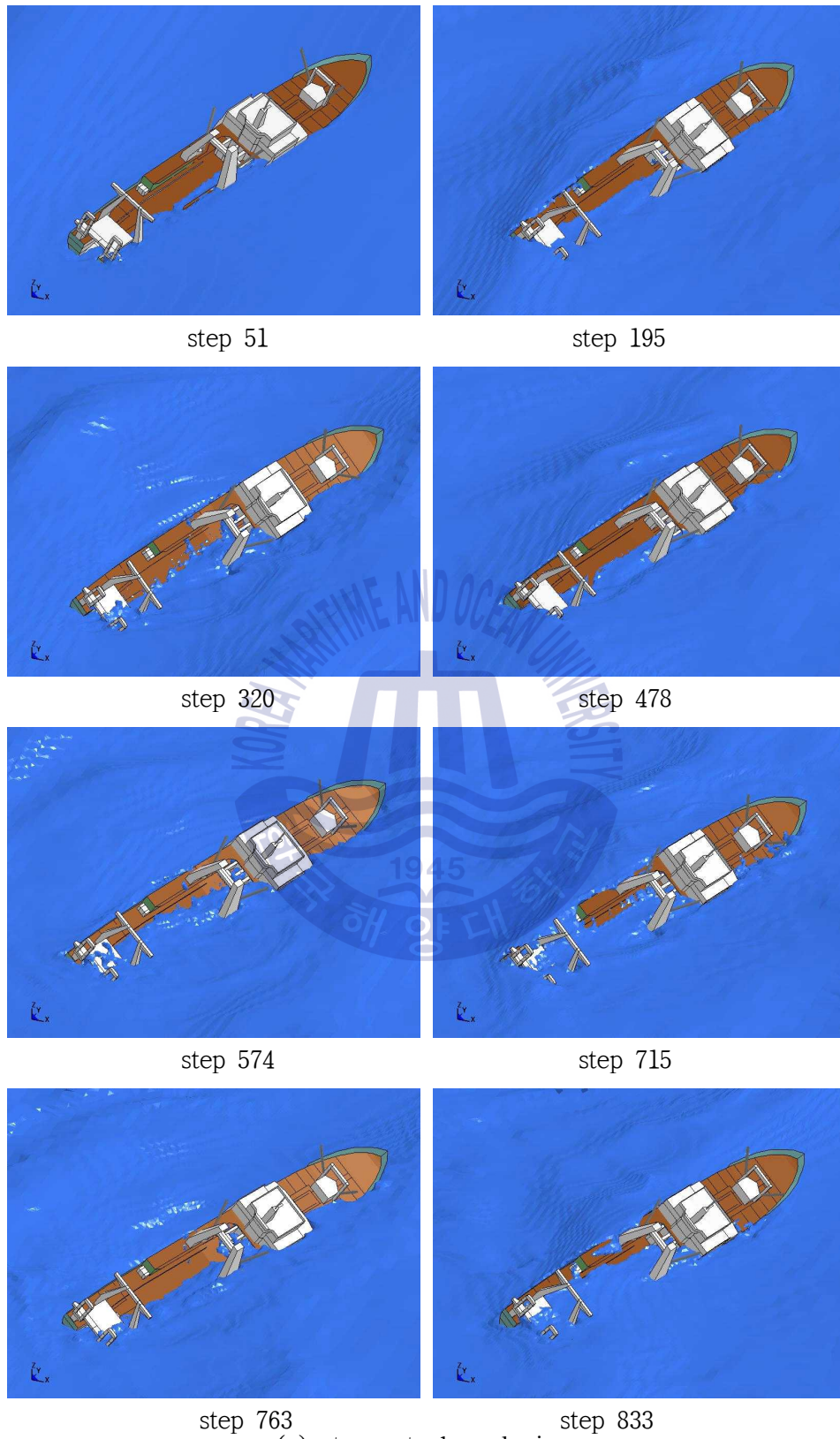


(a) zoom view of rolling response in Case 1-4



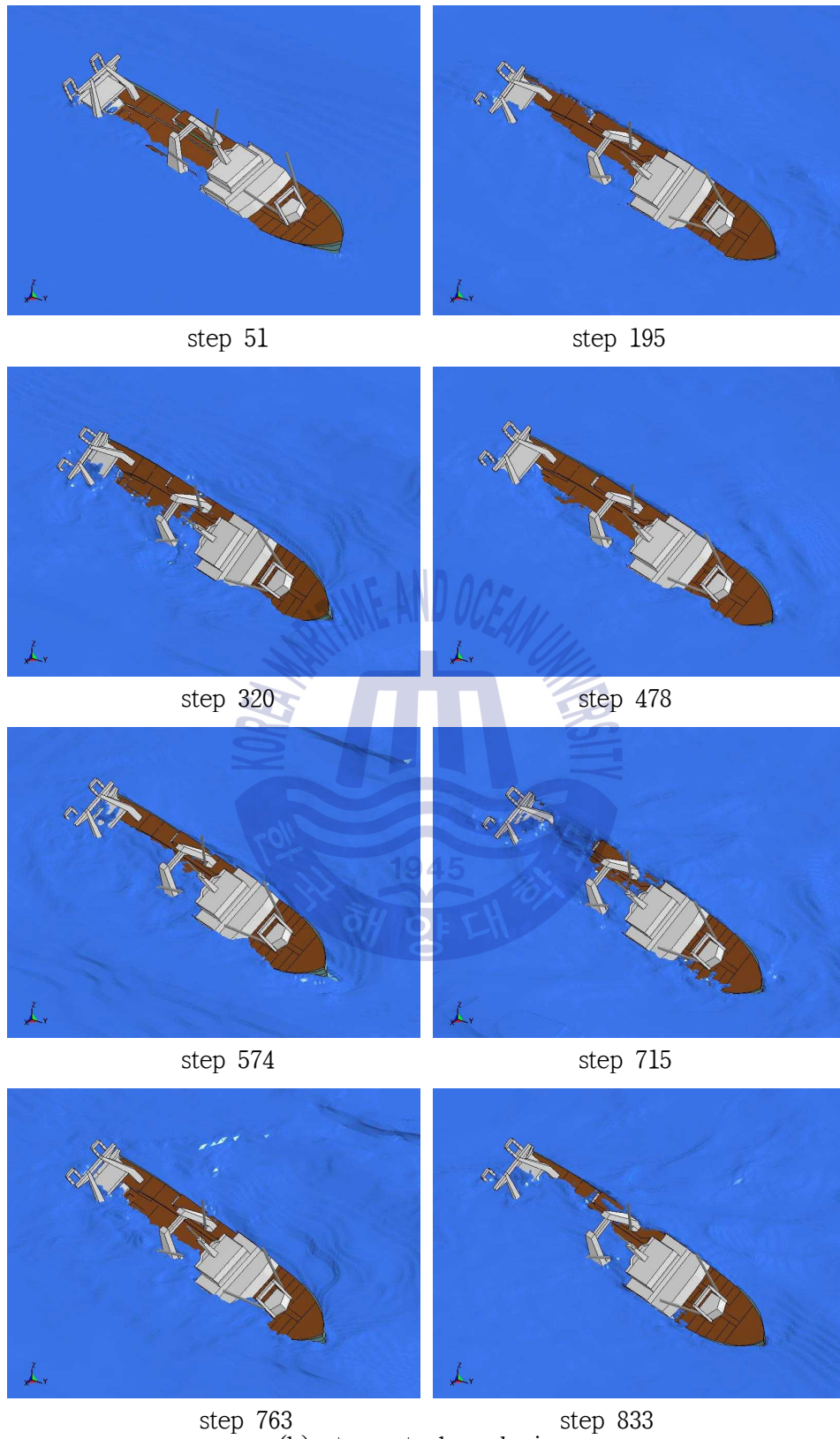
(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 51 Rolling response in Case 1-4



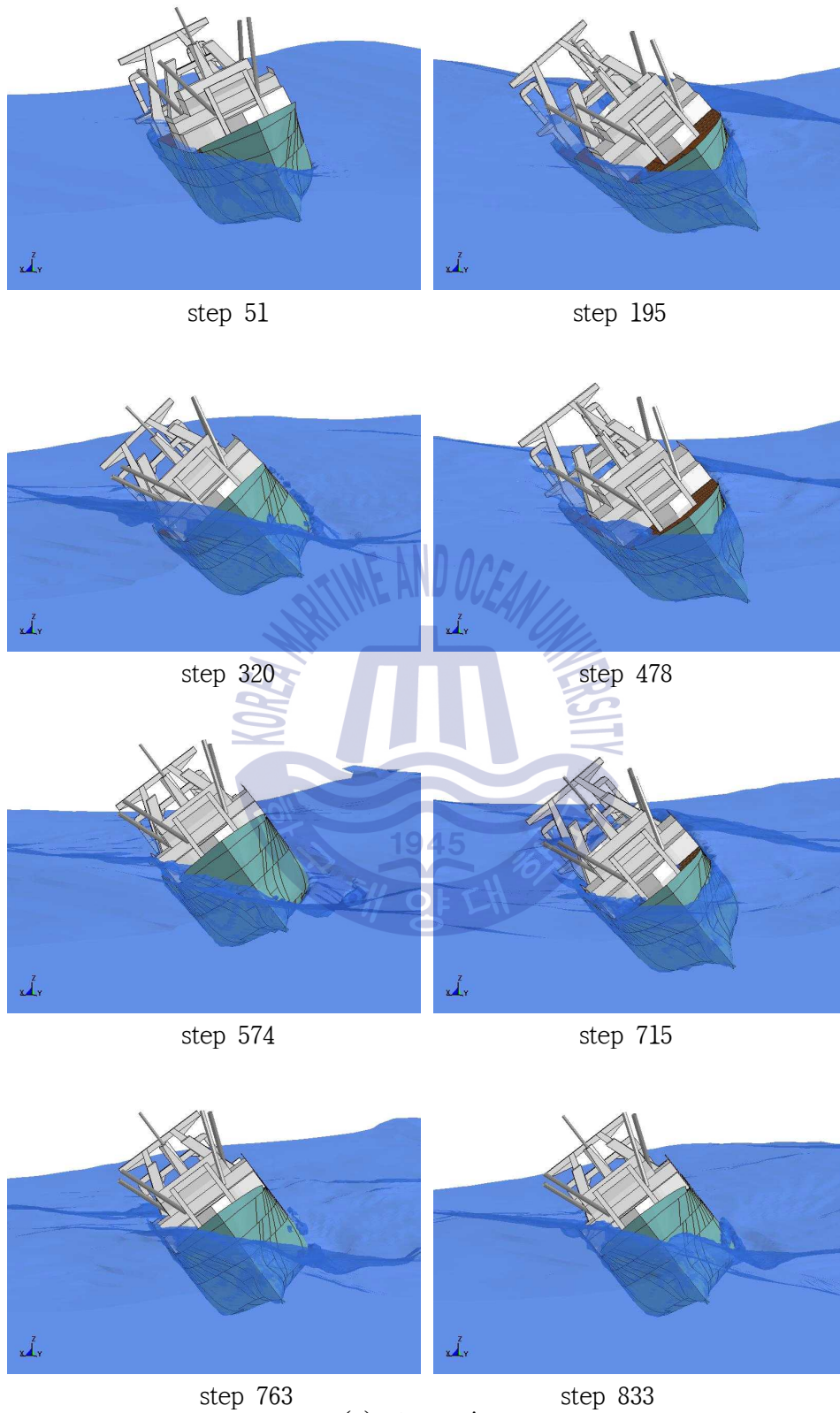
(a) stern starboard view

Fig. 52 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-4 (continued)



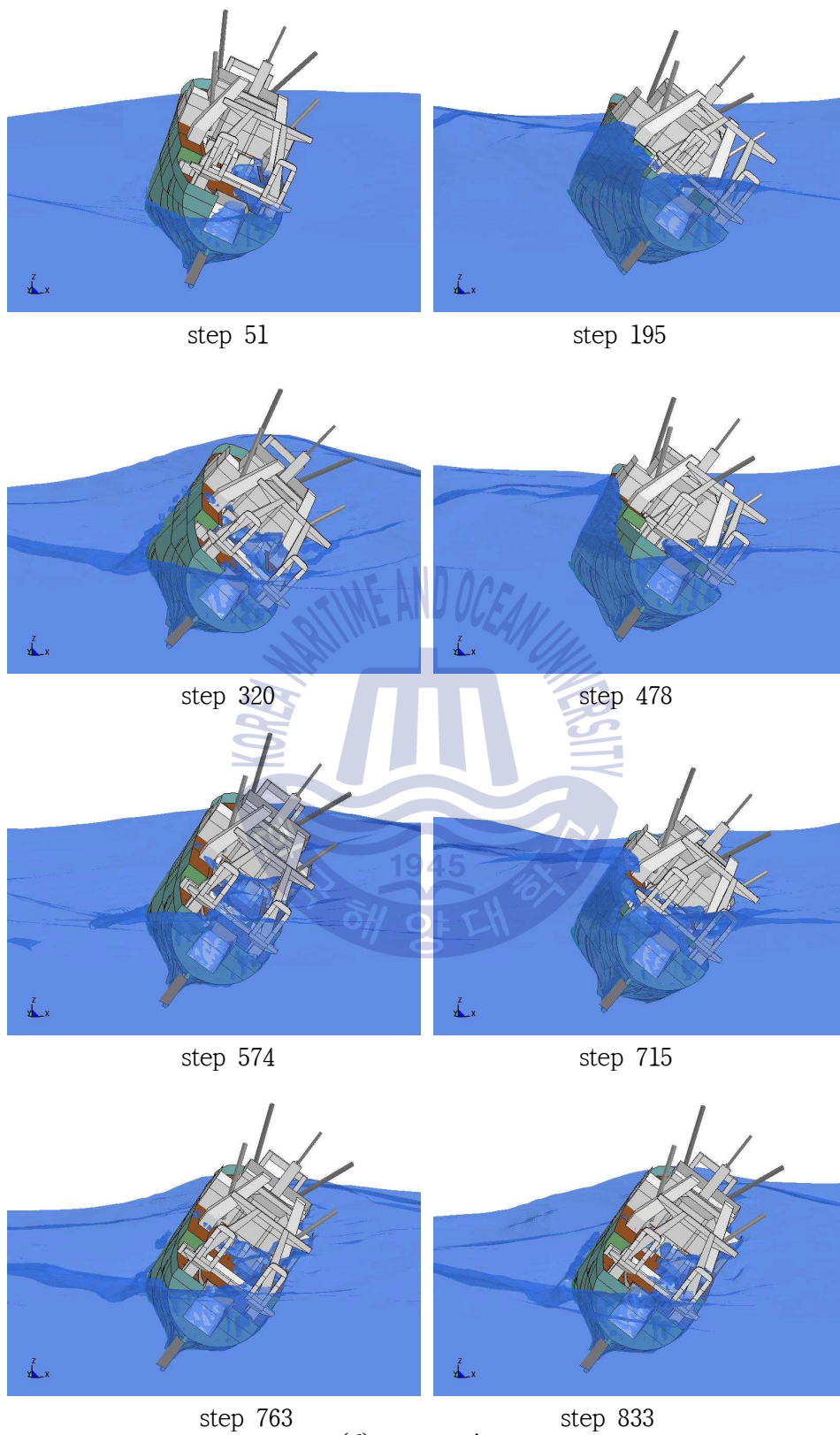
(b) stem starboard view

Fig. 52 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-4 (continued)



(c) stem view

Fig. 52 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-4 (continued)



(d) stern view

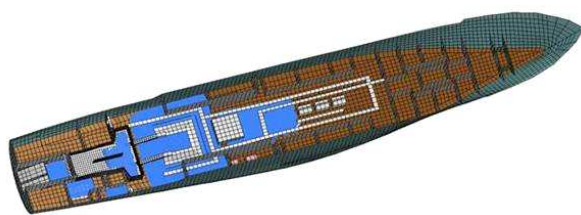
Fig. 52 Flooding and sinking simulation behavior in Case 1-4

5.6 Case 2-0 : 어획물 좌현 이동 시 좌현횡파에 일시 평형

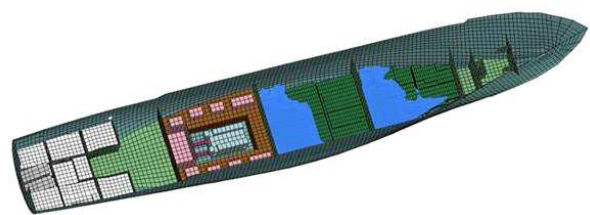
Case 2-0a는 Case 1-4에서 펌프로 약 2/3 정도 해수를 배수하면서 어창의 약 30톤 정도의 어획물과 약 48톤 정도 연료유를 좌현으로 옮겨 Fig. 53과 Table 3 Case 2-0에서와 같이 피쉬병커와 어획물처리실 바닥에 각각 약 8톤과 99톤 정도의 해수로 크게 줄어들었고 어창은 여전히 같은 83톤의 해수가 침수된 선체가 일시적으로 0°로 평형을 이루고 있으면서 Fig. 29(a)에서와 같이 좌현 선미 각도 72.5° 각도로 좌현과랑을 받으면서 표류하고 있는 시나리오이다. Case 2-0는 초기에 평형을 이루었던 Case 2-0a에서 오물 배출구를 통해 약 30톤 정도가 유입되면서 우현으로 약 3° 정도 횡경사지게 되는 Case 2-0b로 두 개의 시나리오로 구성하였다.



(a) overall view of fishing vessel



(b) processing and working space

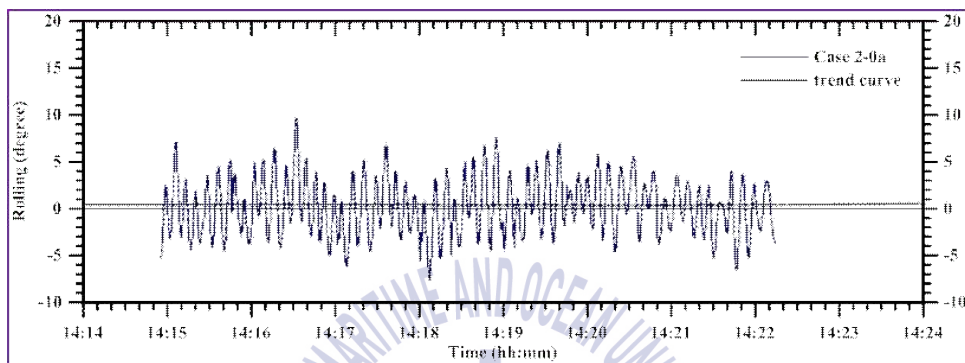


(c) engine room and fishing hold

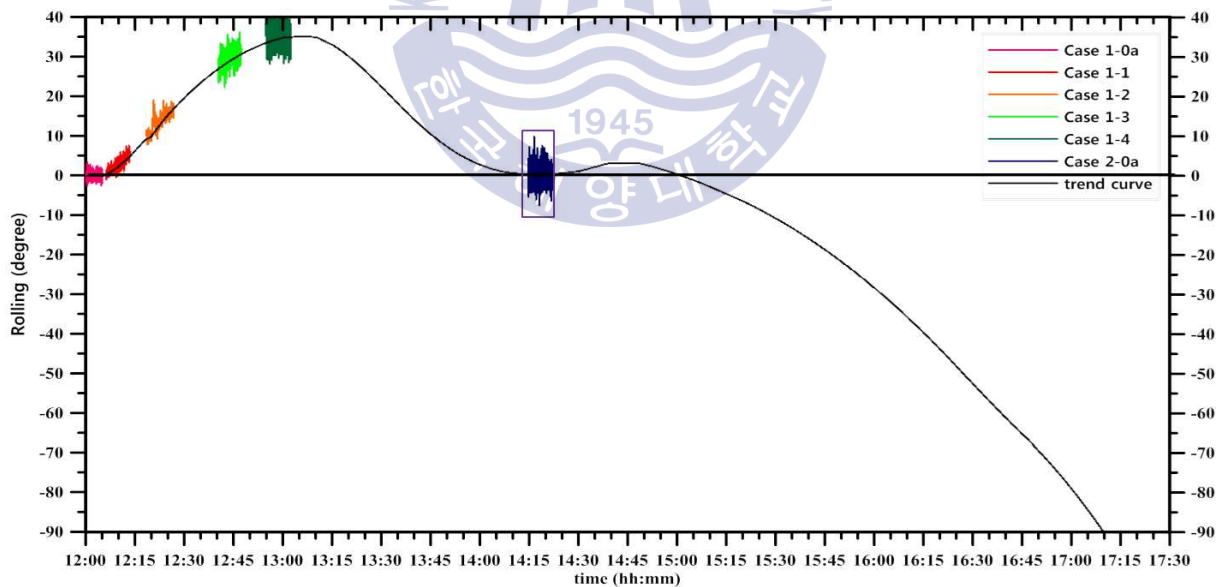
Fig. 53 Initial seawater inflow state in Case 2-0a

2개의 시나리오에 따른 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 선체 횡요 응답과 침수·침몰 시뮬레이션 거동을 각각 Fig. 54와 Fig. 55에 그리고 Fig. 56에 나타내었다. 횡요 응답과 침수·침몰 시뮬레이션 거동에서와 같이

당분간 평형을 유지할 수 있었으나 오물배출구를 통한 해수 유입으로 다시 우현으로 기울기 시작하였고 이로 인해 선회하여 우현횡과를 받게 된 것으로 이 유로 사료된다. Table 3과 4의 Case 2-0에서와 같이 해수의 침수량은 약 30톤 정도 오물배출구를 통하여 유입되었고 피쉬병커와 어획물처리실 및 어창에 각각 10톤, 143톤 및 99톤이 침수되었다.

