

공학석사 학위논문

소형유조선 이중저 구조기준에 관한 연구

*A Study on Double Bottom Structural Criterion
of Small Oil Tanker*

지도교수 이 상 갑

2007년 8월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

윤 여 훈

본 논문을 윤 여훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 박 석 주 (인)

위 원 : 공학박사 박 한 일 (인)

위 원 : 공학박사 이 상 갑 (인)

2007년 8월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과 윤 여 훈

목 차

목 차	i
List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. LS/DYNA3D code 및 수치해석 검증	5
3. 내좌초에 우수한 이중저 구조 모델	29
4. 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석	44
4.1 내좌초 구조해석 시나리오와 시뮬레이션 모델	44
4.2 최저 이중저 구조 내저판 높이 0.65m인 경우의 내좌초 손상 경향	55
4.3 이중저 구조 내저판 높이에 따른 내좌초 손상 경향	65
4.4 화물창 개수에 따른 내좌초 손상 경향	66
4.5 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석에 대한 고찰	69
5. 재화중량 500톤 미만의 소형 유조선 이중저 구조 검토	71
6. 결 론	77
참고 문헌	80
부록 A : 내좌초 구조해석 시나리오	82
부록 B : 내좌초 구조해석 파손 결과 정리표	91
부록 C : 내좌초 구조해석 파손 결과	100

List of Tables

Table 2.1 Member dimensions of double hull grounding models	8
Table 2.2 Material properties of ASTM 569	13
Table 3.1 Principal dimensions of small oil tanker	30
Table 3.2 Dimensions of double bottom model of small oil tanker	31
Table 3.3 Material properties of mild steel	35
Table 3.4 Penetration, location and length of fracture at inner bottom	42
Table 3.5 Comparison of member internal energy with rock position	43
Table 4.1 Scenario of double bottom scantling	44
Table 4.2 Principal dimension change of double bottom scantling	44
Table 4.3 Scenarios of full ship grounding simulation	50
Table 4.4 Summary of member internal energy of Ship C at even keel condition	60
Table 4.5 Summary of member internal energy of Ship B at even keel condition	63
Table 4.6 Summary of member internal energy of Ship A at even keel condition	63
Table 5.1 Volume change of cargo tank	72
Table 5.2 Decrement of transportation cost	73
Table 5.3 Production cost according to double bottom structure	73
Table 5.4 D.B. height of small oil tanker according to DWT	76
Table B.1 Summary of damage results of Ship C	92
Table B.2 Summary of damage results of Ship B	96
Table B.3 Summary of damage results of Ship A	98

List of figures

Fig. 2.1 Characteristics of double hull grounding models	5
Fig. 2.2 Grounding test machine	8
Fig. 2.3 Double hull model installations	8
Fig. 2.4 Configuration of F.E. double bottom model, Paul Buck	9
Fig. 2.5 Configuration of F.E. double bottom model, CONV/PD328	10
Fig. 2.6 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PB	11
Fig. 2.7 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PD328	11
Fig. 2.8 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PD328V	12
Fig. 2.9 Stress-Strain curve (ASTM 569)	13
Fig. 2.10 Strain rate effect(Cowper Symond model)	14
Fig. 2.11 Characteristics of yield stress factor(Cowper Symond model)	14
Fig. 2.12 Damage configuration of double bottom model, Paul Buck	15
Fig. 2.13 Damage configuration of double bottom model, CONV/PD328	15
Fig. 2.14 Damage configuration of double bottom model, ADH/PB	16
Fig. 2.15 Damage configuration of double bottom model, ADH/PD328	17
Fig. 2.16 Damage configuration of double bottom model, ADH/PD328V	17
Fig. 2.17 Grounding responses of Paul Buck model	19
Fig. 2.18 Grounding responses of CONV/PD328 model	21
Fig. 2.19 Grounding responses of ADH/PB model	23
Fig. 2.20 Grounding responses of ADH/PD328 model	25
Fig. 2.21 Grounding responses of ADH/PD328V model	27
Fig. 3.1 Distributions of domestic small oil tankers	29
Fig. 3.2 Idealized D.W.T. 500 ton small oil tanker	30
Fig. 3.3 Configuration of F.E. idealized double bottom models	32
Fig. 3.4 Double hull model installations	33
Fig. 3.5 Location of rock along the breadth	34
Fig. 3.6 Stress-Strain curve (mild steel)	35
Fig. 3.7 Damage configuration of idealized double bottom models(center) ..	36

Fig. 3.8 Damage configuration of idealized double bottom models(off-center)	37
Fig. 3.9 Grounding responses of idealized double hull model(15 knots)	39
Fig. 3.10 Internal energy responses of idealized double hull model(15 knots)	40
Fig. 4.1 Midship section of small oil tanker with double bottom structure	45
Fig. 4.2 Configuration of F.E. small oil tanker Ship C	53
Fig. 4.3 Configuration of F.E. small oil tanker Ship B	54
Fig. 4.4 Configuration of F.E. small oil tanker Ship A	54
Fig. 4.5 Configuration of Ship C grounding scenario with 0.65m inner bottom	55
Fig. 4.6 Configuration of Ship B grounding scenario with 0.65m inner bottom	56
Fig. 4.7 Configuration of Ship A grounding scenario with 0.65m inner bottom	56
Fig. 4.8 Grounding responses of Ship C with center rock position	57
Fig. 4.9 Grounding responses of Ship C with between rock position	57
Fig. 4.10 Grounding responses of Ship C with side rock position	58
Fig. 4.11 Grounding responses of member internal energy of Ship C	59
Fig. 4.12 Grounding responses of Ship A with center rock position	61
Fig. 4.13 Grounding responses of Ship A with between rock position	61
Fig. 4.14 Grounding responses of Ship A with side rock position	62
Fig. 4.15 Configuration of Ship C grounding scenario with 0.65m inner bottom	64
Fig. 4.16 Configuration of Ship C grounding scenario w.r.t. double bottom height	65
Fig. 4.17 Configuration of Ship B grounding scenario w.r.t. double bottom height	66
Fig. 4.18 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders	67

Fig. 4.19 Grounding responses of member internal energy of 6 & 4 cargo holders	68
Fig. 4.20 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders with center rock position	68
Fig. 4.21 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders with between rock position	69
Fig. 4.22 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders with side rock position	69
Fig. 5.1 Distributions of domestic small oil tankers under DWT 500 ton	71
Fig. 5.2 Volume change of cargo tank	72
Fig. 5.3 D.B. height distribution of tanker under DWT 2,000 with DWT	74
Fig. 5.4 D.B. height distribution of small oil tanker according to DWT	75
Fig. A.1 Configuration of rock position and height in Ship C	83
Fig. A.2 Configuration of Scenario in Ship C	84
Fig. A.3 Configuration of rock position and height in Ship B	87
Fig. A.4 Configuration of Scenario in Ship B	87
Fig. A.5 Configuration of rock position and height in Ship A	89
Fig. A.6 Configuration of Scenario in Ship A	89
Fig. C.1 Damage configuration of C65EF65C10	101
Fig. C.2 Damage configuration of C65EF65B10	101
Fig. C.3 Damage configuration of C65EF65S10	102
Fig. C.4 Damage configuration of C65TF65C10	102
Fig. C.5 Damage configuration of C65TF65B10	103
Fig. C.6 Damage configuration of C65TF65S10	103
Fig. C.7 Damage configuration of B65EF65C10	104
Fig. C.8 Damage configuration of B65EF65B10	104
Fig. C.9 Damage configuration of B65EF65S10	105
Fig. C.10 Damage configuration of A65EF65C10	105
Fig. C.11 Damage configuration of A65EF65B10	106
Fig. C.12 Damage configuration of A65EF65S10	106

*A Study on Double Bottom Structural Criterion
of Small Oil Tanker*

Yun, Yeo-Hoon

*Division of Ocean Systems Engineering
Graduate School, Korea Maritime University*

Abstract

With the effectuation of the amendment of MARPOL 73/78 on 5th April 2005, enforcement regulations of Marine Pollution Prevention Act were revised in domestic on 12th March 2005 that double hull structure was required to the small single bottom oil tankers under DWT(deadweight tonnage) 500 ton for the protection of the marine pollution casualties. The objective of this study is to develop the double bottom structure of small oil tanker under DWT 500 ton with superior crashworthiness and to establish its suitable standard to double bottom structure.

The promoting strategy of this study is the crashworthiness structural analysis of small oil tankers using LS/DYNA3D code. For the crashworthiness structural analysis, the followings were carried out : the validation of LS/DYNA3D code and grounding simulation capacity using the experimental results of grounding oil tanker models conducted by NSWC of the USA, the suggestions of the grounding double bottom structural model suitable to domestic small oil tanker with superior crashworthiness using 5 domestic small single and double bottom oil tankers and grounding oil tanker models, and performance of ship grounding simulations of small oil tankers according to tonnage.

The followings might be summarized as conclusions:

1. LS/DYNA3D code could be validated with enough accuracy, and research team might be suitable for this study with good numerical simulation capacity. It is

desirable to adapt the fine mesh F.E. model, and failure strain is related with the size of F.E..

2. Small oil Tanker model was adapted for the crashworthiness structural analysis and examination of damage stability with superior crashworthiness. Even though typical grounding scenario of small oil tanker could not be established because of a lack of damage data from the domestic grounding accidents, important grounding scenario factors were used, such as vertical position of rock to inner bottom, its lateral position, trim and loading conditions of hull, proceeding velocity, etc. for the crashworthiness structural analysis.
3. The bottom is generally the biggest member of the crashworthiness of the double bottom structure, and the absorbed internal energy capacity of each member depends on the double bottom height, rock height based on the inner bottom, and rock position in the breadth direction. It could be confirmed that double structure with superior crashworthiness could be derived through the analysis of the absorbed internal energy capacity of each member, in addition to the global grounding responses.
4. It could be confirmed that the higher rock height based on the inner bottom could make the greater possibility of fracture of inner bottom, and also that the double bottom structure would be more superior to the crashworthiness performance contrary to our expectations through the full-scaled grounding structural analysis of small oil tanker. It could be thought that above 0.65, 0.75 and 0.85m would be suitable for the inner bottom height of Ship A, B and C, respectively, even though the higher inner bottom of double bottom structure could make the more superior to the crashworthiness.
5. It could be thought that it is desirable to reduce the number of cargo holders for the superior crashworthiness structure, within the range of no problem of damage stability capacity, and also that the desirable inner bottom height should be above the B/7.5 and its minimum height 0.65m for the domestic small oil tanker under DWT 500 ton.
6. It could be learned that as the size of oil tanker becomes smaller due to the structural modification to double bottom of small oil tanker, the ratio of reduced volume and the ratio of production cost with respect to the single bottom oil tanker becomes also increasing. It could be thought that it is proper to exempt the small oil tanker under DWT 150 ton from the construction of double bottom structure by the full-scaled small oil tanker grounding simulation results, in addition to such economic problem as small oil tanker.

1. 서 론

Erika호 사고에 뒤이은 Prestige호의 유류 오염사고 인해 국제적으로 해양오염 방지를 위하여 단일선체(single hull) 유조선(oil tanker)에 대한 관련 규정의 강화 필요성이 지속적으로 제기되었고, 최대 피해지역인 EU 국가들을 중심으로 단일선체에 대한 보다 획기적인 규제가 불가피하다는 공감대를 불러왔다. 이로 인해 2005년부터 2010년까지 대부분의 단일선체 유조선에 대한 EU 역내 진입금지라는 초강경조치를 취하였고, 특히 IMO에서는 MARPOL 73/78 부속서 1의 13G 규칙을 개정하고 13H 규칙을 신설하여 단일선체 유조선의 퇴출을 가속화하고 상태평가계획(CAS) 검사요건을 강화하였으며, 단일선체 유조선에 의한 비중이 0.9 이상의 기름인 중급유의 운송을 금지시켰다.

MARPOL 73/78의 개정 내용이 2005년 4월 5일 발효됨에 따라 국내에서는 2005년 3월 12일 해양오염방지법시행규칙을 개정하여 단일선체 유조선에 의한 해양오염사고 방지를 위한 동 협약의 개정사항을 수용하여 단일선체 유조선의 운항금지 시한을 앞당기는 한편, 재화중량톤수(DWT) 500톤 미만의 소형유조선에 대해서도 이중저(double bottom) 구조 설치를 의무화하였다. 우리나라 해양오염방지법시행규칙의 개정에 따르면, 국제항해에 종사하는 재화중량톤수 5,000톤 이상의 일반 단일선체 유조선 가운데 선령 26년 이상 된 선박의 운항이 2005년 4월 5일부터 금지되며, 선령 26년까지 선박은 2010년까지만 운항이 허용된다. 그리고 중급유를 운송하는 재화중량톤수 5,000톤 이상 단일선체 유조선도 2005년 4월 5일부터 운항이 금지되며 재화중량톤수 600톤에서 5,000톤 사이의 선박은 2008년부터 운항이 금지된다. 그러나, 4월 5일 이전에 내항화물 운송사업을 등록하고 국내항해에만 종사하는 선박 가운데 재화중량톤수 5,000톤 이상 중급유를 운송하는 선박의 경우 선령 26년까지는 국내 유류수송차질 등을 고려해 2010년까지 운항을 허용하고 600톤에서 5,000톤은 선령에 따라 2015년까지 운항을 허용하였다. 그리고 현재 재화중량톤수 500톤 이상 5,000톤 미만의 유조선에 대해 이중저 구조를 설치토록 하고 있으나 2010년부터는 재화중량톤수 500톤 미만의 소형유조선에 대해서도 이중저 구조를 구비토록 대상범위를 확대하였다.

위와 같이 재화중량톤수 500톤 미만의 소형유조선에 대한 이중저 설치 의무화는 MARPOL 73/78에서 재화중량 600톤 이상의 유조선에 적용하는 기준에 비하여 국내 기준이 한층 강화된 것으로서 해양오염방지법시행규칙 제12조 제1항 별표4-2에 따라 2010년 1월 1일 이후 인도되는 재화중량톤수 500톤 미만의 유조선은 해양수산부 장관이 정하여 고시하는 소형선 이중저 구조기준에 적합하여야 하

고, 또한, 동 별표 비고 3항에 따라 2010년 1월 1일 이전에 인도된 재화중량 500톤 미만의 유조선의 경우에도 2020년 1월 1일 전까지 소형선 이중저 구조를 갖추도록 규정하고 있고, 다만, 해양수산부장관이 정하는 선박의 크기, 항행구역 및 선박의 구조 등에 관한 규정을 만족하는 경우 이중저 설치를 면제할 수 있도록 규정되어 있다. 현재 해양오염방지법 시행규칙에는 재화중량 500톤 이상의 유조선에 적용되는 이중저 구조는 동 시행규칙 별표6의 18호에 따라 최소높이가 $B/15m$ 이상이 되어야 하고 최소값은 0.76m(재화중량 600톤 미만의 경우 0.65m) 이상으로 규정하고 있으나 재화중량 500톤 미만의 소형유조선에 대해서는 이중저 구조 기준이 설정되어 있지 않은 문제점이 있다.

2005년 3월 12일 재화중량 500톤 미만의 소형 유조선도 해양오염사고를 방지하기 위하여 이중저 구조로 건조하도록 해양오염방지법 시행규칙이 개정됨에 따라 내좌초에 우수한 500톤 미만의 소형 유조선의 이중저 구조를 개발하고 그에 적합한 이중저 구조 기준을 확립하는 것이 본 연구의 최종목표로서 다음과 같은 연구를 수행하고자 한다.

- 국내 유조선 좌초사고 사례조사/분석
- 국내 소형유조선의 톤급별 단저/이중저구조 형태 분석
- 소형유조선 이중저구조 시공/유지관리 분석 : 최소 이중저높이 결정
- 소형 유조선의 단저구조와 이중저구조의 건조선가 비교
- 이중저 설치에 따른 화물창 용적감소 분석
- 유조선 실선 좌초 시물레이션을 통한 이중저 내좌초 성능해석
- 소형유조선 이중저구조 기준설정
- 이중저 설치 면제 선박크기 및 항해구역

선박의 내좌초에 우수한 선저구조는 좌초사고에 대한 충격에너지를 크게 흡수할 수 있는 구조로서 유류 유출을 방지하거나 최소화할 수 있어야 한다. 선박의 좌초사고에 대한 선저의 구조적 좌초거동과 붕괴기구를 가장 유효하게 추정할 수 있는 방법으로써 실선(full scaled ship)의 좌초실험을 수행하는 것이 보다 정확할 수 있겠으나 비경제적이고 다양한 좌초 상황에 대하여 현실적으로 가능하지 않다. 한편 축소 모형을 이용하는 방법이 있으나 치수효과(scale effect)등의 문제로 그 정도가 낮으며 국부적인 현상만을 나타내기 때문에 실제 충돌 거동 및 응답 현상과는 큰 차이가 있을 수 있다. 또한 간이식들이 유도되어 사용되고 있으나 대부분 기본 구조부재들을 실험한 결과를 근거로 도출되어서 복잡하고 거대한 실선 구조의 충돌현상을 나타내기는 적절하지 못하다. 최근 급격한 컴퓨터 전산능력의 발전과 더불어 충돌 및 좌초 수치 시물레이션 code의 개발로 인

해 실선 충돌 및 좌초 실험의 보조자로서 궁극적으로는 실선 충돌 및 좌초 실험을 대체할 수 있을 정도로 정확한 해석 code의 개발과 해석 능력을 갖추게 되었다. LS/DYNA3D[1] 등의 동적 비선형 시뮬레이션 code를 이용하여 실선 선저구조부의 붕괴거동과 파괴형태, 충돌에너지 흡수능력 및 압괴거리 등을 비교 검토하는 것은 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다[2~4]

본 연구를 위한 추진전략으로서 LS/DYNA3D code를 이용한 내좌초 구조해석을 수행하는 것으로서 미국 NSWC(Naval Surface Warfare Center)에서 수행한 좌초모형 유조선 실험 결과[5]들을 이용하여 LS/DYNA3D code 및 좌초 수치해석 능력을 검증하고, 국내 소형 단저 및 이중저 구조 유조선(5척)과 좌초모형 유조선 실험 모델을 이용하여 내좌초에 우수하고 국내 소형 유조선 이중저에 적합한 이중저 구조 모델을 제안하여 톤급별 소형유조선 전선 좌초 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

좌초에 대한 국내외 연구는 충돌 분야에 비하여 다소 활발하지 못하다고 할 수 있다. 1969년 1월부터 1973년 4월까지 미국 내 연근해에서 발생한 30건의 좌초사고로부터 손상범위를 분석하여 유류오염을 감소시키기 위해 이중저 구조의 효율성을 보여주었으며 이중저 높이를 B/15로 제안하였다[6]. 이러한 연구결과가 제안된 후 대규모 좌초실험과 수치해석이 수행하게 되었다. 몇 년 뒤 좌초 손상시 찌그러진 체적과 찢어진 판의 면적으로 에너지 흡수량을 결정지을 수 있다는 간이법이 제안되었다.

1989년 3월 Exxon Valdez 좌초사고가 발생한 후 본격적으로 좌초 사고로 인한 유류 유출을 방지하거나 감소시킬 수 있는 유조선의 설계에 대한 연구가 활발해 졌다. 일본 조선업기반정비사업협회(ASIS)는 운수성의 보조금으로 1991년부터 7년 계획으로 유조선에서의 기름유출방지를 위한 연구개발을 수행하였으며 [7], 이 연구과제는 1994~1995년 네델란드 수로에서의 대규모 실선 좌초실험[8], 모형좌초실험[9] 및 수치 시뮬레이션[10]을 지원하였다.

미국의 NSWCCD(Carderock Division of the Naval Surface Warfare Center)는 1/5 축적의 전통적(convention)인 모형 이중저 구조(Paul Buck, CONV/PD328)와 ADH(Advanced Double Hull)형 모형 이중저 구조(ADH/PB, ADH/PD328, ADH/PD328V)를 이용한 좌초실험을 수행하였으며[11, 12], 본 연구를 비롯한 많은 수치 시뮬레이션의 검증을 위한 자료로 사용되고 있다.

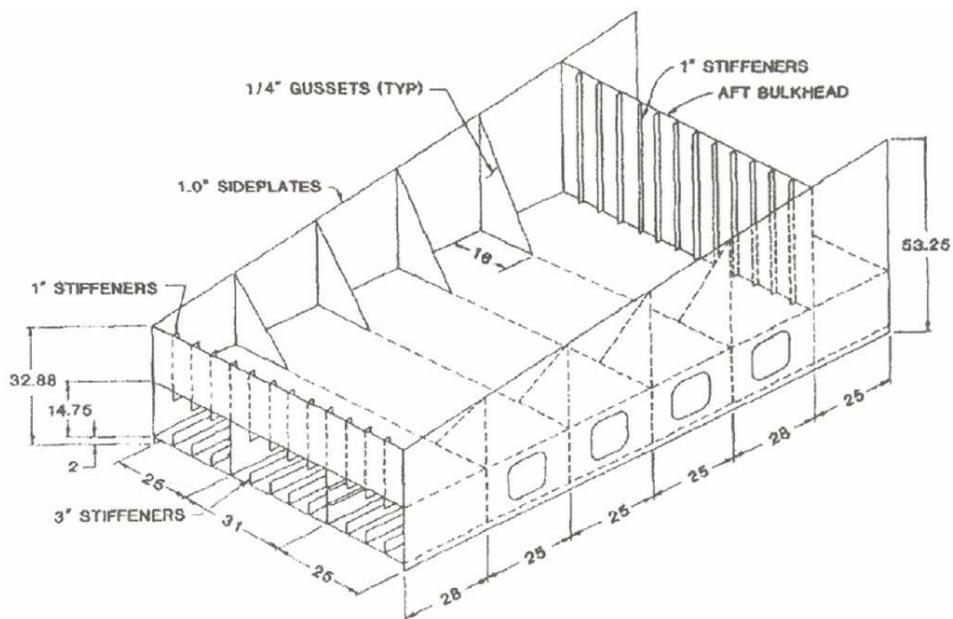
1992년 7월부터 1995년 12월 까지 약 3년 6개월 동안 국내 3대 조선소를 비롯하여 일본 대형 조선소 및 세계 주요 선급 등 19 기관이 참여하고 미국 MIT가 주관하여 유조선 구조안전성에 관한 MIT 공동연구(MIT-Joint Industry Project on Tanker Safety)가 수행되었다. 특히 MIT Wierzbicki 교수를 중심으로 선체구조의 소성 에너지 소산, 판부재의 파단과 찢어지는 과정, 압초와 보강판과의 접

측 및 마찰 등에 관한 연구가 수행되었으며, 좌초해석 간이 프로그램 DAMAGE(Damage Assessment of Grounding Events)도 개발하였다. 이 프로그램의 검증을 위해 NSWCCD의 축소모형 좌초실험 결과, 네델란드에서의 대규모 실선 좌초실험 결과와 1975년 싱가포르의 Buffalo Reef에 좌초된 VLCC의 좌초사고 결과 등을 이용하였다[13].

국내외적으로 초기 에너지 흡수를 추정하는데 매우 적합한 간이식의 도출에 연구와 구조적 내충격 개념과 방법을 근간으로 한 간이 해석적 방법의 제안에 대한 연구들이 다수 수행되었다[14, 15]. 최근에는 급속한 컴퓨터 전산능력과 해석 code의 발전으로 hydrocode LS-DYNA3D, MSC/DYTRAN 등을 사용한 충돌 및 좌초 수치 시뮬레이션이 주류를 이루고 있다[16~18]. 외국의 선진 조선국들에 비하여 국내에서는 실선 및 모형선의 좌초 실험을 통한 연구개발 분야는 매우 열악하지만, 최근 hydrocode를 사용한 수치 시뮬레이션에 대한 연구는 활발해 졌고 조선소에서도 수치 시뮬레이션에 의한 결과들을 설계에 적용하고 있다.

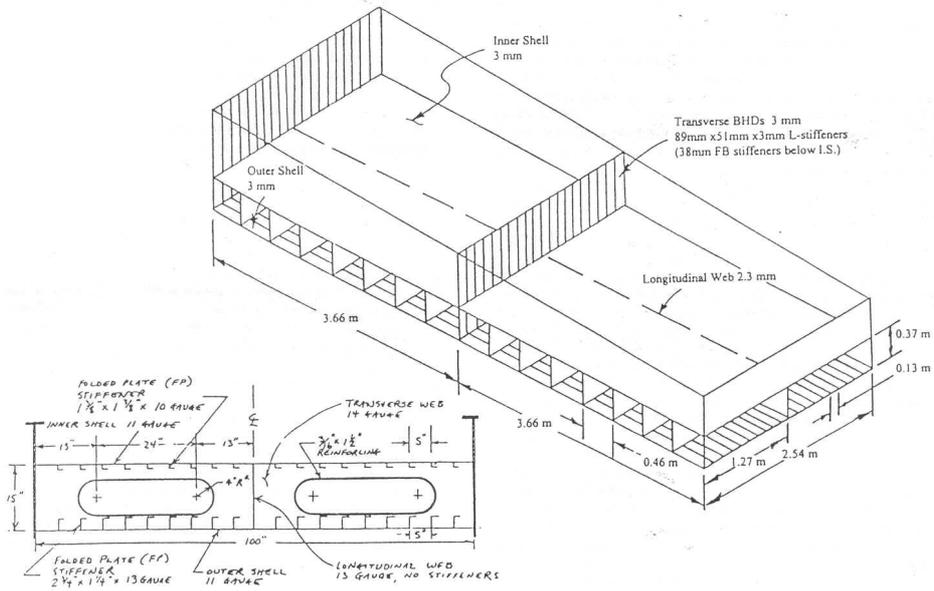
2. LS/DYNA3D code 및 수치해석 검증

NSWC에서 수행한 좌초모형 유조선 실험 결과들을 본 연구에서 사용하는 LS/DYNA3D의 수치해석의 결과와 비교 검토함으로써 해석 code와 수치해석 능력을 검증하고자 한다. NSWC의 좌초실험을 위한 좌초모형들은 재화중량 약 40,000톤급 유조선을 1/5로 축소한 5개의 이중저 모델로서 Fig. 2.1에서와 같이 Paul Buck, CONV/PD328, ADH/PB, ADH/PD328, ADH/PD328V이고, 각 모델의 주요부재 치수는 Table 2.1에 요약되어 있다. Fig. 2.2는 NSWC에서 수행한 좌초 실험의 좌초시험기(grounding test machine)를, Fig. 2.3은 각각 Paul Buck 모델 및 그 외 나머지 모델의 실험장치를 보여주고 있다.