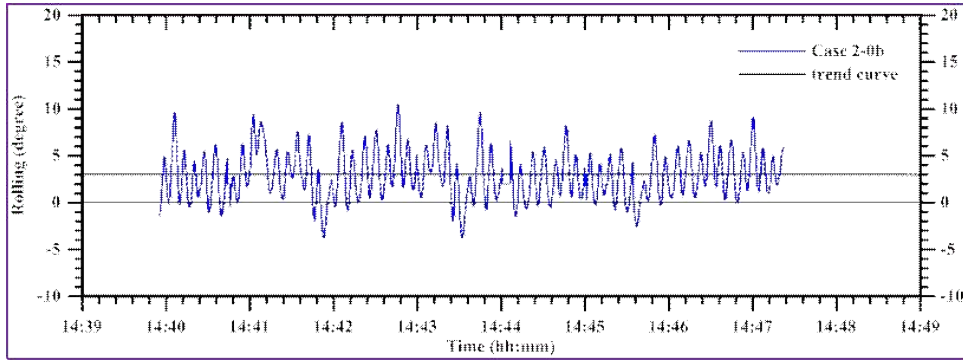


(a) zoom view of rolling response in Case 2-0a

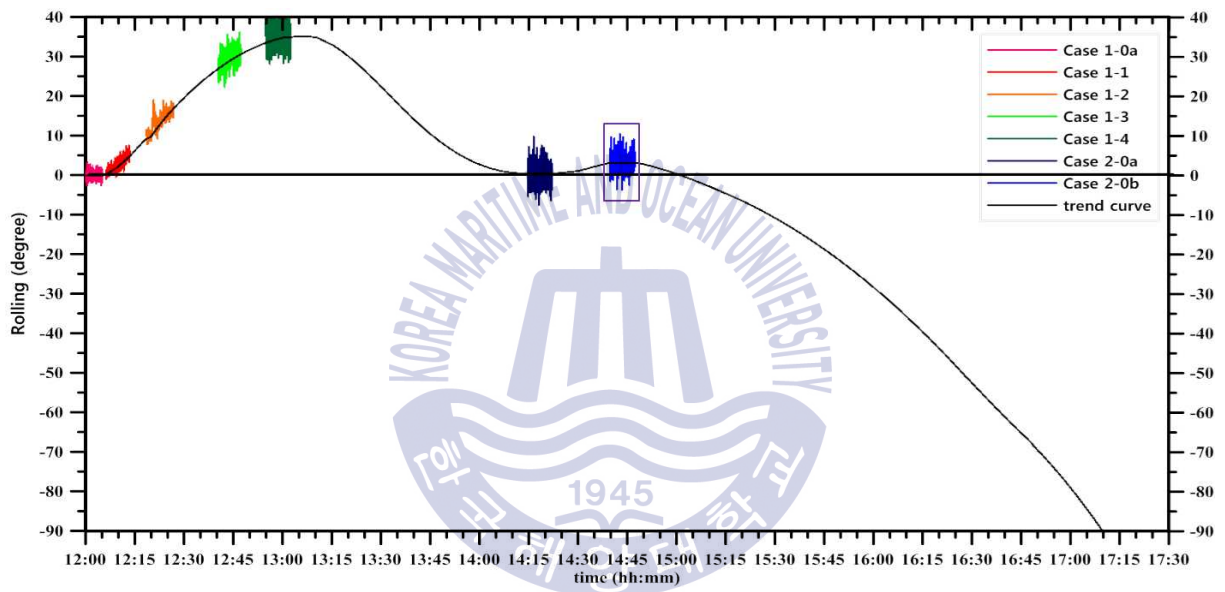


(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 54 Rolling response of fishing vessel in Case 2-0 (continued)

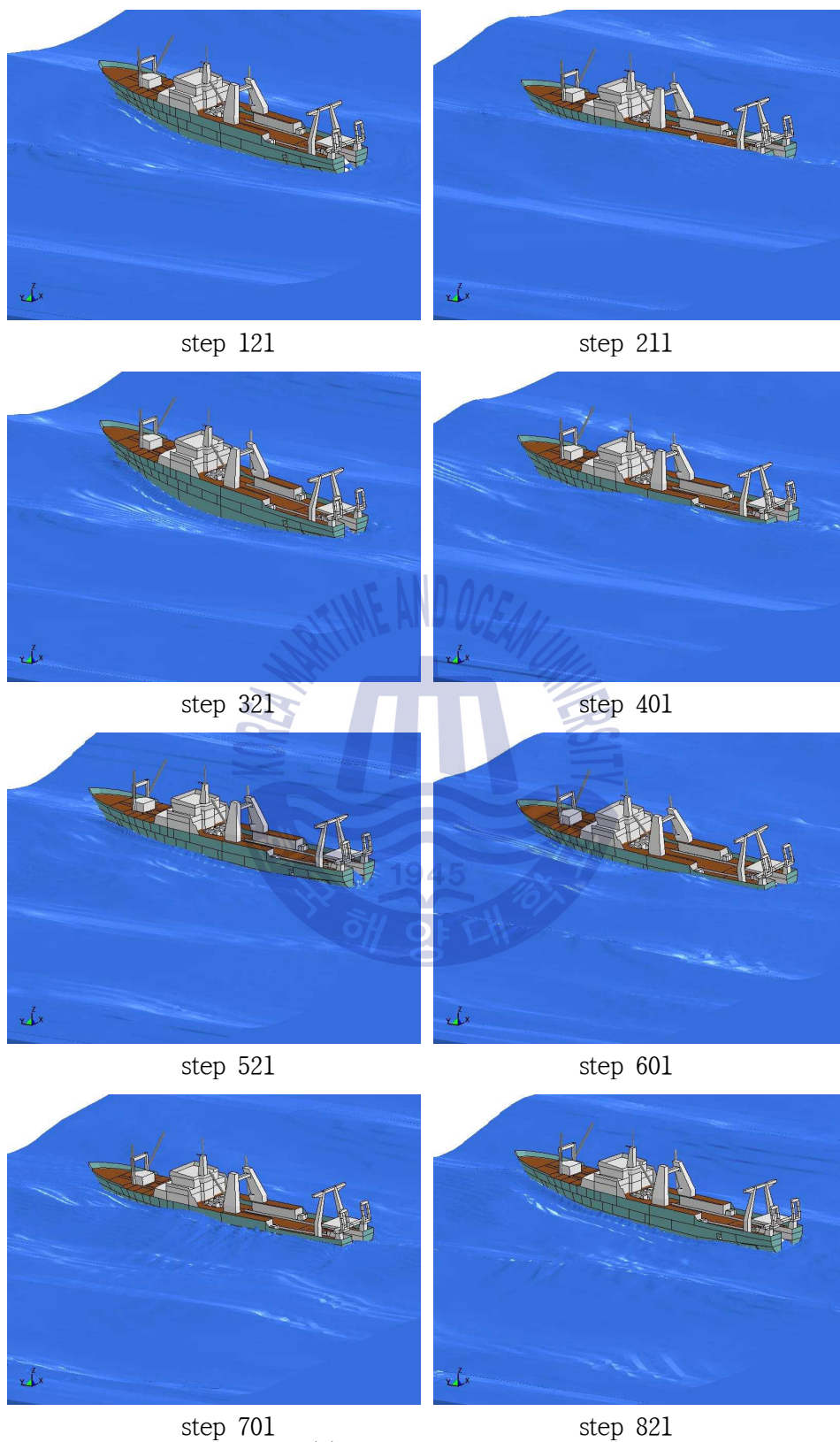


(c) zoom view of rolling response in Case 2-0b



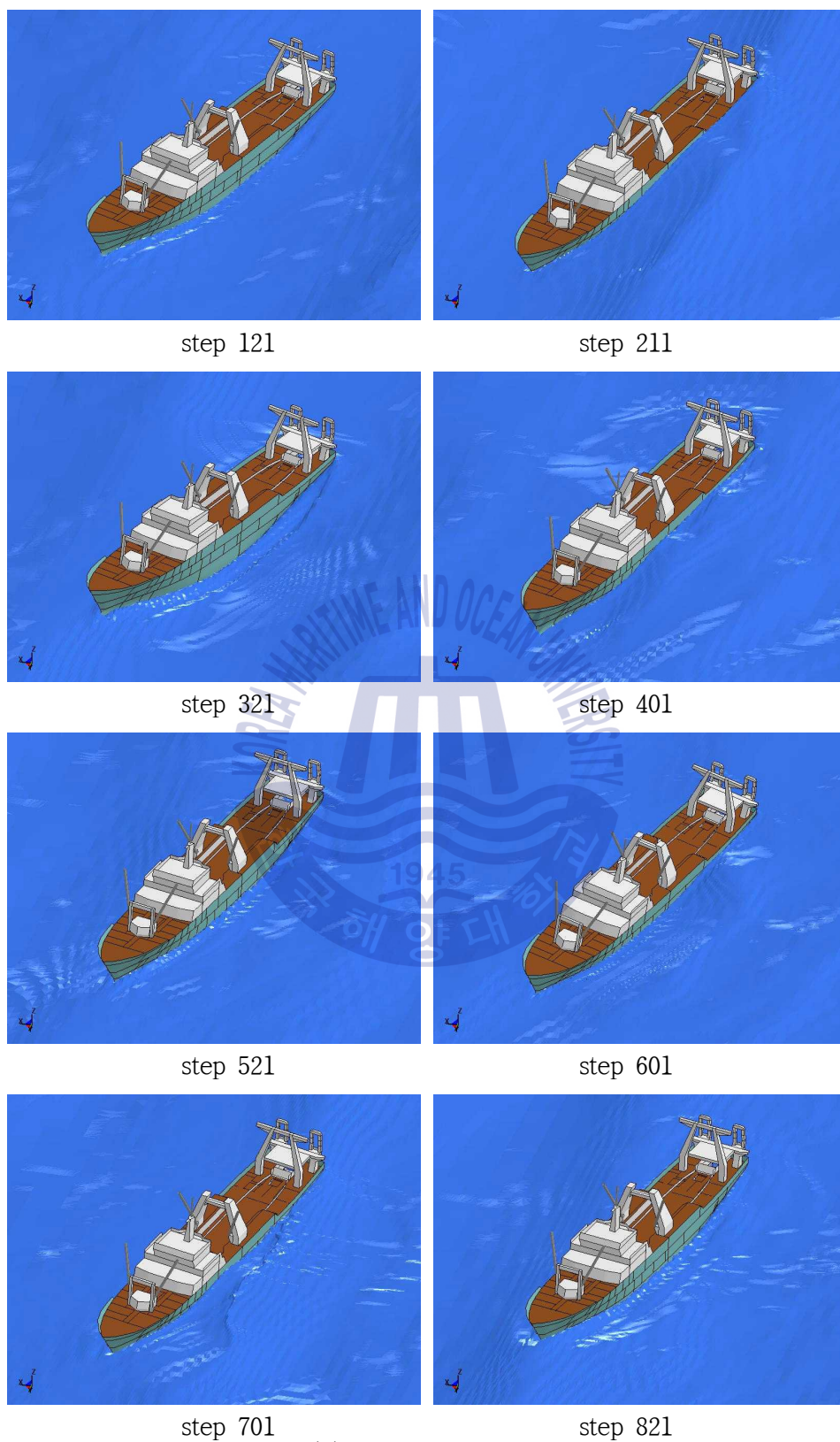
(d) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 54 Rolling response of fishing vessel in Case 2-0



(a) stern port view

Fig. 55 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0a (continued)



(b) stem port view

Fig. 55 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0a (continued)

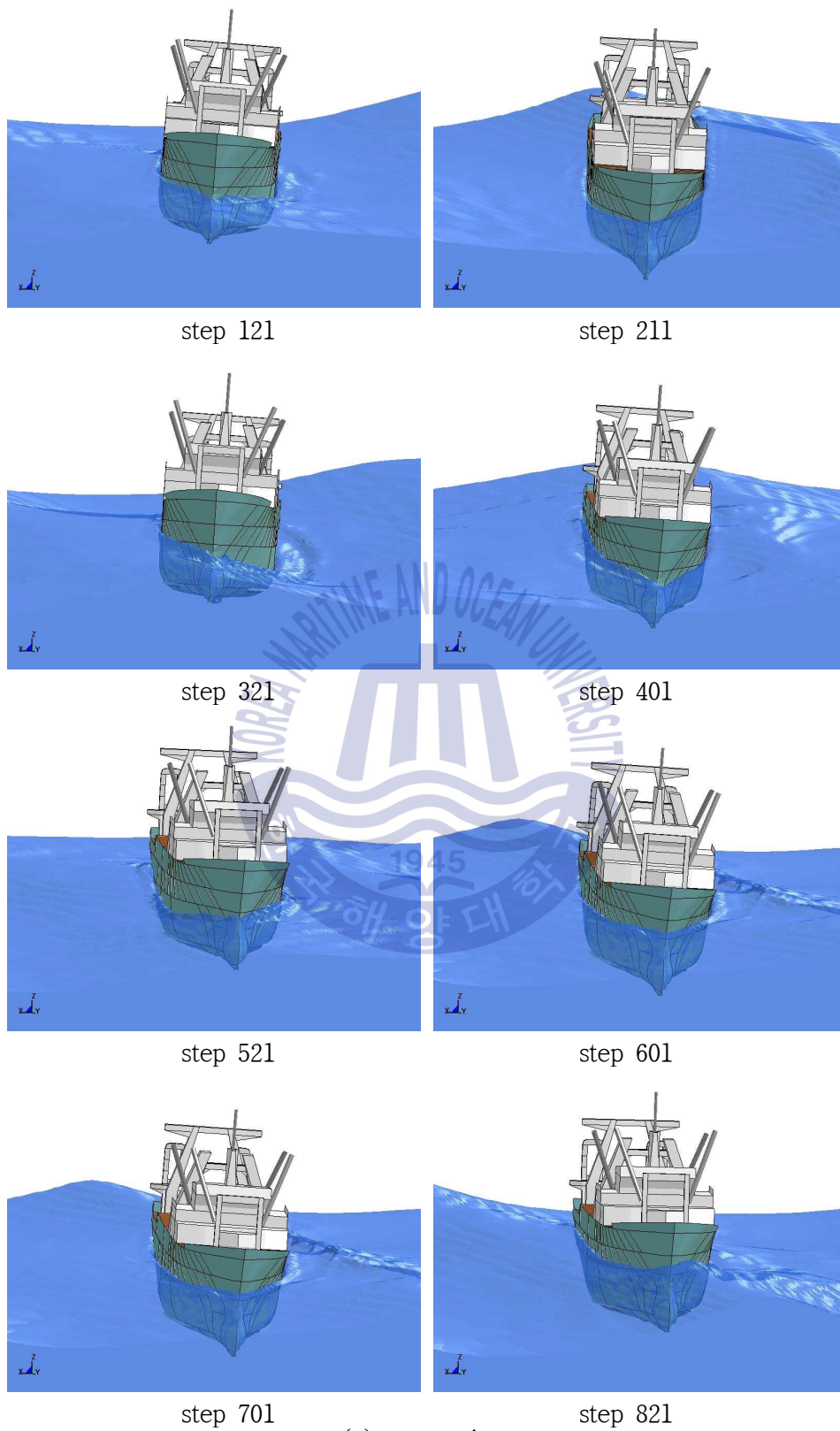
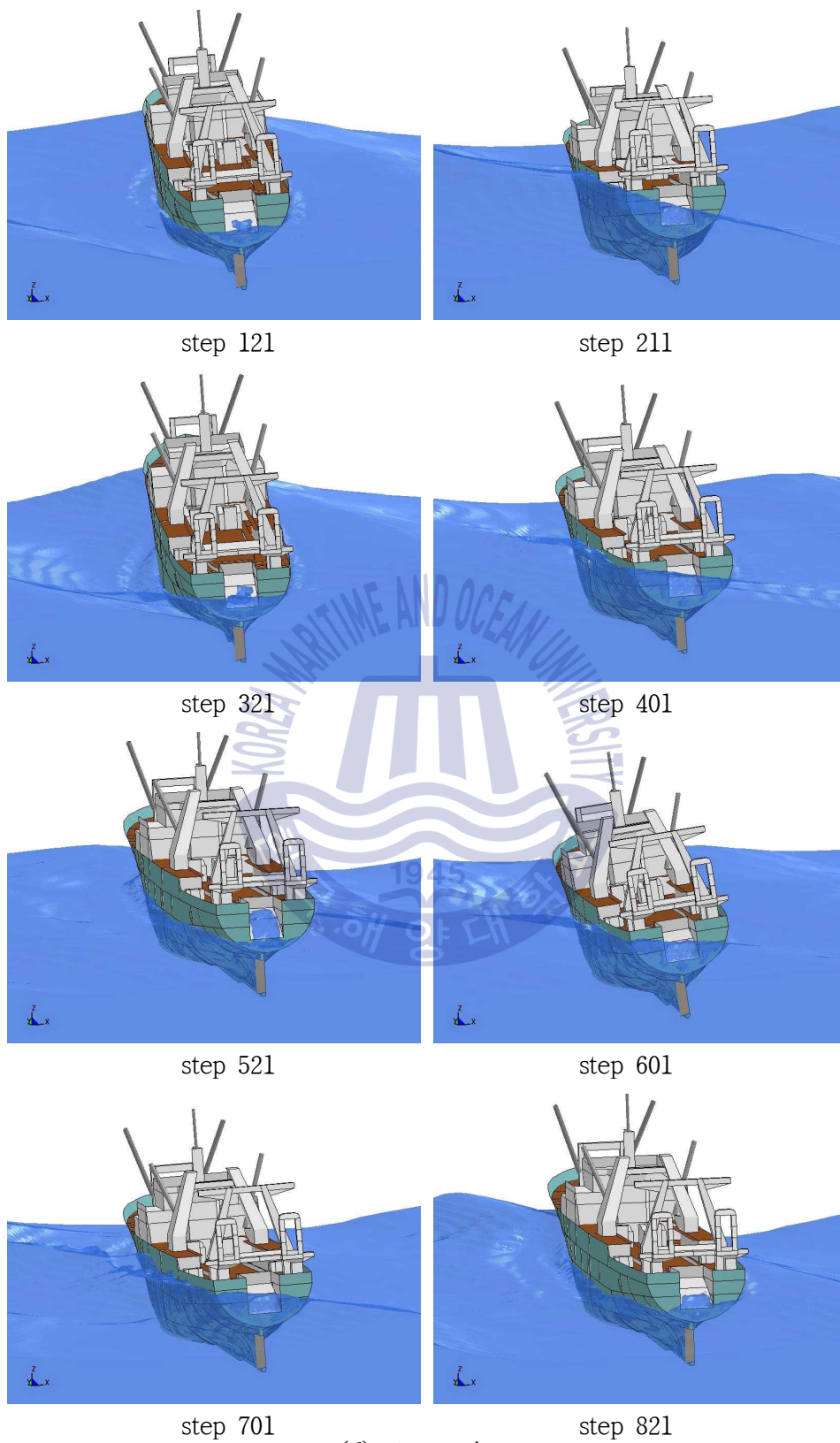
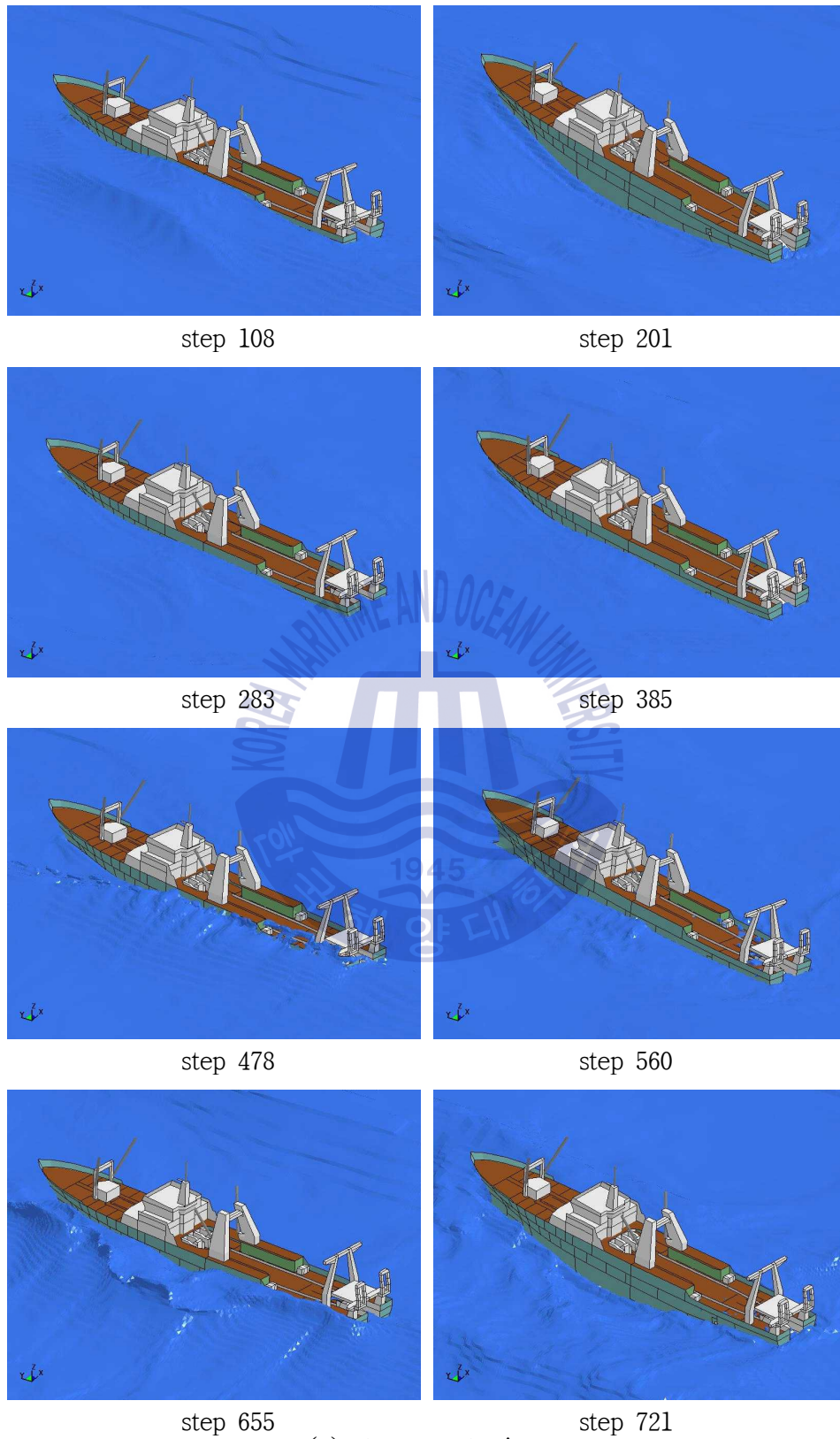


Fig. 55 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0a (continued)



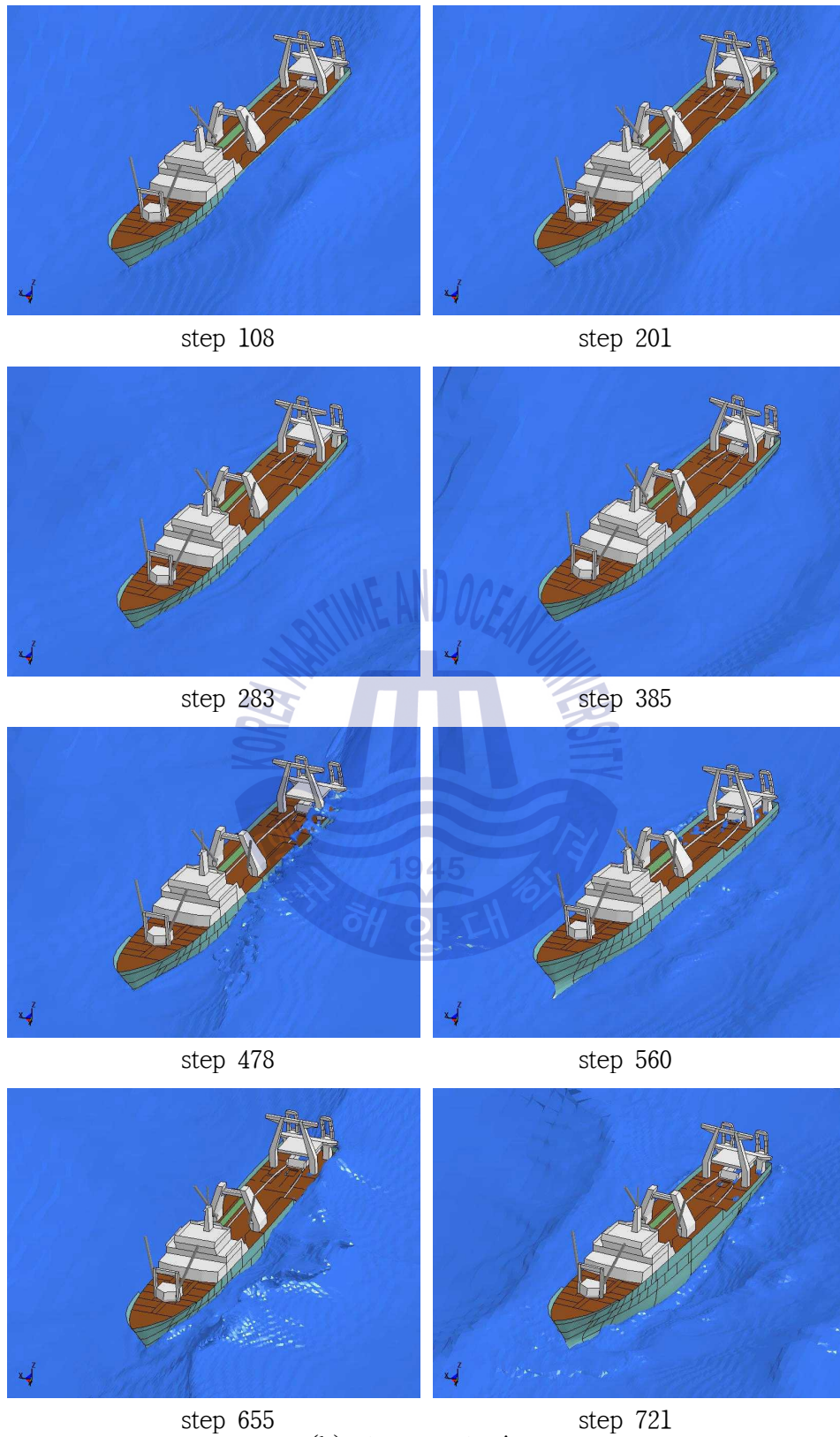
(d) stern view

Fig. 55 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0a



(a) stern port view

Fig. 56 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0b (continued)



(b) stem port view

Fig. 56 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0b (continued)

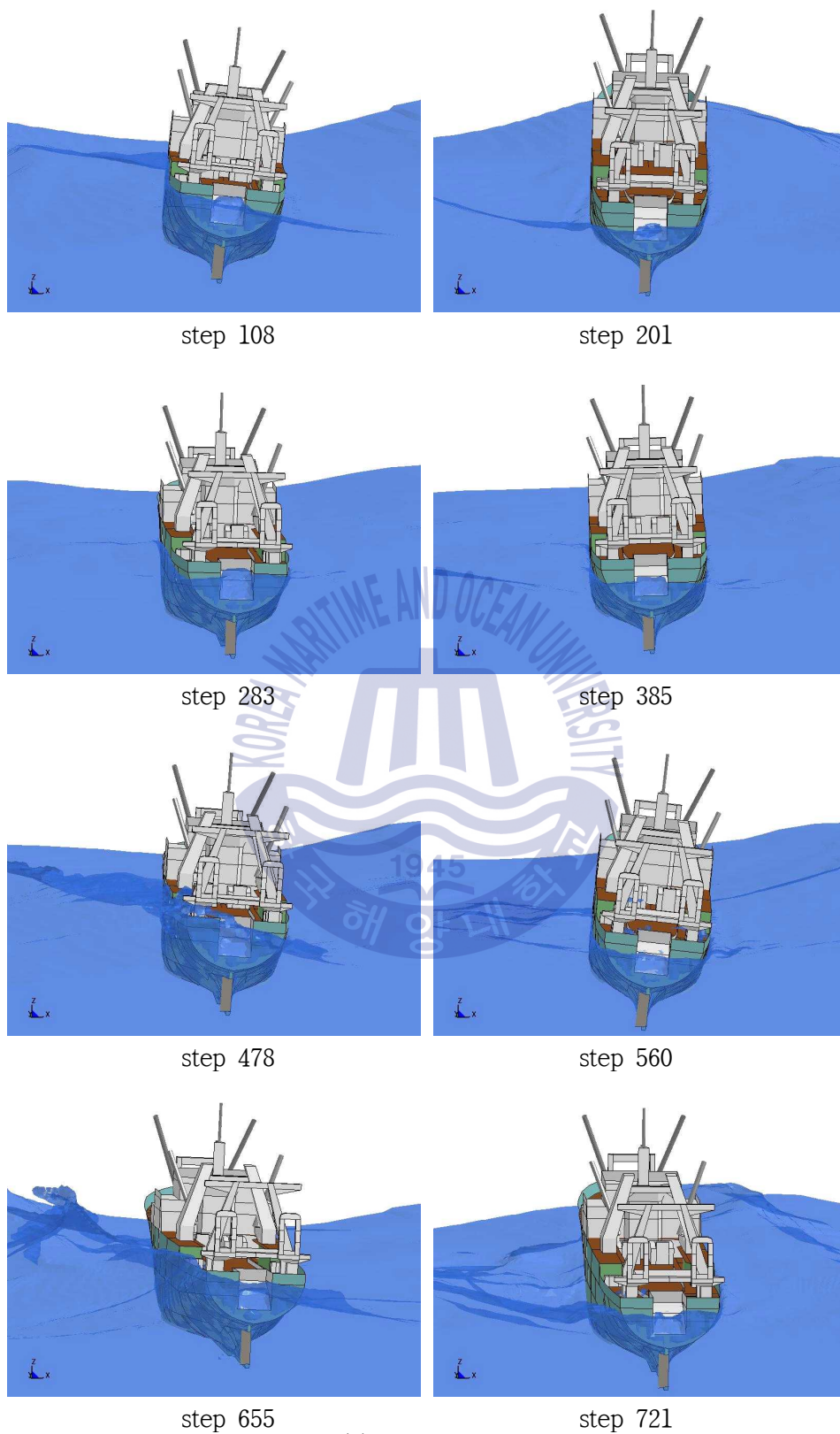


Fig. 56 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0b (continued)

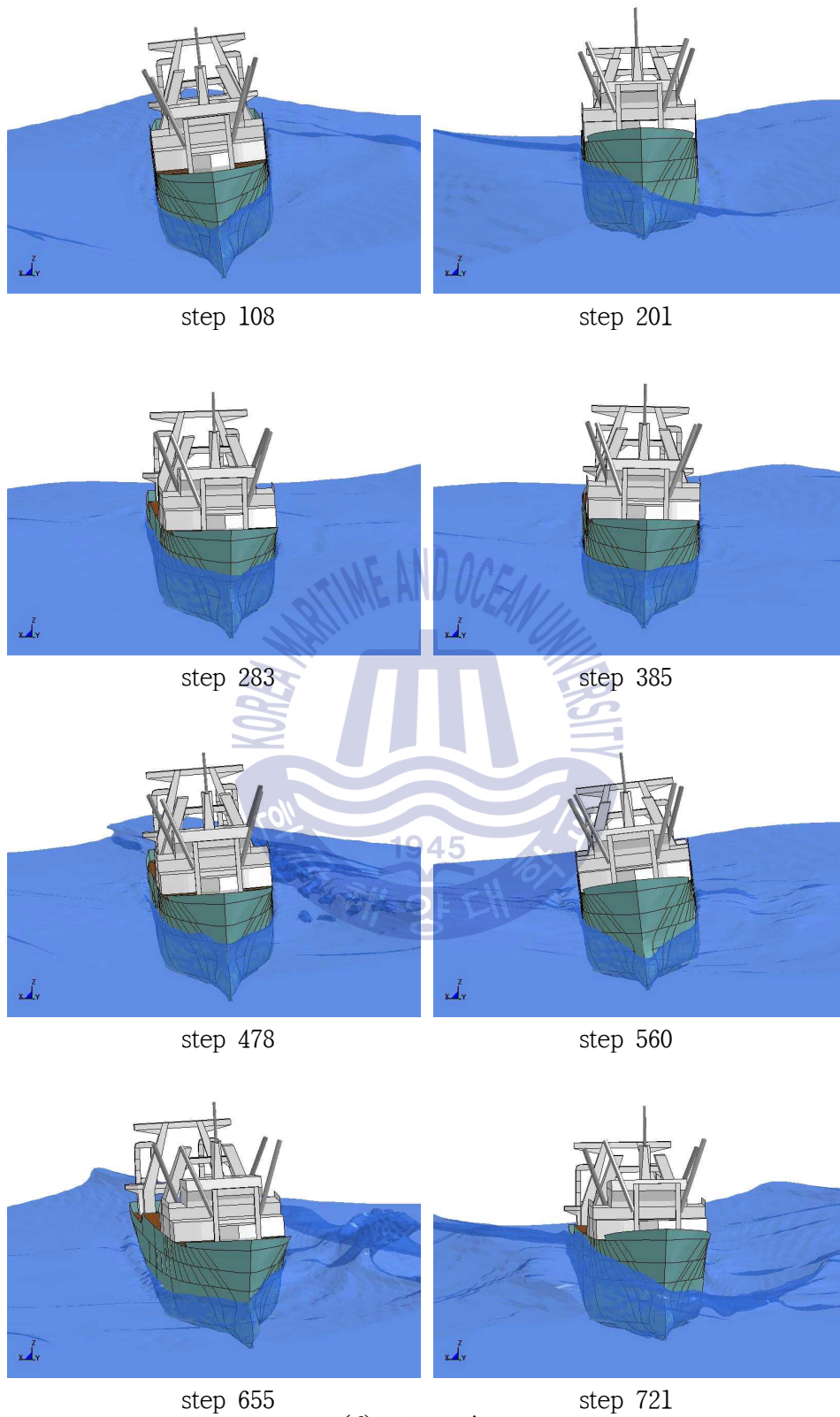


Fig. 56 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-0b

5.7 Case 2-1 : 우현횡파에서 좌현 측 5°~10° 경사

Case 2-1은 선체가 오물배출구를 통해 해수가 유입됨에 따라 우현으로 경사지는 Case 2-0b에서 약 145톤의 해수가 더 유입되어 Fig. 57과 Table 3 Case 2-1에서와 같이 약 370톤 정도의 해수가 피쉬병커, 어획물처리실 바닥과 어창에 각각 약 12톤, 229톤 및 129톤 정도 침수되어 좌현으로 5° 정도 경사진 상태에서 Fig. 29(b)에서와 같이 선회하여 우현 선미각도 72.5°로 우현횡파를 받으면서 표류 중인 시나리오이다.

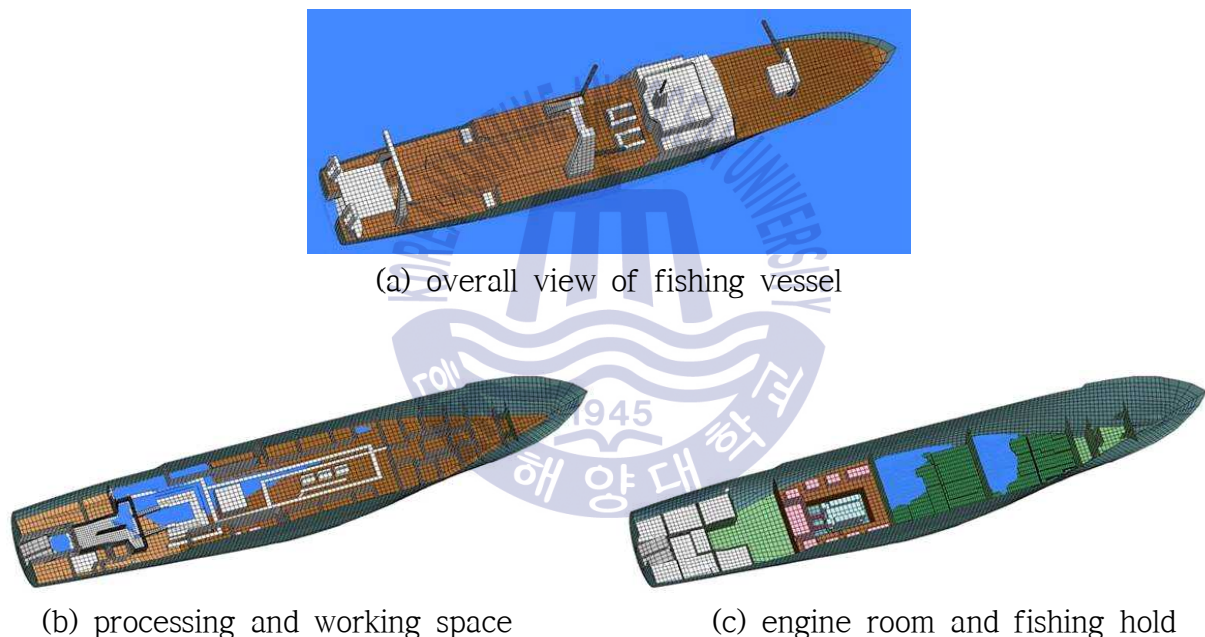
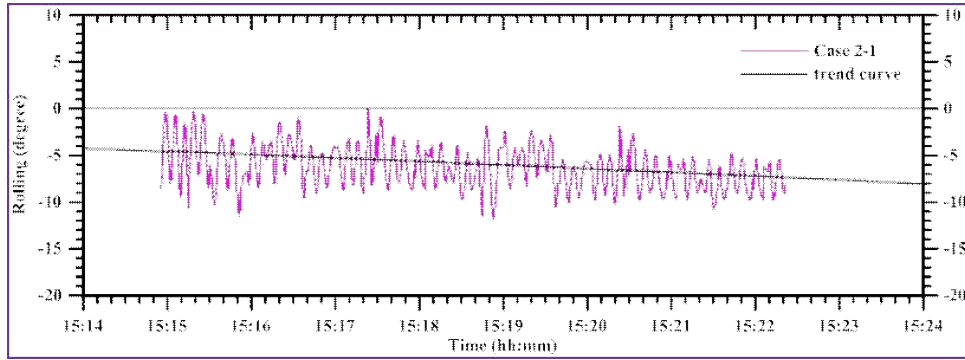
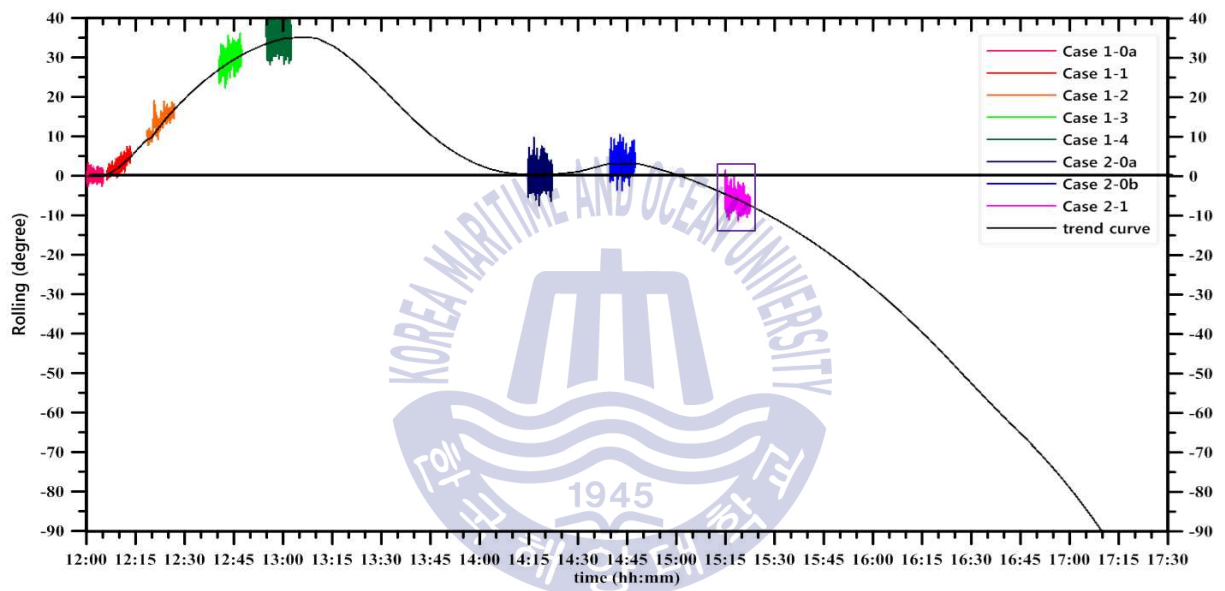


Fig. 57 Initial seawater inflow state in Case 2-1

선체가 좌현으로 5°에서 10° 정도로 경사지는 시나리오로서 FSI 해석기법의 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서 선체의 횡요 응답과 침수·침몰 시뮬레이션 거동을 각각 Fig. 58과 Fig. 59에 나타내었다.

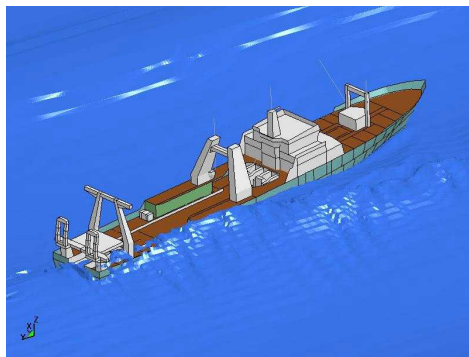


(a) zoom view of rolling response in Case 2-1

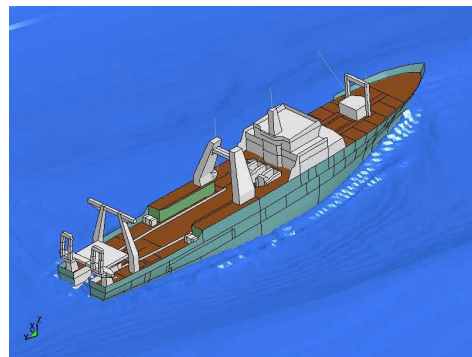


(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

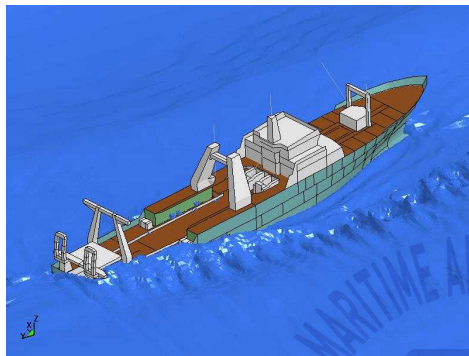
Fig. 58 Rolling response of fishing vessel in Case 2-1



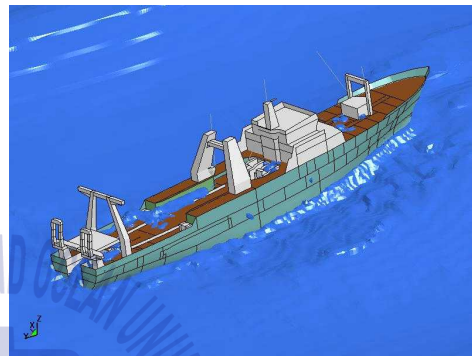
step 101



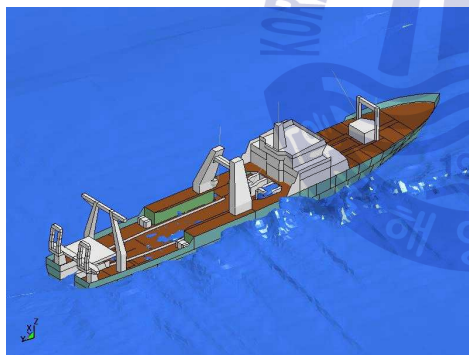
step 221



step 313



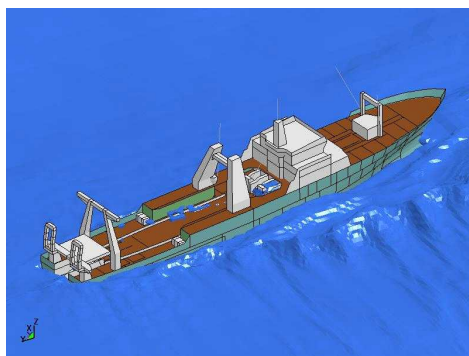
step 428



step 511



step 597



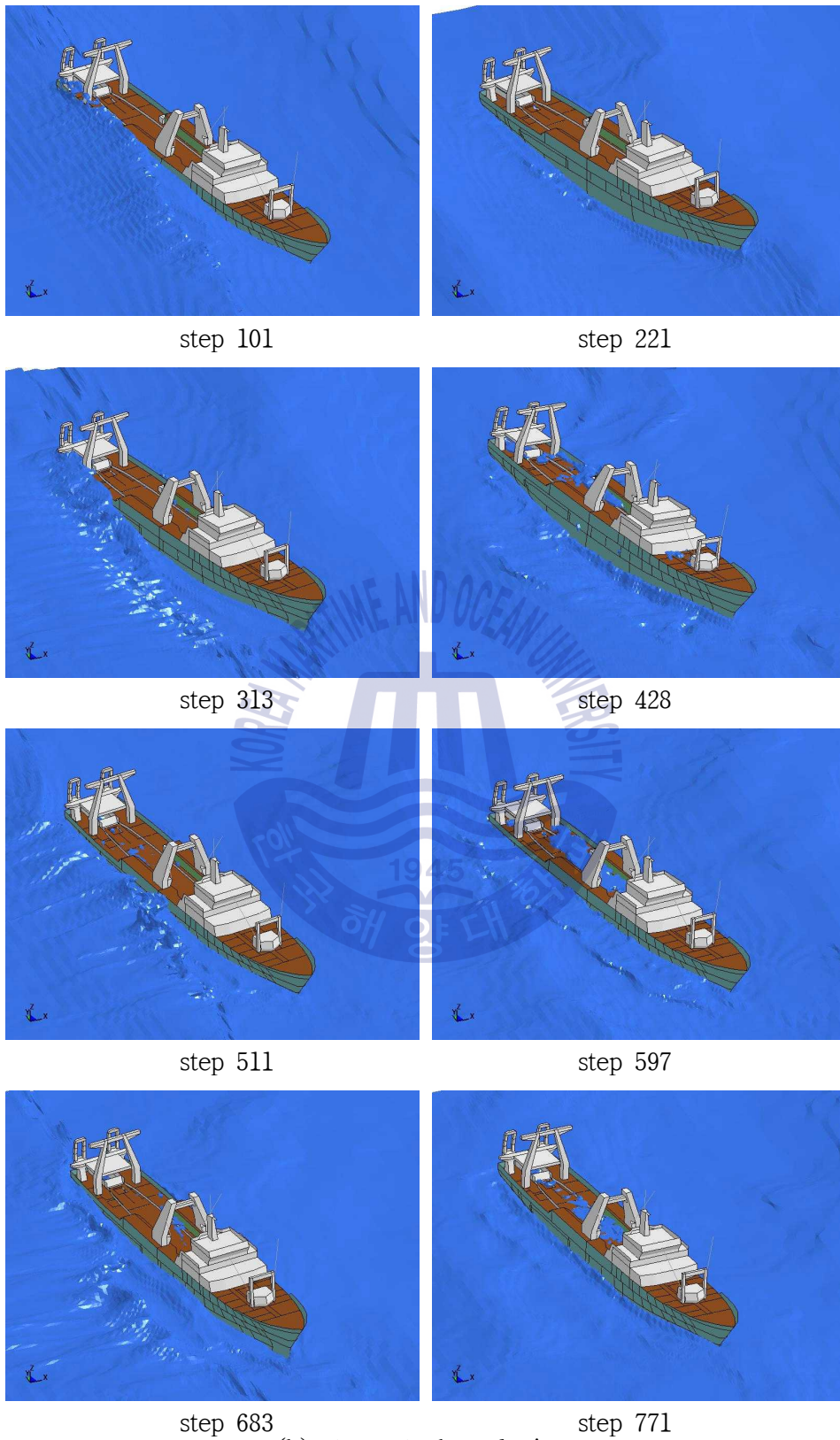
step 683



step 771

(a) stern starboard view

Fig. 59 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-1 (continued)



(b) stem starboard view

Fig. 59 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-1 (continued)

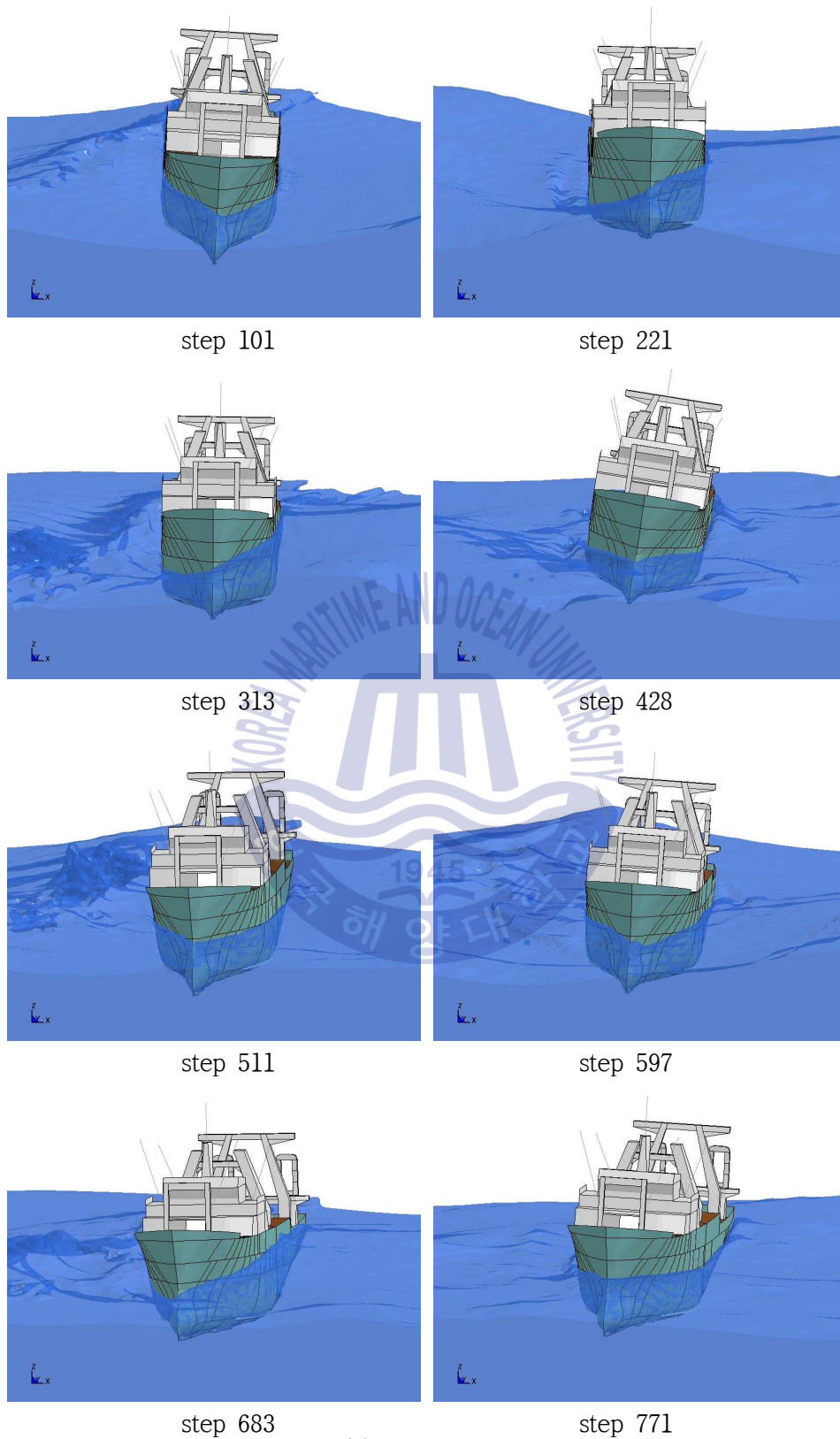


Fig. 59 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-1 (continued)