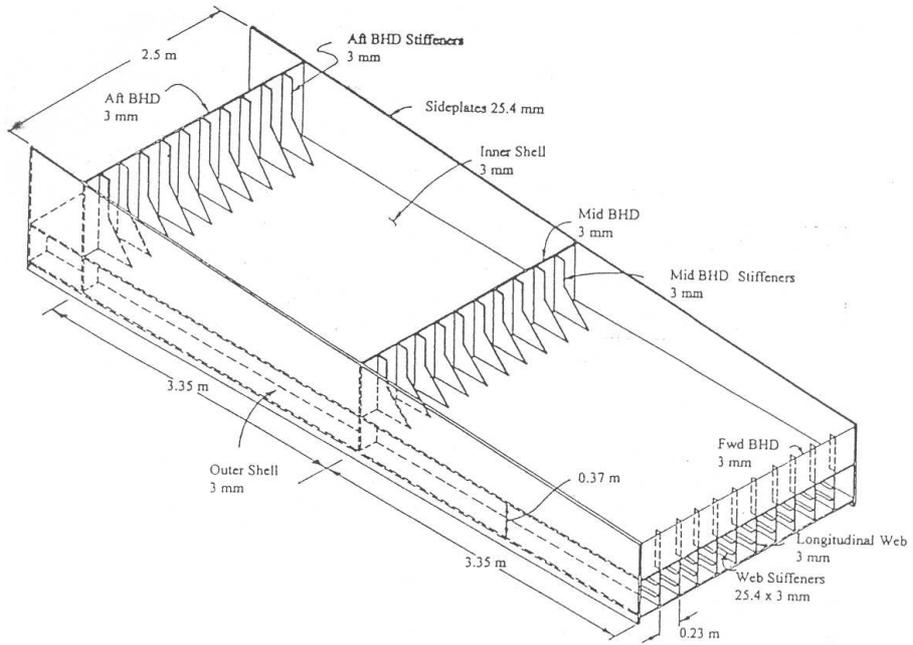


(a) Paul Buck

Fig. 2.1 Characteristics of double hull grounding models (continued)

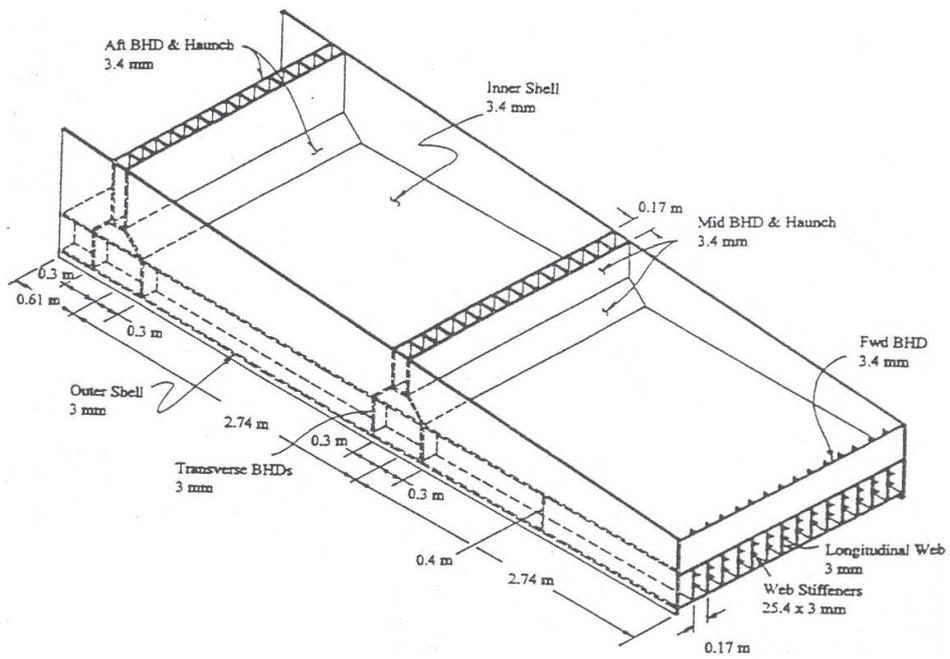


(b) CONV/PD328

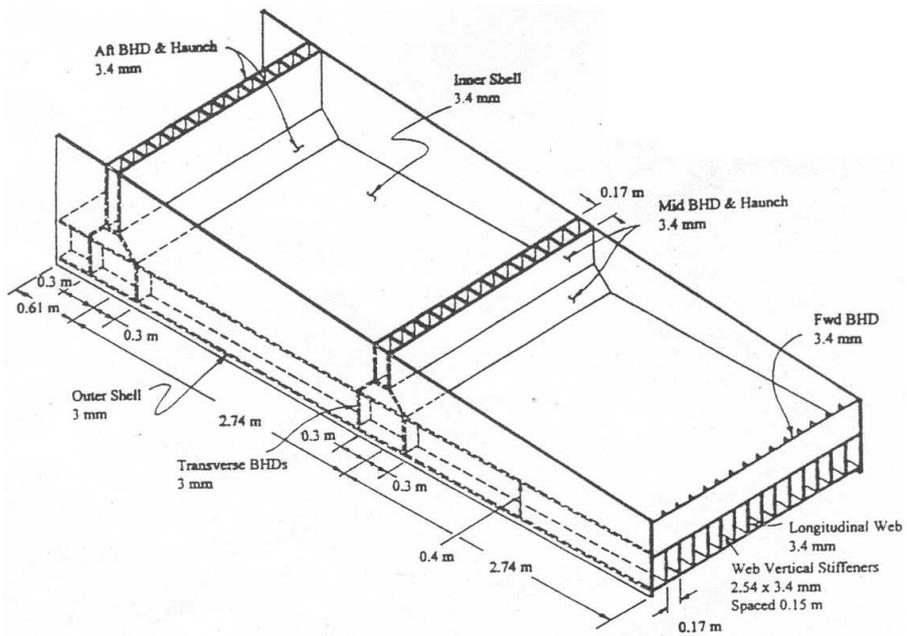


(c) ADH/PB

Fig. 2.1 Characteristics of double hull grounding models (continued)



(d) ADH/PD328



(e) ADH/PD328V

Fig. 2.1 Characteristics of double hull grounding models

Table 2.1 Member dimensions of double hull grounding models(unit : mm)

	Paul Buck	CONV/PD328	ADH/PB	ADH/PD328	ADH/PD328V
Bottom	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Inner bottom	3.0	3.4	3.0	3.4	3.4
Web frame	3.0	3.0	-	3.0	3.4
Girder	3.0	2.3	3.0	3.0	3.4
Longitudinal stiffener	3.0	3.0	-	3.0	3.4
Girder longitudinal stiffener	3.0	-	3.0	-	-
Side shell	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3

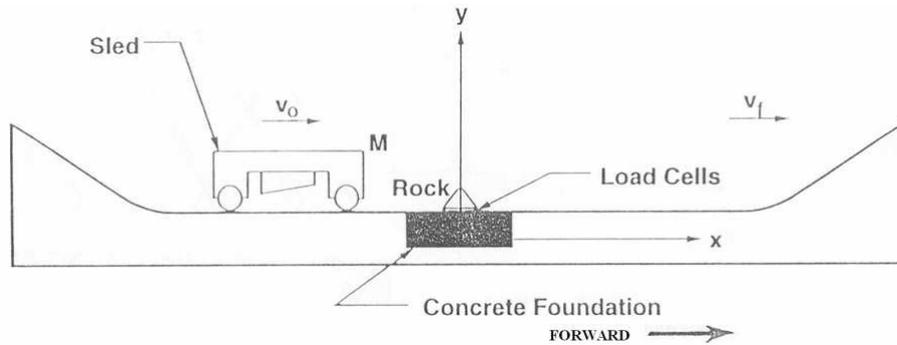
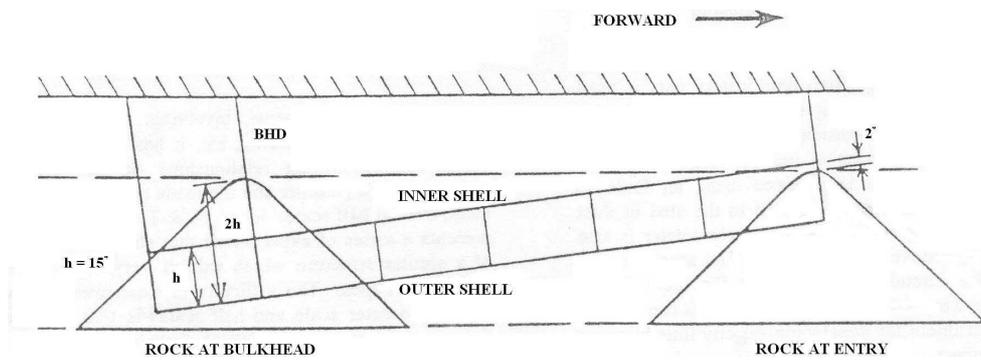
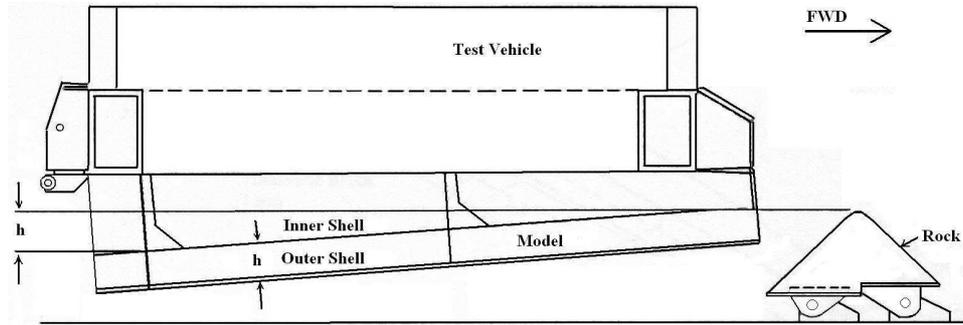


Fig. 2.2 Grounding test machine



(a) Paul Buck model

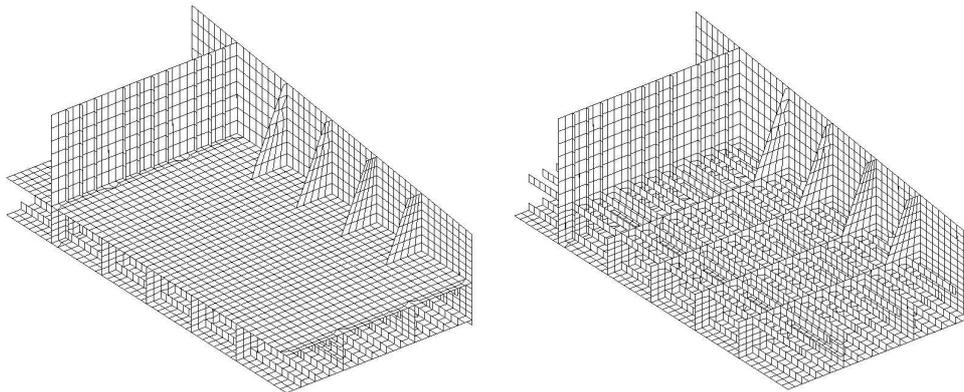
Fig. 2.3 Double hull model installations (continued)



(b) CONV/PD328, ADH/PB, ADH/PD328 and ADH/PD328V models

Fig. 2.3 Double hull model installations

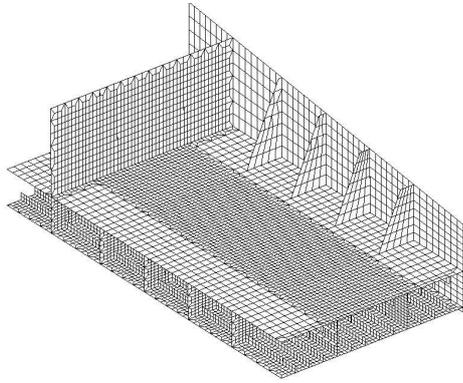
충돌 및 좌초 등의 수치해석 시뮬레이션에서는 구조부재의 파단(fracture) 등이 발생하는 매우 복잡한 역학적 거동이 나타나고 있다. 이러한 특성은 파단이 발생하는 부재의 두께(t)에 대한 유한요소 크기(L)의 비(L/t)와 재료의 파단 변형률(failure strain) 등에 의해 영향을 받는다[19]. 본 연구에서는 수치해석 시뮬레이션을 위하여 상세(fine) 유한요소 모델을 사용하였으며, 실험결과와의 비교를 위하여 상세 모델과 개략적(rough) 유한요소 모델과의 거동을 비교하였으며, 각 경우에 대하여 재료의 파단 변형률과의 관계도 함께 검토하였다. 상세 모델인 경우 두께에 대한 요소 크기 비를 10~15 정도, 개략적 모델인 경우 20~30 정도로 하였다. Figs. 2.4~2.8은 각 선저모델의 개략적 및 상세 유한요소 모델을 보여주고 있으며, 또한 내저판(inner bottom)을 제거하여 이중저의 형상을 보다 자세히 나타내었다.



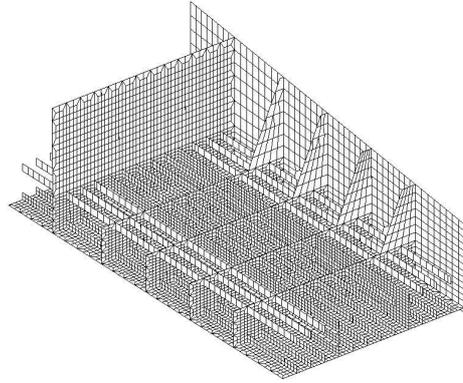
(a) rough model with inner bottom

(b) rough model without inner bottom

Fig. 2.4 Configuration of F.E. double bottom model, Paul Buck (continued)

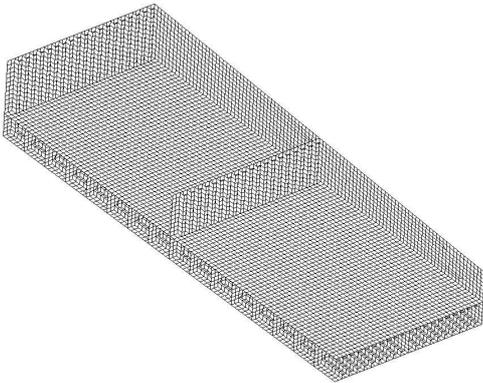


(c) fine model with inner bottom

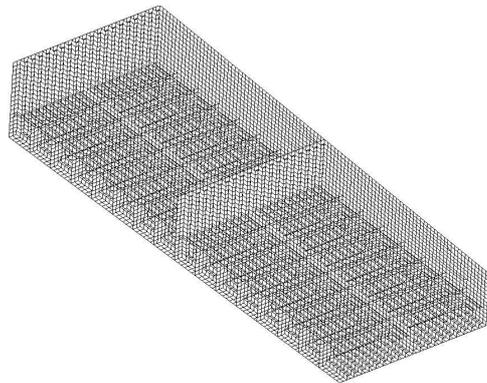


(d) fine model without inner bottom

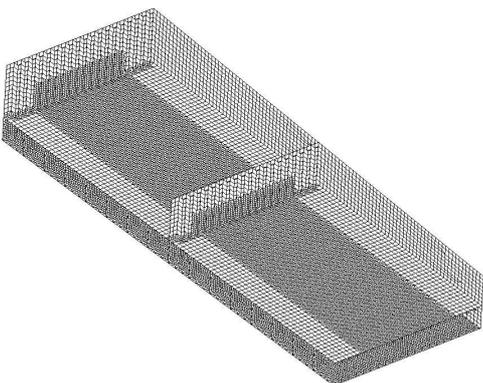
Fig. 2.4 Configuration of F.E. double bottom model, Paul Buck



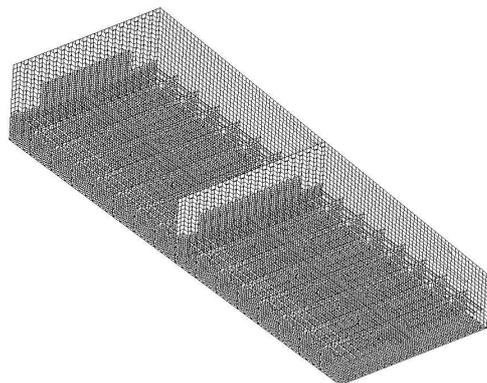
(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom

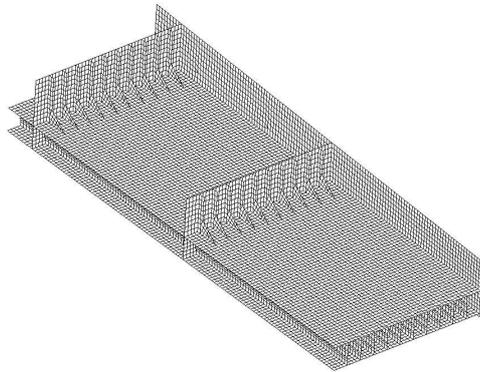


(c) fine model with inner bottom

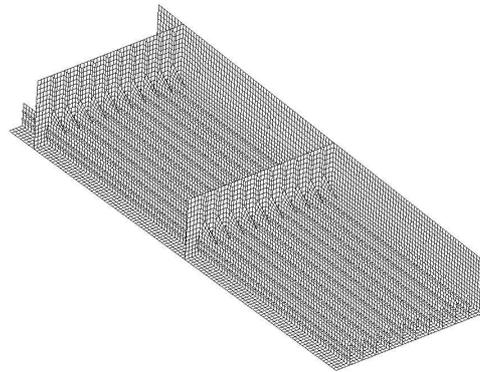


(d) fine model without inner bottom

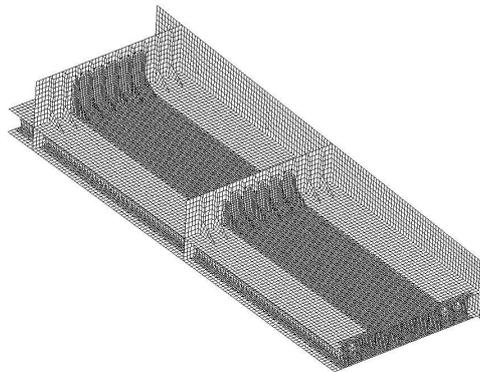
Fig. 2.5 Configuration of F.E. double bottom model, CONV/PD328



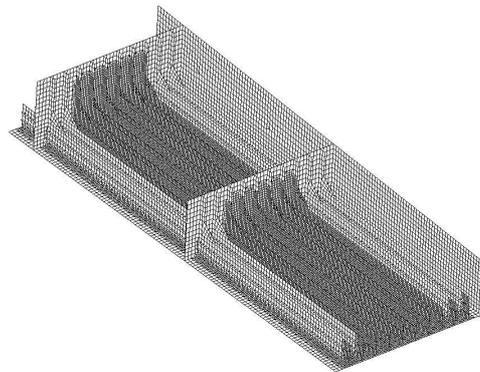
(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom

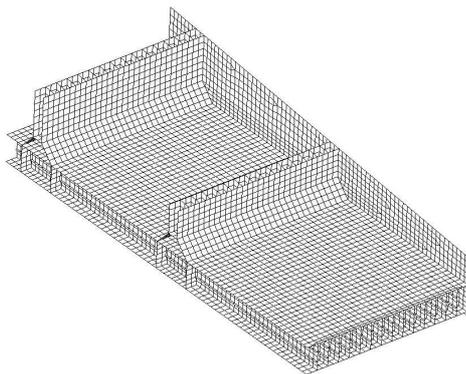


(c) fine model with inner bottom

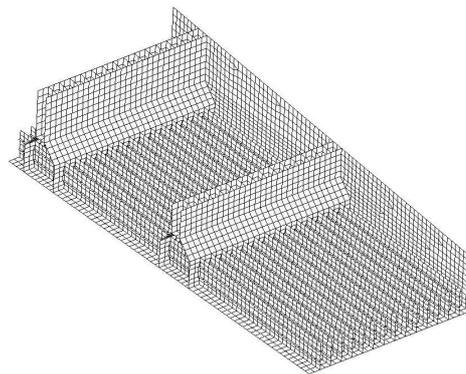


(d) fine model without inner bottom

Fig. 2.6 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PB

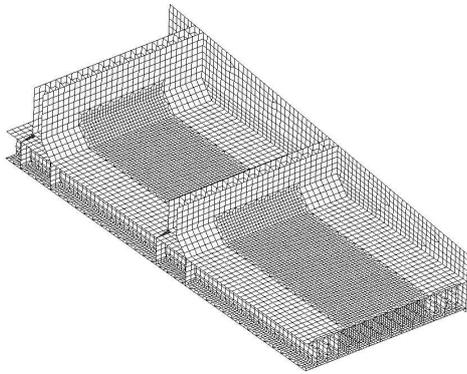


(a) rough model with inner bottom

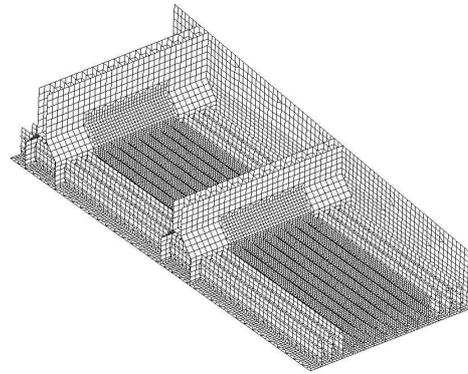


(b) rough model without inner bottom

Fig. 2.7 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PD328 (continued)

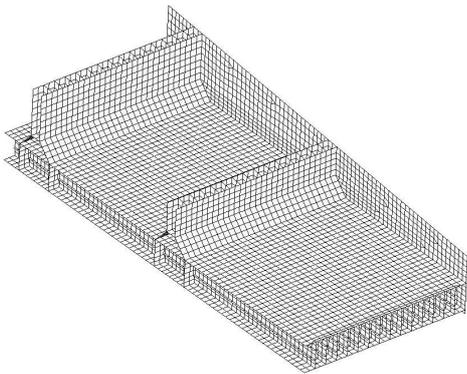


(c) fine model with inner bottom

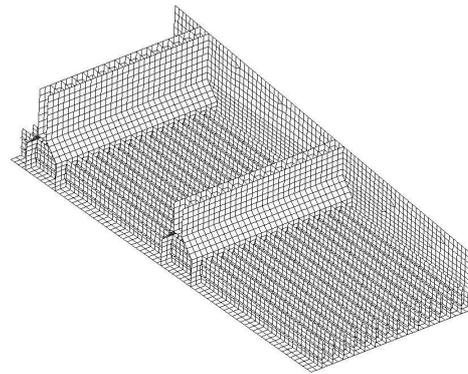


(d) fine model without inner bottom

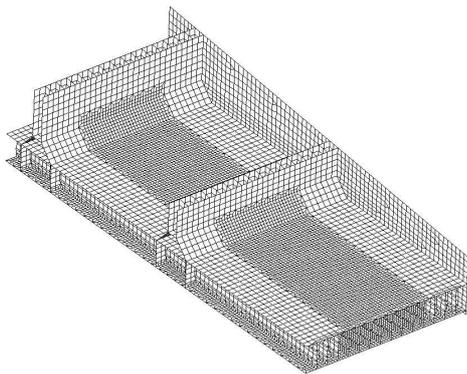
Fig. 2.7 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PD328



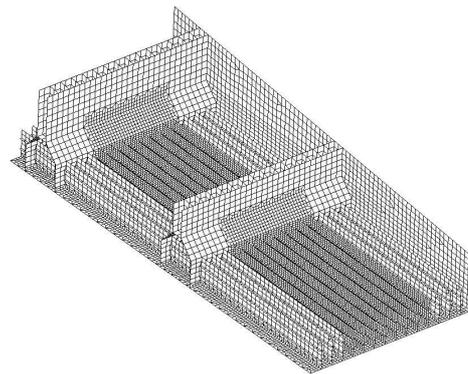
(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom



(c) fine model with inner bottom



(d) fine model without inner bottom

Fig. 2.8 Configuration of F.E. double bottom model, ADH/PD328V

선저모델의 재료는 ASTM 569로써 재료 물성치는 Table 2.2와 같고, 응력-변형률의 관계는 Fig. 2.9와 같다. 또한 Fig. 2.10에서와 같이 Cowper Symond 변형률 의존(strain rate dependent) 재료를 사용하였으며, 과단 변형률은 0.20, 0.25, 0.30 및 0.35의 4가지를 사용하였다. Fig. 2.11은 연강(mild steel)과 고강도강(high tensile steel)의 Cowper Symond 변형률 의존 재료의 항복응력계수(yield stress factor, $1 + (\dot{\epsilon}/C)^q$)의 변형률에 따른 경향을 보여주고 있다. 연강과 고강도강의 동적항복응력계수 C와 q는 각각 40.4 s^{-1} , 5 및 $4,000 \text{ s}^{-1}$, 5이다. 그리고 선저모델에 대해서는 가능한 한 실험상황을 구현하도록 하였다. 자중을 고려하여 수직방향은 구속하지 않고 전진방향으로만 직진하도록 구속하였다. 암초에 부딪칠 때의 초기속도는 Paul Buck과 ADH/PB는 12노트, 나머지 모델은 14노트로 설정하였다.

Table 2.2 Material properties of ASTM 569

Young's modulus	3.00×10^7 ksi
Density	7.43×10^{-4} lbf/in ²
Poisson's ratio	0.3
Yield stress	41.00 ksi
Ultimate stress	50.00 ksi
Failure strain	0.20, 0.25, 0.30, 0.35
Dynamic yield stress constants	$C=40.4 \text{ s}^{-1}$, $q = 5$

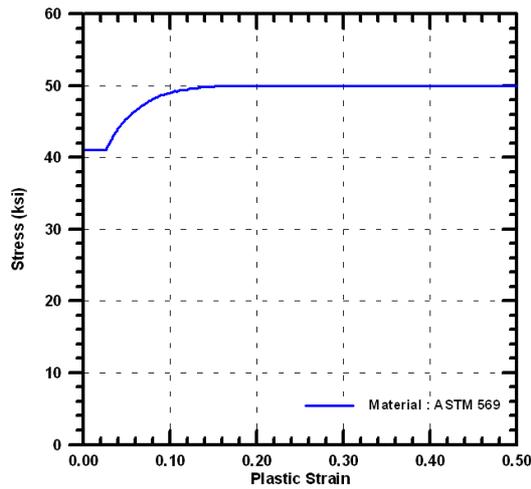


Fig. 2.9 Stress-Strain curve (ASTM 569)

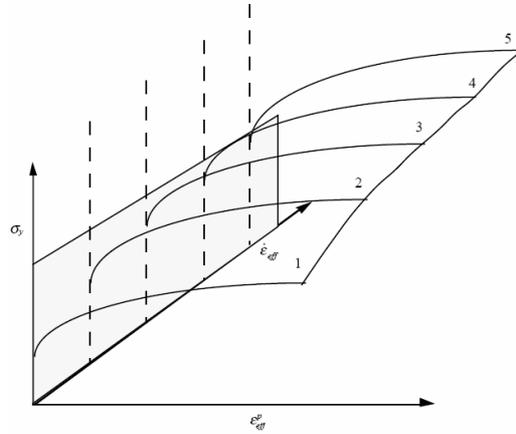


Fig. 2.10 Strain rate effect(Cowper Symond model)

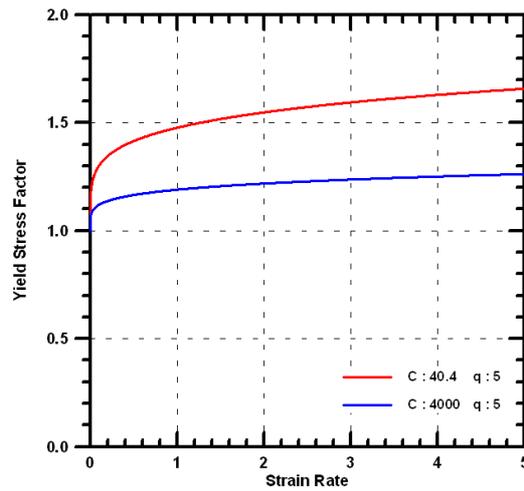
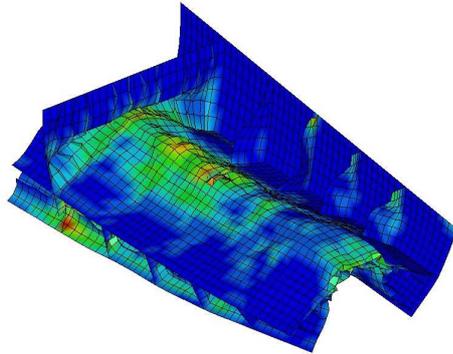
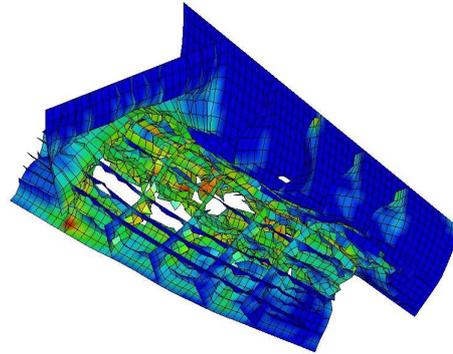


Fig. 2.11 Characteristics of yield stress factor(Cowper Symond model)

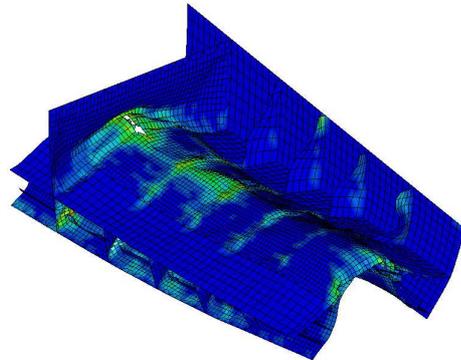
Figs. 2.12~2.16은 각 선저모델의 개략적 및 상세 이중저 모델의 손상상태를 보여주고 있으며, 내저판을 제거하여 이중저 선저내부의 손상상태를 보다 자세히 보여주고자 하였다. 그리고 Figs. 2.17~2.21은 각 선저모델에 대한 모델의 좌초 속도, 수평 및 수직 충격력(horizontal and vertical collision force)의 응답에 대한 실험결과와 상세 및 개략적 모델의 시뮬레이션 결과와를 비교하여 보여주고 있다.