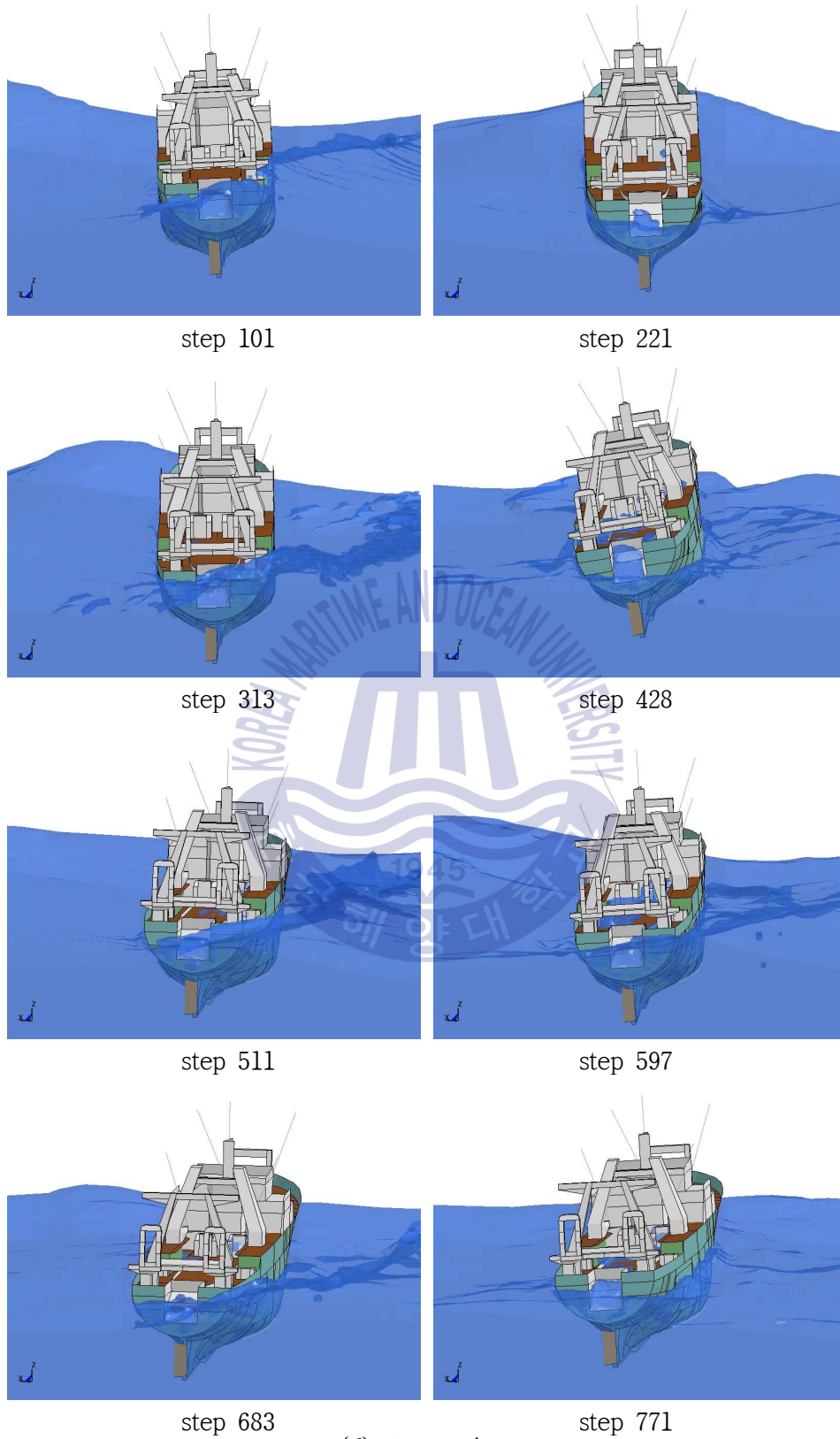
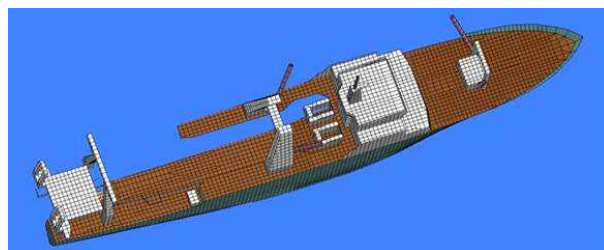


Fig. 59 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-1

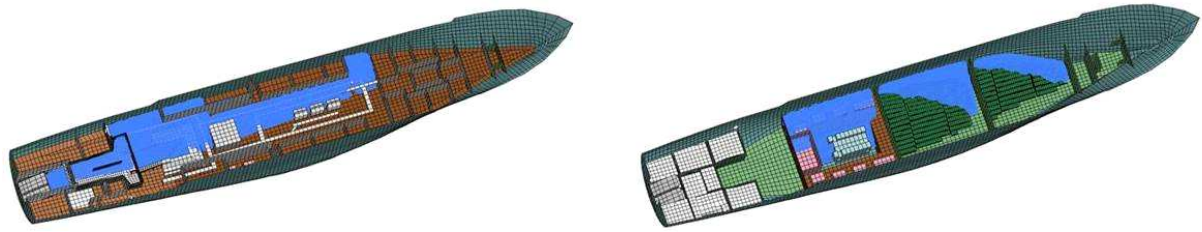
침수·침몰 시뮬레이션 거동과 횡요 응답에서 알 수 있듯이 선회하여 우현횡파의 파도를 받게 됨으로써 선체는 좌우현의 중량의 불균형으로 좌현으로 10° 정도까지 경사지게 되었다. 좌현으로 횡경사함에 따라 우현횡파에 의해 파도가 상갑판으로 덮치고 또한 선미좌현이 수면 아래로 주기적으로 내려감으로써 해치커버와 오물 배출구를 통해서 해수가 유입되었다. Table 3과 4의 Case 2-1에서와 같이 해수의 침수량은 약 230톤 정도 해치커버와 오물배출구를 통하여 각각 146.6톤과 83.4톤이 유입되었고 피쉬병커와 어획물처리실 및 어창에 각각 20톤, 285톤 및 150톤이 침수되었다.

5.8 Case 2-2 : 우현횡파에서 좌현 측 30°~35° 경사

Case 2-2는 선체를 선회하여 우현 선미각도 72.5°로 우현횡파를 받게 한 시나리오 Case 2-1에 이어서 216톤 정도 더 유입되어 Fig. 60과 Table 3 Case 2-2에서와 같이 피쉬병커, 어획물처리실 바닥, 기관실 및 어창에 각각 약 42톤, 345톤, 72톤 및 212톤 정도의 해수가 침수되어 선체가 좌현 30° 정도 경사진 상태에서 Fig. 29(c)에서와 같이 우현 선미각도 72.5°로 우현횡파를 받으면서 표류 중인 시나리오이다. 이 시나리오에서 좌현 35° 이상으로 더 경사지는 시나리오에 대한 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 선체 횡요 응답과 침수 시뮬레이션 거동을 각각 Fig. 61과 Fig. 62에 나타내었다.



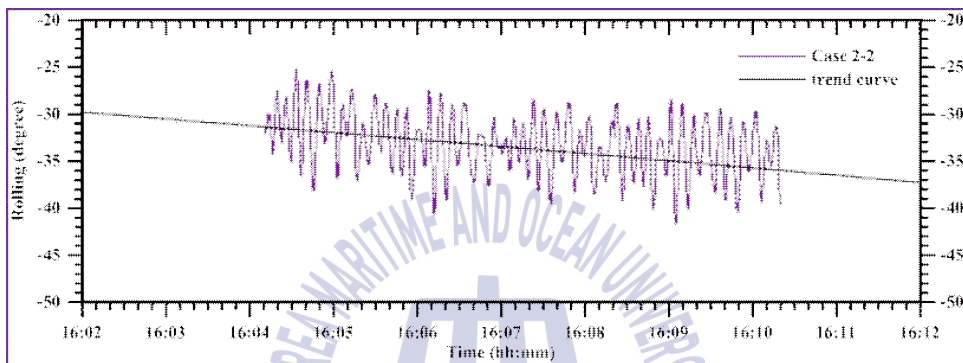
(a) overall view of fishing vessel



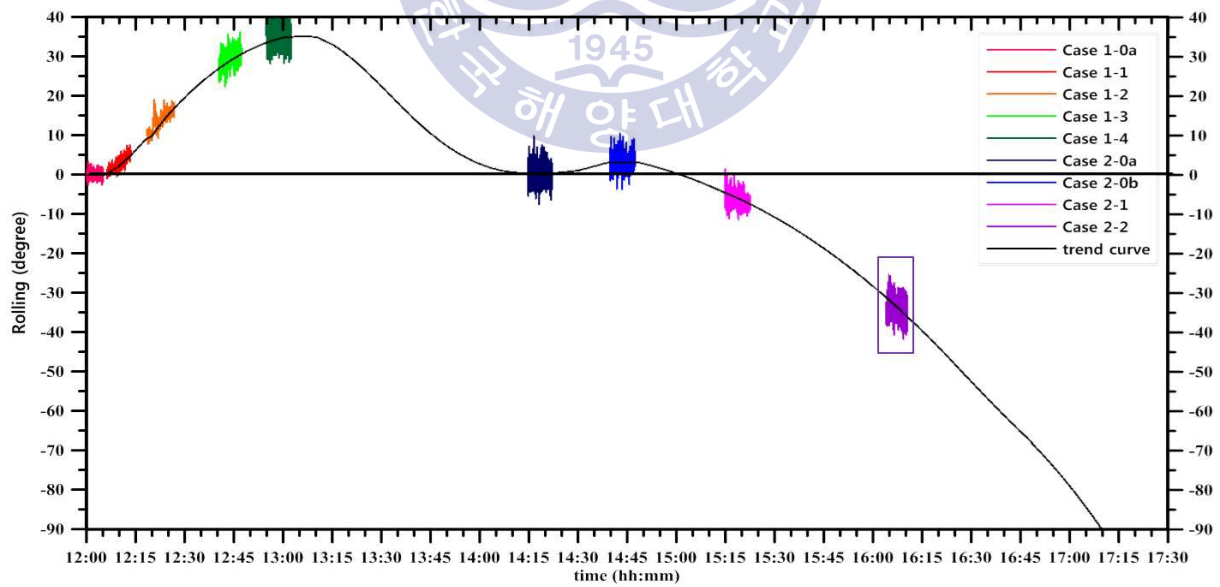
(b) processing and working space

(c) engine room and fishing hold

Fig. 60 Initial seawater inflow state in Case 2-2



(a) zoom view of rolling response in Case 2-2

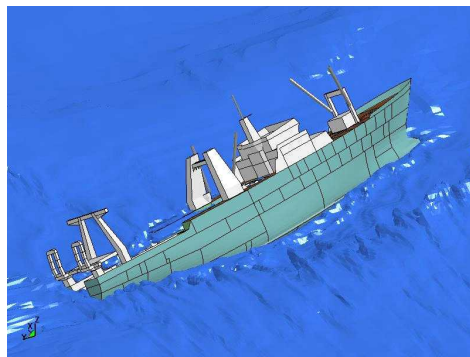


(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

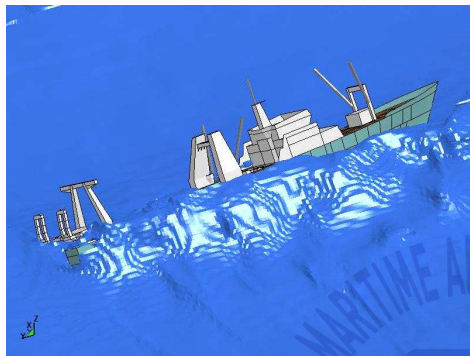
Fig. 61 Rolling response of fishing vessel in Case 2-2



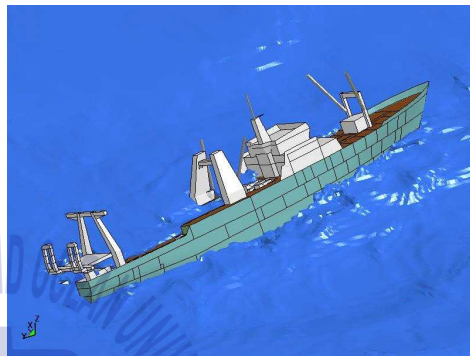
step 201



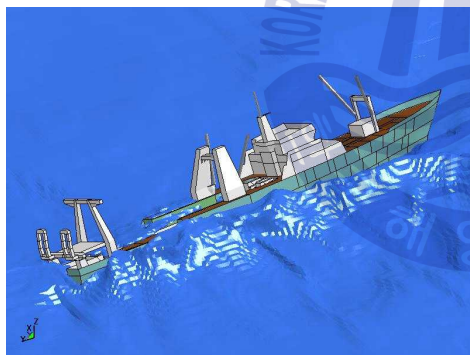
step 251



step 411



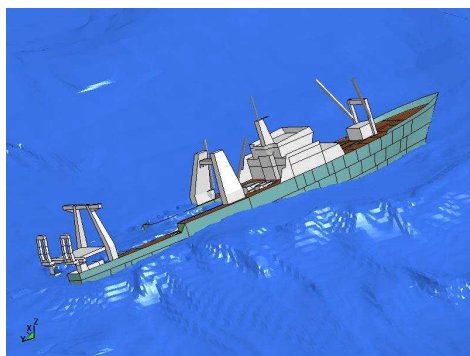
step 441



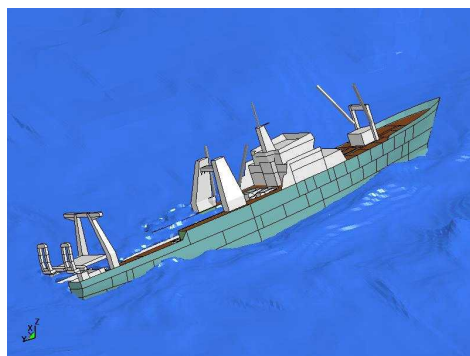
step 671



step 701



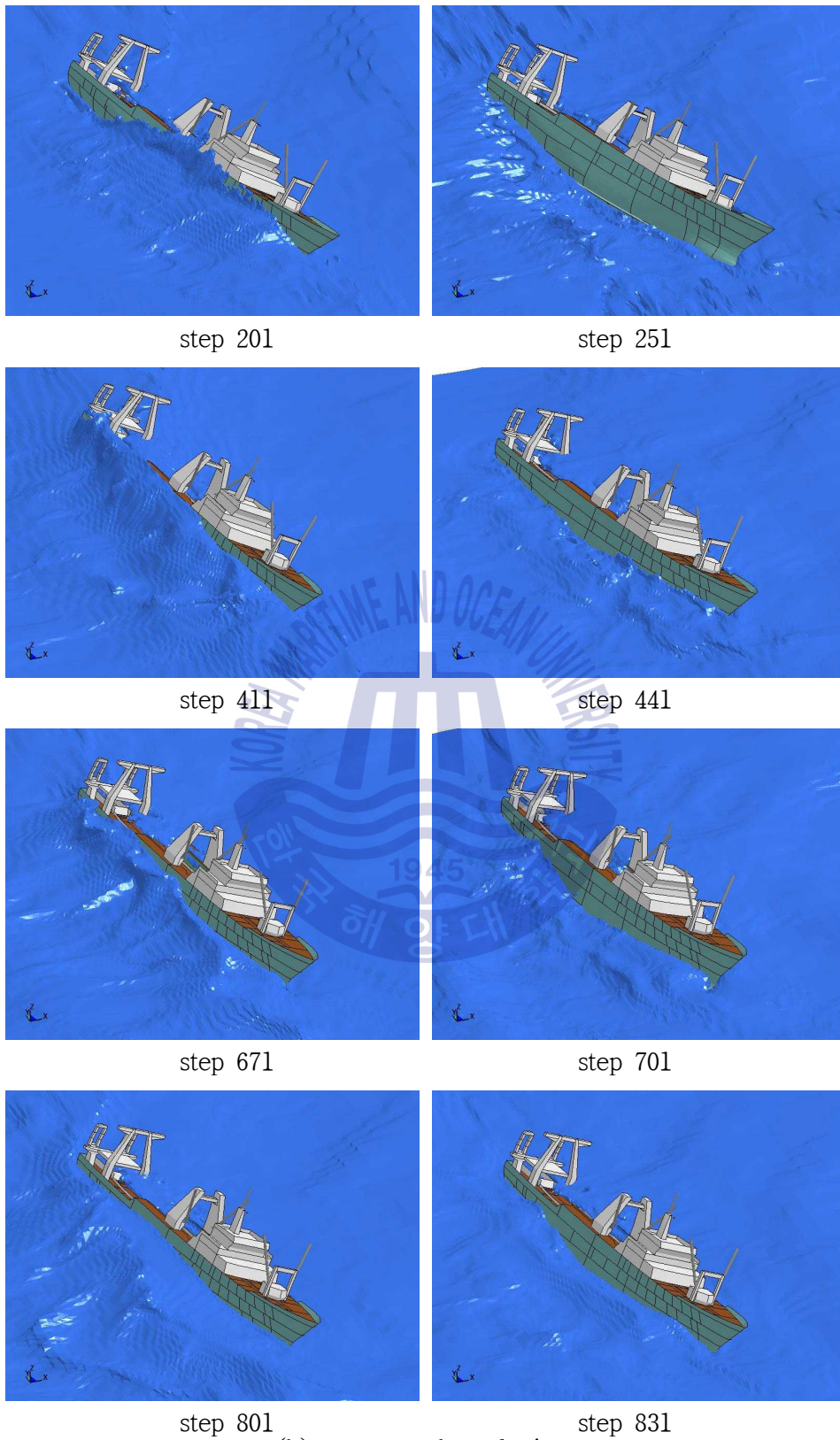
step 801



step 831

(a) stern starboard view

Fig. 62 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-2 (continued)



(b) stem starboard view

Fig. 62 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-2 (continued)

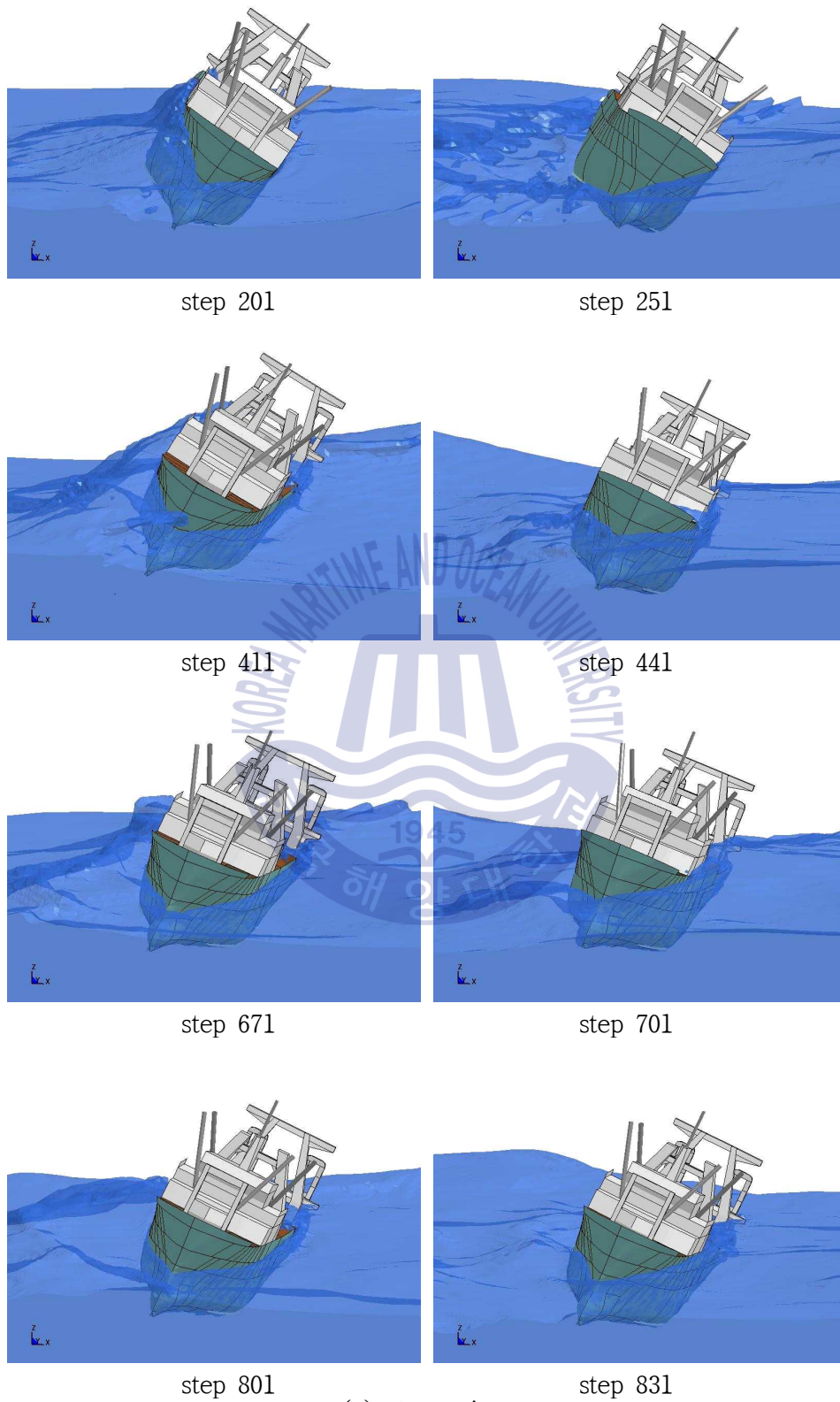


Fig. 62 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-2 (continued)

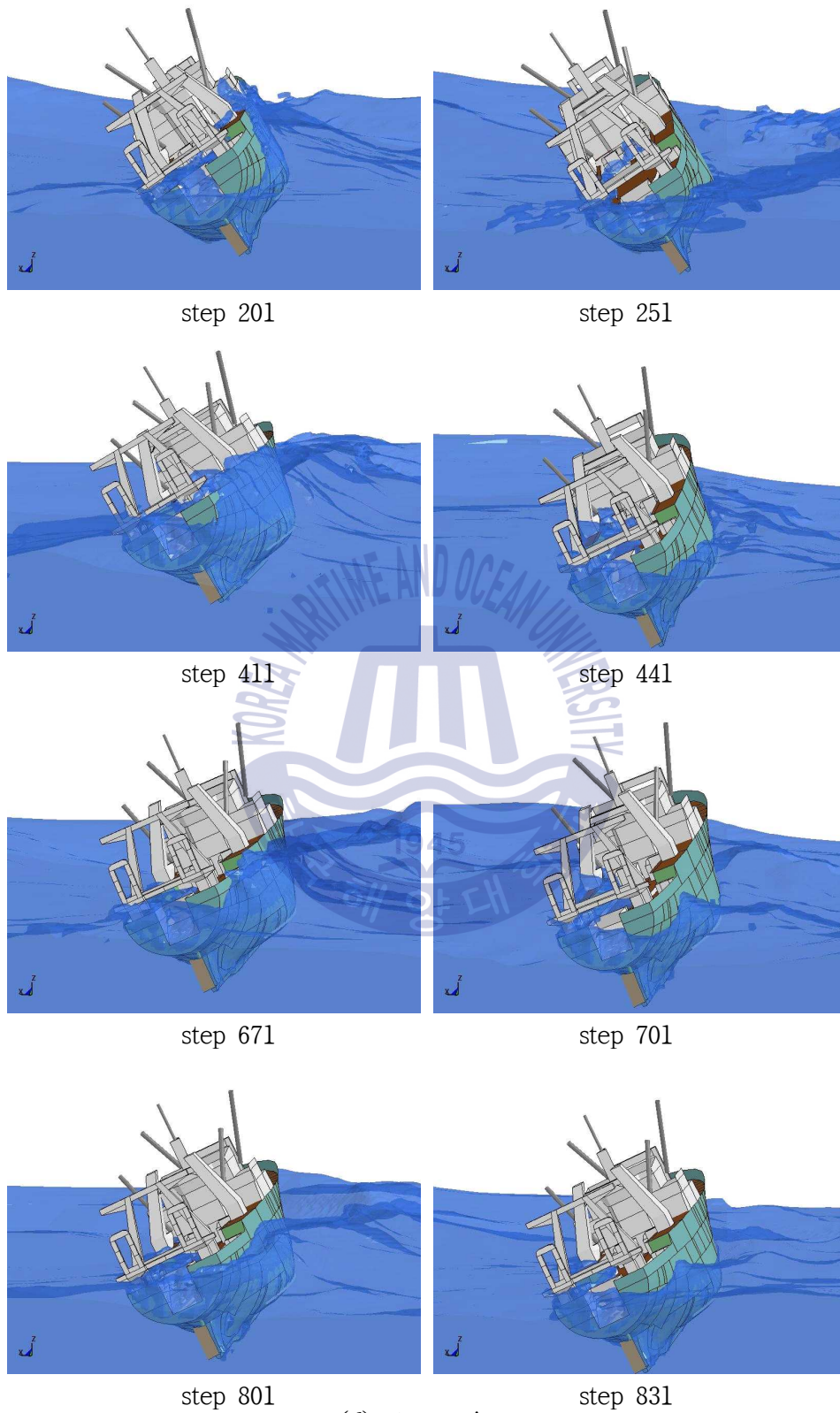


Fig. 62 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-2

횡요 응답과 침수·침몰 시뮬레이션 거동에서 알 수 있듯이 중량물의 좌현측 이동으로 인한 불균형과 우현횡파로 인하여 좌현으로 35° 정도 이상으로 횡경사지고 좌현선미가 수면 아래로 주기적으로 잠기면서 해치커버와 오물배출구를 통하여 다량의 해수가 유입되었음을 알 수 있다. 또한 기관실에도 해수가 유입되고 어창에는 해수 유입량이 증가하여 선미 침하도 크게 증가하였다는 것을 Fig. 63의 어획물처리실과 기관실 그리고 어창내의 해수유동 및 침수 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있었다. Table 3과 4의 Case 2-2에서와 같이 해치커버와 오물배출구를 통하여 각각 166.7톤과 101.3톤의 해수가 유입되었고 피쉬병커, 어획물처리실, 엔진실 및 어창에 각각 55톤, 347톤, 85톤 및 236톤이 침수되었다.



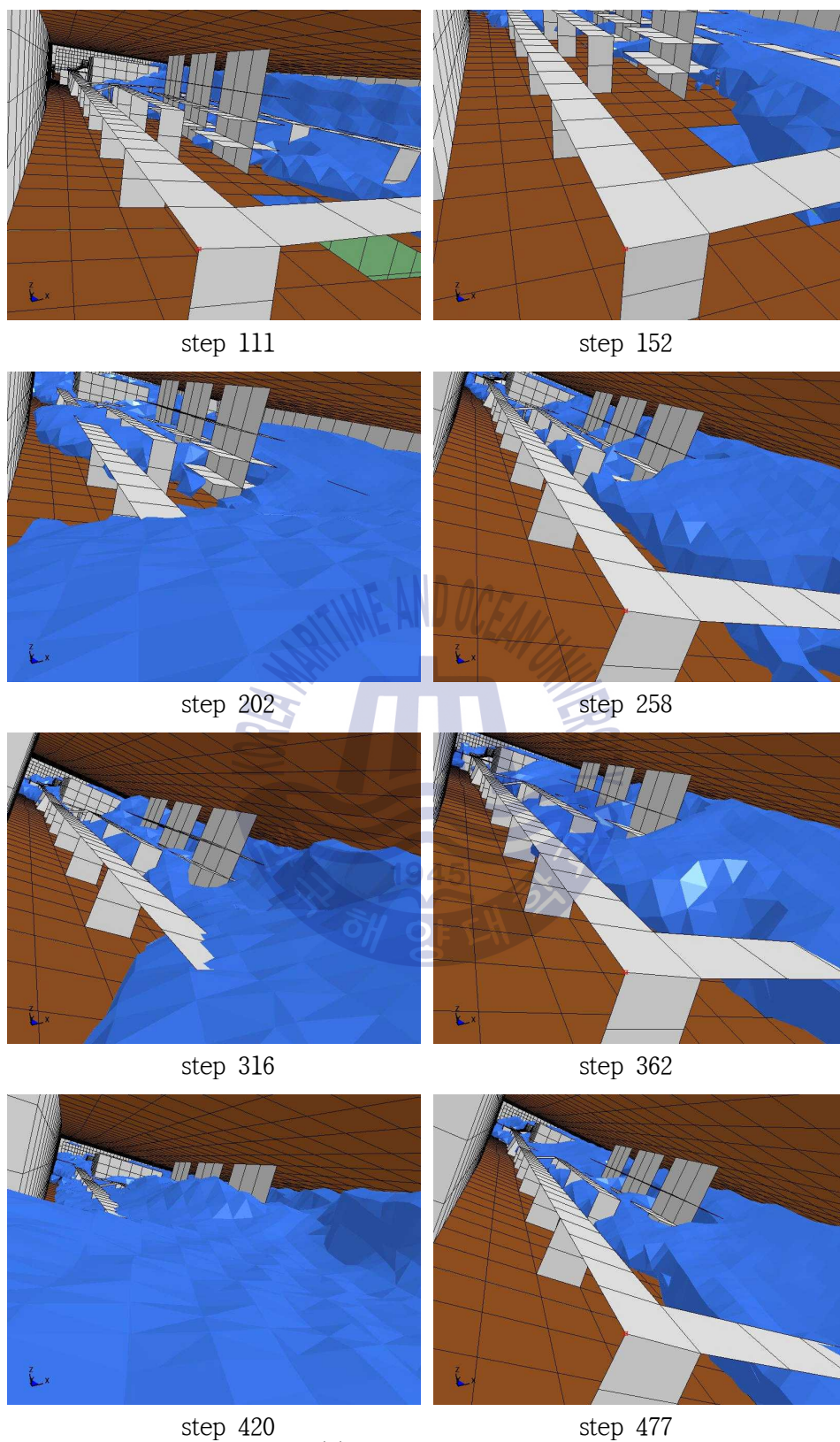


Fig. 63 Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-2 (continued)

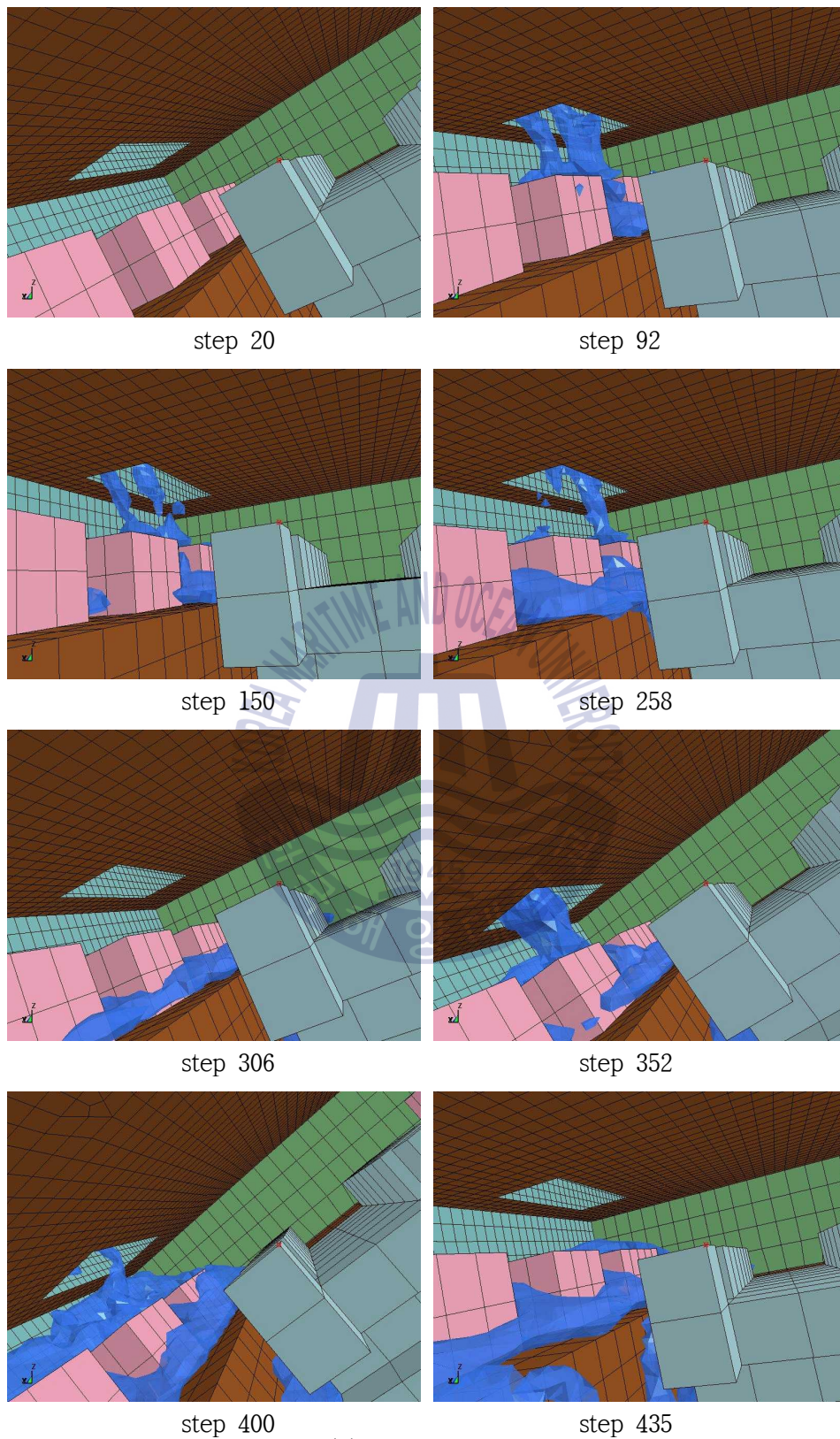


Fig. 63 Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-2 (continued)

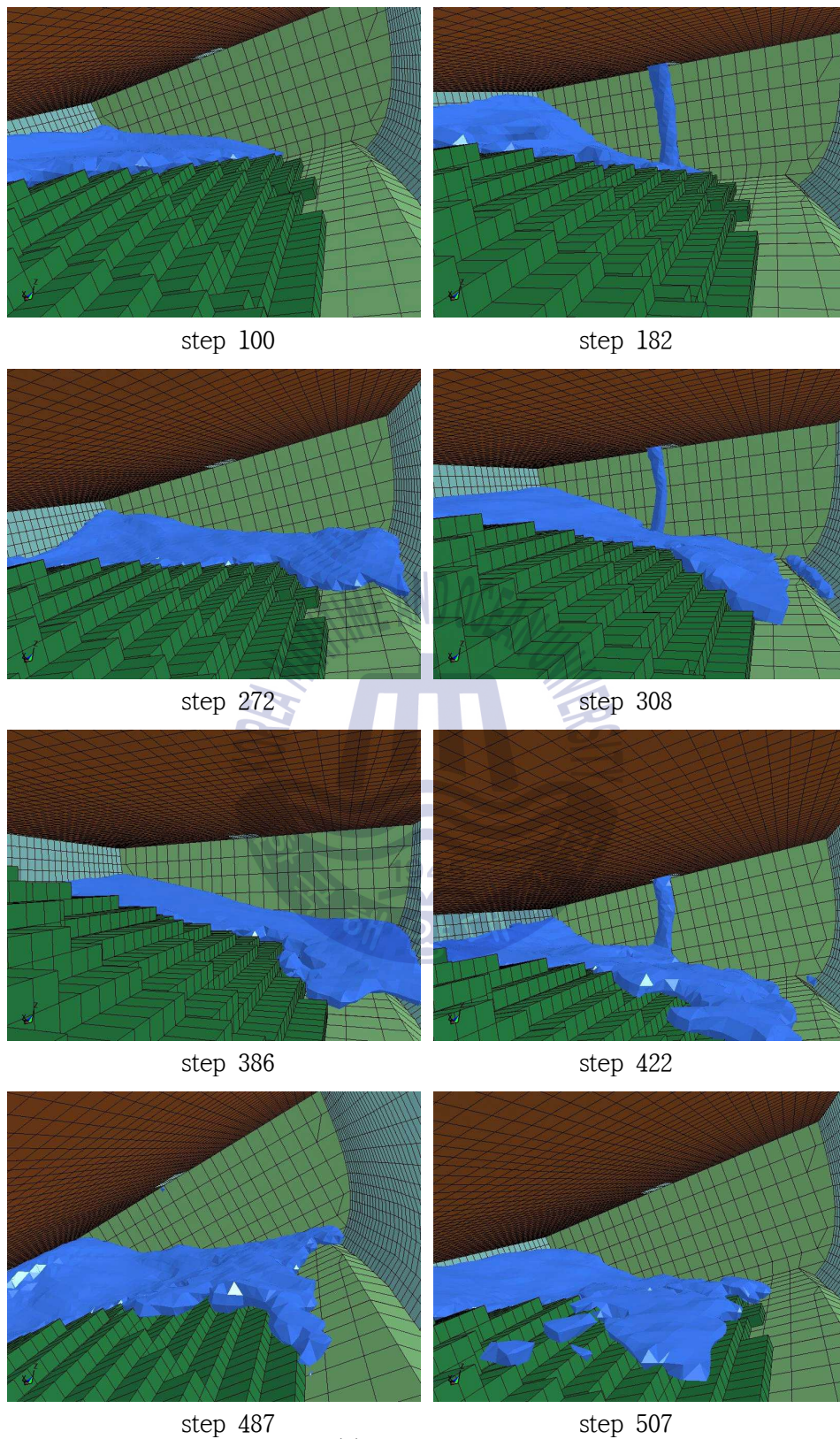


Fig. 63 Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-2

5.9 Case 2-3 : 우현횡파에서 좌현 측 45°~55° 경사

Case 2-3은 Case 2-2에 이어서 184톤 정도가 더 유입되어 Fig. 64와 Table 3 Case 2-3에서와 같이 피쉬병커, 어획물처리실, 기관실 및 어창에 각각 약 90톤, 409톤, 144톤 및 264톤 정도 해수가 침수되어 선체가 좌현 45° 정도 경사진 상태에서 Fig. 29(d)에서와 같이 우현 선미각도 72.5°로 우현횡파를 받으면서 표류 중인 시나리오이다. 이 시나리오의 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 선체의 횡요 응답과 침수 시뮬레이션 거동을 각각 Fig. 65와 Fig. 66에 나타내었다.

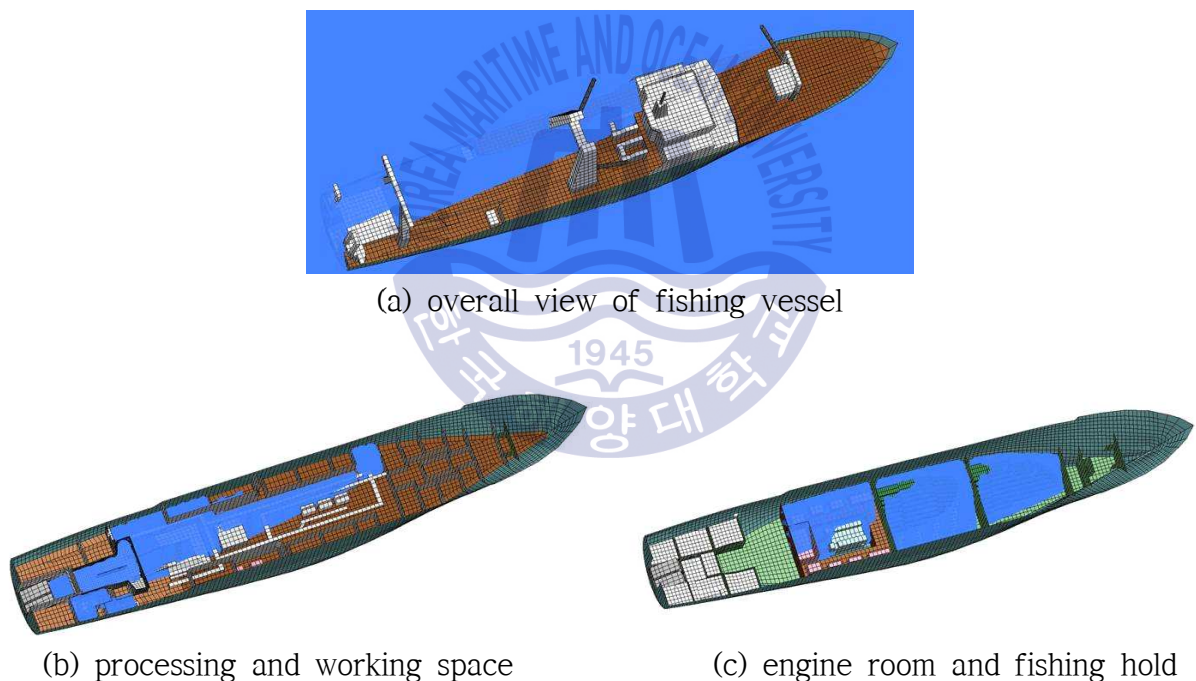
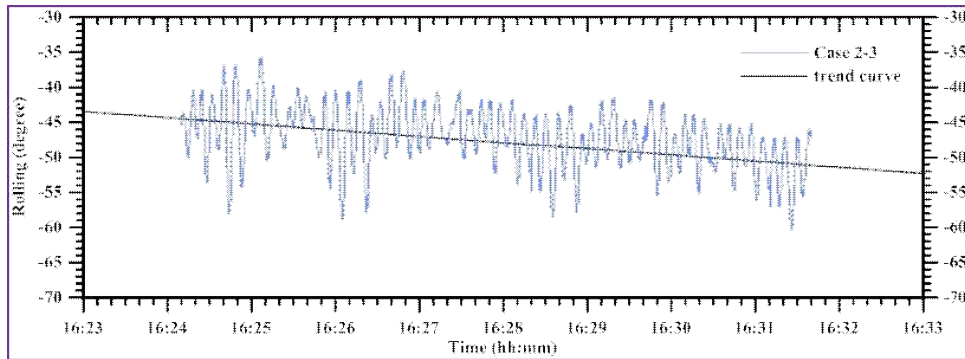
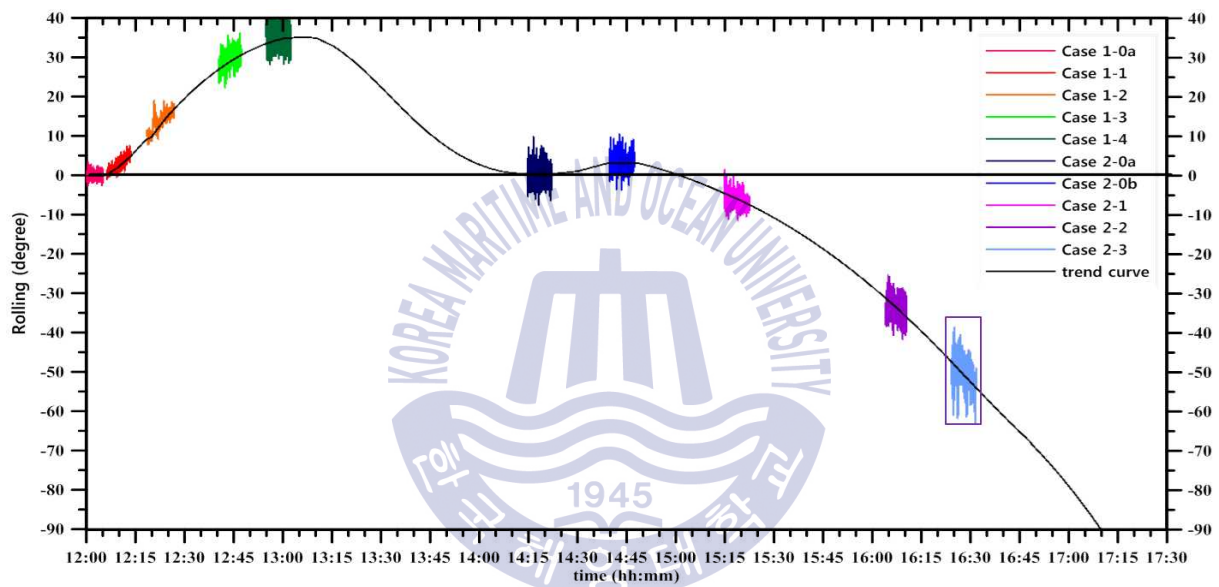