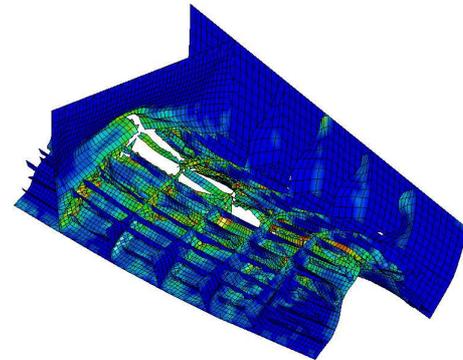
(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom

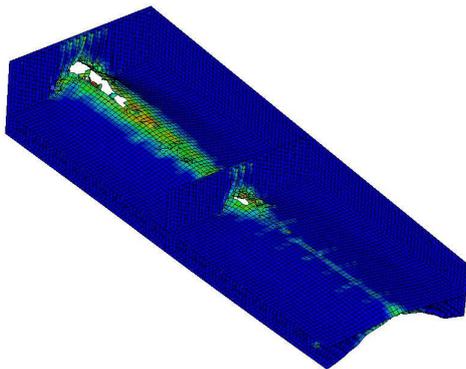


(c) fine model with inner bottom

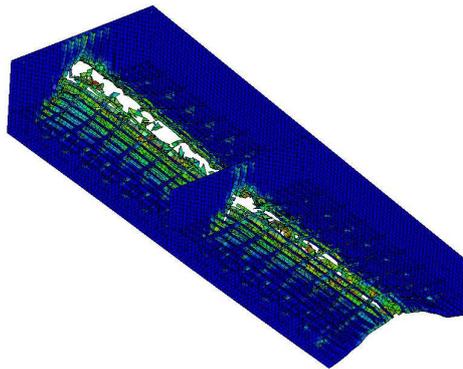


(d) fine model without inner bottom

Fig. 2.12 Damage configuration of double bottom model, Paul Buck

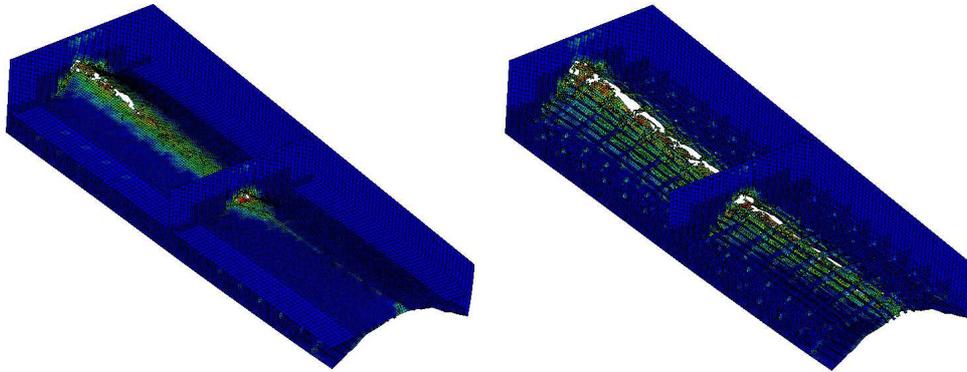


(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom

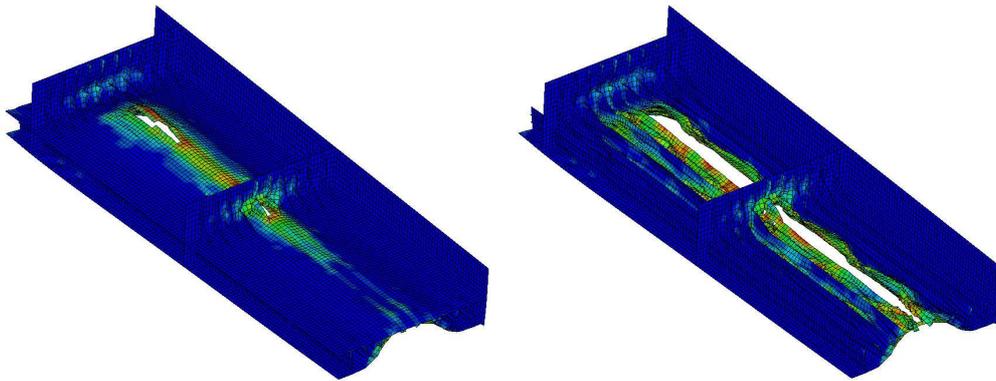
Fig. 2.13 Damage configuration of double bottom model, CONV/PD328 (contd.)



(c) fine model with inner bottom

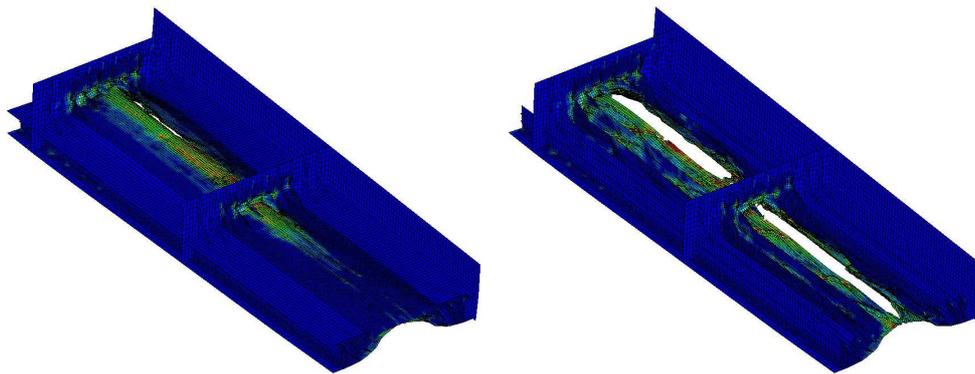
(d) fine model without inner bottom

Fig. 2.13 Damage configuration of double bottom model, CONV/PD328



(a) rough model with inner bottom

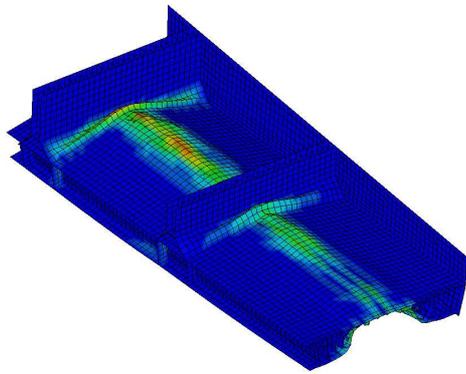
(b) rough model without inner bottom



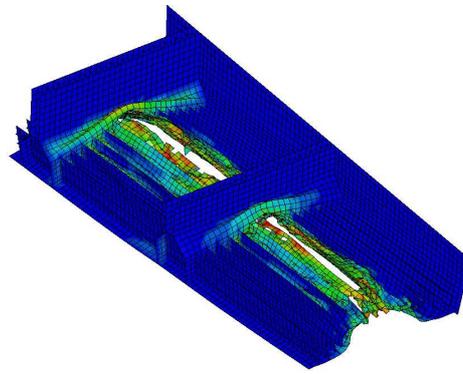
(c) fine model with inner bottom

(d) fine model without inner bottom

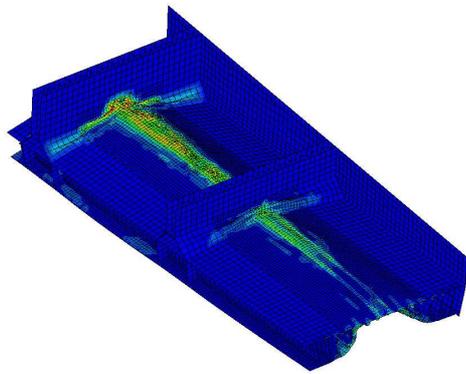
Fig. 2.14 Damage configuration of double bottom model, ADH/PB



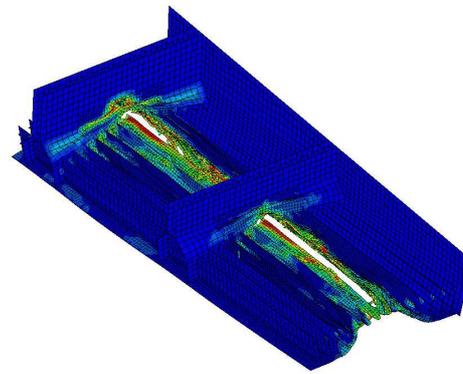
(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom

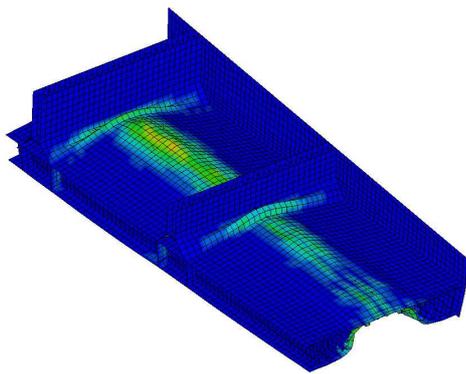


(c) fine model with inner bottom

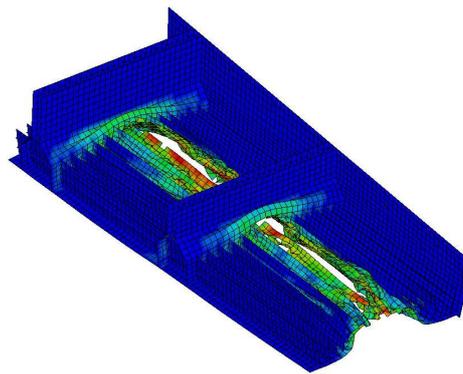


(d) fine model without inner bottom

Fig. 2.15 Damage configuration of double bottom model, ADH/PD328

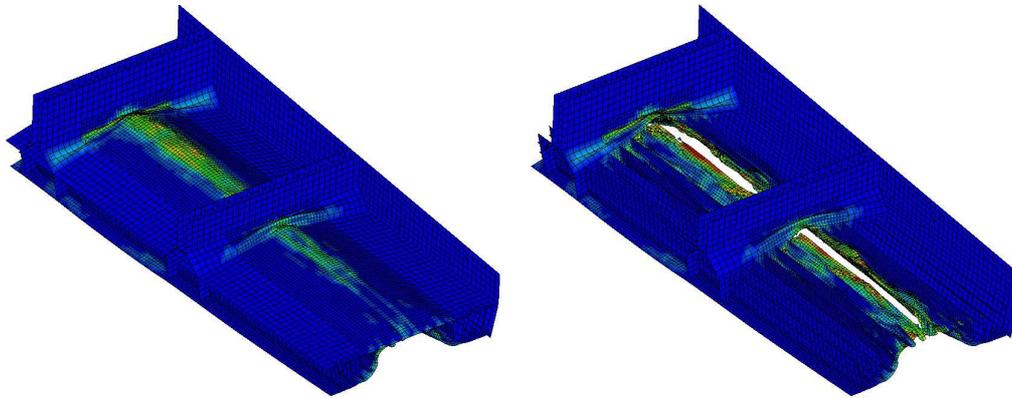


(a) rough model with inner bottom



(b) rough model without inner bottom

Fig. 2.16 Damage configuration of double bottom model, ADH/PD328V (contd.)



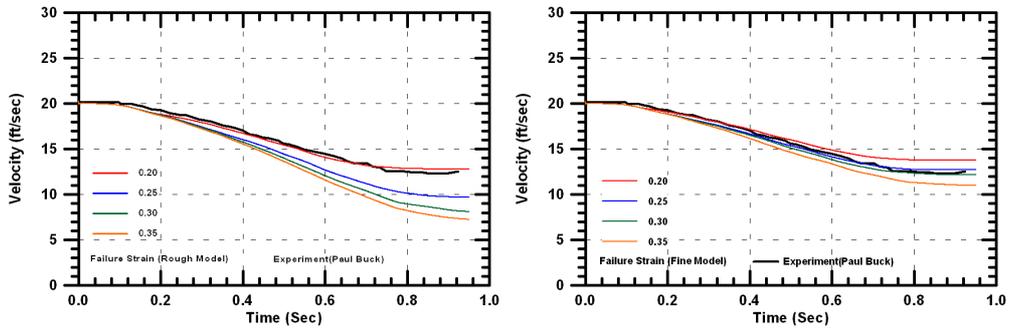
(c) fine model with inner bottom

(d) fine model without inner bottom

Fig. 2.16 Damage configuration of double bottom model, ADH/PD328V

이상의 결과에서 각 구조부재에서의 파단은 부재의 두께에 대한 유한요소 크기의 비와 재료의 파단 변형률 등에 의해 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 같은 파단 변형률을 사용하여도 부재의 두께에 대한 유한요소 크기의 비에 따라 파단 특성은 다르게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 개략적인 유한요소 모델에서는 파단 변형률 0.2에서, 상세 모델에서는 0.3을 사용하였을 때 일반적으로 실험결과와 대체로 잘 일치하였다. 그리고 상세 모델에서는 거의 발생하지 않는 hourglass mode도 개략적 모델에서는 다소 발생하였지만 hourglass option을 고려하여 상당히 감소시켰다.

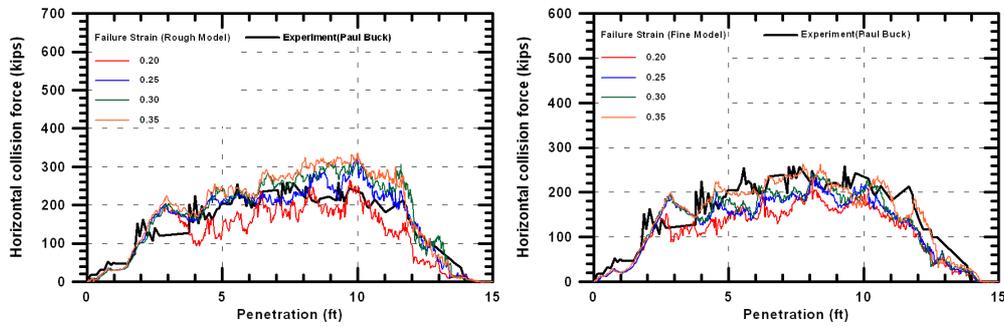
이상의 결과들의 비교 검토를 통하여 본 연구에서 사용한 LS/DYNA3D code는 충분한 정도로서 손상을 추정할 수 있고, 또한 수치 시뮬레이션 해석능력도 본 연구를 수행하기에 적합하다고 사료된다. 본 연구에서 수행할 내좌초 구조해석에서는 가능한 유한요소 모델은 파단 발생 부재의 두께에 대한 유한요소 크기의 비를 10~15 정도의 상세 유한요소 모델과 파단 변형률은 0.3을 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.



(rough model)

(fine model)

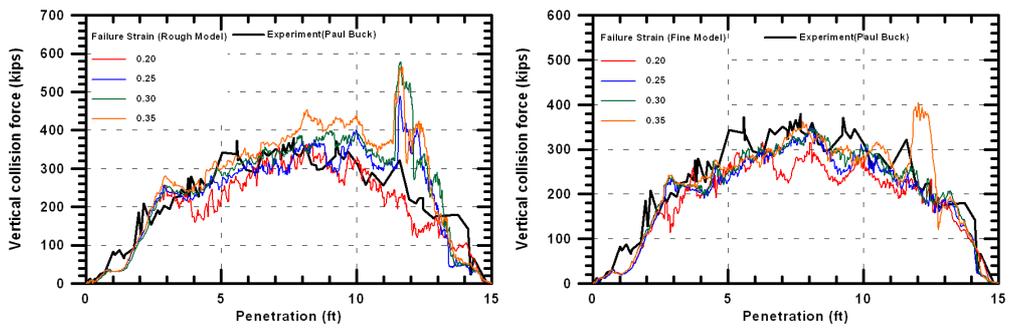
(a) grounding velocity



(rough model)

(fine model)

(b) horizontal collision force

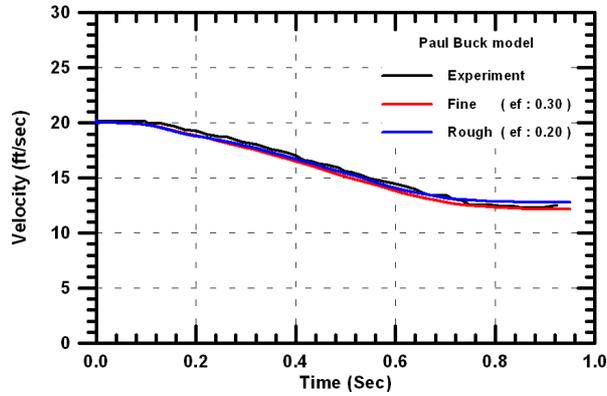


(rough model)

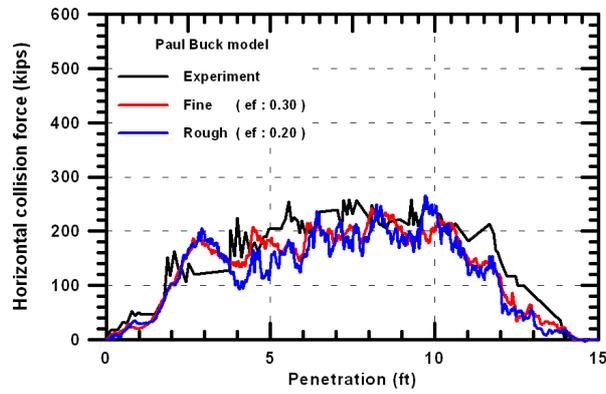
(fine model)

(c) vertical collision force

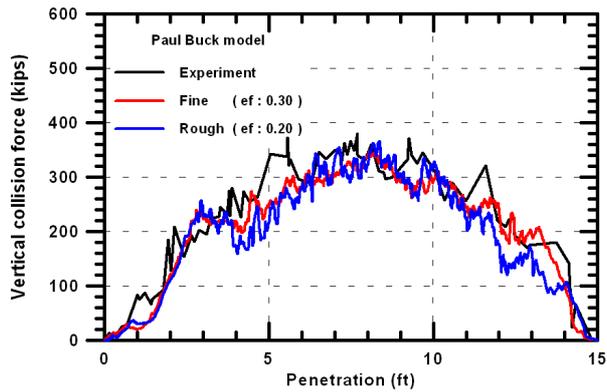
Fig. 2.17 Grounding responses of Paul Buck model (continued)



(a) grounding velocity

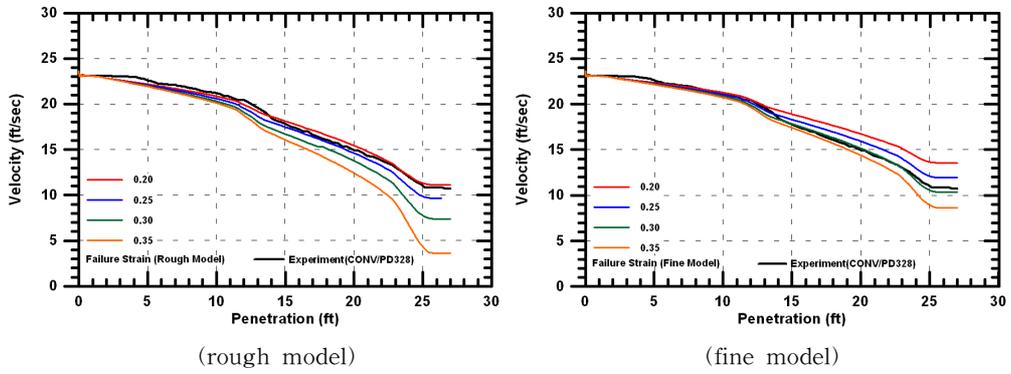


(b) horizontal collision force

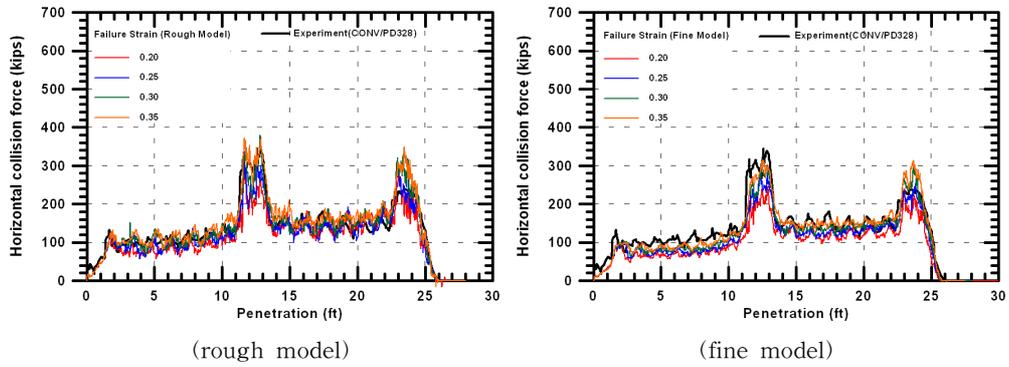


(c) vertical collision force

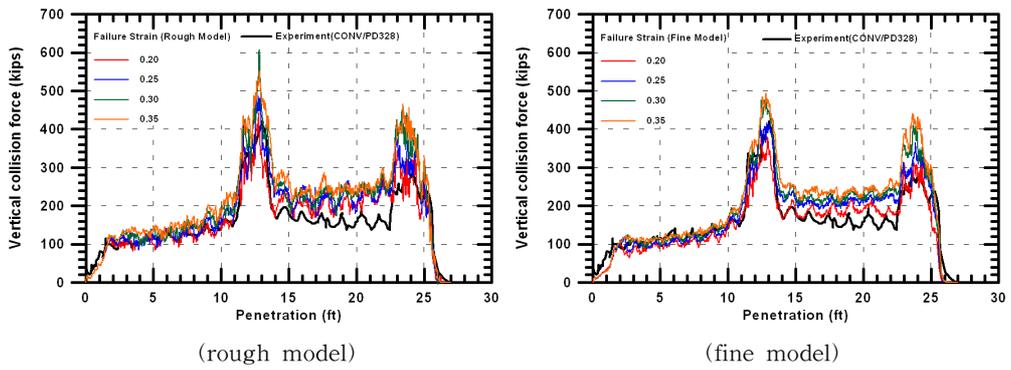
Fig. 2.17 Grounding responses of Paul Buck model



(a) grounding velocity

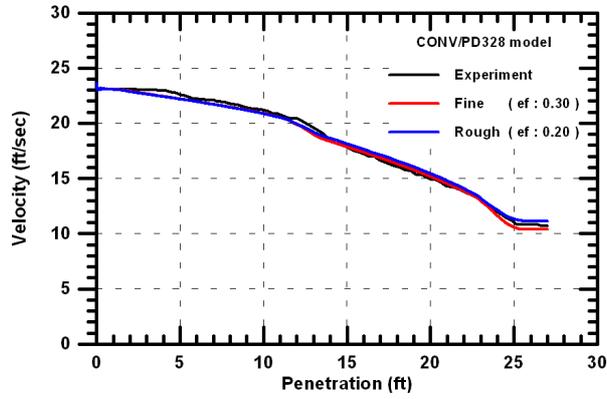


(b) horizontal collision force

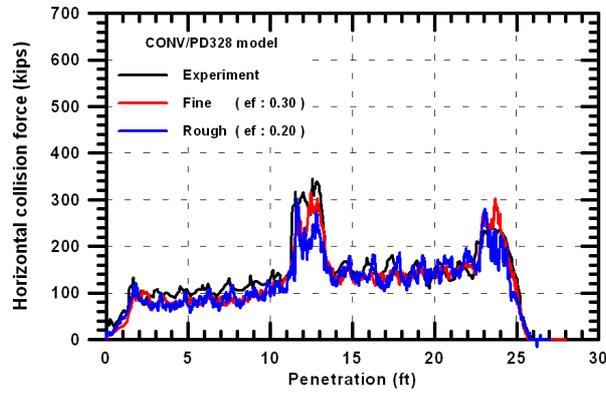


(c) vertical collision force

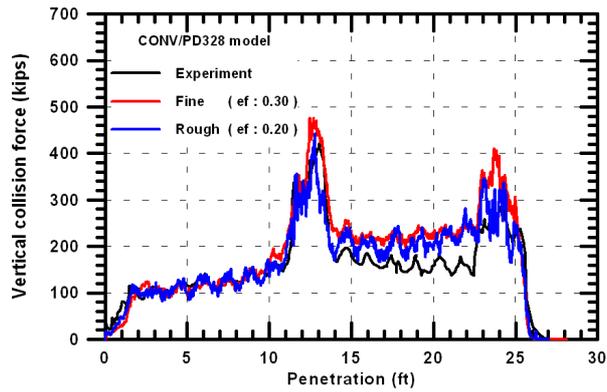
Fig. 2.18 Grounding responses of CONV/PD328 model (continued)