Fig. 64 Initial seawater inflow state in Case 2-3

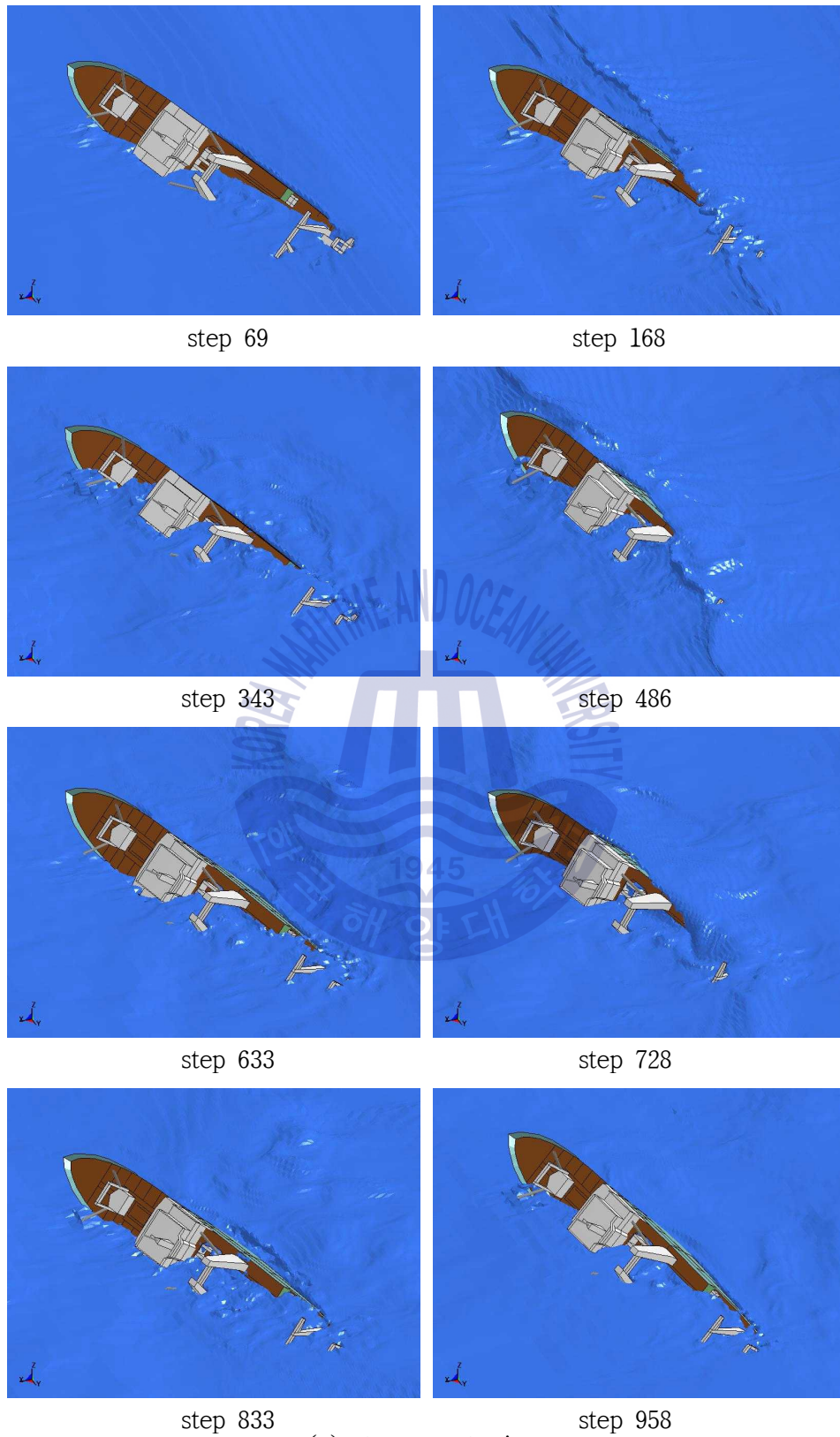


(a) zoom view of rolling response in Case 2-3



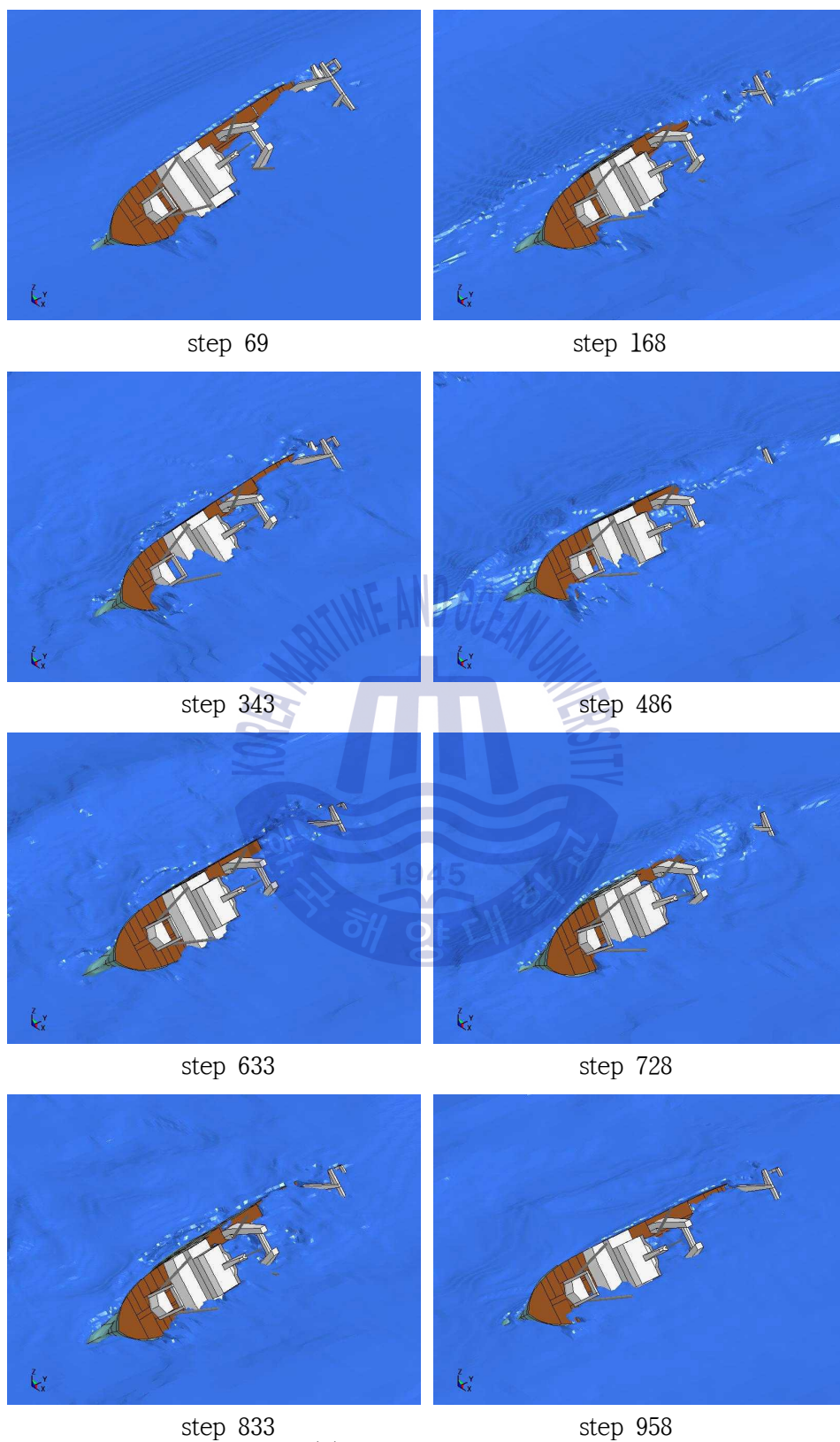
(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 65 Rolling response of fishing vessel in Case 2-3



(a) stern port view

Fig. 66 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-3 (continued)



(b) stem port view

Fig. 66 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-3 (continued)

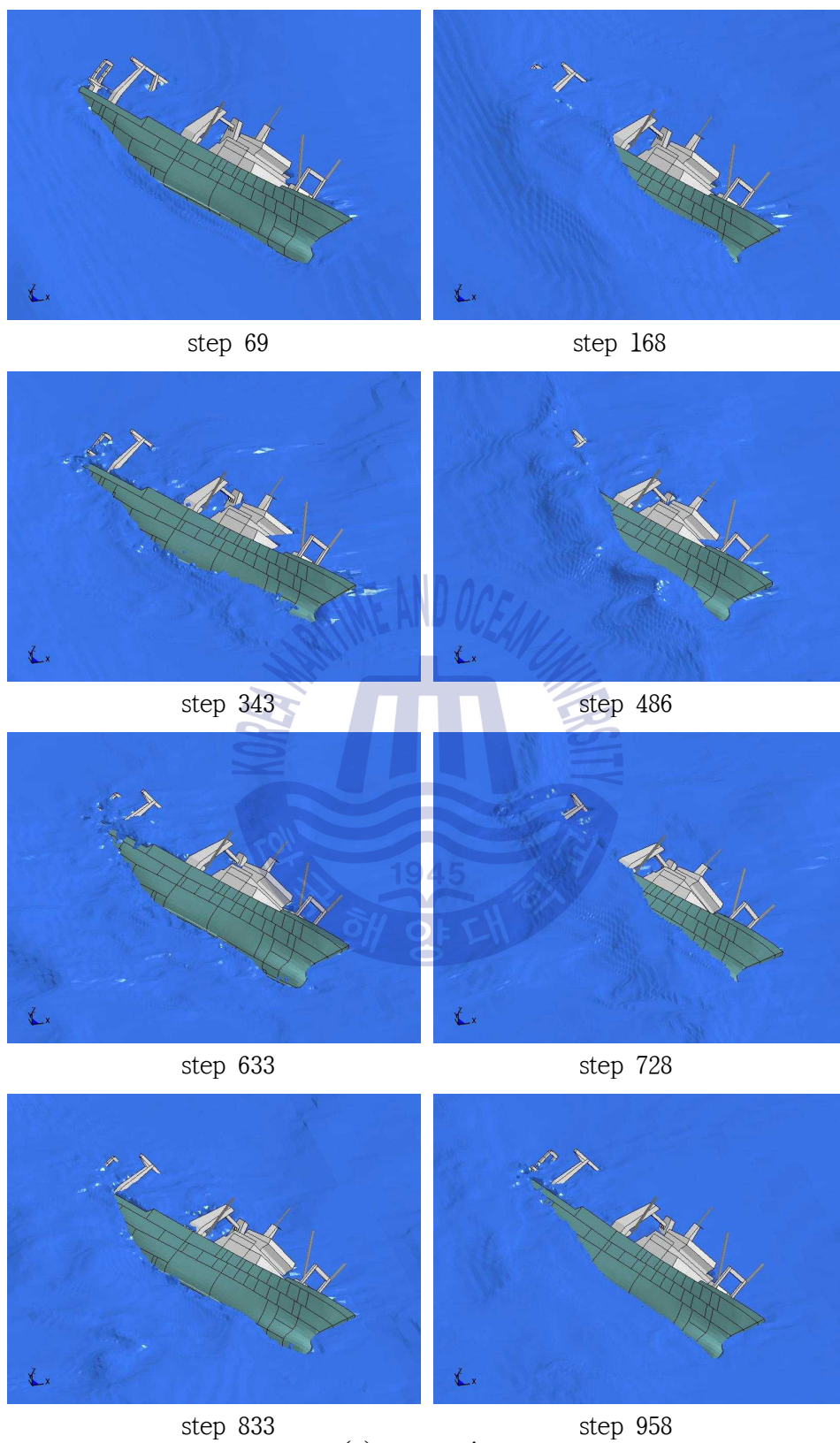
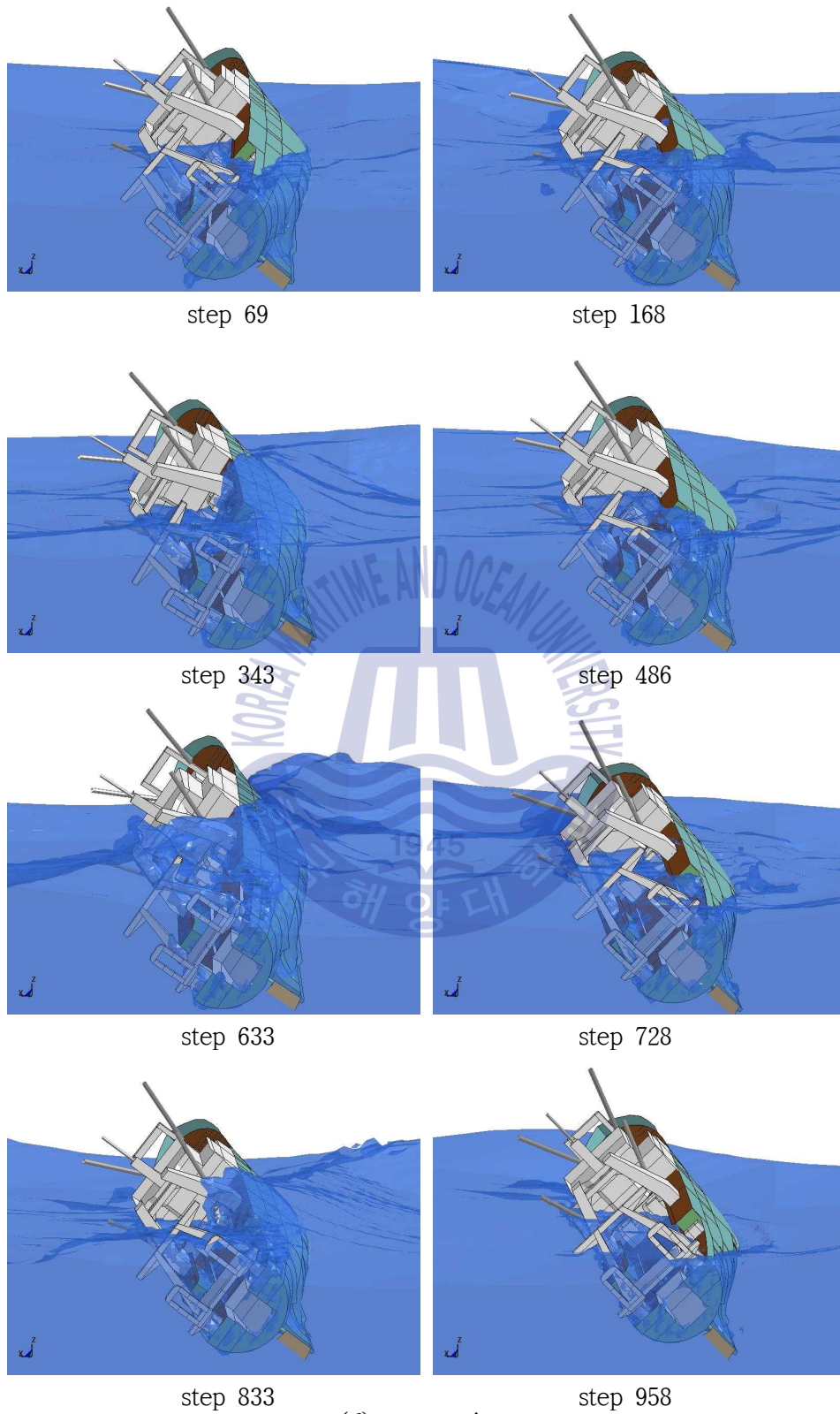


Fig. 66 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-3 (continued)

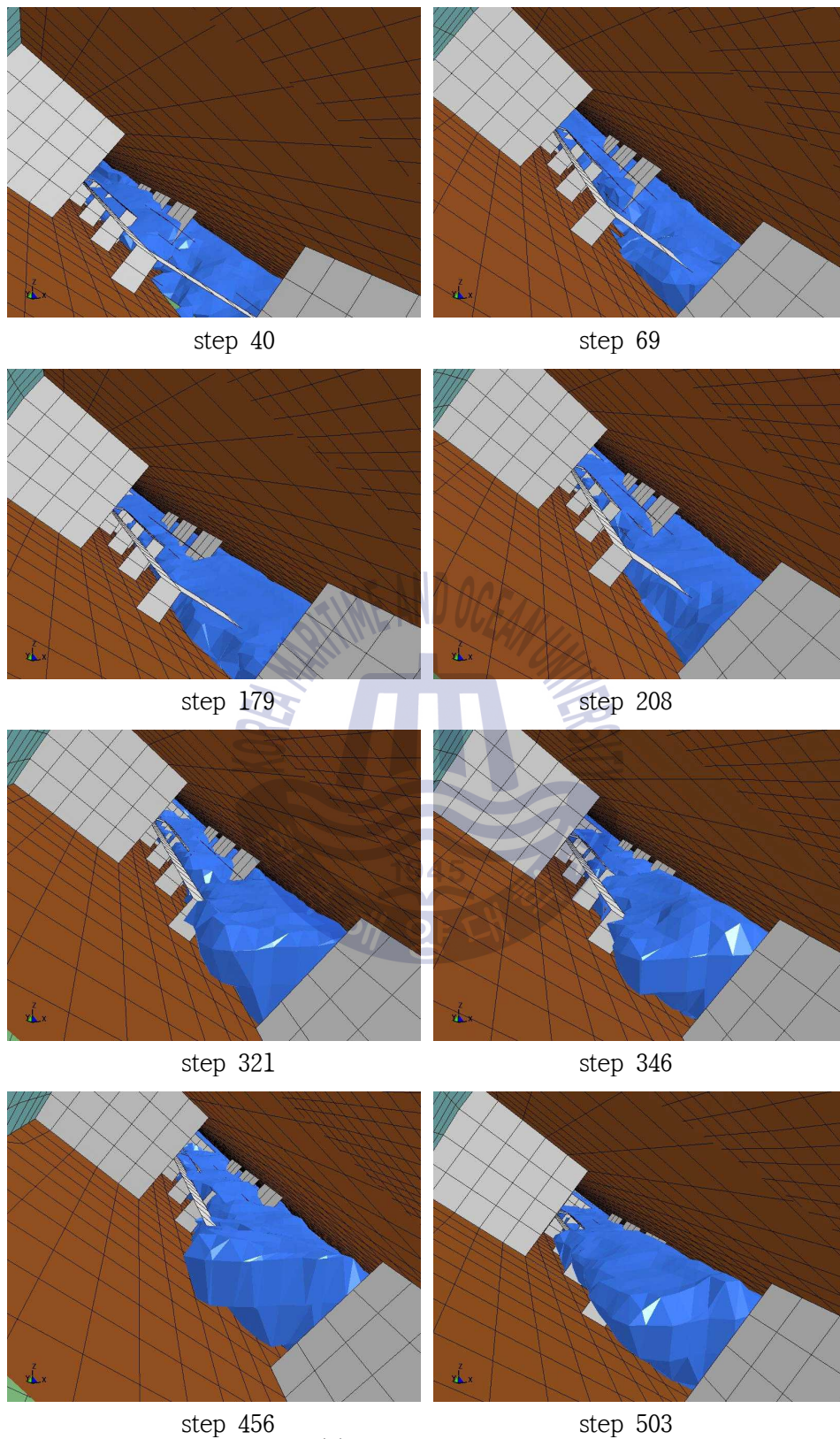


(d) stern view

Fig. 66 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-3

기관실과 어창의 해수 유입이 크게 증가하여 선미부가 수면 아래로 크게 침하하고 이에 따라 해치커버와 오물배출구를 통한 어획물처리실로의 해수 유입이 가속화하여 횡경사도 50° 이상으로 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 어획물처리실, 기관실 및 어창의 해수 유입에 따른 유동을 Fig. 67에 보여주고 있다. Table 3과 4의 Case 2-3에서와 같이 해치커버와 오물배출구를 통하여 각각 206.3톤과 128.7톤의 해수가 유입되었고 피쉬병커, 어획물처리실, 엔진실 및 어창에 각각 93톤, 486톤, 199톤 및 280톤이 침수되었다.





(a) working space

Fig. 67 Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-3 (continued)

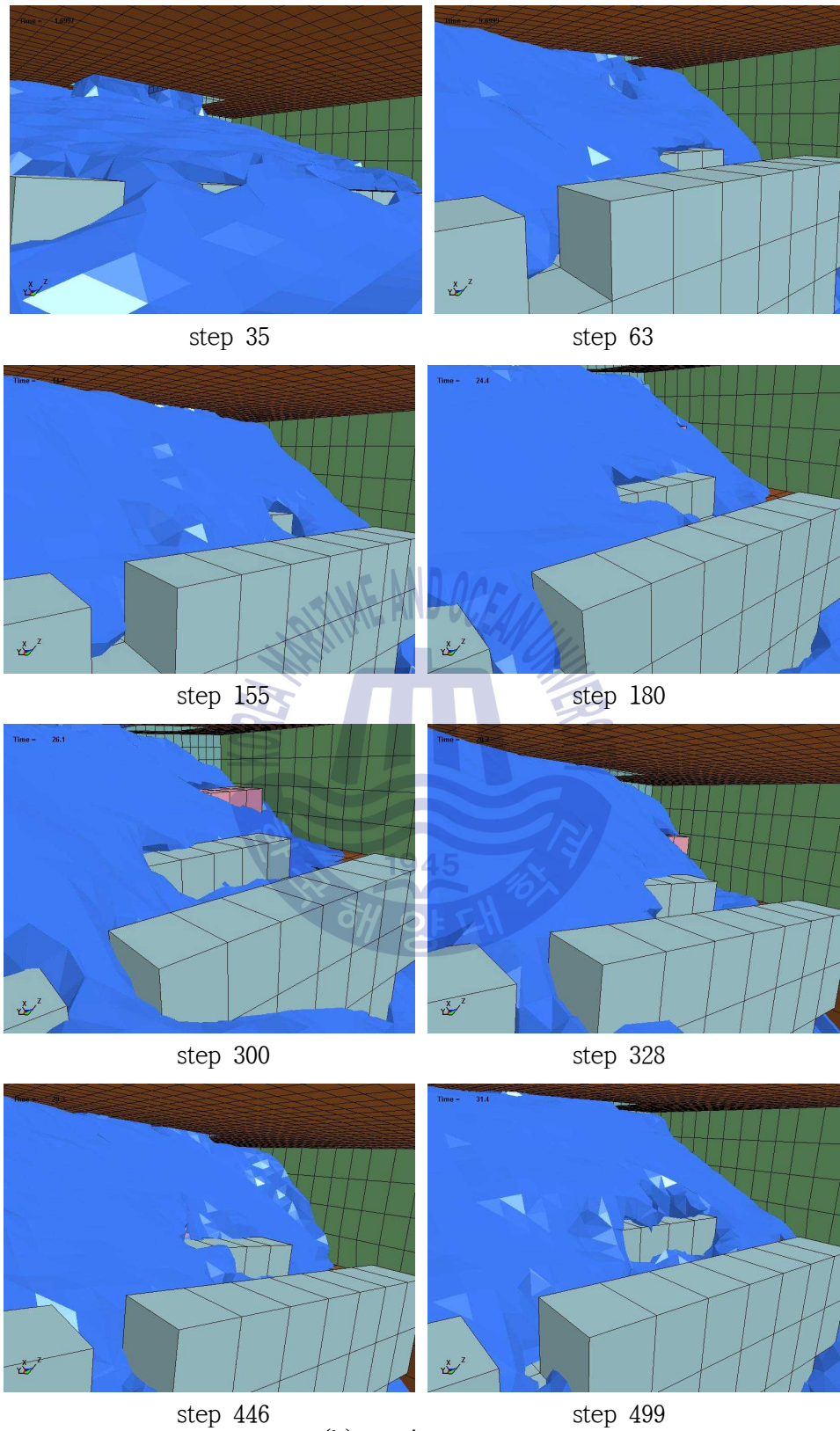
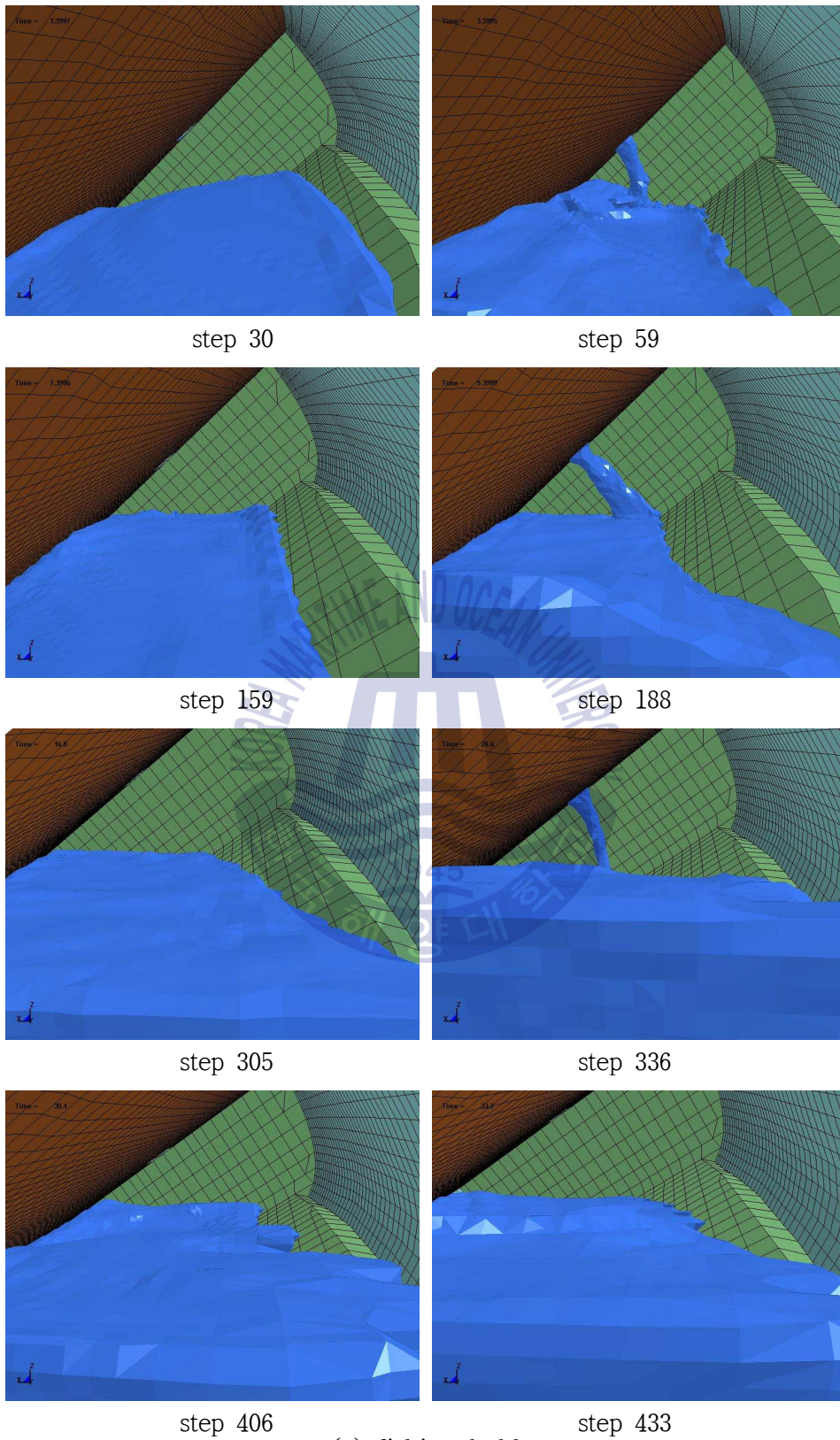


Fig. 67 Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-3 (continued)



(c) fishing hold

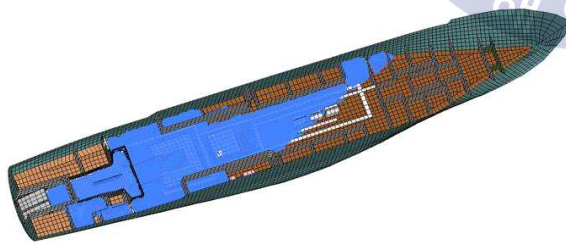
Fig. 67 Sea water flow in working space and inflow into engine room and fishing hold in Case 2-3

5.10 Case 2-4 : 우현횡파에서 좌현 측 60°~70° 경사

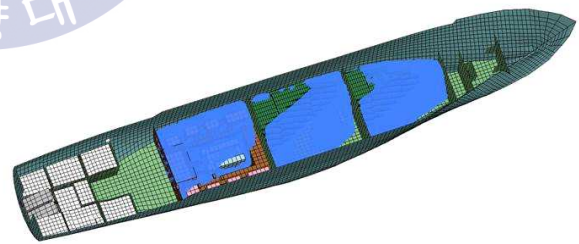
Case 2-4는 Case 2-3에 이어서 192톤 정도가 더 유입되어 Fig. 68과 Table 3 Case 2-4에서와 같이 피쉬병커, 어획물처리실, 기관실 및 어창에 각각 약 96톤, 547톤, 216톤 및 391톤 정도 해수가 침수되어 선체가 좌현 60° 정도 경사진 상태에서 Fig. 29(e)에서와 같이 우현 선미각도 72.5°로 우현횡파를 받으면서 표류 중인 시나리오이다. FSI 해석기법의 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 선체의 횡요 응답과 침수·침몰 시뮬레이션 거동을 각각 Fig. 69와 70에 나타내었다.