(a) grounding velocity

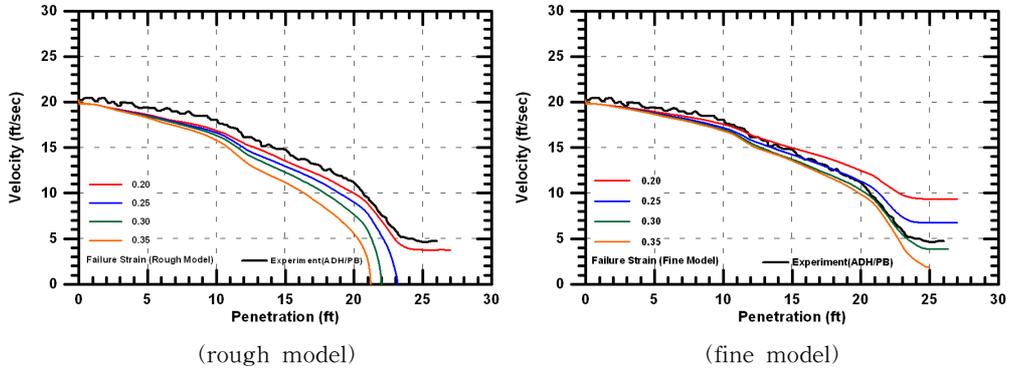


(b) horizontal collision force

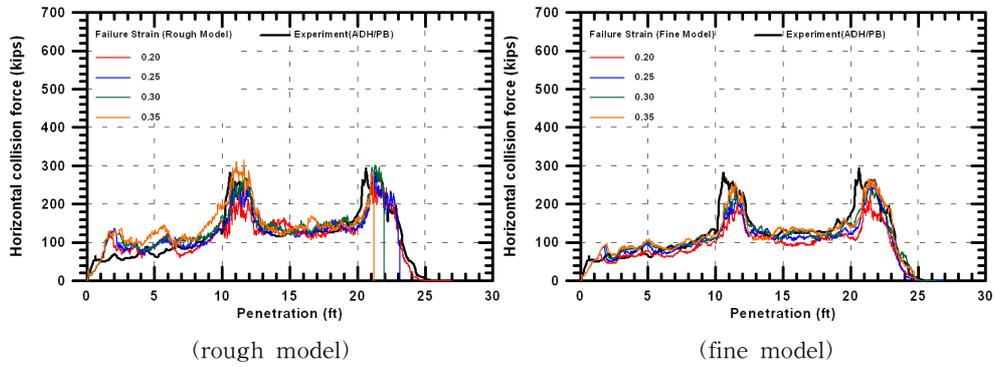


(c) vertical collision force

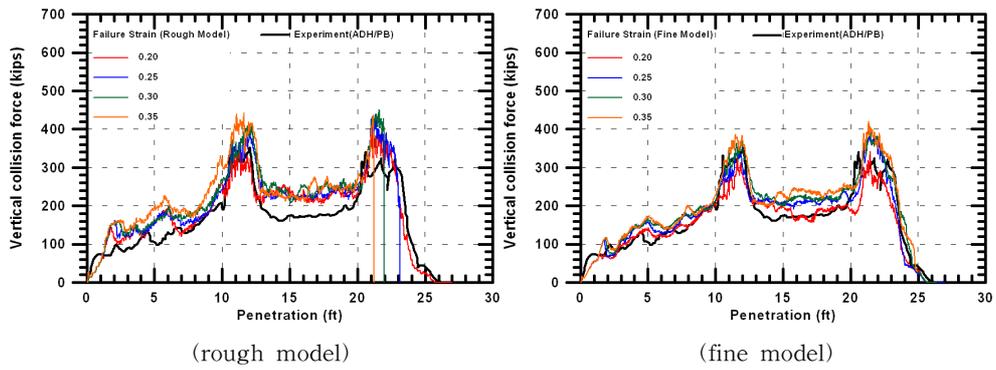
Fig. 2.18 Grounding responses of CONV/PD328 model



(a) grounding velocity

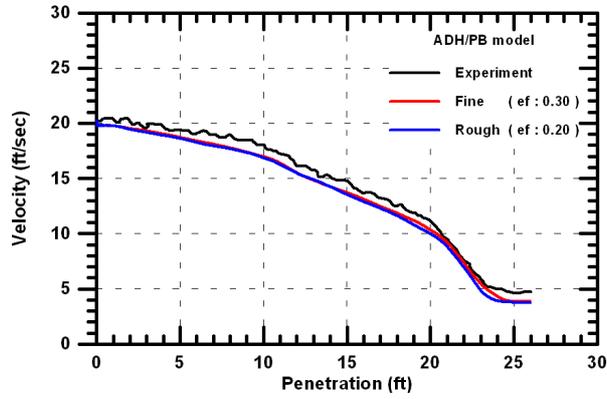


(b) horizontal collision force

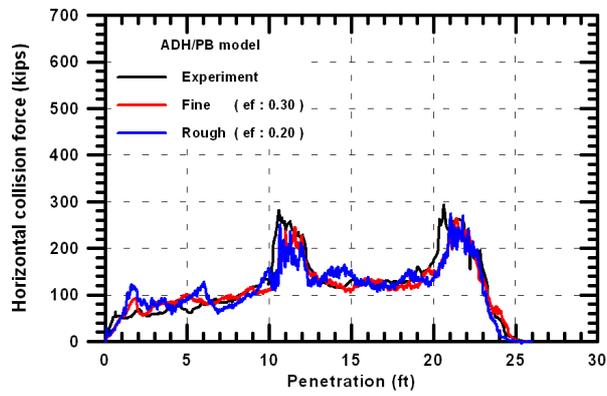


(c) vertical collision force

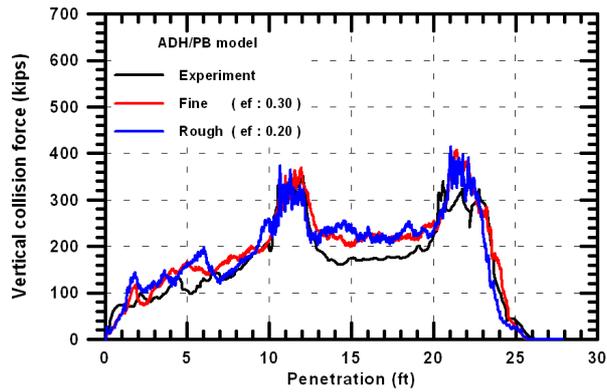
Fig. 2.19 Grounding responses of ADH/PB model (continued)



(a) grounding velocity

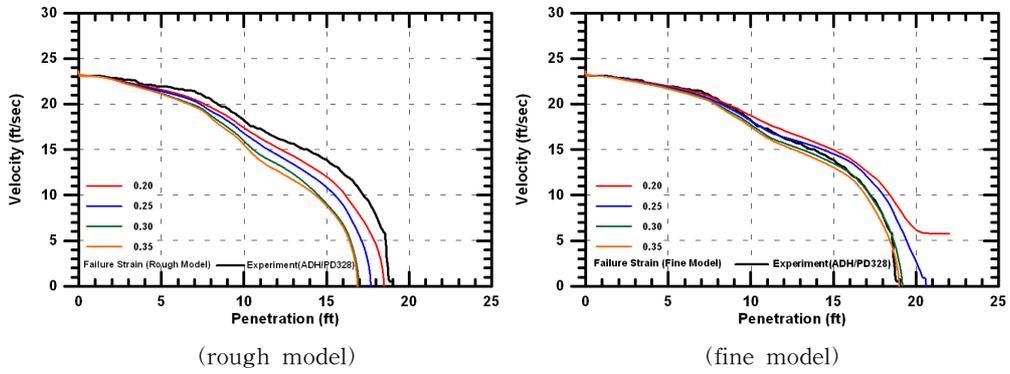


(b) horizontal collision force

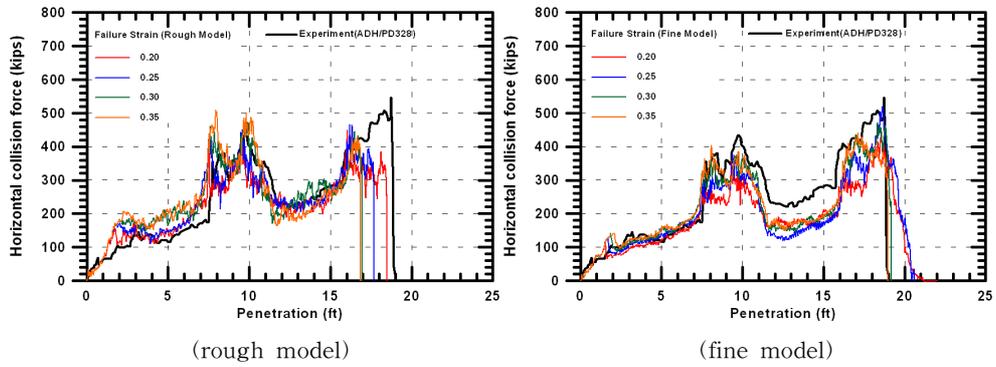


(c) vertical collision force

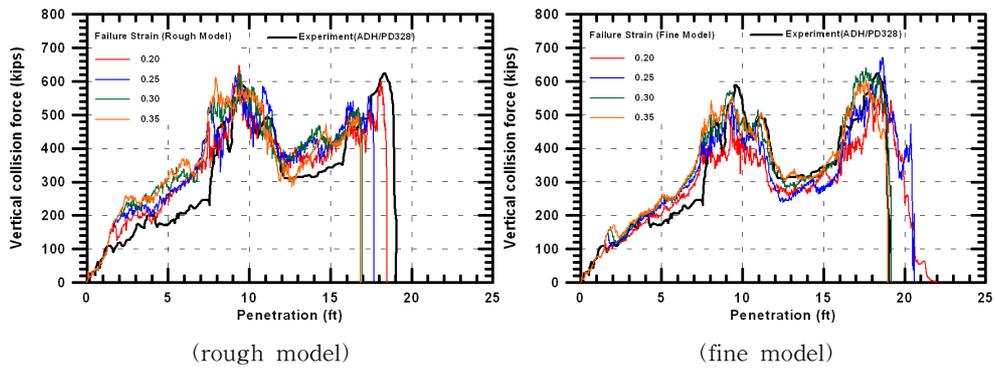
Fig. 2.19 Grounding responses of ADH/PB model



(a) grounding velocity

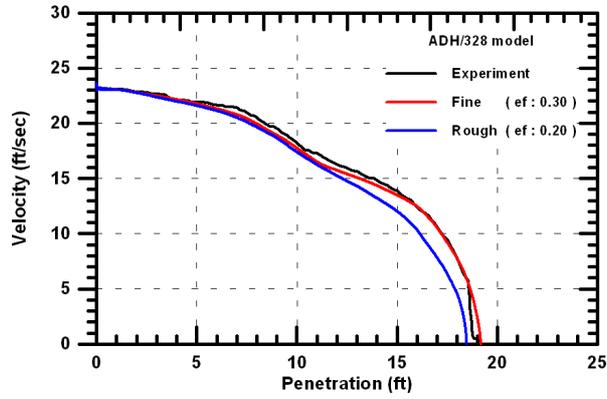


(b) horizontal collision force

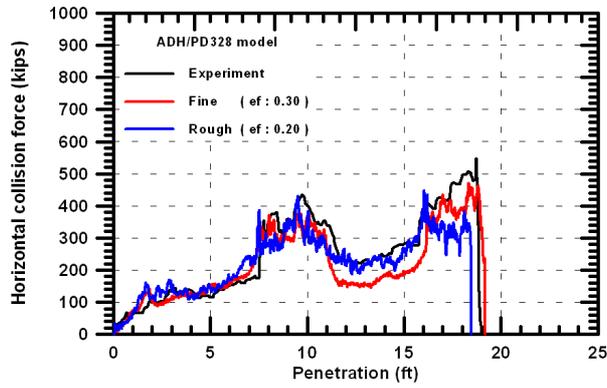


(c) vertical collision force

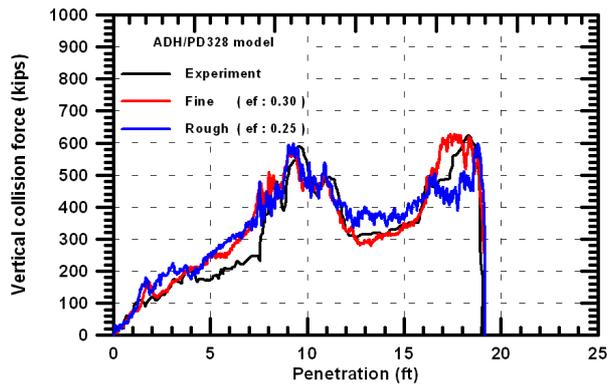
Fig. 2.20 Grounding responses of ADH/PD328 model (continued)



(a) grounding velocity

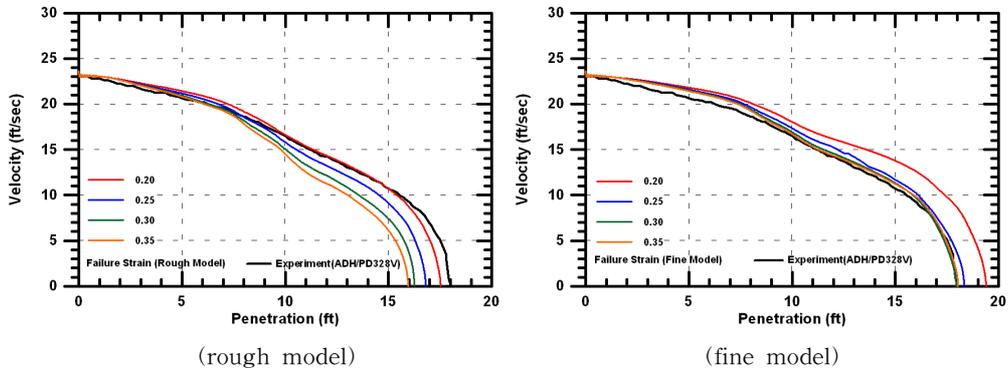


(b) horizontal collision force

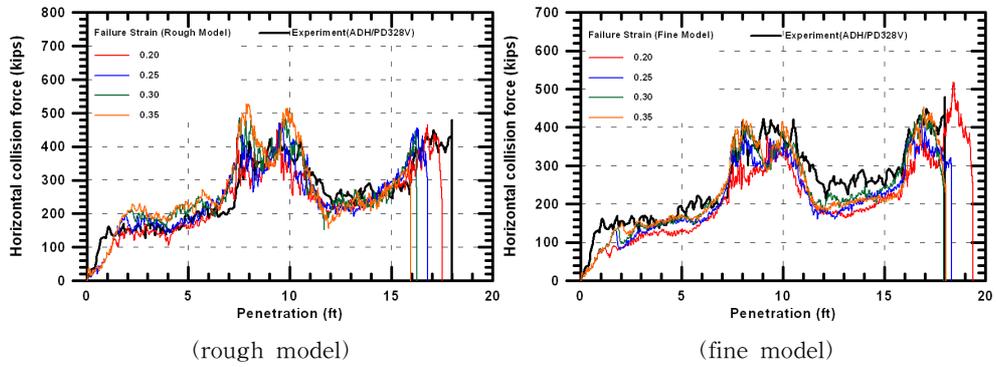


(c) vertical collision force

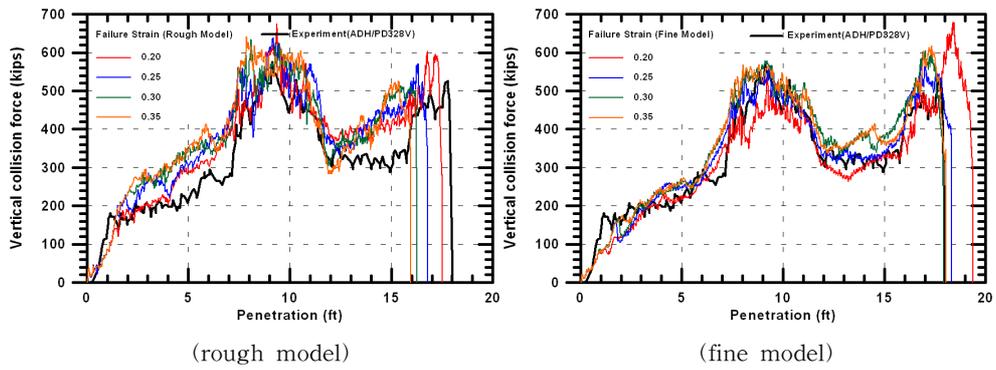
Fig. 2.20 Grounding responses of ADH/PD328 model



(a) grounding velocity

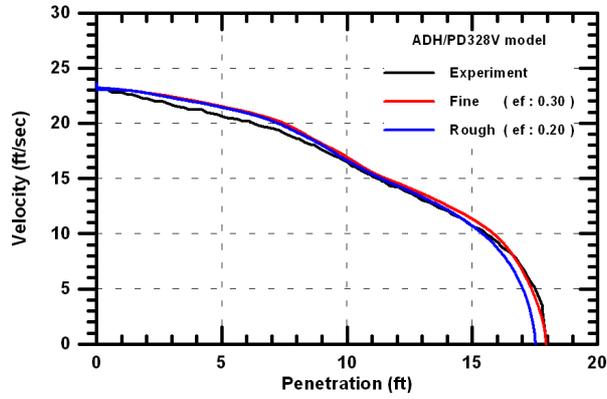


(b) horizontal collision force

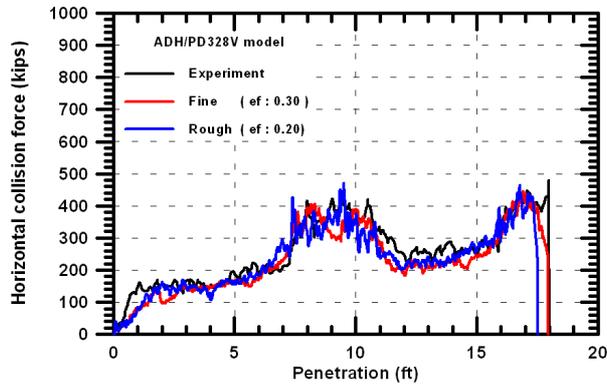


(c) vertical collision force

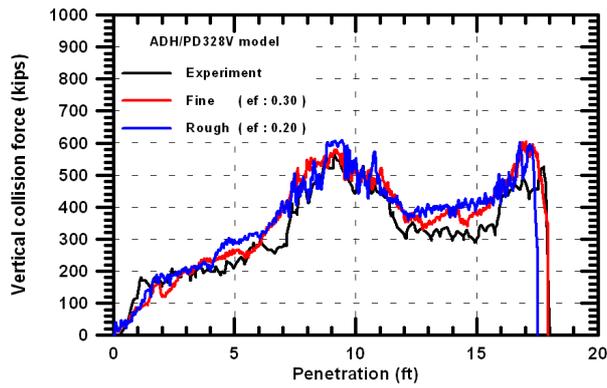
Fig. 2.21 Grounding responses of ADH/PD328V model (continued)



(a) grounding velocity



(b) horizontal collision force

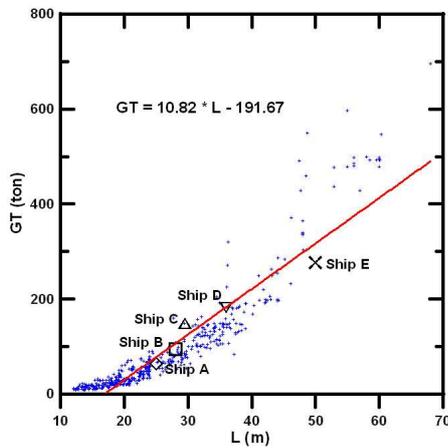


(c) vertical collision force

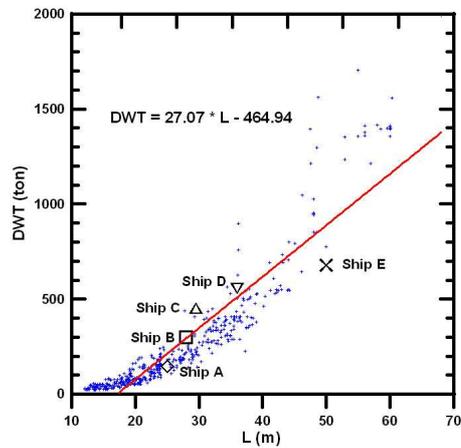
Fig. 2.21 Grounding responses of ADH/PD328V model

3. 내좌초에 우수한 이중저 구조 모델

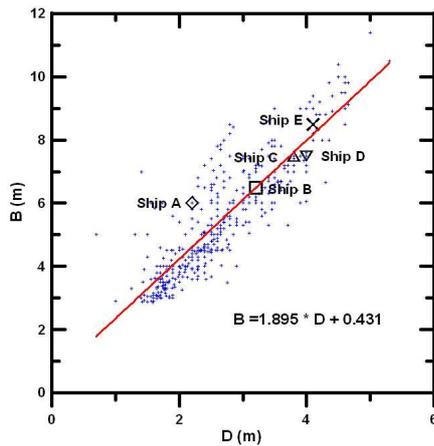
국내 연근해에 운항중인 소형 유조선의 총톤수(G/T), 재화중량(DWT), 길이(L), 선폭(B) 및 깊이(D)에 대한 분포는 Fig. 3.1과 같다. 국내 소형 유조선 이중저 구조에 적합하고 내좌초에 우수한 모델 제안과 톤수별 소형 유조선의 이중저 구조 설치에 따른 손상 시 복원성 검토를 위해 채택한 5척의 단저 및 이중저 구조 유조선의 주요제원은 Table 3.1과 같고, Fig. 3.1의 분포 속에 나타내었다.



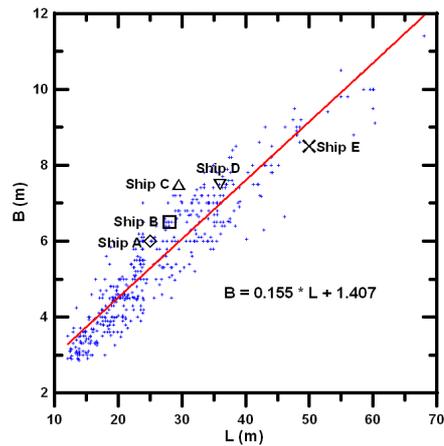
(a) G/T distribution according to length



(b) DWT distribution according to length



(c) Breadth distribution according to depth



(d) Breadth distribution according to length

Fig. 3.1 Distributions of domestic small oil tankers

Table 3.1 Principal dimensions of small oil tanker

	Ship A	Ship B	Ship C	Ship D	Ship E
L.O.A (m)	28.87	31.10	34.32	40.10	54.00
L.B.P (m)	25.00	28.00	29.50	36.00	50.00
B (m)	6.00	6.50	7.50	7.50	8.50
D (m)	2.20	3.20	3.80	4.00	4.10
draft (m)	1.87	2.80	3.50	3.40	3.70
GT (ton)	64.00	95.00	149.00	183.00	277.00
DWT (ton)	144.85	298.78	425.80	558.16	679.65
Bottom type	single	single	single	single	double

이와 같은 국내 소형 단저 및 이중저 구조 유조선과 앞 장의 좌초실험 모델을 참조하여 Fig. 3.2와 같은 재화중량 500톤급 이상화한 소형 이중저 구조 유조선의 좌현 2개의 화물창에 대하여 5가지 형태의 이중저 구조 모델을 구축하였다. 5가지 형태의 이중저 구조 모델이 비슷한 중량을 갖도록 주요치수를 결정하였으며, Table 3.2에 요약하였다.

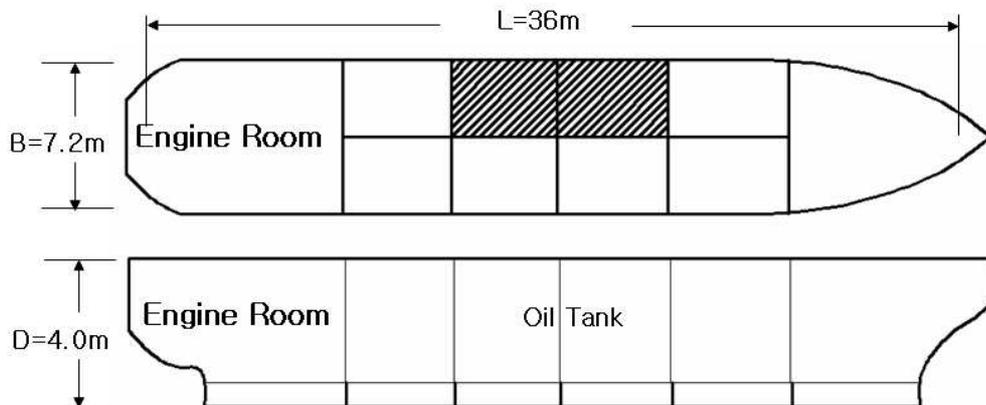


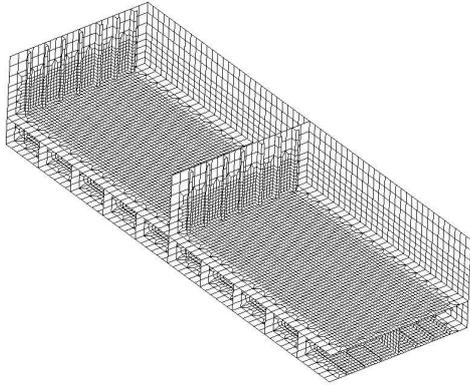
Fig. 3.2 Idealized D.W.T. 500 ton small oil tanker

Table 3.2 Dimensions of double bottom model of small oil tanker(unit : mm)

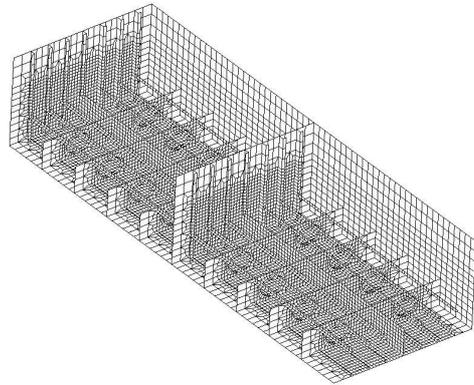
	Small Oil Tanker	Paul Buck	CONV/PD328	ADH/PB	ADH/PD328
Bottom	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Bottom stiffener	65×65×6	105×10	65×65×6	-	-
Inner bottom	6	6	6	6	6
Inner bottom stiffener	65×65×6	105×10	65×65×6	-	-
BHD	9.5	6	7.5	8.5	6.5
BHD stiffener	125×75×10	150×12	75×75×12	-	-
BHD bracket	-	-	-	9.5	-
Girder	9	6	7	7.5	6
Girder Longitudinal stiffener	-	-	-	55×6	55×6
Floor	9.5	6	7.5	-	-
Hole Longitudinal stiffener	55×6	55×6	55×6	55×6	55×6

이상화 이중저 구조 선저모델에 파단이 발생하는 부위는 Fig. 3.3에서와 같이 부재의 두께에 대한 유한요소 크기 비를 10~15 정도의 상세 유한요소로 모델링하였다. 소형 유조선의 이중저 구조의 시공과 유지관리를 위해 이중저 구조의 늑골(frame) 및 거어더(girder)에는 적어도 400×600mm 정도 크기의 홀이 필요하다. 해양오염방지법 시행규칙 제12조 3항 별표6의 18호의 재화중량 600톤 미만의 경우 이중저 높이가 0.65m 이상은 되어야 한다는 규정은 이러한 홀의 최소크기를 고려하였다고 사료된다. 재화중량 500톤 미만의 국내 소형 유조선의 이중저 최소높이로서도 0.65m가 적당하다고 사료된다.

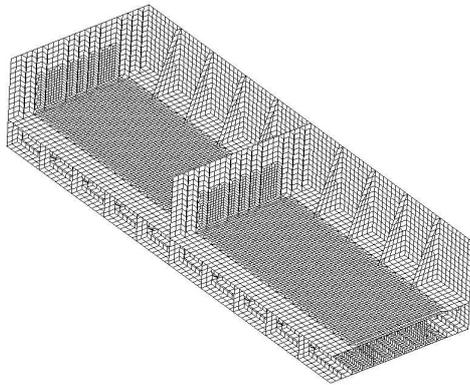
앞의 2장의 좌초모형 실험모델들에서와 같이 좌초 시뮬레이션을 Fig. 3.4와 같은 실험장치로 수행하였다. Fig. 3.3에서 볼 수 있듯이 각각의 이상화 이중저 구조는 암초(rock)와 부딪치는 폭 방향의 위치에 따라 종방향 주요부재의 내좌초의 저항능력이 달라질 수 있으므로 Fig. 3.5에서와 같이 폭 방향의 중앙과 중앙에서 벗어난 위치에서의 좌초 시나리오를 고려하였다. 이상화 이중저 모델이 암초에 부딪치는 선저모델의 초기속도는 15노트로 수행하였으며, 이상화된 선저모델의 재료는 일반 유조선에 사용되고 있는 연강을 사용하였고 Table 3.3에 요약되어 있다. 그리고 응력-변형률 관계는 Fig. 3.6에 나타내었고, 파단 변형률은 0.3을 사용하였다.



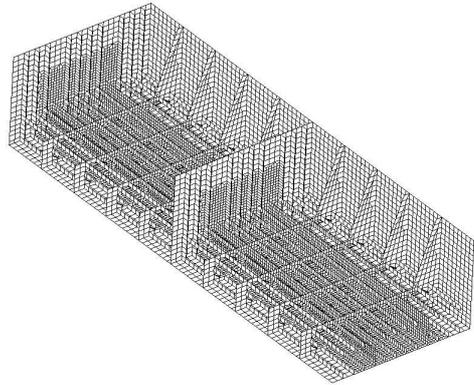
(a1) Small Oil Tanker with inner bottom



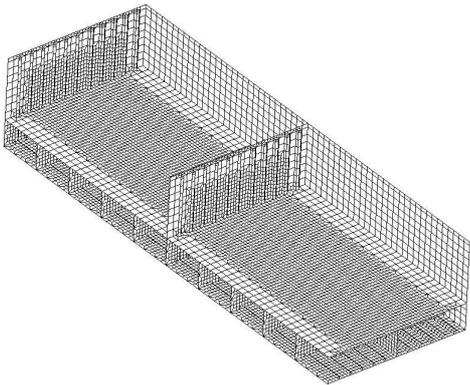
(a2) Small Oil Tanker without inner bottom



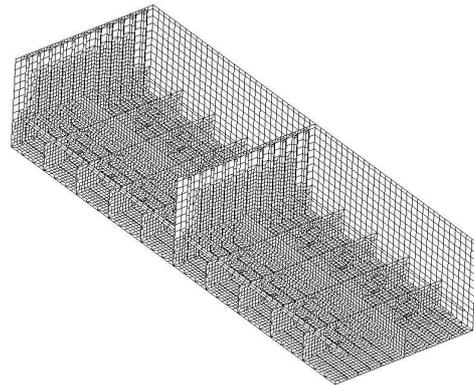
(b1) Paul Buck with inner bottom



(b2) Paul Buck without inner bottom

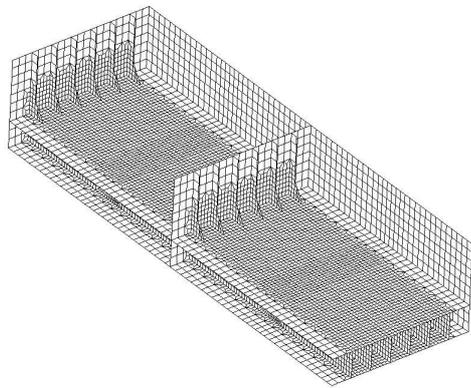


(c1) CONV/PD328 with inner bottom

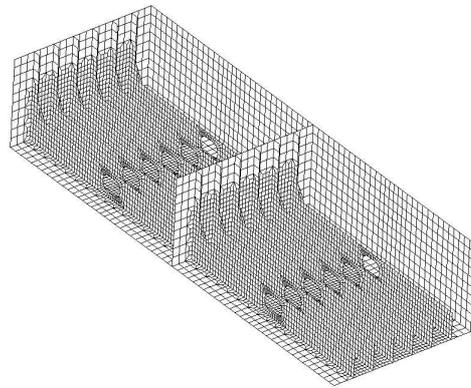


(c2) CONV/PD328 without inner bottom

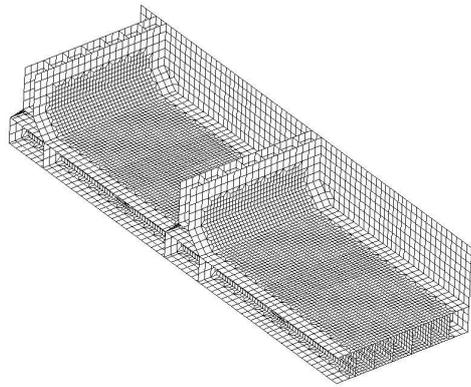
Fig. 3.3 Configuration of F.E. idealized double bottom models (continued)



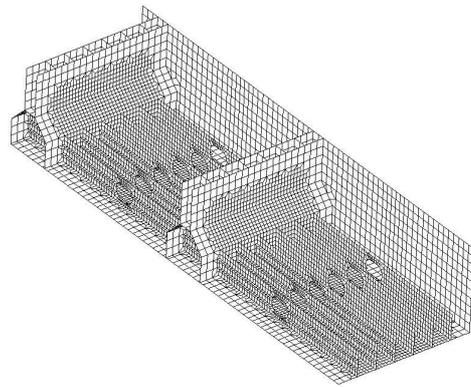
(d1) ADH/PB with inner bottom



(d2) ADH/PB without inner bottom



(e1) ADH/PD328 with inner bottom



(e2) ADH/PD328 without inner bottom

Fig. 3.3 Configuration of F.E. idealized double bottom models

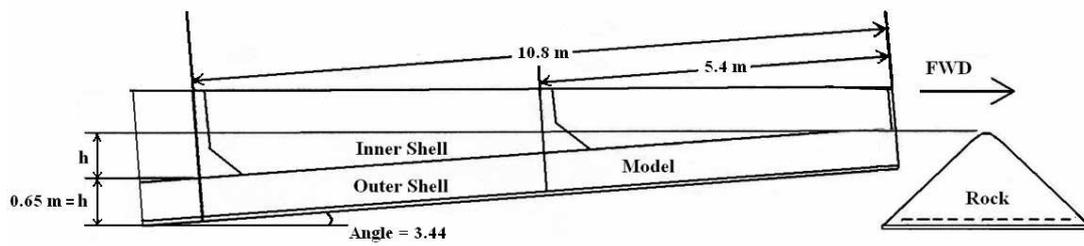


Fig. 3.4 Double hull model installations

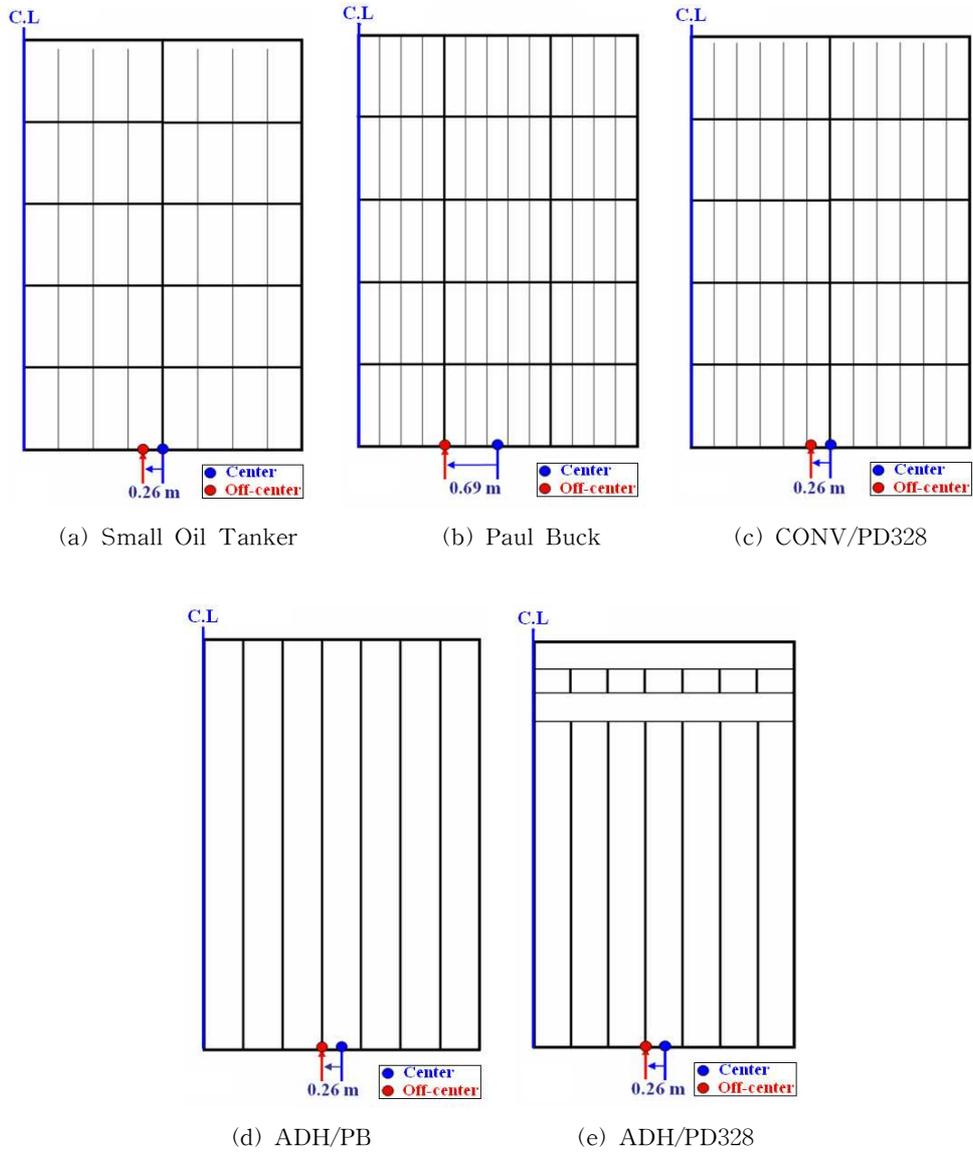


Fig. 3.5 Location of rock along the breadth

Table 3.3 Material properties of mild steel

Young's modulus	206 GPa
Density	$7.787 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Poisson's ratio	0.30
Yield stress	234 MPa
Ultimate stress	455 MPa
Failure strain	0.30
Dynamic yield stress constants	$C=40.4 \text{ s}^{-1}, q = 5$

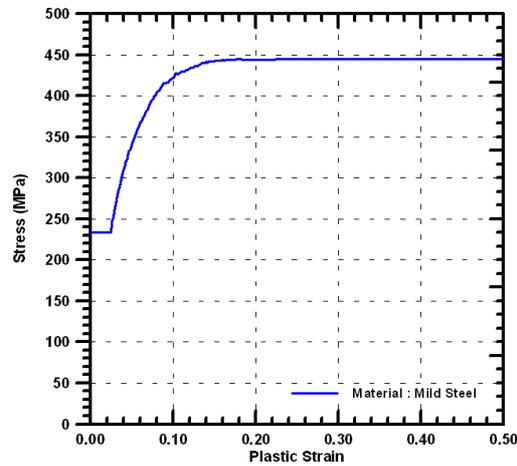
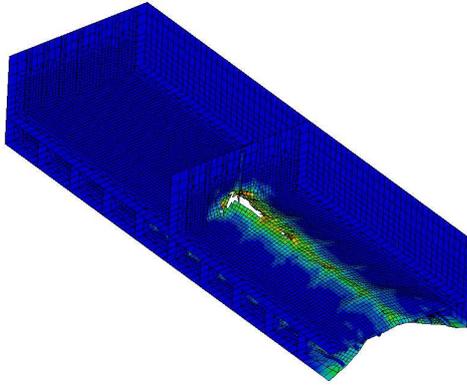
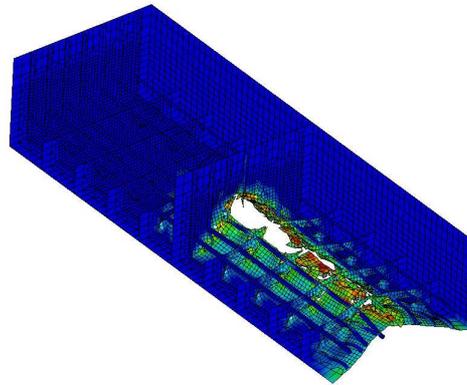


Fig. 3.6 Stress-Strain curve (mild steel)

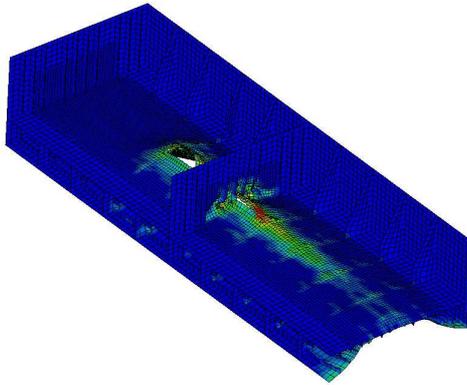
Figs. 3.7~3.8은 각각 압초가 이상화 이중저 모델의 중앙과 중앙에서 벗어난 위치에 부딪혔을 때의 손상상태를 보여주고 있으며, 내저판을 제거하여 이중저 선저 내부의 손상상태를 보다 자세히 보여주고 있다. 그리고 Fig. 3.9~3.10은 각각 압초가 이상화 이중저 모델의 중앙과 중앙에서 벗어난 위치에 부딪혔을 때의 각 선저모델에 대한 모델의 좌초속도, 수평 및 수직 충격력의 응답과 전체 및 부재별 내부에너지(internal energy) 응답에 대한 결과를 비교해 보여주고 있다. Table 3.4는 내저판에서의 압초의 진행거리(penetration), 파단발생 위치 및 파공 길이 등을 요약하여 보여주고 있다. 그리고 Table 3.5는 Fig. 3.10의 각각 이상화 이중저 구조모델의 전체 및 주요부재별 내부에너지의 응답 결과를 시뮬레이션 종료시간 2.0초에서 비교검토를 위해 압초가 이상화 이중저 모델의 중앙과 중앙에서 벗어난 위치에 부딪혔을 경우에 대하여 요약하였다.



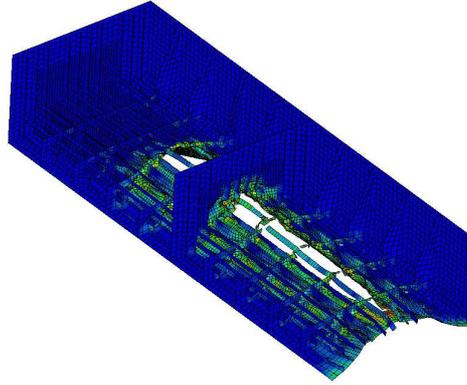
(a1) Small Oil Tanker with inner bottom



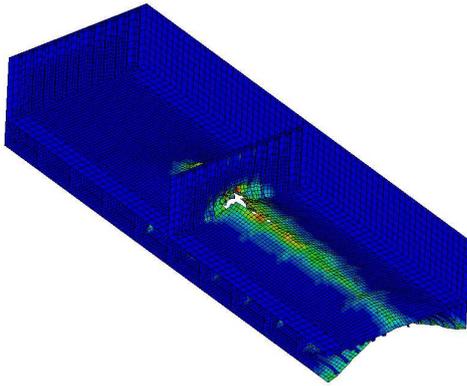
(a2) Small Oil Tanker without inner bottom



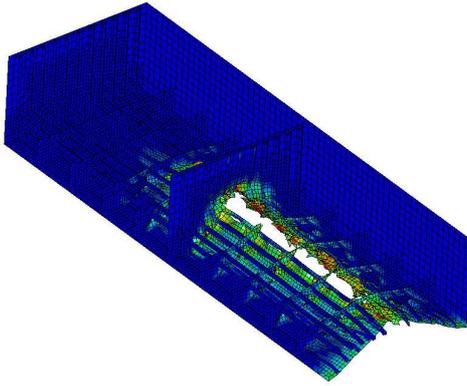
(b1) Paul Buck with inner bottom



(b2) Paul Buck without inner bottom



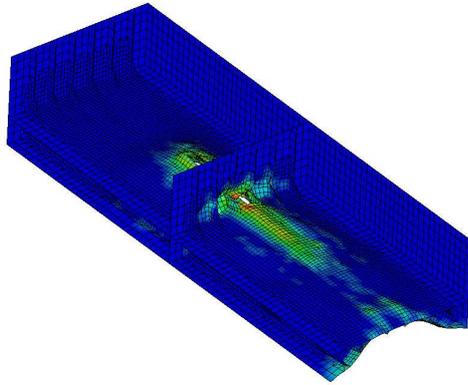
(c1) CONV/PD328 with inner bottom



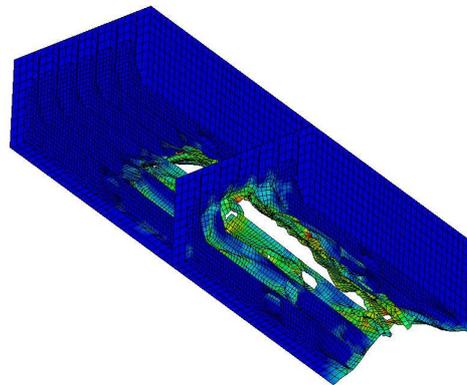
(c2) CONV/PD328 without inner bottom

Fig. 3.7 Damage configuration of idealized double bottom models(center)

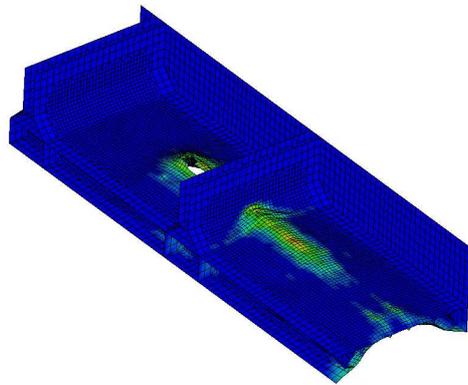
(contd.)



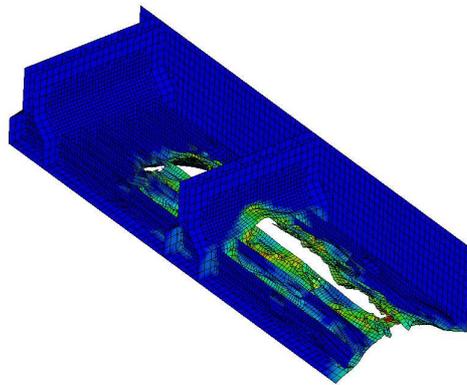
(d1) ADH/PB with inner bottom



(d2) ADH/PB without inner bottom

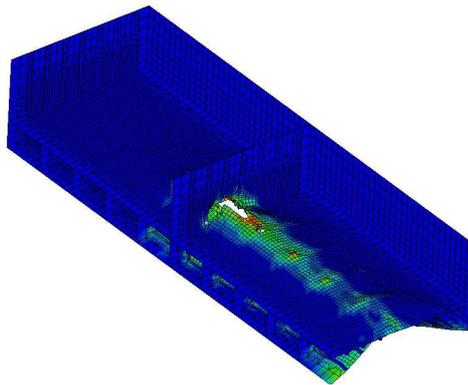


(e1) ADH/PD328 with inner bottom

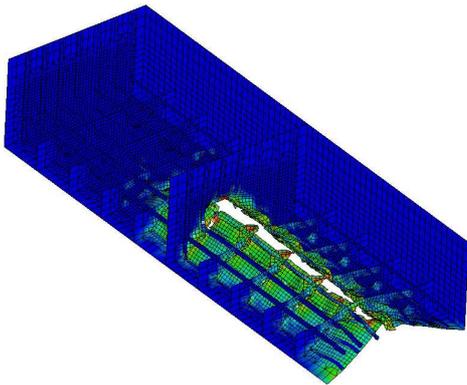


(e2) ADH/PD328 without inner bottom

Fig. 3.7 Damage configuration of idealized double bottom models(center)



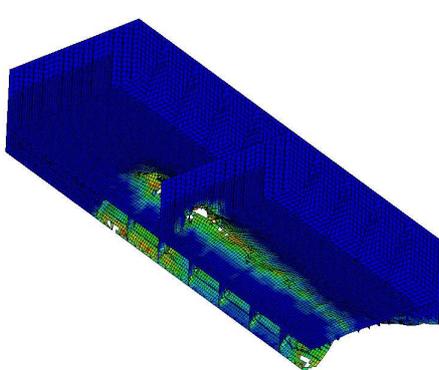
(a1) Small Oil Tanker with inner bottom



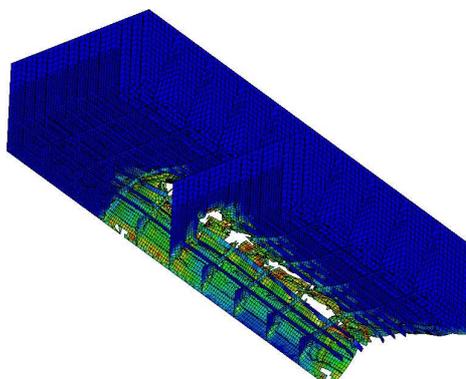
(a2) Small Oil Tanker without inner bottom

Fig. 3.8 Damage configuration of idealized double bottom models(off-center)

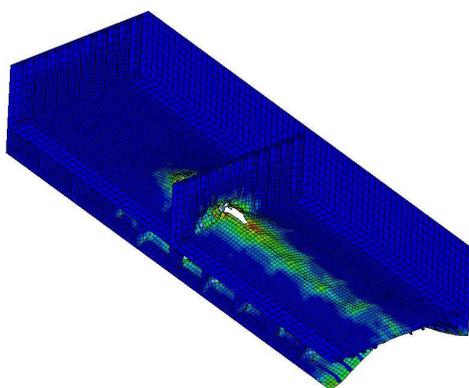
(contd.)



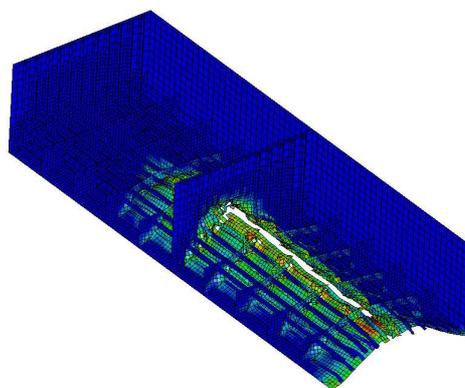
(b1) Paul Buck with inner bottom



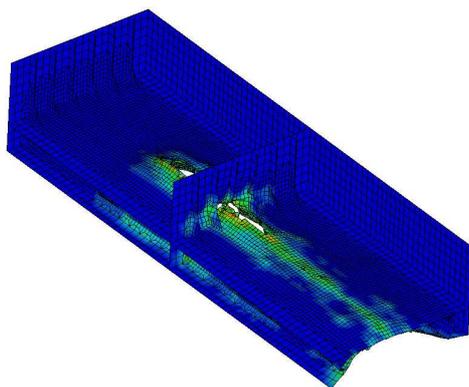
(b2) Paul Buck without inner bottom



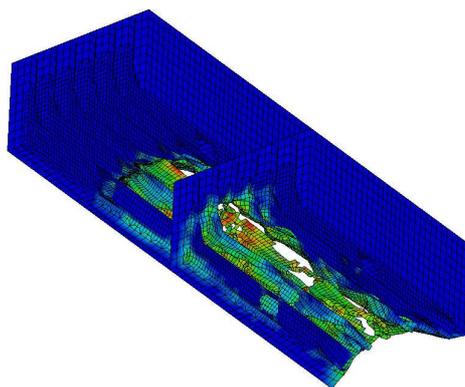
(c1) CONV/PD328 with inner bottom



(c2) CONV/PD328 without inner bottom

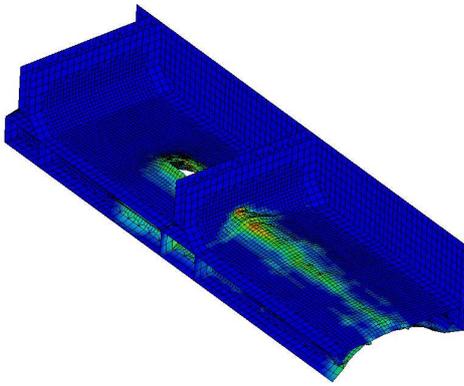


(d1) ADH/PB with inner bottom

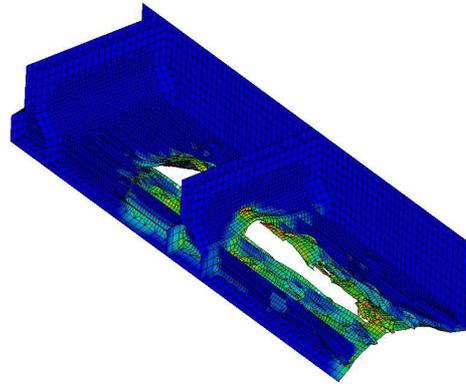


(d2) ADH/PB without inner bottom

Fig. 3.8 Damage configuration of idealized double bottom models(off-center)
(contd.)

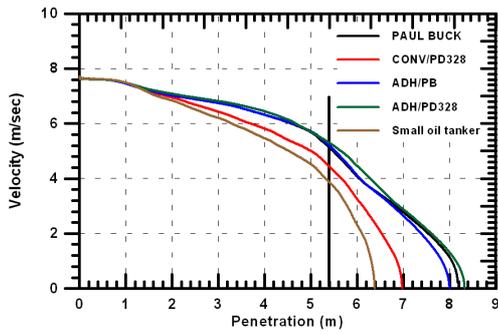


(e1) ADH/PD328 with inner bottom

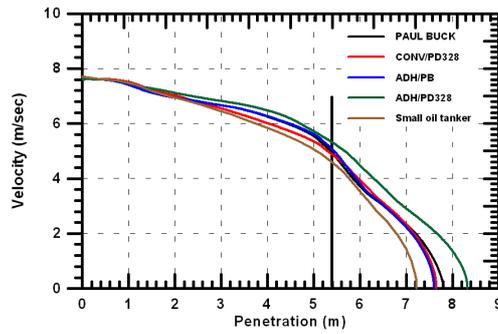


(e2) ADH/PD328 without inner bottom

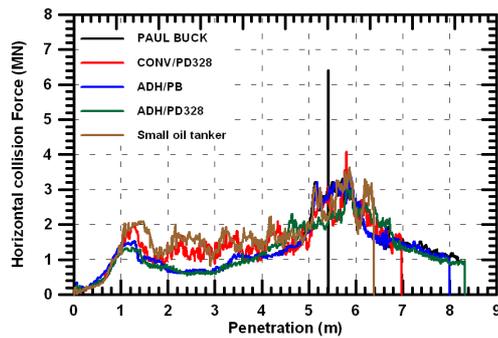
Fig. 3.8 Damage configuration of idealized double bottom models(off-center)



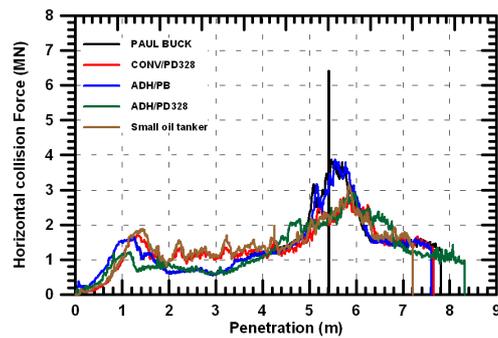
(a1) grounding velocity(center)



(a2) grounding velocity(off-center)

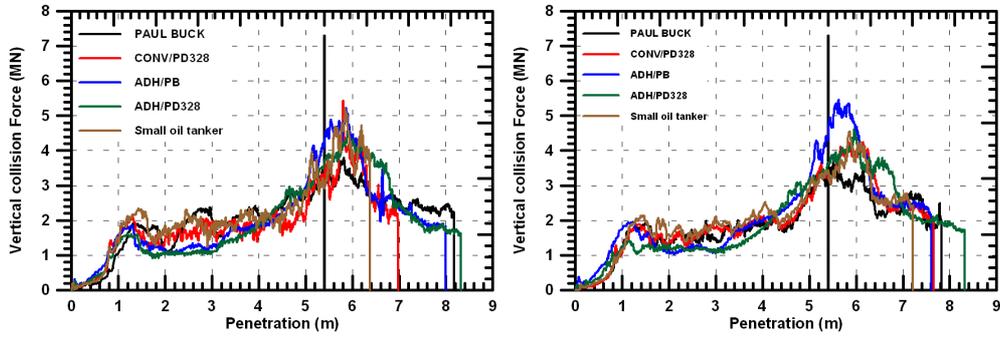


(b1) horizontal collision force(center)



(b2) horizontal collision force(off-center)

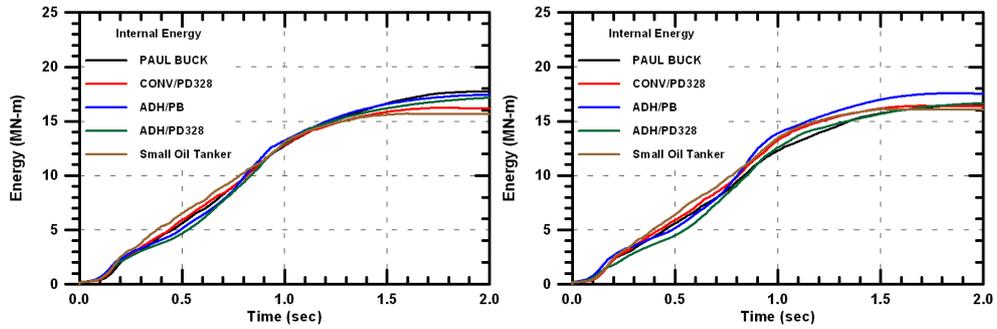
Fig. 3.9 Grounding responses of idealized double hull model(15 knots) (contd.)