(a) overall view of fishing vessel

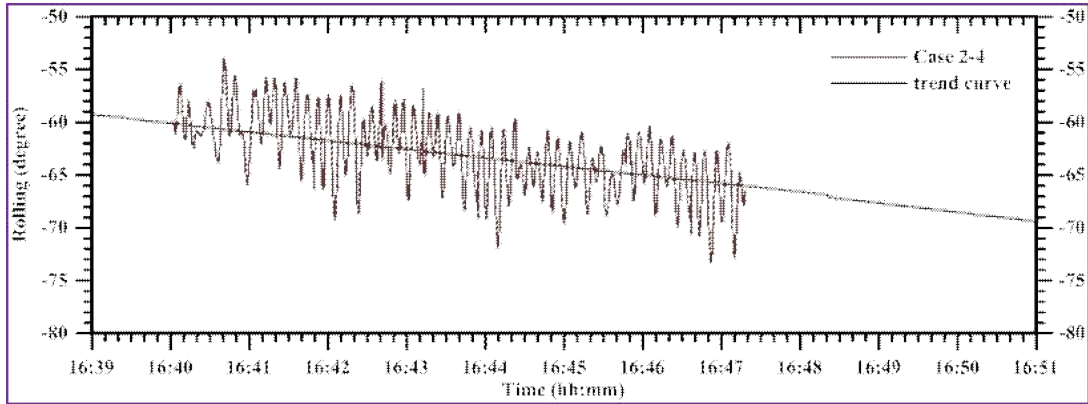


(b) processing and working space

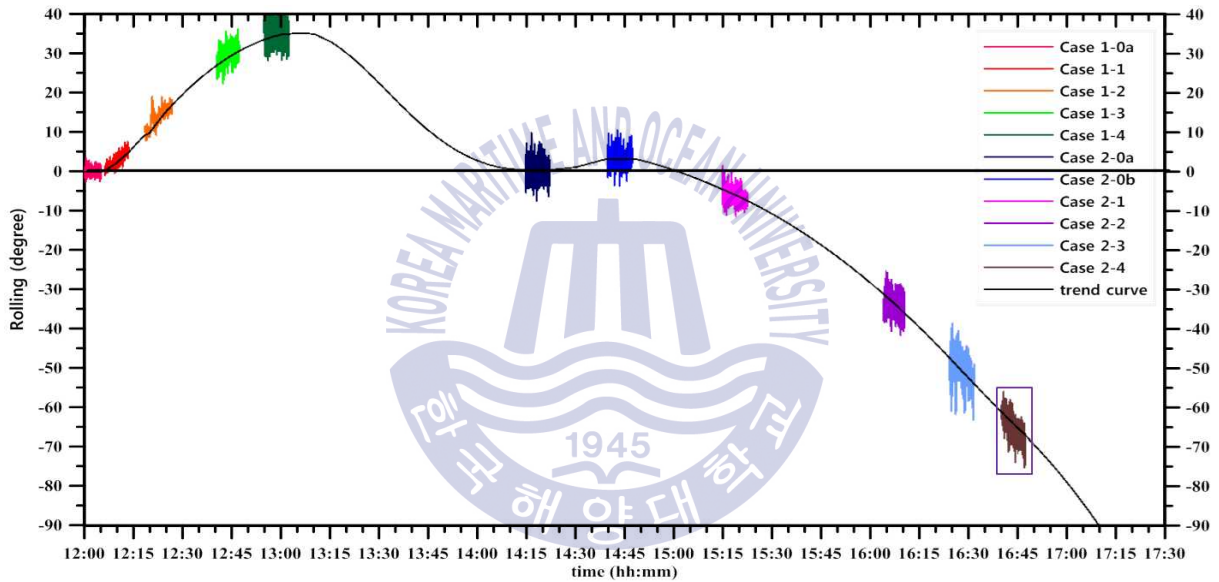


(c) engine room and fishing hold

Fig. 68 Initial seawater inflow state in Case 2-4

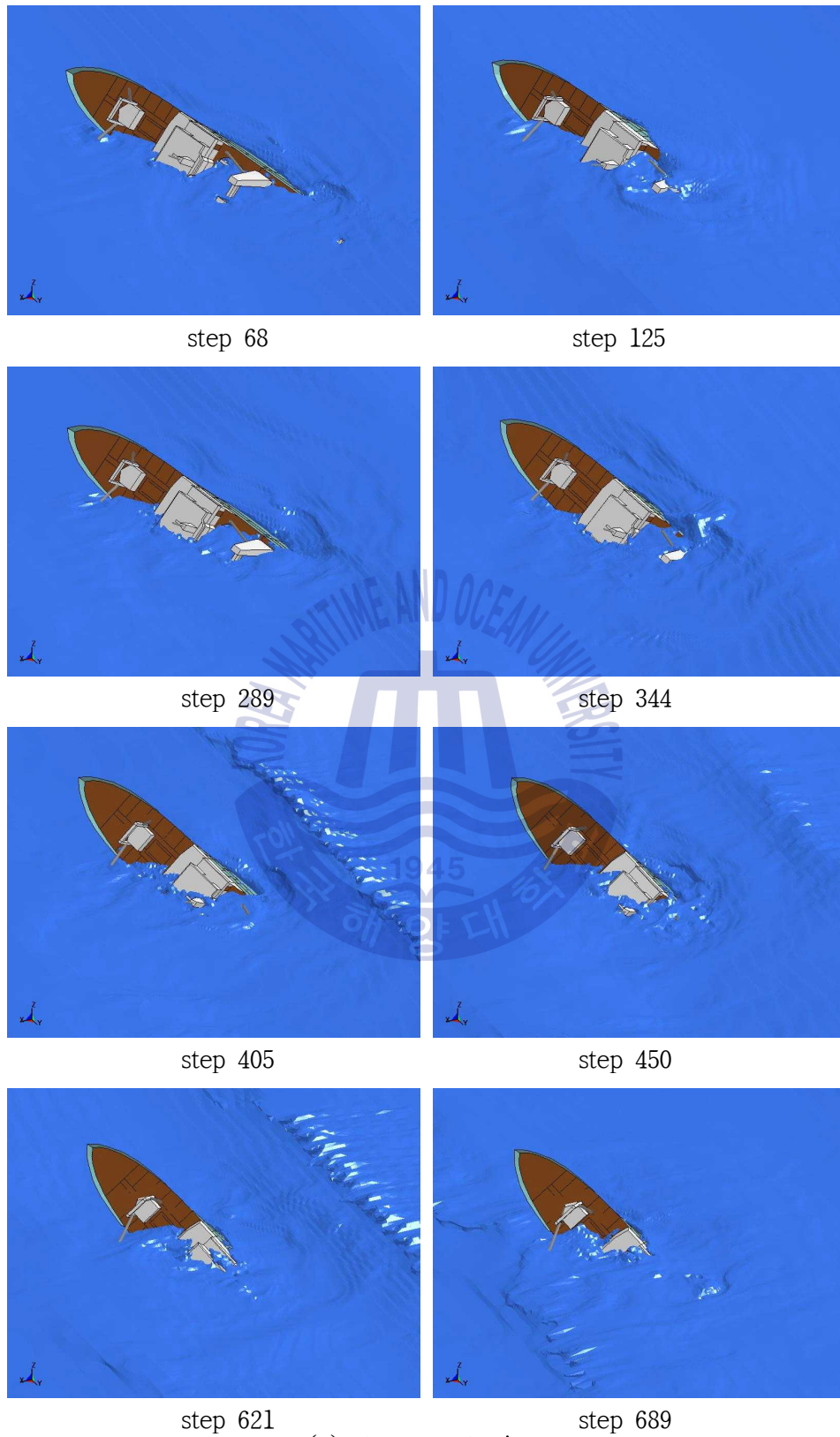


(a) zoom view of rolling response in Case 2-4



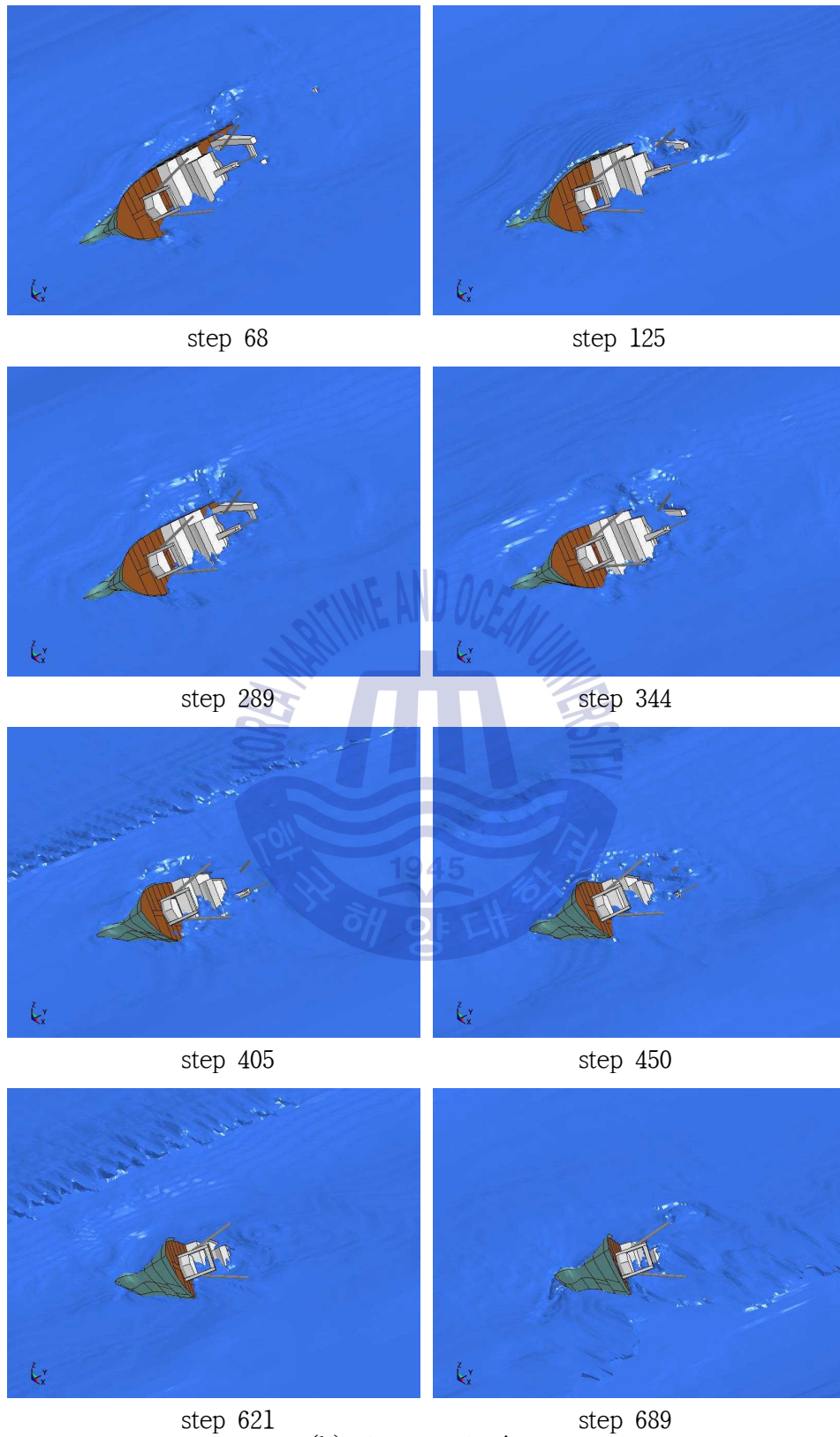
(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 69 Rolling response in Case 2-4



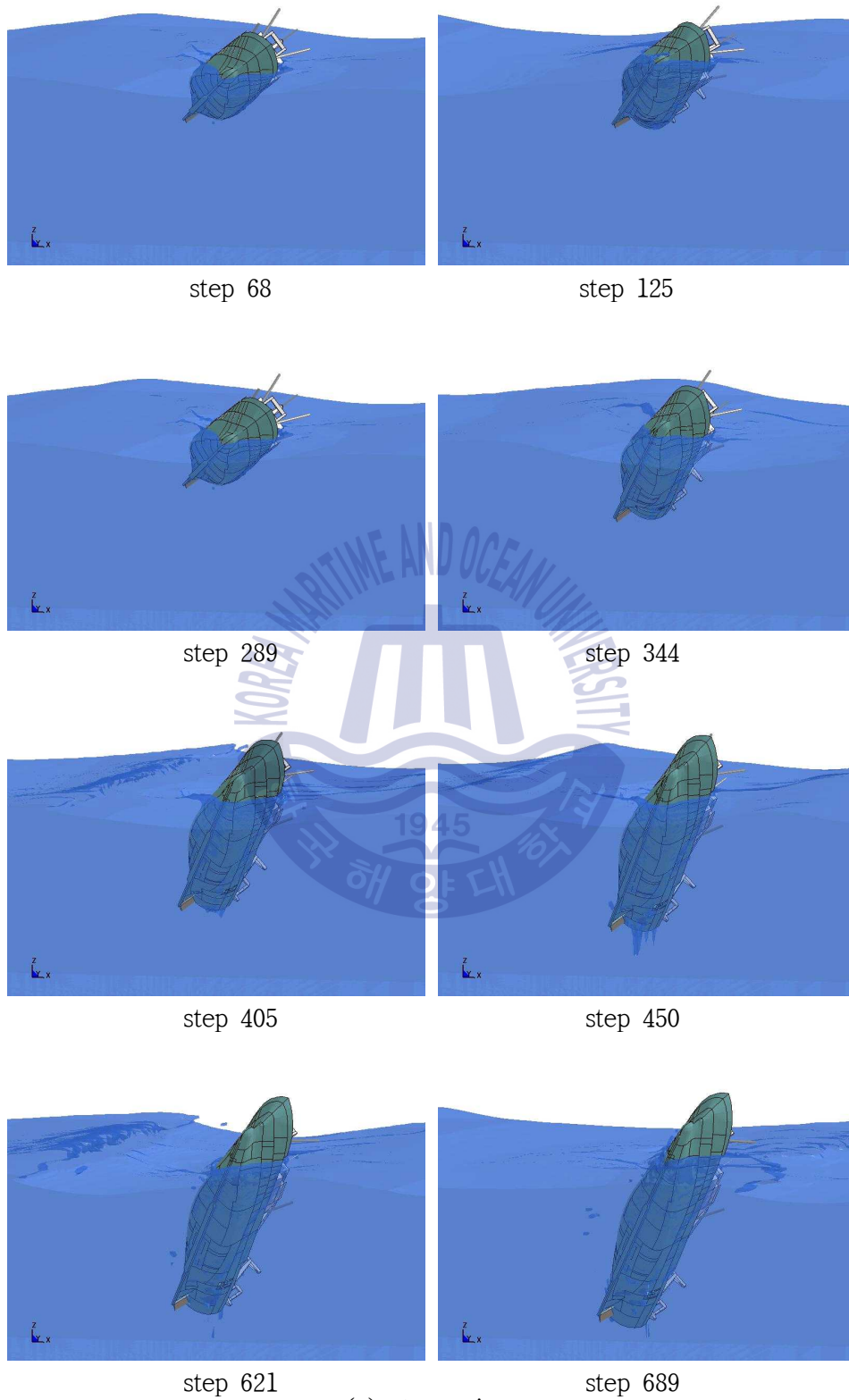
(a) stern port view

Fig. 70 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-4 (continued)



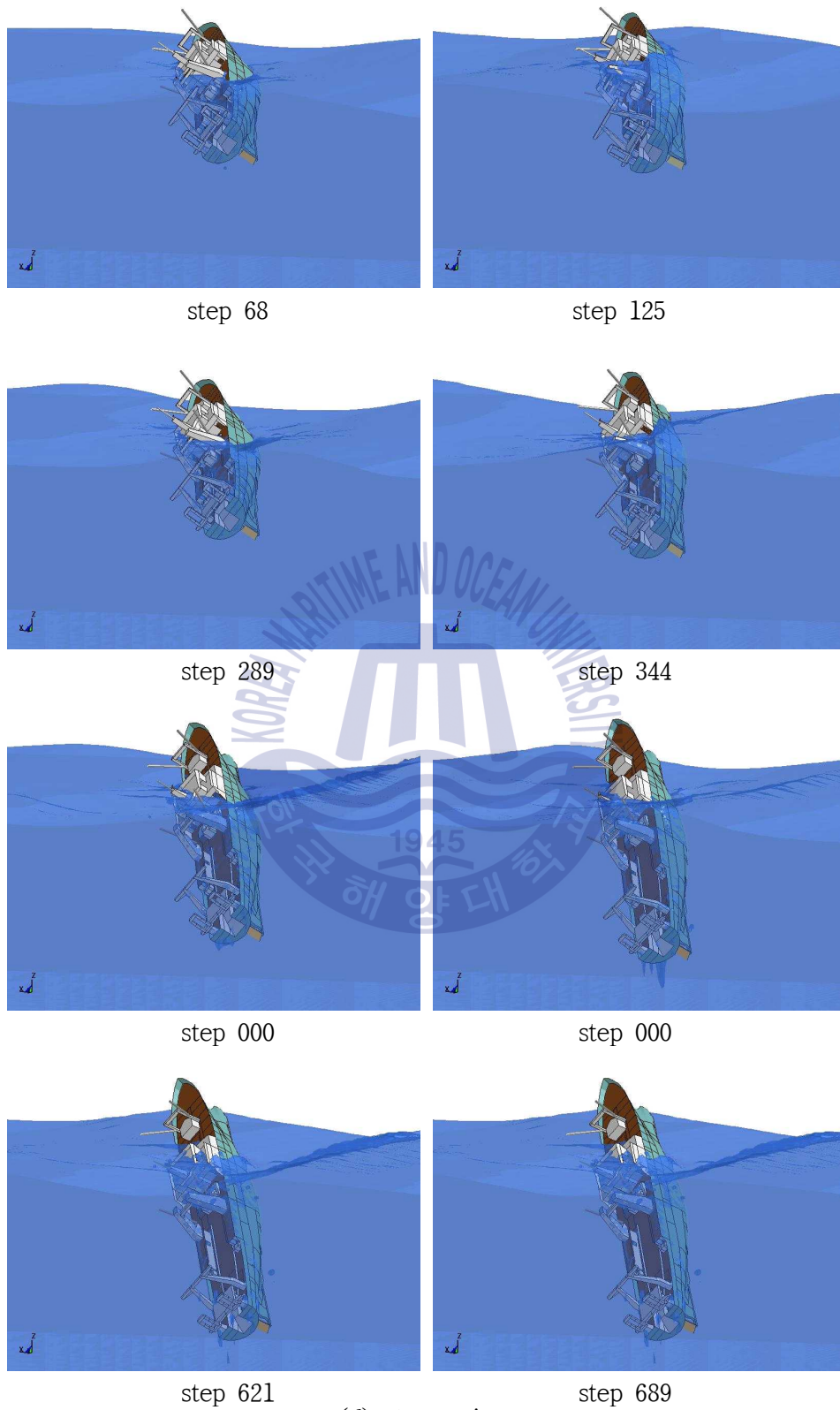
(b) stem port view

Fig. 70 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-4 (continued)



(c) stem view

Fig. 70 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-4 (continued)



(d) stern view

Fig. 70 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-4

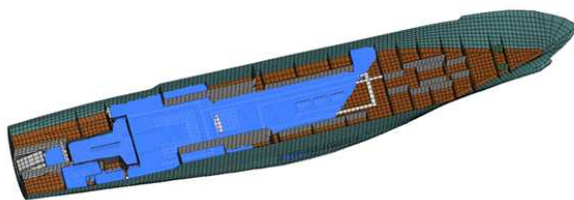
기관실과 어창의 해수 유입이 크게 증가하여 선미부가 수면 아래로 크게 침하하여 해치커버와 오물배출구를 통한 어획물처리실로의 해수 유입이 가속화하고 또한 선수루의 출입구를 비롯한 여러 개구부를 통하여 선체 전체에 걸쳐 해수가 유입됨에 따라 선체는 횡경사의 증가와 함께 침하였다. Table 3과 4의 Case 2-4에서와 같이 좌현 60°에서 70° 각도까지 횡경사하면서 해치커버와 오물배출구를 통하여 각각 264.0톤과 218.0톤의 해수가 유입되었고 피쉬병커, 어획물처리실, 엔진실 및 어창에 각각 96톤, 667톤, 237톤 및 540톤이 침수되었다.

5.11 Case 2-5 : 우현횡파에서 좌현 측 80° 이상 경사

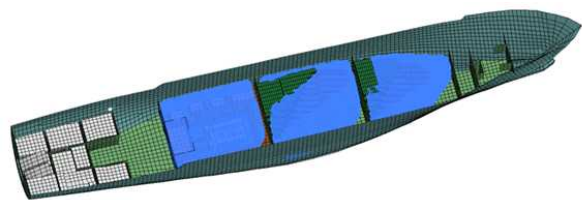
Case 2-5는 Case 2-4에 이어서 370톤 정도가 더 유입되어 Fig. 71과 Table 3 Case 2-5에서와 같이 피쉬병커, 어획물처리실, 기관실 및 어창에 각각 약 97톤, 763톤, 265톤 및 565톤 정도 해수가 침수되어 선체가 좌현 80° 정도 경사진 상태에서 Fig. 29(f)에서와 같이 우현 선미각도 72.5°로 우현횡파를 받으면서 표류 중인 시나리오이다. 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행한 결과로서의 중요 응답과 선체가 수면 아래로 침몰하는 과정을 각각 Fig. 72와 73에 나타내었다.