(c1) vertical collision force(center)

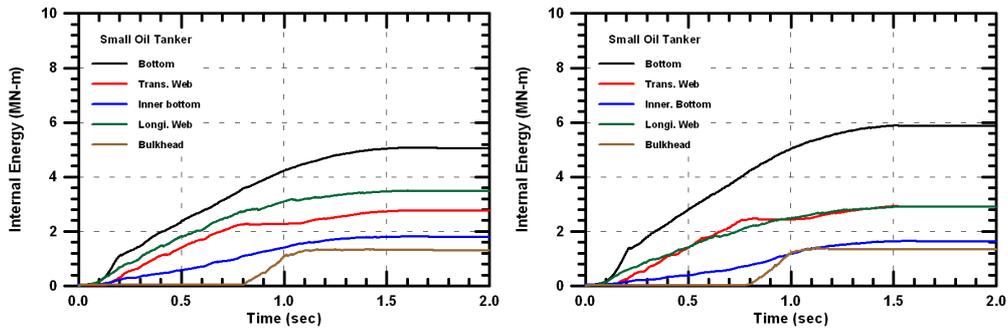
(c2) vertical collision force(off-center)

Fig. 3.9 Grounding responses of idealized double hull model(15 knots)



(a1) total internal energy(center)

(a2) total internal energy(off-center)



(b1) Small Oil Tanker(center)

(b2) Small Oil Tanker(off-center)

Fig. 3.10 Internal energy responses of idealized double hull model(15 knots) (contd.)

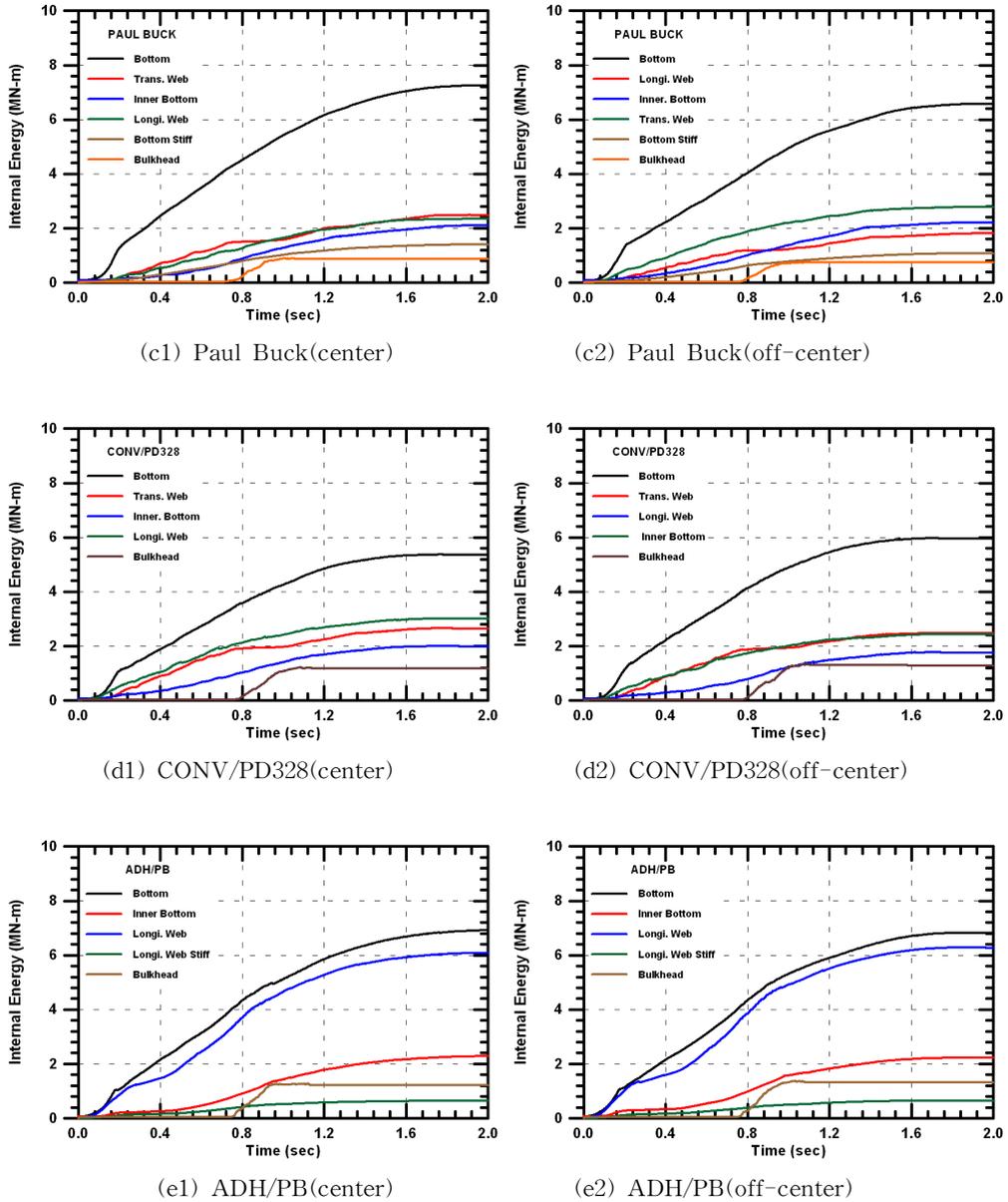


Fig. 3.10 Internal energy responses of idealized double hull model(15 knots) (contd.)

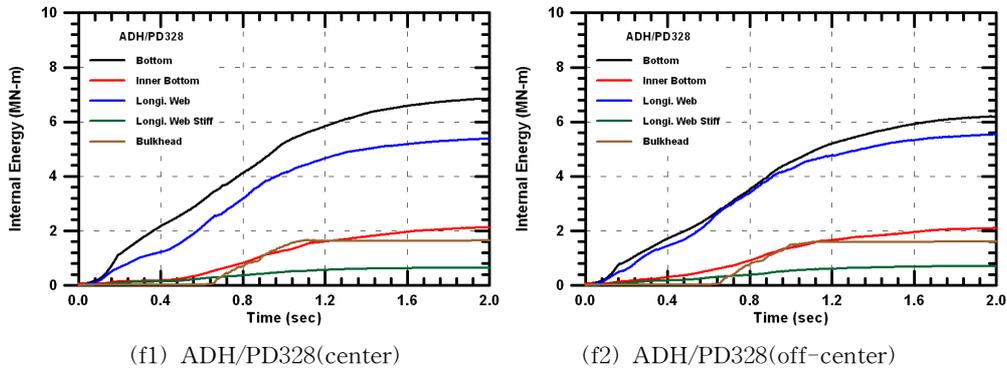


Fig. 3.10 Internal energy responses of idealized double hull model(15 knots)

Table 3.4 Penetration, location and length of fracture at inner bottom(unit : m)

		Small Oil Tanker	Paul Buck	CONV/PD328	ADH/PB	ADH/PD328
Penetration	center	5.5	7.4	6.0	7.1	7.4
	off-center	5.8	6.9	6.3	6.7	7.4
Fracture location	center	4.7	4.6	4.8	5.0	5.8
	off-center	4.8	4.5	4.8	5.5	5.3
Fracture length	center	0.9	2.9	1.5	2.2	1.7
	off-center	1.1	2.7	1.6	1.6	2.4

일반적인 예상과는 달리 Small Oil Tanker와 CONV/PD328 선저모델이 ADH형의 이상화 선저모델에 비하여 내좌초에 우수하다는 것을 알 수 있다. 선저가 내좌초에 가장 크게 기여하였으며, 종방향 웨브가 다음으로 기여하는 부재이라는 것을 알 수 있다. 전자의 이상화 선저모델들은 암초가 종방향 웨브에 부딪칠 경우에는 횡방향 늑골에 비하여 다소 크게 기여하지만 종방향 웨브에서 벗어나 부딪칠 경우에는 서로 비슷하게 기여하고 있음을 알 수 있다. 후자의 이상화 선저모델들도 예상대로 종방향 웨브가 선저와 비슷한 크기로 기여하고 있으며 웨브사이에 부딪칠 경우에도 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Table 3.4에서 볼 수 있듯이 암초의 관입량, 내저판에서의 파단 발생위치와 파단길이 등의 자료에서 Small Oil Tanker 선저모델이 내좌초에 가장 우수하다는 것을 알 수 있다. 실선 소형 유조선의 내좌초 구조해석과 손상 시 복원성능 검토는 Small Oil Tanker 선저모델을 채택하고자 한다.

Table 3.5 Comparison of member internal energy with rock position (2.0 sec)

double bottom type	member	center(MN-m)	off-center(MN-m)
Small Oil Tanker	Bottom	5.09	5.86
	Transverse web	2.55	2.90
	Inner bottom	1.77	1.63
	Longitudinal web	2.92	2.91
	Bulkhead	1.48	1.35
	Total	15.0	16.1
Paul Buck	Bottom	7.25	6.57
	Transverse web	2.48	1.80
	Inner bottom	2.10	2.21
	Longitudinal web	2.34	2.78
	Bottom stiffener	1.39	1.07
	Total	17.7	16.4
CONV/PD328	Bottom	5.21	5.95
	Longitudinal web	2.56	2.47
	Transverse web	2.42	2.42
	Inner bottom	1.89	1.76
	Bulkhead	1.21	1.28
	Total	15.2	16.4
ADH/PB	Bottom	6.92	6.81
	Inner bottom	2.28	2.21
	Longitudinal web	6.08	6.27
	Longitudinal web stiffener	0.64	0.64
	Bulkhead	1.22	1.32
	Total	17.4	17.5
ADH/PD328	Bottom	6.85	6.19
	Inner bottom	2.12	2.09
	Longitudinal web	5.38	5.53
	Longitudinal web stiffener	0.64	0.70
	Bulkhead	1.64	1.60
	Total	17.1	16.6

4. 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석

4.1 내좌초 구조해석 시나리오와 시뮬레이션 모델

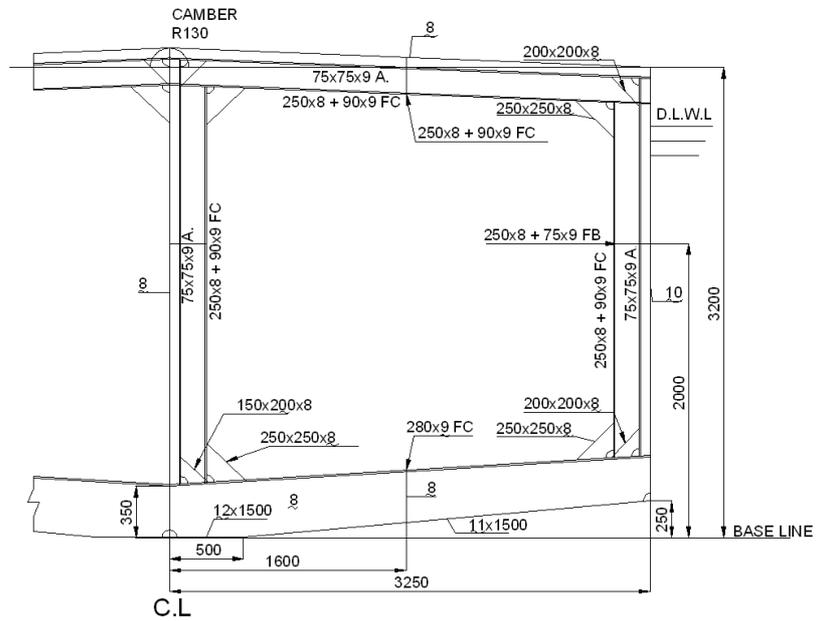
3장의 Fig. 3.1의 국내 운항중인 소형 유조선의 분포에 표시된 5척의 국내 단저 및 이중저 구조 소형 유조선 중에서 재화중량 500톤 미만인 3척의 단저구조 유조선 Ship A, B 및 C를 소형강선규정에 의해 Table 4.1에서와 같이 각 유조선의 크기에 따라 이중저구조로 설계변경(scantling)하여 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석에 사용하였다. Ship A인 경우 이중저 높이가 0.65m인 이중저 구조에, Ship B인 경우 이중저 높이가 0.65 및 0.75m인 이중저 구조에, 그리고 Ship C인 경우 이중저 높이가 0.65, 0.75 및 0.85m인 이중저 구조로 설계변경 하였다. Fig. 4.1에 3척의 설계변경 전 단저구조와 설계변경 후의 이중저 구조 중앙횡단면을 각각 나타내었으며, 변경된 주요제원을 Table 4.2에 요약하였다.

Table 4.1 Scenario of double bottom scantling

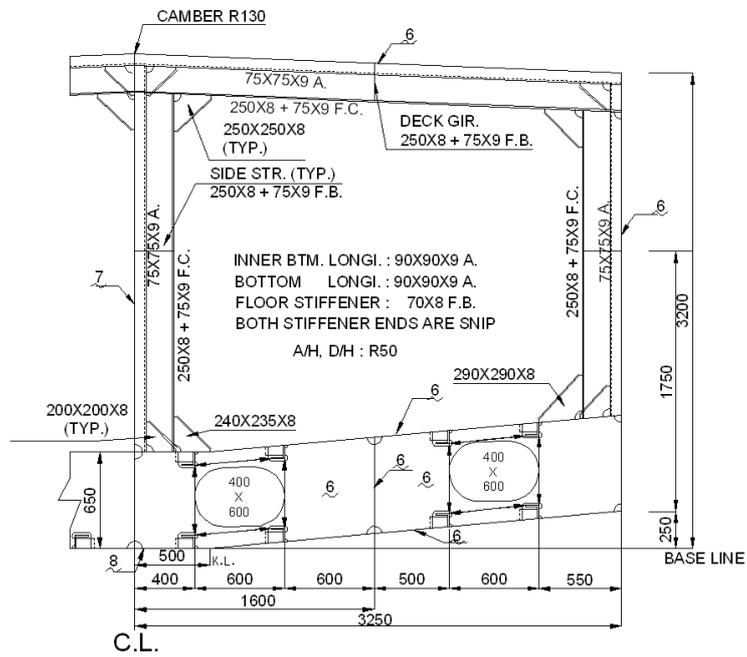
double bottom height(m)	Ship A	Ship B	Ship C
0.65	○	○	○
0.75	-	○	○
0.85	-	-	○

Table 4.2 Principal dimension change of double bottom scantling

case	DWT(ton)	D.B.(m)	B(m)	L(m)	D(m)
A-065	116.865	0.65	6.00	28.87	2.20
B-065	258.450	0.65	0.65	31.10	3.20
B-075	251.133	0.75			
C-065	394.200	0.65	7.50	34.32	3.80
C-075	370.940	0.75			
C-085	301.280	0.85			

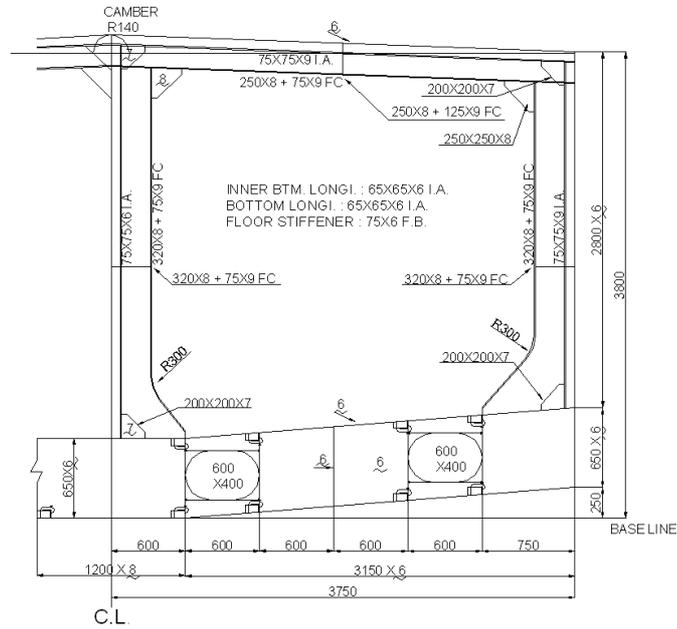


(c) Midship section of Ship B : single bottom

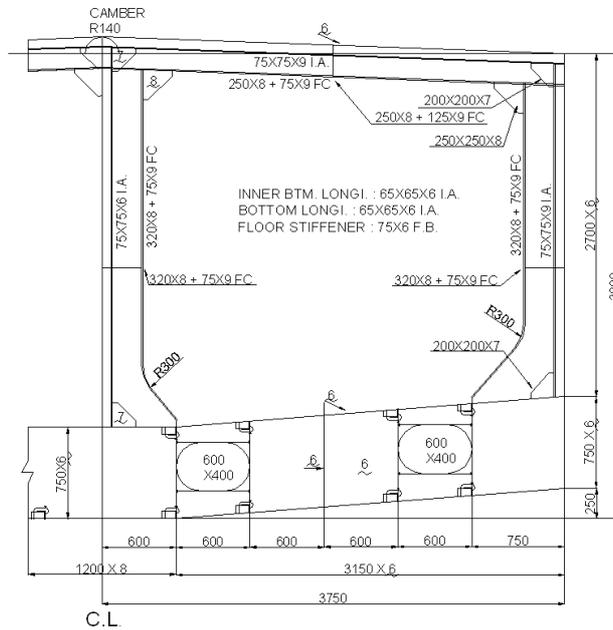


(d) Midship section of Ship B : double bottom height 0.65m

Fig. 4.1 Midship section of small oil tanker with double bottom structure
(contd.)

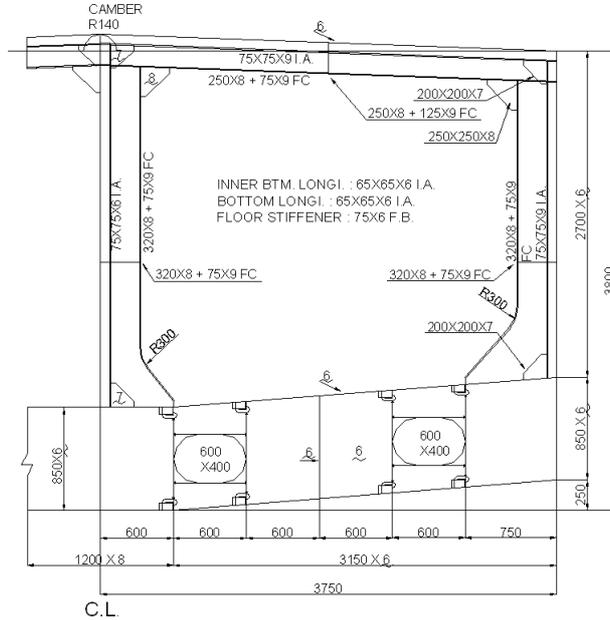


(g) Midship section of Ship C : double bottom height 0.65m



(h) Midship section of Ship C : double bottom height 0.75m

Fig. 4.1 Midship section of small oil tanker with double bottom structure (contd.)



(i) Midship section of Ship C : double bottom height 0.85m

Fig. 4.1 Midship section of small oil tanker with double bottom structure

현재까지의 좌초손상 자료로서 소형 유조선의 좌초사고를 대표적으로 나타낼 수 있는 시나리오를 제안하기란 매우 어렵다. Fig. 4.1의 3가지 크기의 이중저 구조 유조선을 이용한 실선 내좌초 구조해석을 통해 가장 효과적인 좌초손상의 분석과 소형 이중저 구조의 내좌초 성능을 분석을 위해서는 암초에 의한 등흘수 상태(even keel condition)와 트림 상태(trim condition)에 대한 좌초 시나리오를 수행하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 암초와 이중저 구조의 내저판과의 위치와 선체의 기울기 및 하중상태, 선체의 진행속도 등이 좌초 시나리오에서 중요한 인자가 될 것이다. 여기서는 암초의 상하위치는 내저판이 적당히 손상이 발생할 수 있는 높이로서 등흘수 상태와 트림 상태에서의 선수좌초일 경우 암초 상단이 내저판에 0.05, 0.25, 0.45 및 0.65m 정도 솟아있는 위치를 가정하고, 트림상태에서 암초가 선수부를 지나 화물창에 있는 경우에는 화물창 1번과 2번 사이에 위치하도록 하였다. 선속은 10 및 15노트로 직진하고 선체는 암초와의 충돌로 인한 좌우 회전운동은 무시하고 전진하는 것으로 가정하였다. 그리고 암초는 선폭방향으로 선박의 중심선상에, 중심선을 벗어나 선측 거어더(side girder)상에, 그리고 중심선과 선측 거어더 사이에 놓이는 경우를 고려하였다. Table 4.3에 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석을 위한 시나리오를 요약하였다.

Table 4.3 Scenarios of full ship grounding simulation (continued)

ship type	double bottom height(m)	trim condition	loading condition	rock height(m)		speed (knot)	rock position	case
				inner bottom	baseline			
Ship C	0.65	even keel	full, depart	0.05	0.70	10	center	C65EF05C10
							between	C65EF05B10
							side	C65EF05S10
				0.25	0.90	10	center	C65EF25C10
							between	C65EF25B10
							side	C65EF25S10
				0.45	1.10	10	center	C65EF45C10
							between	C65EF45B10
							side	C65EF45S10
			0.65	1.30	10	center	C65EF65C10	
						between	C65EF65B10	
						side	C65EF65S10	
					center	C65EF65C10 (4 cargo)		
					between	C65EF65B10 (4 cargo)		
					side	C65EF65S10 (4 cargo)		
		15	center	C65EF65C15				
			between	C65EF65B15				
			side	C65EF65S15				
			center	C65EF65C15 (4 cargo)				
			between	C65EF65B15 (4 cargo)				
			side	C65EF65S15 (4 cargo)				
		trim	full, depart	0.05	0.70	10	center	C65TF05C10
							between	C65TF05B10
							side	C65TF05S10
				0.25	0.90	10	center	C65TF25C10
							between	C65TF25B10
							side	C65TF25S10
				0.45	1.10	10	center	C65TF45C10
							between	C65TF45B10
							side	C65TF45S10
0.65	1.30		10	center	C65TF65C10			
				between	C65TF65B10			
				side	C65TF65S10			
			15	center	C65TF65C15			
				between	C65TF65B15			
				side	C65TF65S15			
ballast	bottom	bottom	10	center	C65TBBC10			
				between	C65TBBB10			
				side	C65TBBS10			
			15	center	C65TBBC15			
				between	C65TBBB15			
				side	C65TBBS15			

Table 4.3 Scenarios of full ship grounding simulation (continued)

ship type	double bottom height(m)	trim condition	loading condition	rock height(m)		speed (knot)	rock position	case	
				inner bottom	baseline				
Ship C	0.75	even keel	full, depart	0.52	1.27	10	center	C75EF52C10	
							between	C75EF52B10	
							side	C75EF52S10	
		trim	full, depart	0.52	1.27	15	center	C75EF52C10	
							between	C75EF52B10	
							side	C75EF52S10	
	0.85	even keel	full, depart	0.37	1.22	10	center	C75TF52C10	
							between	C75TF52B10	
							side	C75TF52S10	
		trim	full, depart	0.37	1.22	15	center	C75TF52C10	
							between	C75TF52B10	
							side	C75TF52S10	
	Ship B	0.65	even keel	full, depart	0.05	0.70	10	center	B65EF05C10
								between	B65EF05B10
					0.25	0.90	10	center	B65EF05S10
								between	B65EF05S10
					0.45	1.10	10	center	B65EF25C10
								between	B65EF25B10
0.65			1.30	10	center	B65EF25S10			
					between	B65EF25S10			
trim			ballast	bottom	bottom	10	center	B65EF45C10	
							between	B65EF45B10	
						15	center	B65EF45S10	
							between	B65EF45S10	
		10				center	B65EF65C10		
						between	B65EF65B10		
15		center	B65EF65S10						
		between	B65EF65S10						
0.75		even keel	full, depart	0.51	1.26	10	center	B65TF65C10	
							between	B65TF65B10	
	side						B65TF65S10		
	15					center	B65TF65C15		
						between	B65TF65B15		
						side	B65TF65S15		

Table 4.3 Scenarios of full ship grounding simulation

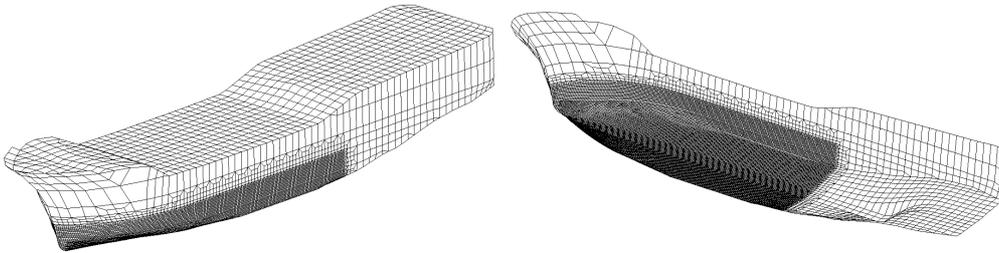
ship type	double bottom height(m)	trim condition	loading condition	rock height(m)		speed (knot)	rock position	case
				inner bottom	baseline			
Ship A	0.65	even keel	full, depart	0.05	0.70	10	center	A65EF05C10
							between	A65EF05B10
							side	A65EF05S10
				0.25	0.90	10	center	A65EF25C10
							between	A65EF25B10
							side	A65EF25S10
				0.45	1.10	10	center	A65EF45C10
							between	A65EF45B10
							side	A65EF45S10
				0.65	1.30	10	center	A65EF65C10
							between	A65EF65B10
							side	A65EF65S10
		15	1.30	15	center	A65EF65C15		
					between	A65EF65B15		
					side	A65EF65S15		
trim	ballast	bottom	bottom	bottom	bottom	10	center	A65TBBC10
							between	A65TBBB10
							side	A65TBBS10
						15	center	A65TBBC15
							between	A65TBBB15
							side	A65TBBS15

내좌초 구조해석 시나리오의 Table 4.3에서의 각 case의 첫 영문자는 Ship C, B 및 A를, 두 번째 두 숫자는 이중저 높이를, 세 번째 영문자는 선박의 흘수 상태인 등흘수(Even keel)과 트림(Trim)을, 네 번째 영문자는 하중상태인 만재(Full loading)과 발라스트(Ballast)를, 다섯 번째 두 숫자 또는 영문자는 이중저 구조 내저판을 기준으로 한 암초의 상대적인 높이나 암초의 선저 좌초를, 여섯 번째 영문자는 암초의 선체 폭 방향으로의 위치를, 마지막 두 숫자는 좌초선속을 나타낸다.

Table 4.3의 내좌초 구조해석 시나리오를 CAD로 작성하여 부록 A에 첨부하였다. Fig. A.1(a)~(c), Fig. A.3(a)~(b) 및 Fig. A.5(a)는 각각 Ship C의 이중저 구조 선저높이 0.65, 0.75 및 0.85m, Ship B의 이중저 구조 선저높이 0.65 및 0.75m 그리고 Ship A의 이중저 구조 선저높이 0.65m에 대한 암초의 폭 방향의 위치 및 내저판 기준의 암초 높이를 보여주고 있다. Fig. A.2(a)~(o), Fig. A.4(a)~(f) 및 Fig. A.6(a)~(f)는 Table 4.3의 Ship C, Ship B 및 Ship A에 대한 각 시나리오의 측면도를 나타낸 것이다.

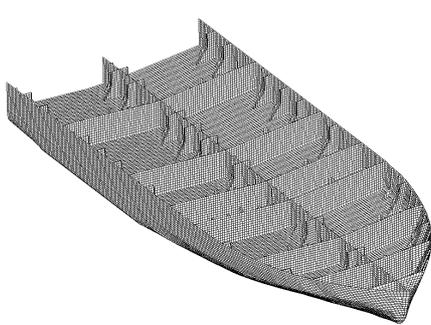
Figs. 4.2~4.4은 내좌초 구조해석을 위한 이중저 구조 유조선 Ship C, B 및 A의 유한요소 모델로서 암초로 인한 좌초손상에 영향을 받는 선저로부터 높이까지, 그리고 선수 선저로부터 화물창 선저부까지는 앞 절에서와 같이 상세 유한요소로 모델링하였고, 그 외 나머지는 강체로 가정하였다. 물성치는 3장의 Table 3.3에서 정

의한 연강재료를 그대로 사용하였다.



(a) isometric overview of small oil tanker

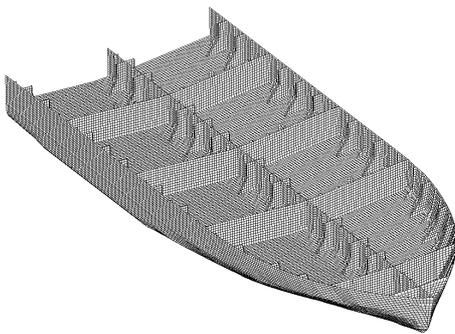
(b) upward overview of small oil tanker



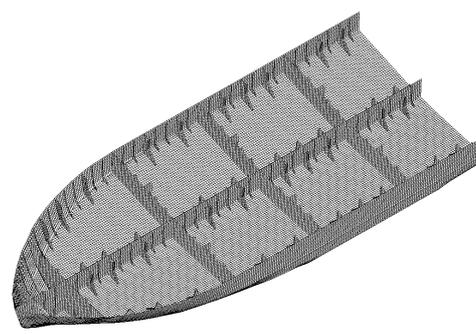
(c) deformable D.B. structure w/o inner bottom
& 6 cargo holders



(d) deformable D.B. structure w inner bottom
& 6 cargo holders

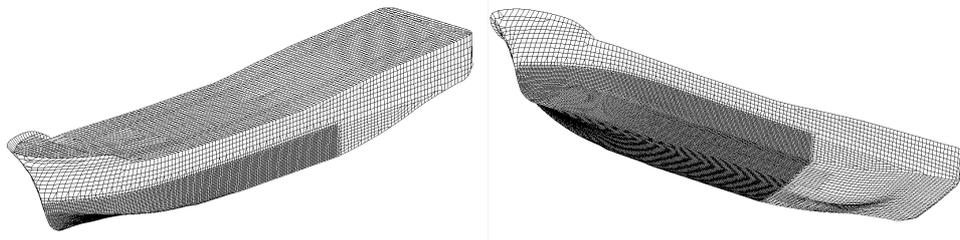


(e) deformable D.B. structure w/o inner bottom
& 4 cargo holders



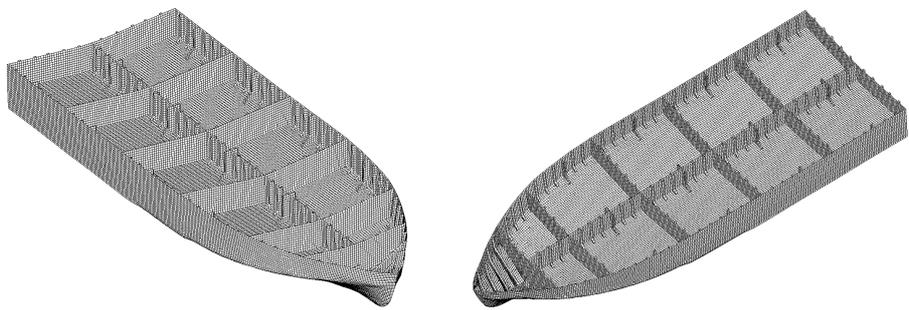
(f) deformable D.B. structure w inner bottom
& 4 cargo holders

Fig. 4.2 Configuration of F.E. small oil tanker Ship C



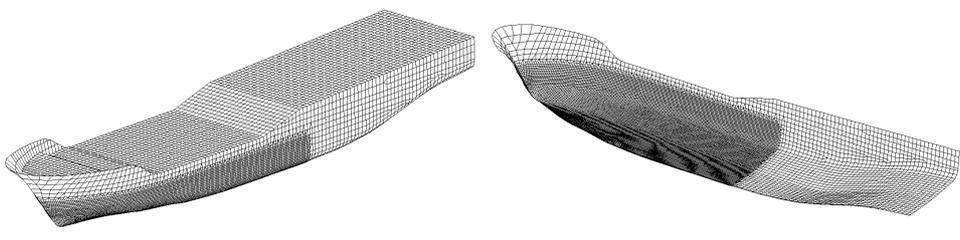
(a) isometric overview of small oil tanker

(b) upward overview of small oil tanker



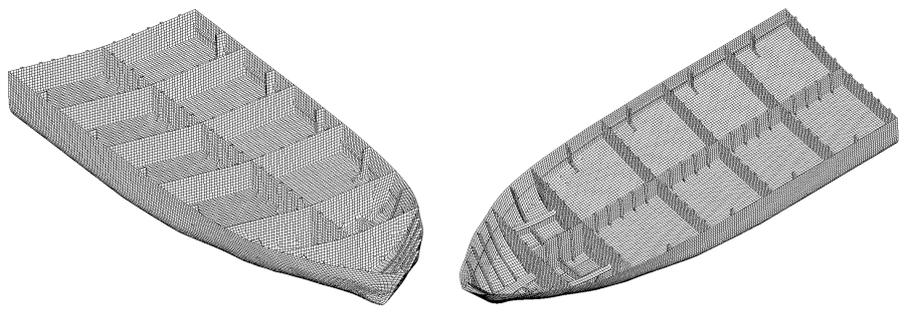
(c) deformable D.B. structure w/o inner bottom (d) deformable D.B. structure w inner bottom

Fig. 4.3 Configuration of F.E. small oil tanker Ship B



(a) isometric overview of small oil tanker

(b) upward overview of small oil tanker



(c) deformable D.B. structure w/o inner bottom (d) deformable D.B. structure w inner bottom

Fig. 4.4 Configuration of F.E. small oil tanker Ship A

4.2 최저 이중저 구조 내저판 높이 0.65m인 경우의 내좌초 손상 경향

앞의 Table 4.3의 내좌초 구조해석 시나리오에 따라 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 시나리오에 따른 소형 유조선의 손상 (damage)에 대한 그림을 부록 C에 나타내었다. 각 시나리오 별 손상 그림은 손상 선박의 (a)선측에서 바라본 그림, (b)선저에서 바라본 그림, (c)이중저 내저판을 내려다 본 그림 및 (d)이중저 내저판을 제거한 선저를 내려다 본 그림들로 나타내었다. 그리고 이들 각 소형 유조선 Ship C, B 및 A의 손상 결과를 구체적으로 암초의 전진거리(rock penetration length), 선저의 파단길이(fracture length), 이중저 내저판의 파단여부 및 파단길이 등으로 수치화하여 부록 B의 Tables B.1~B.3에 요약하였다.

Figs. 4.5~4.7은 최저 이중저 구조 내저판 높이 0.65m을 갖는 유조선 Ship C, B 및 A가 만재 등흘수 상태(even keel, full loading condition)에서 내저판을 기준으로 0.05(C65EF05), 0.25(C65EF25), 0.45(C65EF45) 및 0.65m(C65EF65) 위로 솟아있는 암초에 좌초가 발생한 경우를 각각 나타내고 있다.

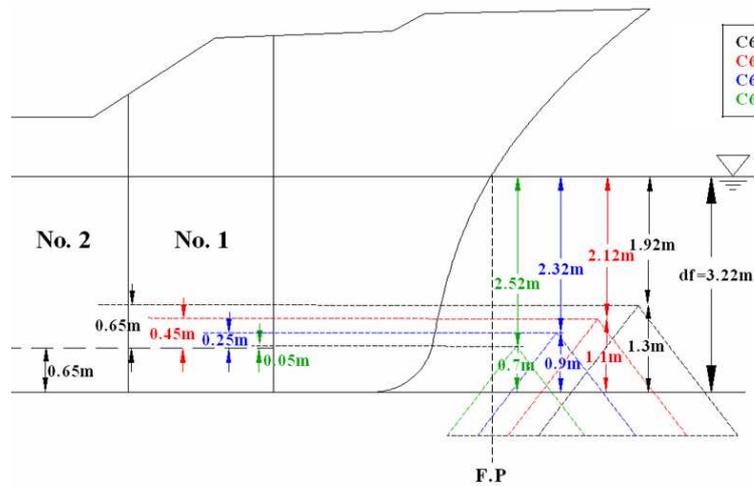


Fig. 4.5 Configuration of Ship C grounding scenario with 0.65m inner bottom

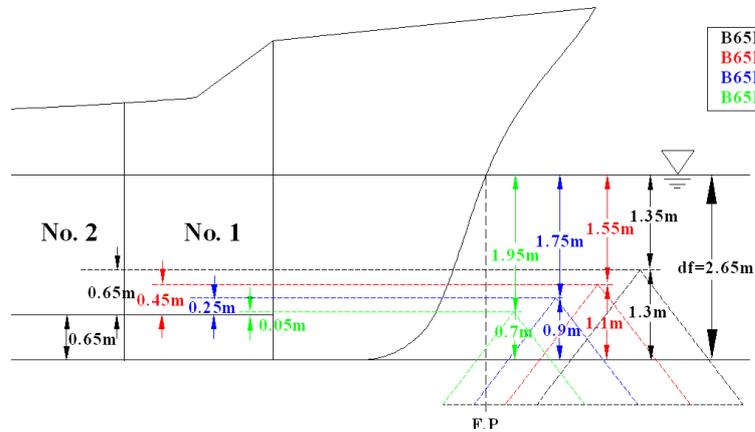


Fig. 4.6 Configuration of Ship B grounding scenario with 0.65m inner bottom

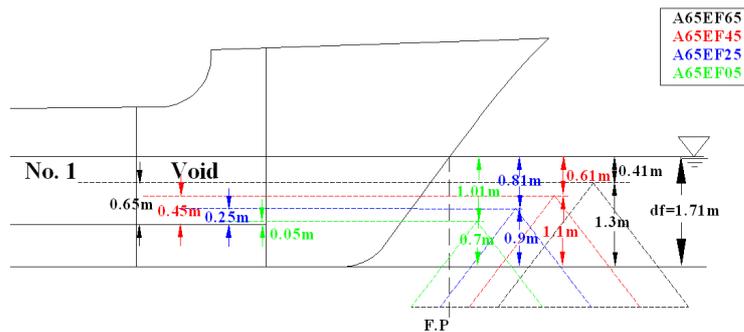


Fig. 4.7 Configuration of Ship A grounding scenario with 0.65m inner bottom

Ship C의 경우 내저판의 파손 경향과는 달리 선저부는 암초가 내저판으로부터 높이가 낮을수록 파손이 길게 발생하지만 파손 범위는 암초가 내저판으로부터 높이가 높은 경우보다 대체로 작다는 것을 알 수 있었다. 이것은 암초가 내저판으로부터 높이가 높을수록 선저 이중저 구조에 깊이 박혀서 이러한 경향이 발생한다는 것을 의미한다. 암초가 이중저 구조 내저판으로부터 위로 높이가 솟아 있을수록 내저판의 손상부위는 더 크게 발생하고, 특히 암초가 내저판으로부터 0.45m 이상 (C65EF45S10, C65EF65B10, C65EF65BS10) 솟아있을 경우 내저판에 파단이 발생하였다. 암초에 15노트로 좌초하는 경우(C65EF65x15)는 전자의 10노트 경우에 비하여 내저판과 선저부위의 파단이 더욱 크게 발생하였다. Figs. 4.8~4.10에서와 같이 각 경우에 대한 내부에너지(internal energy), 좌초 선속(velocity), 수평 및 수직 충돌력(horizontal & vertical collision forces)의 응답에서 확인할 수 있다.

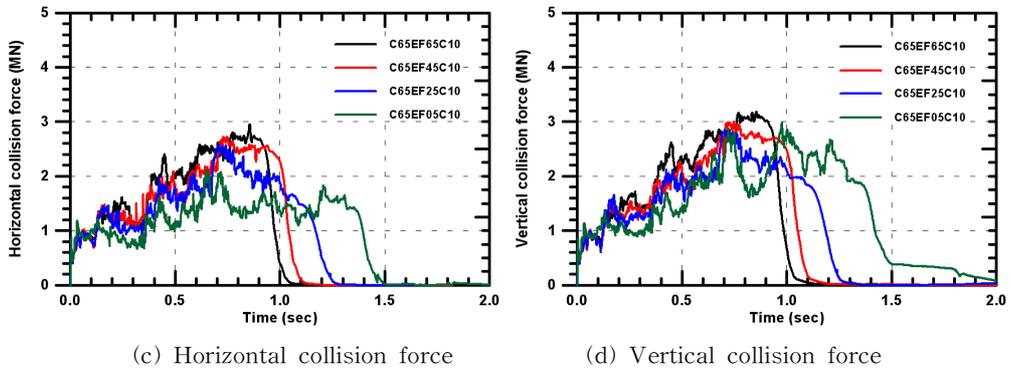
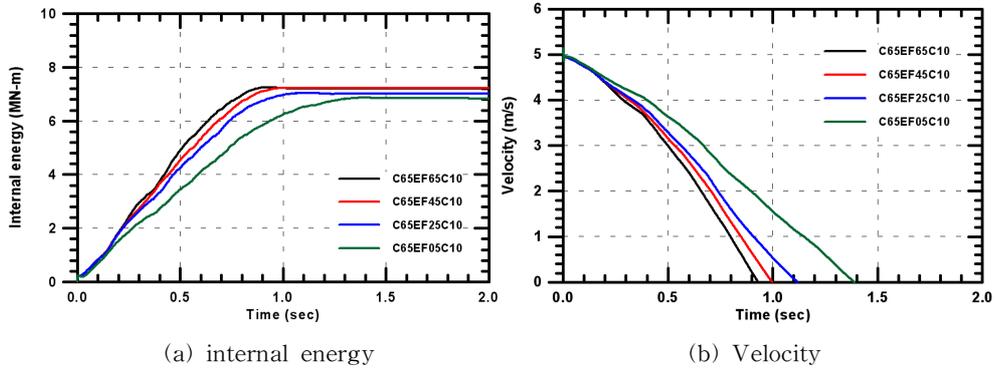


Fig. 4.8 Grounding responses of Ship C with center rock position

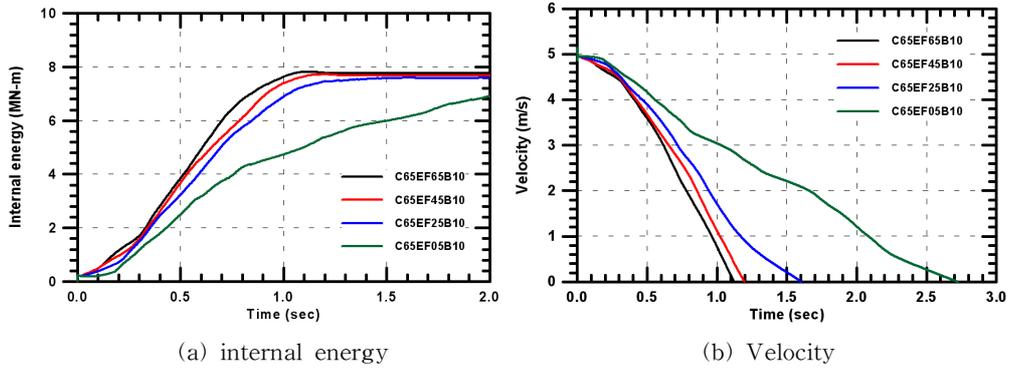
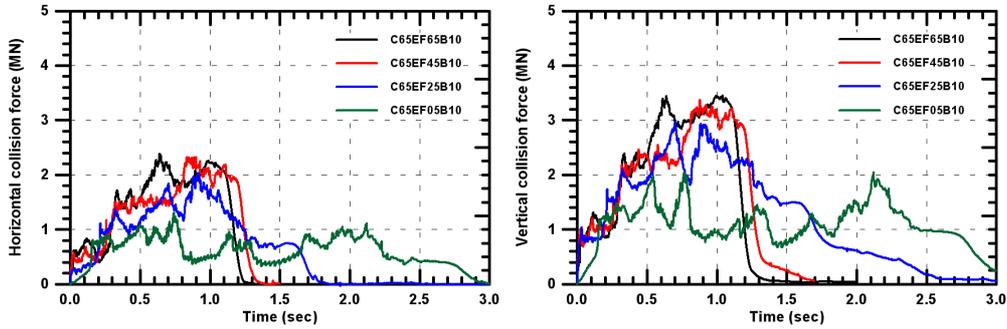


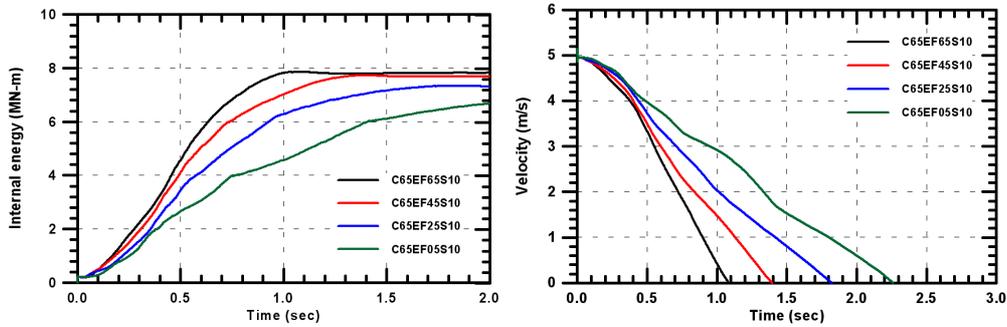
Fig. 4.9 Grounding responses of Ship C with between rock position (continued)



(c) Horizontal collision force

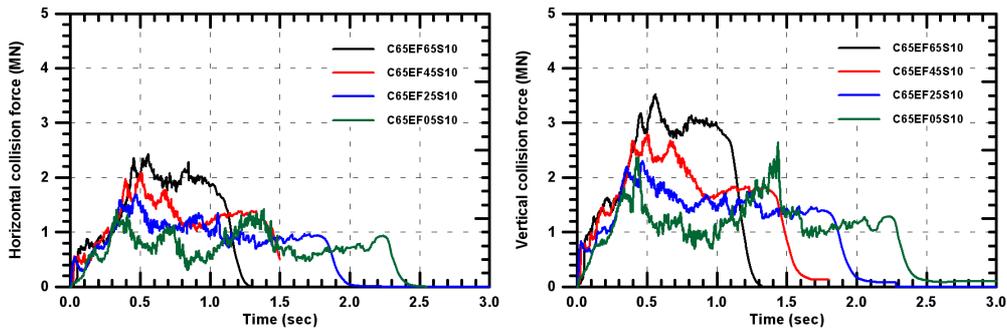
(d) Vertical collision force

Fig. 4.9 Grounding responses of Ship C with between rock position



(a) internal energy

(b) Velocity



(c) Horizontal collision force

(d) Vertical collision force

Fig. 4.10 Grounding responses of Ship C with side rock position

Fig. 4.11은 Ship C에서 암초가 내저판으로부터 0.65m 솟아있는 경우 (C65EF65x10)의 각 부재별 내부에너지의 응답을 보여주고 있고, Ship C의 만재 등 흡수 상태에서의 각 시나리오에 대한 각 부재별 내부에너지의 크기 및 전체 내부에너지에 대한 백분율을 Table 4.4에 요약하였다. 유조건이 일반적으로 암초에 좌초

될 때 선저부에 손상이 가장 크게 발생하므로 선저부가 가장 큰 내부에너지를 흡수하고 있다. 압초가 선폭방향으로 선박의 중심선 상에 부딪칠 경우 중앙 종격벽(center elevation)이 그 다음으로 큰 비중을 차지하고, 늑골과 횡격벽도 어느 정도 비중을 차지하고 있다. 압초가 선측 거어더 상에 부딪칠 경우 선측 거어더와 횡격벽의 순서대로 내부에너지의 비중을 차지하지만, 이중저 구조 내저판 높이가 커지거나 압초가 내저판으로부터 높이 솟을수록 선측 거어더와 횡격벽의 비중은 뒤 바뀐다. 그리고 압초가 선체 중심선과 선측 거어더 사이에 부딪칠 경우 횡격벽, 늑골 등의 순서대로 내부에너지의 비중을 차지하지만 이중저 구조 내저판 높이가 커지거나 압초가 내저판으로부터 높이 솟을수록 중앙 종격벽의 비중이 더 크게 차지하게 된다. 이러한 분석을 통하여 각 좌초 시나리오에 대한 각 부재의 내좌초에 기여하는 비중을 판단할 수 있고, 내좌초에 우수한 구조부재의 배치 및 크기를 조절할 수가 있다.

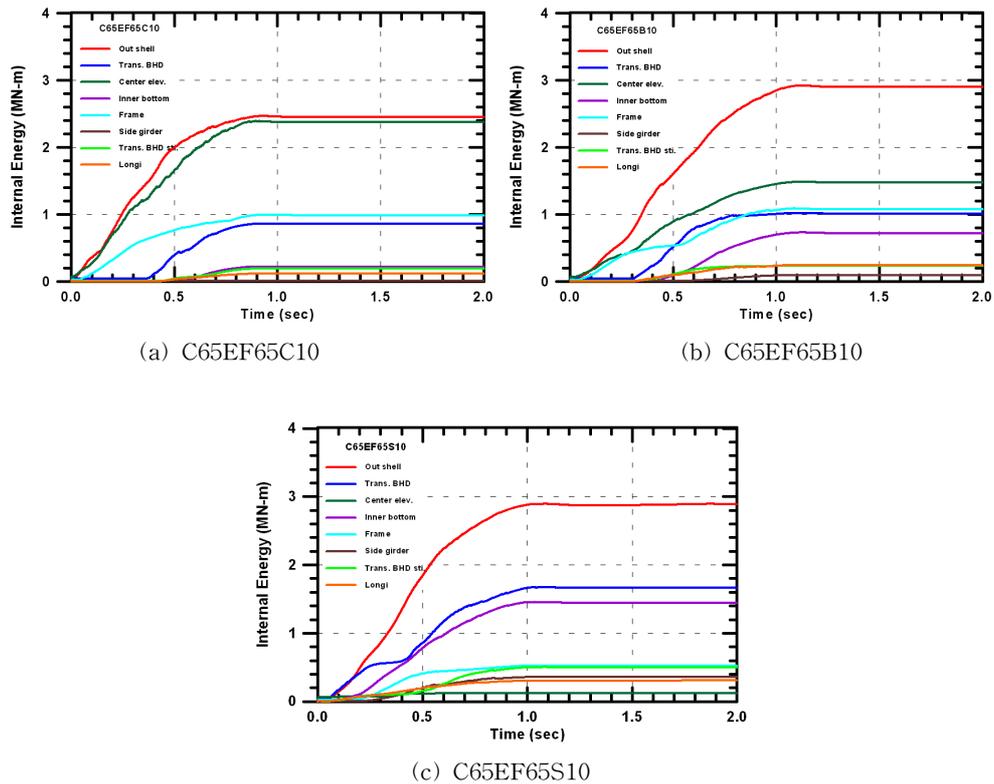


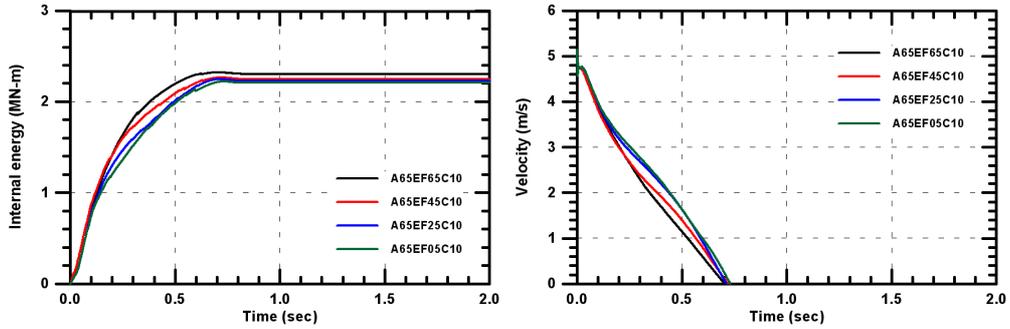
Fig. 4.11 Grounding responses of member internal energy of Ship C