(a) overall view of fishing vessel

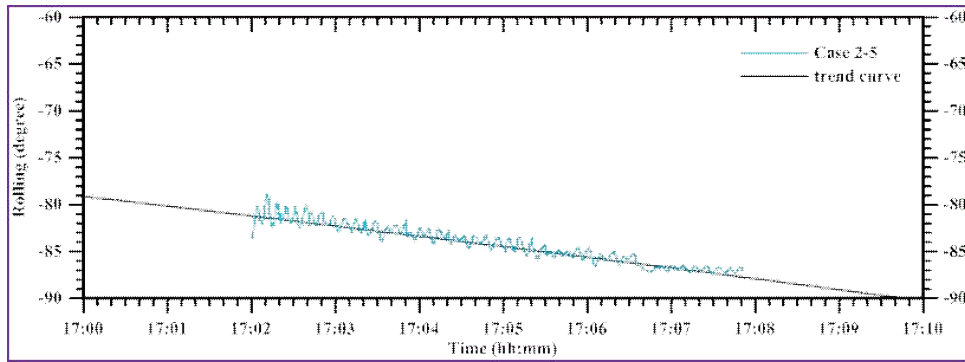


(b) processing and working space

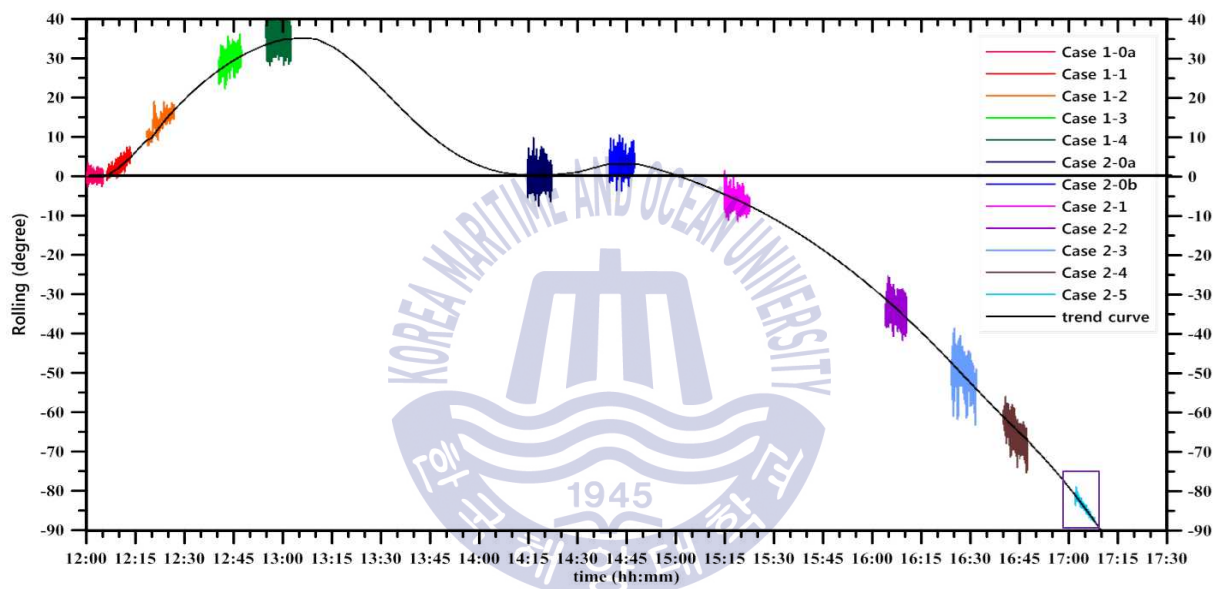


(c) engine room and fishing hold

Fig. 71 Initial seawater inflow state in Case 2-5



(a) zoom view of rolling response in Case 2-5



(b) rolling response according to scenario through flooding · sinking simulation

Fig. 72 Rolling response in Case 2-5

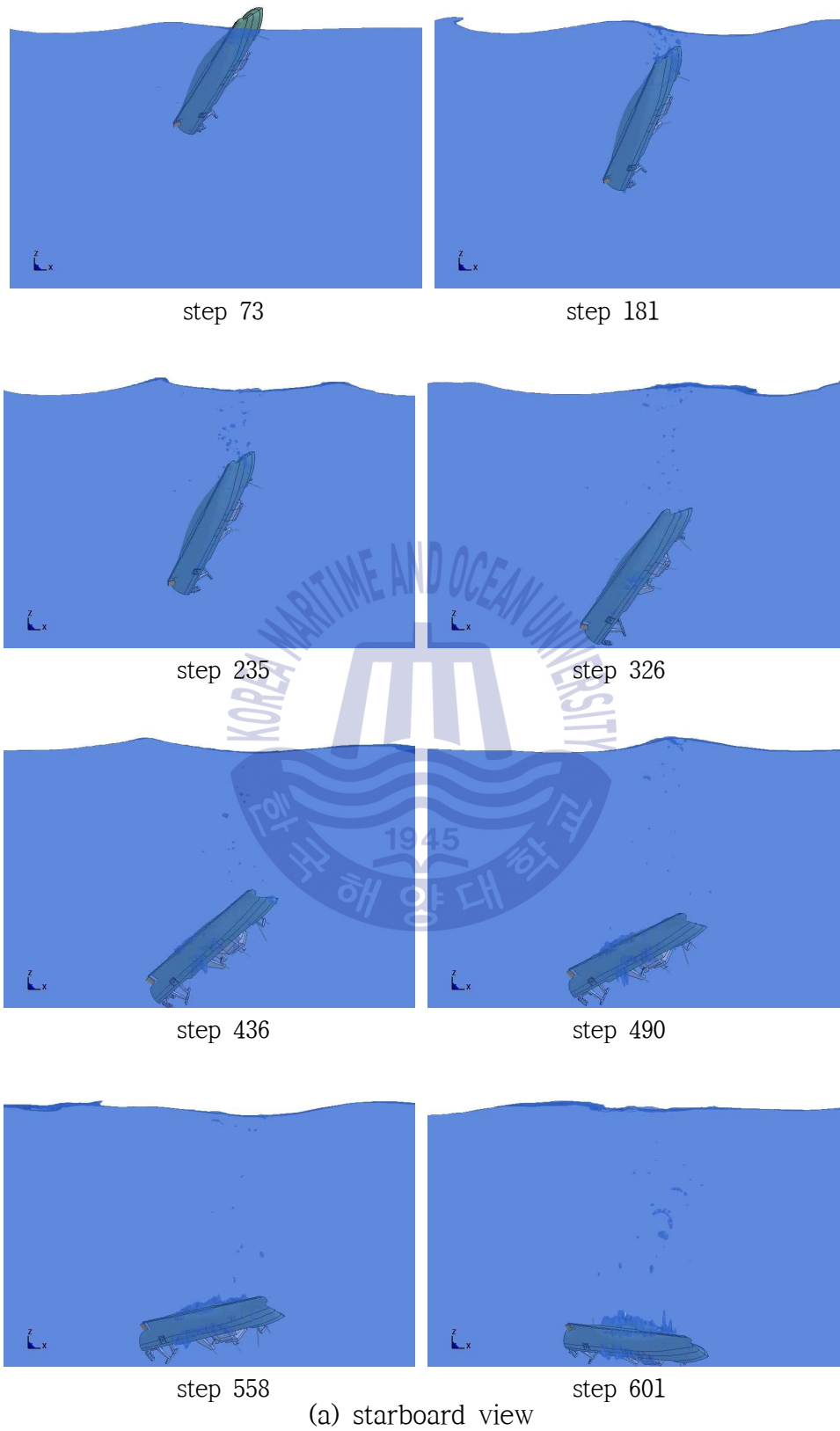


Fig. 73 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-5 (continued)

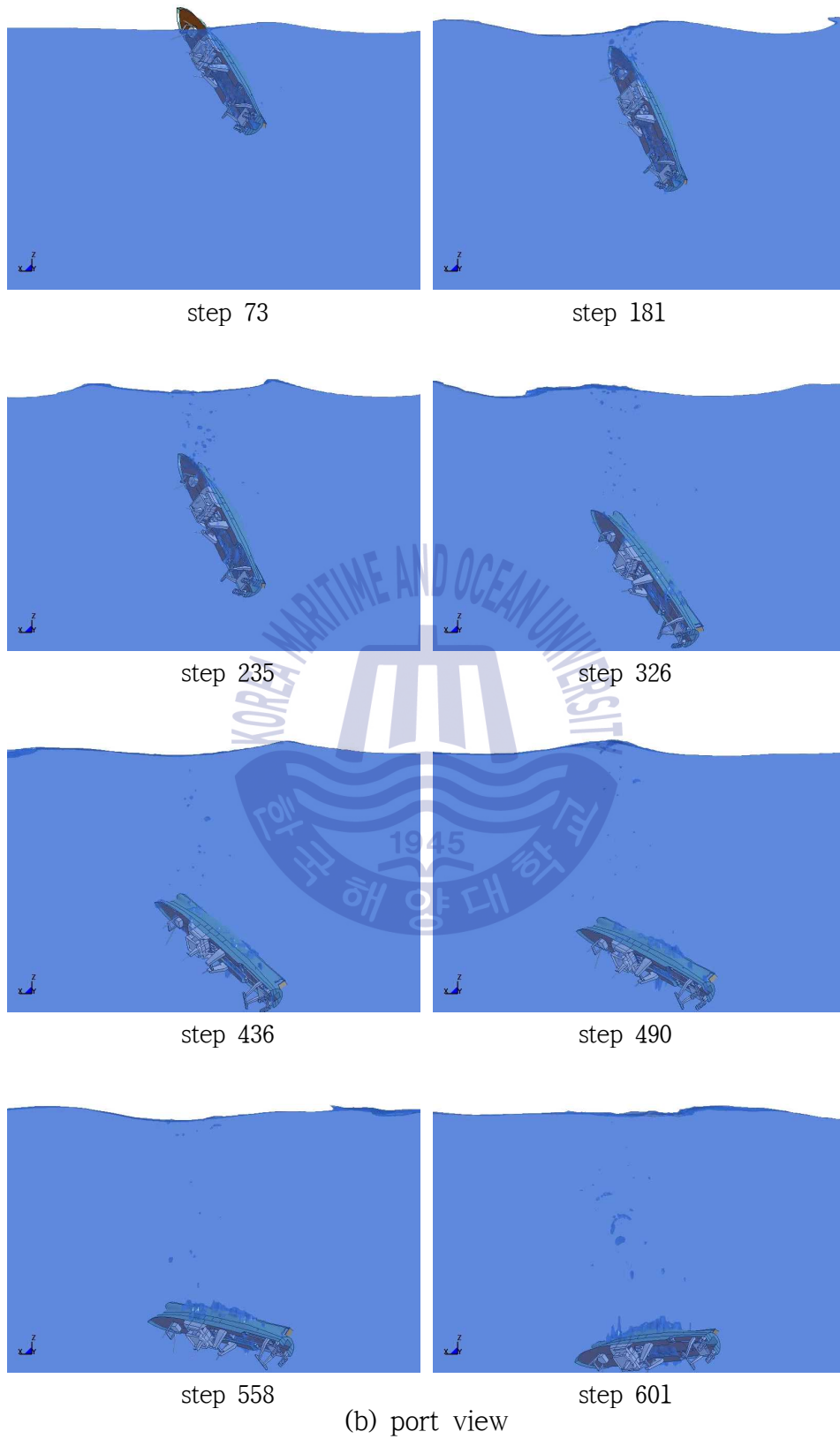


Fig. 73 Flooding and sinking simulation behavior in Case 2-5

Case 2-4에 이어서 선체가 침하함에 따라 여러 개구부를 통하여 선체 전체에 걸쳐 해수가 빠르게 유입되어 선체는 횡경사도 크게 증가하고 빠른 속도로 침몰하였다. Table 3과 4의 Case 2-5에서와 같이 좌현 80° 경사각도에서 선체 전체는 횡경사가 계속 증가하면서 선체 내부에 해수가 완전히 침수되고 117m 해저 바닥에 가라앉기 까지는 약 911톤의 해수가 각 구획별로 유입되었다.

5.12 고찰

사고선박이 황천에서 조업을 하고 피항하던 중 발생한 침몰사고를 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 사용하여 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하고 침몰사고의 과정 및 원인을 분석하고 하였다. 러시아 베링호 침몰사고 지역의 기상 및 해상상태를 객관적으로 확보하기 위하여 침몰사고 지역의 시간대별 해상 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고 당시 파랑과 강풍 등을 분석하였고, Bretschneider & Mitsuyasu 스펙트럼을 사용한 불규칙 파랑과 von Karman 모델을 사용한 불규칙 강풍을 구현하였다.

사고선박의 선형, 선체 구조도 및 일반배치도 등의 도면 등을 통한 선박의 선형과 중량 분포를 분석하고, 외부 침수 개구부 및 선내 침수 경로와 선박 복원성 계산서 등을 통한 어획량 및 연료유 등의 중량 분포를 파악하여 침수·침몰 시뮬레이션 시나리오를 작성하였고, 이를 기반으로 하여 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 위한 사고선박의 전선과 유체(공기 및 해수)를 상세 모델링 하였다.

어획물을 피쉬병커에 투하하면서 다량의 해수가 유입된 상황에서 해치커버를 불완전하게 폐쇄하고 피항 하던 중 크게 우현으로 급경사가 발생하였고 어획물과 연료유를 좌현으로 이동시킨 후 파도를 좌현에서 우현으로 받으면서 또다시 좌현으로 급경사하고 선미가 수면에 잠기면서 침몰하는 과정을 크게 2가지 시나리오로 나누어 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하였다. 거친 해상상태에서와 사고선박에 발생한 횡요와 중요 운동에 따른 선박의 거동과 선내에서의 해수 유입에 따른 구획별 침수과정과 유동을 각 시나리오에 따른 실선 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 실제와 같이 현실감 있게 구현하였다.

6. 결론

원양어선의 침수·침몰 시뮬레이션과 본 연구와 같이 수행하였지만 본 논문에서는 포함시키지 않았던 비손상 및 손상 복원성 계산을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 우현이나 좌현 측으로 선체가 횡경사 함에 따라 어획물처리실로 다량의 해수가 유입되고 또한 무게중심보다 낮은 기관실과 어창으로도 해수가 다량 유입됨에 따라 이미 선미 트림된 사고선박의 선미흘수가 더욱 증가되면서 선미는 수면 아래로 동시에 침하하였다. 무게중심보다 위에 있는 어획물처리실에만 해수가 유입되었다면 선미부의 선미트림이나 선미부의 수면 아래로의 침하가 그렇게 크게 증가하지는 않았고, 횡경사가 전진됨에 따라 선박의 복원성은 훨씬 더 빨리 악화되었을 것으로 판단된다.
2. 사고선박의 경우 급격하게 횡경사가 크게 진행되어도 선미부가 수면 아래로 침수되면서 기관실과 어창에 유입된 다량의 해수로 인하여 무게중심이 다소 아래로 내려가 전복에 의한 침몰이 아니라 선미의 침수가 병행한 대각도의 횡경사로 이어져 단순한 복원성 상실로 인한 전복으로 침몰하는 것과는 다른 현상으로 침몰되었다고 수치 시뮬레이션의 거동으로 확인할 수 있었다.
3. 비손상 및 손상 복원성 분석결과 중 비손상 복원성 분석결과로서 오물배출구 덮개가 파손됨으로써 해수유입각이 크게 감소하고, 격심한 파도와 바람에 의해 선박이 횡경사하면 낮아진 해수유입각으로 유입된 해수로 인해 경사 후 복원되어지는 에너지가 줄어들어 쉽게 복원되지 못함을 보여주고 있었다. 이것은 격심한 파도와 바람에 따른 횡경사로 불완전 폐쇄된 해치커버와 오물배출구를 통해 지속적인 해수유입이 가능하여 어획물처리실이 침

수, 어창과 기관실까지 해수가 전파되어 침몰에 이르는 것으로 추정이 가능하였다.

4. 또한 손상 복원성 분석은 침수 진행상황 별 복원성 계산을 분석하였으며 분석 결과도 불완전하게 밀폐된 해치커버와 오물배출구 덮개의 파손으로 인해 격심한 파도와 풍압에 의한 면적비와 동복원력 관련 기준을 만족하지 못하게 되기 때문에 횡경사 시 복원이 어려워 경사가 점차 심해지면서 해수가 지속적으로 유입되고, 여러 가지 분석을 통하여 선미부가 먼저 침수가 되어 침몰이 된 것이라고 추정이 가능하였다. 이것은 본 논문의 시뮬레이션 결과와 비교하더라도 횡경사 및 침수상태 등 상당한 부분이 일치함을 보여 줌으로써 침몰사고의 원인분석에 중요한 근거가 될 것으로 판단된다.

원양어선의 침수·침몰 시뮬레이션과 선박복원성 계산을 통하여 본 사고선박의 침몰사고 원인을 분석하면 해치커버를 개방하여 어획물을 피쉬병커로 투입하도록 지시를 내려 다량의 해수가 어획물과 함께 유입되도록 한 것이 본 사고선박의 직접적인 침몰사고 원인이 되었다. 처음에는 피쉬병커 해치커버를 통해서 해수가 유입되었고 그 이후에는 오물배출구를 통하여 해수가 대량 유입되게 하였다고 할 수 있다. 원양어선의 침몰사고에 대한 원인에 대하여 선체의 구조적인 대책으로 피쉬병커와 어획물처리실간에 어획물과 해수의 유입을 막아주는 나무 간이칸막이 대신에 충분한 강도와 수밀을 보장하는 스테인리스 셔터(stainless shutter)와 장치를 설치하는 것이 이와 같은 원양어선의 침몰사고를 예방하는 방법으로 현실성 있고 효율적일 것으로 판단된다.

References

- Aquelet, N., Souli, M., Gabrys, J. and Olovsson, L., 2003. A new ALE formulation for sloshing analysis. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 16, No. 4, pp. 1-18.
- Aquelet, N., Souli, M. and Olovsson, L., 2006. Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195, pp. 110-132.
- Bretschneider, C.L., 1968. Significant waves and wave spectrum. *Ocean Industry*, Feb. pp. 40-46.
- Korea Maritime Safety Tribunal, 2016. *Marine Accident Statistics, 2000-2015*, Available at: <https://data.kmst.go.kr/kmst/statistics/preiodStat/selectPreiodStat.do> [Accessed 1 September 2016].
- Lee, S. G., 2012. Development of Highly Sophisticated M&S System for Marine Accident Cause Investigation. *AMFUF 2012*, Busan, Korea, November 3-5, pp. 1-19.
- Lee, S. G., 2014a. Marine Safety technology using Highly Advanced M&S System. *KINPR 2014 Fall Conference Proceedings*, Busan, Korea, October 23-24, pp. 140-141.
- Lee, S. G., 2014b. Highly Advanced M&S System for Marine Accident Cause Investigation using FSI Analysis Technique. *Asia Navigation Conference 2014*, Xiamen, China, November 6-8, pp. 1-15.

- Lee, S. G., 2015c. Marine Accident Cause Investigation using Highly Advanced M&S System of FSI Analysis Technique. *AMFUF 2015*, Busan, Korea, November 3-5, pp. 1-11.
- Lee, S. G., 2016a. Marine Accident Integrated Analysis System. *KAOSTS 2016 KINPR Proceedings*, Busan, Korea, May 19-20, pp. 50-54.
- Lee, S. G., 2016b. Marine Accident Integrated Analysis System using Highly Advanced M&S System of FSI Analysis Technique. *AMFUF 2016 Proceedings*, Keelooong, Taiwan, October 13-15, pp. 49-61.
- Lee, S. G., 2016c. Marine Accident Integrated Analysis System. *Asia Navigation Conference 2016 Proceedings*, Yeosu, Korea, November 10-12, pp. 171-184.
- Lee, S. G. et al., 2017a. Rapid Turning Investigation of Sewol Capsizing Accident, *KAOSTS 2017 KINPR Proceedings*, Busan, Korea, April 19-20, pp. 1-8.
- Lee, S. G. et al., 2017b. Flooding & Sinking Investigation of Sewol Capsizing Accident. *KAOSTS 2017 KINPR Proceedings*, Busan, Korea, April 19-20, pp. 144-151.
- Lee, S. G. et al., 2017c, Investigation of Flooding & Sinking Accident of Sewol Ro-Ro Ferry Ship. *Asia Navigation Conference 2017 Proceedings*, Zhanjiang Chain, November 23-25, pp. 152-157.
- Lee, S. G. et al., 2017d, Investigation of Capsize Accident Cause of Sewol Ro-Ro Ferry Ship. *Asia Navigation Conference 2017 Proceedings*, Zhanjiang Chain, November 23-25, pp. 1-16.
- Lloyd Maritime Information Service, 2001. *Ship Casualty Database, 1990-2000*.
- LSTC, 2013. *LS-DYNA User's Manual*, Version 971 R7, Livermore Soft Technology Corp. : USA.

Mitsuyasu, H., 1970. On the growth of spectrum of wind-generated waves (2) - spectral shape of wind waves at finite fetch. *17th Conference on Coastal Engineering*, pp. 1–7 (in Japanese).

Mucke, T., Harkness, C. and Argyriadis, K., 2012. Offshore wind turbulence model vs. measurement. *Proceedings of EWEA 2012*, Copenhagen, Denmark, pp. 1-10.



감사의 글

2010년 2월에 석사과정을 마치고 조선소에 입사하여 약 5년 동안 현업에 종사하였다가 2014년 학교로 다시 돌아오게 되었습니다. 학교로 돌아올 수 있었던 계기는 이상갑 교수님께서 대표로 계시는 해양안전기술의 직원으로써 교수님의 연구와 회사의 업무를 수행하기 위해서였습니다. 처음에는 박사과정에 대하여 고려를 하지 않고 있었으나, 교수님의 권유와 배려 덕분에 박사과정에 진학하게 되었고 3년이 지나 이 논문을 완성할 수 있는 단계까지 오게 되었습니다. 처음에는 박사라는 지위에 대한 무게감과 학위 수여 가능성에 대한 두려움이 컸습니다. 저의 감양으로는 박사학위를 수여받기는 어려울 것이라는 것을 잘 알았기 때문입니다. 하지만 제 곁에는 석사과정에서부터 박사과정까지 저의 부족한 능력에도 불구하고 연구자로서의 길을 걸을 수 있게 많은 가르침과 조언을 해주시는 이상갑 지도교수님이 계셨기에 그러한 생각들이 기우였다는 것을 깨닫게 되었습니다. 24시간이 부족할 정도로 연구에 대한 열정이 가득하신 교수님이시지만 저의 연구와 관련한 일이라면 낮과 밤, 평일, 주말 상관없이 나아갈 방향을 제시하여 주시고, 잘못된 점에 대한 질책과 잘된 점에 대한 아낌없는 칭찬 덕분에 지금의 제가 된 것 같습니다. 이 지면을 빌려 이상갑 교수님께 진심으로 감사드립니다.

그리고 학문적 깊이와 열정을 가늠하기 어려울 정도로 평소에도 많은 가르침을 주시지만 특히 바쁘신 와중에도 저의 논문 심사를 위하여 끝까지 세심한 심사와 조언을 아끼지 않으신 박석주 교수님, 현범수 교수님과 남종호 교수님 그리고 기계공학부의 조종래 교수님께도 깊은 감사드립니다.

박사과정을 수행하면서 실무적으로 많은 도움을 주었던 STX 구조기술팀 사람들, 선체구조실험실에서 함께 동거동락했던 동생들과 지치고 힘들고 고민이 있을 때 곁에서 힘이 되어 주었던 친구들과 동기 그리고 후배들에게도 감사하다는 말 전하고 싶습니다.

끝으로 잘 하지도 못하는 공부와 연구한다고 새벽까지, 때로는 주말도 없이 생활하는 모습을 노심초사 지켜봐주신 부모님과 가족들에게 감사드리며 이 논문을 전하고 싶습니다.

본 연구는 해양안전심판원의 “제501오룡호 침몰사고 원인분석 침수·침몰 시뮬레이션 연구 용역” 과제의 지원을 받아 수행한 연구의 일부이며, 이에 감사드립니다.