Table 4.4 Summary of member internal energy of Ship C at even keel condition
(unit : MN-m)

case	total	bottom		center elev.		floor		side girder		inner bottom		trans BHD		longi. stiff.	
		IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%
C65EF05C10	6.8	2.7	40.1	1.9	28.1	1.1	16.3	0.0	0.1	0.2	2.7	0.7	8.9	0.5	6.6
C65EF05B10	7.0	3.8	55.1	0.1	1.7	0.8	11.9	0.1	0.9	0.2	2.1	1.5	18.9	0.5	6.6
C65EF05S10	6.2	2.4	38.1	0.1	1.1	0.5	7.5	1.4	23.3	0.5	6.3	1.2	14.9	0.2	2.6
C65EF25C10	7.2	2.4	33.3	2.1	29.0	1.2	16.9	0.0	0.1	0.3	3.4	0.9	11.6	0.1	1.4
C65EF25B10	7.6	3.3	44.1	0.8	10.0	0.7	9.4	0.1	1.8	0.6	7.5	1.7	21.3	0.4	5.0
C65EF25S10	7.3	3.0	40.7	0.1	1.0	0.8	10.4	0.9	12.9	1.2	15.6	1.1	14.2	0.3	3.4
C65EF45C10	7.2	2.5	34.2	2.2	30.1	1.1	15.6	0.0	0.0	0.3	3.4	1.1	13.6	0.1	1.7
C65EF45B10	7.7	3.1	40.4	1.1	14.2	0.9	12.3	0.1	1.7	0.7	9.2	1.4	17.4	0.3	4.4
C65EF45S10	7.7	3.0	38.9	0.1	0.9	0.6	8.2	0.7	8.5	1.5	19.0	1.6	20.4	0.3	3.7
C65EF65C10	7.2	2.5	34.1	2.4	33.1	1.0	13.8	0.0	0.0	0.2	3.1	1.0	14.5	0.1	1.5
C65EF65B10	7.8	2.9	37.4	1.5	19.1	1.1	13.8	0.1	1.2	0.7	9.3	1.2	16.0	0.2	3.1
C65EF65S10	7.8	2.9	37.0	0.1	1.5	0.5	6.7	0.4	4.6	1.4	18.6	2.2	27.9	0.3	4.0
C75EF51C10	7.0	2.4	33.6	2.1	30.0	1.0	14.8	0.0	0.0	0.2	3.1	1.0	12.8	0.1	1.4
C75EF51B10	7.6	2.9	38.7	1.3	17.5	1.1	14.3	0.1	1.5	0.6	7.6	1.3	16.1	0.3	3.7
C75EF51S10	7.6	2.9	38.5	0.1	1.3	0.6	7.2	0.4	5.4	1.3	16.8	2.0	26.4	0.3	3.9
C85EF37C10	6.3	2.3	36.3	2.1	33.2	0.9	14.1	0.0	0.0	0.1	1.2	0.9	11.1	0.1	1.0
C85EF37B10	6.8	2.6	39.1	1.3	19.3	1.0	14.8	0.1	1.5	0.3	4.3	1.2	15.0	0.2	2.8
C85EF37S10	6.6	2.6	39.4	0.1	1.1	0.5	8.1	0.5	7.4	0.9	12.0	1.7	21.8	0.3	3.5

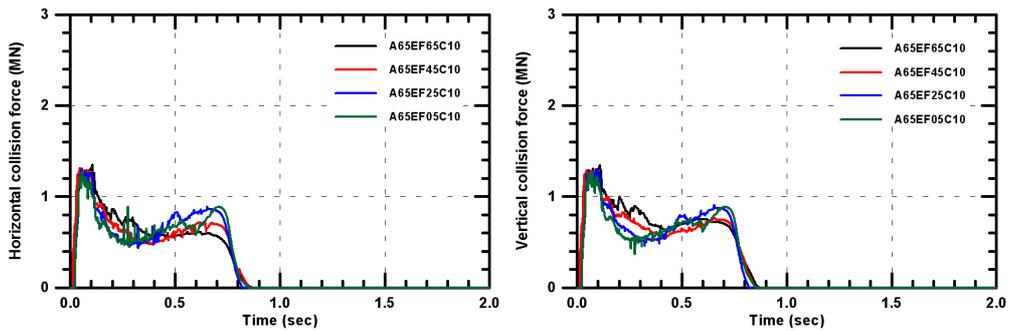
Ship B의 경우는 Ship C의 경우와 경향이 대체로 비슷하지만 손상은 작은 편이다. 10노트의 좌초속도에서는 선박의 선측 거어디(B65EF65S)에 암초가 부딪치면 내저판에 파단이 매우 경미하게 발생하였고, 15노트에서는 내저판의 파단이 다소 크게 발생하였다. 그러나 Ship A에서는 선저 부위에는 손상이 다소 크게 발생하지만 파단은 매우 미미하였고, 내저판에는 파단이 발생하지 않았다. 특히 Ship A의 재화중량이 다른 두 선박에 비하여 크게 작으므로 같은 상황에서 좌초에 대한 손상이 다른 두 선박에 비하여 경미하다는 것을 본 내좌초 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있었다. Figs. 4.12~4.14의 암초 높이에 대한 Ship A의 내부에너지, 좌초선속, 수평 및 수직 충돌력의 응답으로부터 두 선박과는 달리 암초의 높이에 대한 전반적인 좌초응답에 크게 차이가 없다는 것을 확인할 수 있었다. Ship B 및 A의 만재 등 흘수 상태에서의 각 시나리오에 대한 각 부재별 내부에너지의 크기 및 전체 내부에너지에 대한 백분율을 요약한 Tables 4.4 및 4.5에서 Ship B 와 A의 각 부재별 내부에너지의 비중은 Ship C와 전반적으로 비슷한 경향을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. Ship A는 다른 두 선박에 비하여 선저가 내좌초에 더 크게 기여하였음을 알 수 있다. 이것은 선저부의 최소 두께로도 상대적으로 내좌초에 크게 기여할 수 있

었던 것으로 사료된다. 또한 본 내좌초 시뮬레이션을 통하여 예상과 달리 이중저 구조가 내좌초에 매우 우수하다는 것도 발견할 수 있었다.



(a) internal energy

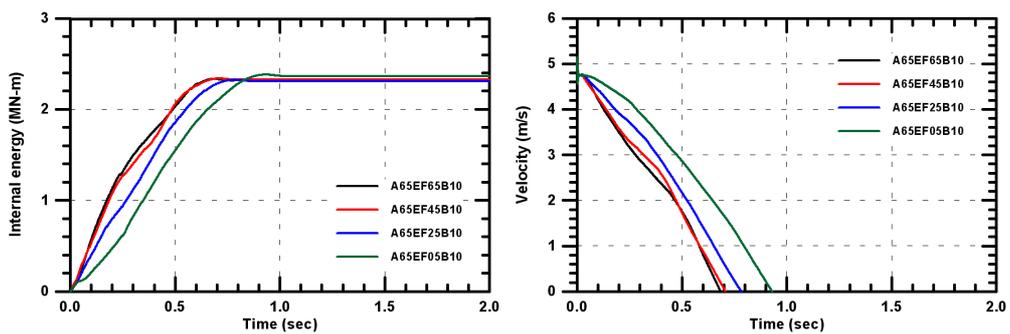
(b) Velocity



(c) Horizontal collision force

(d) Vertical collision force

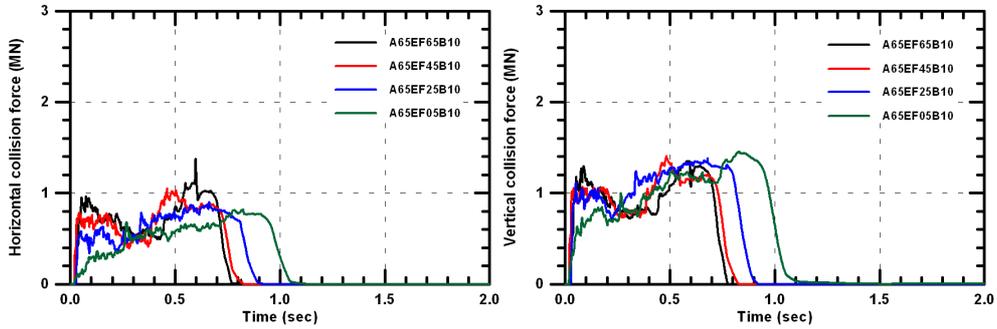
Fig. 4.12 Grounding responses of Ship A with center rock position



(a) internal energy

(b) Velocity

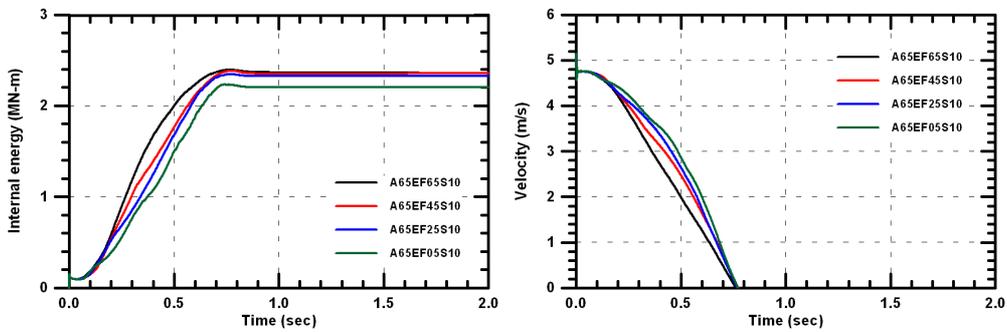
Fig. 4.13 Grounding responses of Ship A with between rock position
(continued)



(c) Horizontal collision force

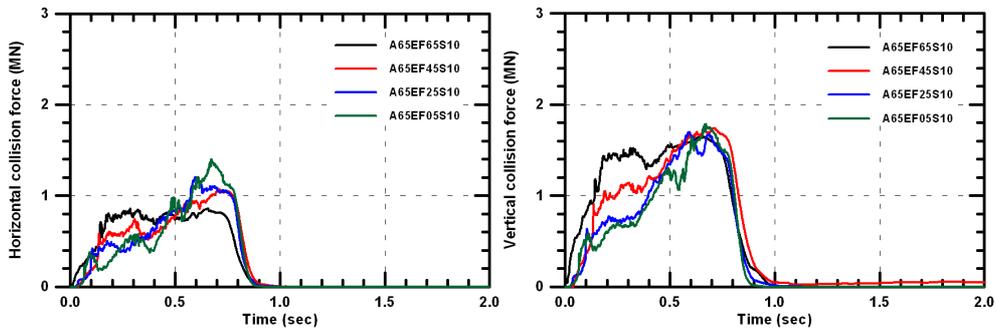
(d) Vertical collision force

Fig. 4.13 Grounding responses of Ship A with between rock position



(a) internal energy

(b) Velocity



(c) Horizontal collision force

(d) Vertical collision force

Fig. 4.14 Grounding responses of Ship A with side rock position

Table 4.5 Summary of member internal energy of Ship B at even keel condition
(unit: MN-m)

case	total I.E.	bottom		center elev.		floor		side girder		inner bottom		trans BHD		longi. stiff.	
		IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%
B65EF05C10	4.2	1.8	43.0	1.0	23.8	0.6	14.2	0.0	0.0	0.1	2.4	0.6	13.7	0.1	2.6
B65EF05B10	4.1	2.1	50.7	0.4	9.8	0.5	11.5	0.0	1.0	0.1	2.4	0.7	16.8	0.3	8.0
B65EF05S10	4.2	1.9	46.7	0.1	1.9	0.5	12.3	0.9	20.7	0.3	7.2	0.7	16.9	0.1	2.2
B65EF25C10	4.3	1.8	41.4	1.1	24.3	0.6	13.9	0.0	0.0	0.1	3.2	0.6	14.4	0.1	2.5
B65EF25B10	4.6	2.0	43.4	0.6	13.9	0.8	17.2	0.1	2.0	0.3	5.9	0.6	12.0	0.3	5.7
B65EF25S10	4.4	1.9	43.5	0.1	1.8	0.3	6.5	0.5	10.8	0.8	17.6	0.8	17.6	0.1	2.5
B65EF45C10	4.4	1.8	41.4	1.0	22.7	0.7	14.9	0.0	0.0	0.2	3.7	0.7	15.1	0.1	2.3
B65EF45B10	4.6	1.9	40.1	0.8	16.3	0.7	15.6	0.1	1.1	0.3	6.9	0.7	15.2	0.2	4.3
B65EF45S10	4.6	1.9	41.8	0.1	2.2	0.4	8.8	0.3	6.7	0.9	18.3	0.9	19.2	0.3	6.7
B65EF65C10	4.4	1.9	42.0	1.0	23.0	0.7	15.5	0.0	0.0	0.1	3.2	0.6	14.5	0.1	2.0
B65EF65B10	4.7	1.9	40.3	0.9	19.1	0.8	16.9	0.0	0.2	0.2	4.4	0.7	15.3	0.2	3.6
B65EF65S10	4.8	1.9	39.5	0.1	2.9	0.6	12.2	0.3	6.0	0.9	18.4	0.9	18.2	0.2	3.5
B75EF52C10	4.3	1.9	43.5	1.0	22.8	0.7	16.5	0.0	0.0	0.1	2.4	0.6	12.9	0.1	1.9
B75EF52B10	4.6	1.9	41.2	0.9	18.7	0.7	15.7	0.0	0.9	0.2	3.9	0.8	16.3	0.2	3.3
B75EF52S10	4.6	1.9	41.6	0.1	2.6	0.5	11.7	0.4	7.6	0.8	16.7	0.8	16.2	0.1	3.0

Table 4.6 Summary of member internal energy of Ship A at even keel condition
(unit: MN-m)

case	total I.E.	bottom		center elev.		floor		side girder		inner bottom		trans BHD		longi. stiff.	
		IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%	IE	%
A65EF05C10	2.2	1.1	47.5	0.6	26.7	0.4	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	5.0	0.0	0.5
A65EF05B10	2.4	1.2	50.0	0.3	11.9	0.3	14.0	0.1	3.4	0.0	0.0	0.4	15.7	0.1	5.1
A65EF05S10	2.2	1.0	45.0	0.0	1.8	0.2	6.8	0.5	22.3	0.0	1.8	0.4	20.0	0.1	2.3
A65EF25C10	2.2	1.1	47.1	0.6	28.7	0.5	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	4.9	0.0	0.4
A65EF25B10	2.3	1.0	44.6	0.5	22.5	0.3	12.1	0.0	0.9	0.0	0.0	0.4	17.3	0.1	2.6
A65EF25S10	2.3	1.1	47.4	0.0	1.7	0.2	8.6	0.5	19.8	0.0	0.4	0.4	19.0	0.1	3.0
A65EF45C10	2.2	1.1	49.1	0.6	27.2	0.5	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	4.0	0.0	0.4
A65EF45B10	2.3	1.1	48.3	0.6	24.6	0.4	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	11.2	0.0	1.7
A65EF45S10	2.4	1.2	51.1	0.1	2.1	0.2	10.2	0.3	12.8	0.0	0.0	0.5	19.6	0.1	4.3
A65EF65C10	2.3	1.1	48.7	0.7	28.7	0.4	19.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.0	0.0	0.4
A65EF65B10	2.3	1.1	48.7	0.6	23.7	0.4	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	8.6	0.0	1.3
A65EF65S10	2.4	1.3	52.9	0.1	3.3	0.3	13.3	0.1	4.2	0.0	0.0	0.5	21.7	0.1	4.6

Fig. 4.15은 최저 이중저 구조 내저판 높이 0.65m을 갖는 유조선 Ship C가 만재 트림 상태(trim, full loading condition)에서 압초가 내저판으로부터 0.05(C65TF05), 0.25,(C65TF25) 0.45(C65TF45) 및 0.65m(C65TF65) 위로 솟아있는 경

우를 각각 나타내고 있다. 만재 트림 상태에서의 압초 높이에 따른 유조선의 좌초 손상의 경향은 앞에서 검토한 등흘수 만재 상태에서와 비슷하지만 같은 조건에서는 압초가 등흘수 상태에서 보다 선저 이중저 구조에 더 깊이 박혀서 압초로 인한 선저와 내저판에 발생하는 파단길이는 줄어들지만 손상 범위와 크기는 더 증가한다는 것을 알 수 있었다.

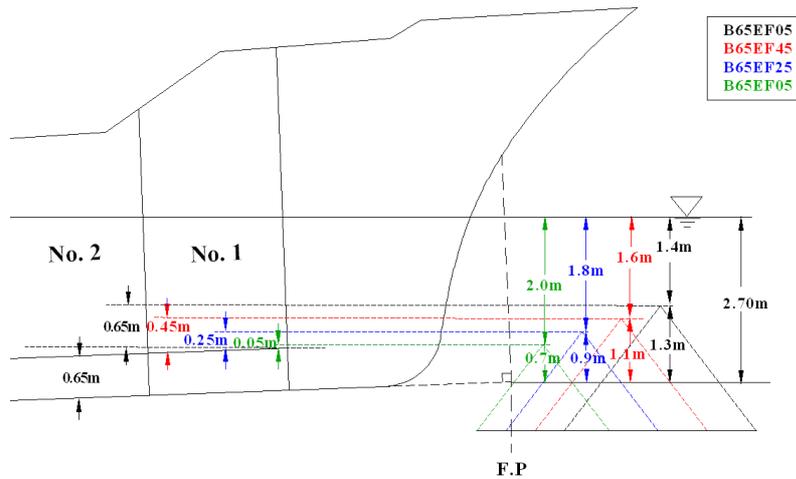


Fig. 4.15 Configuration of Ship C grounding scenario with 0.65m inner bottom

부록 A의 Fig A.2(j), Fig A.4(e), Fig A.6(e)는 최저 이중저 구조 내저판 높이 0.65m을 갖는 소형 유조선 Ship C, B 및 A가 트림 발라스트 상태(trim, ballast condition)에서 압초가 선저에 부딪치는 시나리오를 보여주고 있다. Ship C와 B는 선저의 파단이 발생하지만, Ship A는 등흘수 만재 상태와 비슷하게 선저에서의 손상은 미미한 경향을 보이고 있다. 좌초선속이 10노트에서는 Ship C, B 및 A 모두 압초는 이중저 구조 내저판에 부딪치지 않고, 15노트에서는 3척 모두 선저에서의 파손과 파단의 범위는 증가하고, 내저판에도 손상은 발생하지만 그 정도가 경미하다. 이것은 만재상태에 비하여 선체 중량이 절반 정도로 작기 때문에 선체가 종방향으로 압초에 많이 노출되어 있지만 작은 충돌 운동에너지로 인하여 손상이 작은 것으로 생각된다.

4.3 이중저 구조 내저판 높이에 따른 내좌초 손상 경향

Fig. 4.16은 자유수면에서 1.92m 깊이에 있는 암초에 대한 Ship C의 이중저 구조 내저판 높이 0.65(C65EF65), 0.75(C75EF52) 및 0.85m(C85EF37)인 경우에 대한 만재 등흘수 상태에서의 좌초 시나리오를 보여주고 있다. 이중저 높이에 따른 만재톤수의 감소로 인해 암초는 이중저 구조 내저판으로부터 각각 0.65, 0.52(0.55) 및 0.37(0.45)m 위로 솟아있다. 내저판 높이가 0.65m에 비해 0.75 및 0.85m인 경우에는 각각 0.03 및 0.08m 정도 흘수가 작다. Fig. 4.17은 자유수면에서 1.35m 깊이에 있는 암초에 대한 Ship B의 이중저 구조 내저판 높이 0.65(B65EF65) 및 0.75m(B75EF51)인 경우를 만재 등흘수 상태에서의 좌초 시나리오를 보여주고 있다. 이중저 높이에 따른 만재톤수의 감소로 인해 암초는 내저판으로부터 각각 0.65 및 0.51(0.55)m 위로 솟아있다. 이중저 높이가 0.75m인 경우 0.65m에 비해 0.04m 정도 흘수가 작다.

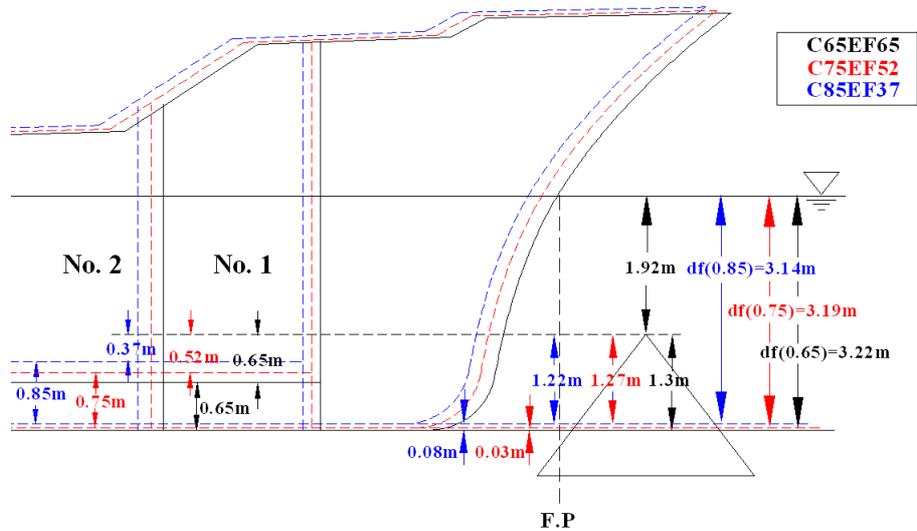


Fig. 4.16 Configuration of Ship C grounding scenario w.r.t. double bottom height

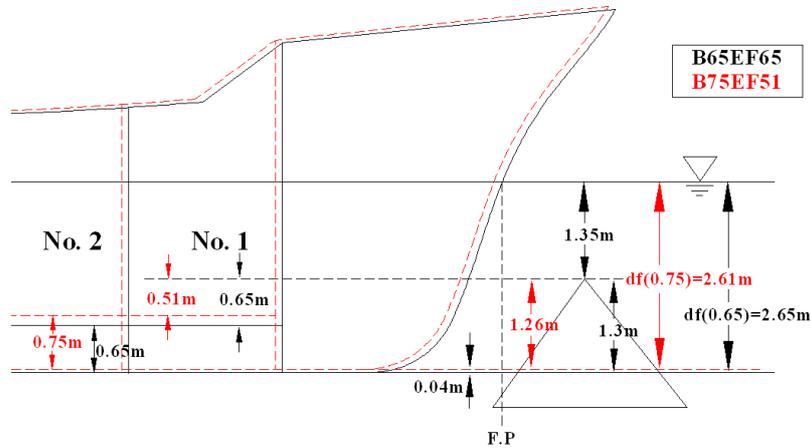


Fig. 4.17 Configuration of Ship B grounding scenario w.r.t. double bottom height

Ship C의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 이중저 구조 내저판 높이가 0.65m인 경우 10노트(C65EF65x10) 및 15노트(C65EF65x15)의 좌초속도에서 내저판에 파단이 발생하였고, 내저판 높이가 0.75m인 경우 10노트(C65EF75x10)와 15노트(C65EF75x15)에서도 내저판에 파단이 발생하지만, 0.65m 이중저 구조 내저판 높이에 비하여 손상 범위가 다소 작다. 내저판 높이가 0.85m인 경우 10노트(C85EF37x10)와 15노트(C85EF37x15)의 내저판에는 파단이 발생하지 않았다. Ship B의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 이중저 구조 내저판 높이가 0.65m인 경우 10노트(B65EF65x10)의 좌초속도에서는 매우 경미하게 내저판에 파단이 발생하였고, 15노트에서는 내저판의 파단이 다소 발생하였다. 이중저 높이가 0.75m인 경우 15노트에서 압초가 선측에 부딪칠 때(B75EF51S10) 내저판에 파단이 매우 미미하게 발생하였다.

내좌초 시뮬레이션을 통하여 이중저 구조 내저판의 높이가 증가함에 따라 내좌초 성능이 더 우수해 진다는 것을 다시 확인할 수 있었다. Ship B의 경우에는 내저판의 높이를 0.75m로, Ship C의 경우는 0.85m로 하는 것이 내좌초에 우수한 이중저 구조가 된다는 것을 알 수 있다.

4.4 화물창 개수에 따른 내좌초 손상 경향

Ship C의 경우에 부록 A의 Fig. A.2(d)~(e)에서와 같이 화물창이 6개인 경우(C65EF65)와 4개인 경우(C65EF65 4 cargo)에 대하여 내좌초 시뮬레이션을 수행하

여 화물창 개수에 따른 내좌초 손상 경향을 살펴보았다. 6개 화물창의 첫 번째와 두 번째 화물창을 합쳐 화물창 4개의 첫 번째 화물창으로 변경하였다. 화물창이 6개인 유조선은 10노트 좌초선속에서 압초가 선폭방향으로 선박의 중심선(C65EF65C10) 상에 부딪칠 경우와 선박 중심선과 선측 거어더 사이(C65EF65B10)에 부딪칠 경우 둘 다 첫 번째 화물창 이내의 내저판에 파단을 발생시킨다. 반면 압초가 선측 거어더(C65EF65S10)에 부딪칠 경우에는 두 번째 화물창 전반부의 내저판까지 파단을 발생시킨다. 그러므로 화물창이 4개인 유조선의 압초가 선측 거어더에 부딪칠 경우(C65EF65S10 4 cargo)에만 6개 화물창 유조선의 첫 번째와 두 번째 화물창 사이의 횡격벽의 영향을 받는다. 이러한 횡격벽의 영향으로 화물창이 6개일 때 보다 손상은 더 길게 발생하지만 내저판의 파단은 상대적으로 짧게 발생한다. 그 이유는 횡격벽이 제거됨에 따라 선측 거어더 부근의 이중저 구조가 보다 유연해지기 때문이다. Fig. 4.18의 두 유조선의 내부에너지, 좌초선속, 수평 및 수직 충돌력의 전반적인 좌초응답과 Fig. 4.19의 각 부재별 내부에너지 응답으로부터 이러한 경향을 확인할 수 있다.

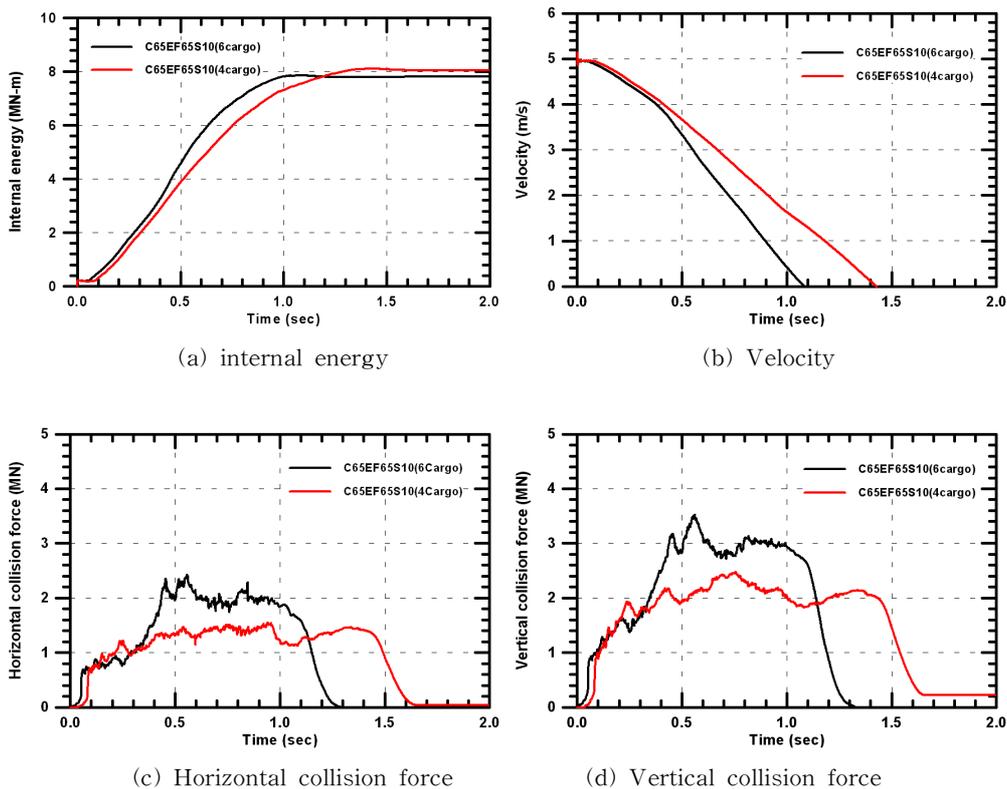


Fig. 4.18 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders

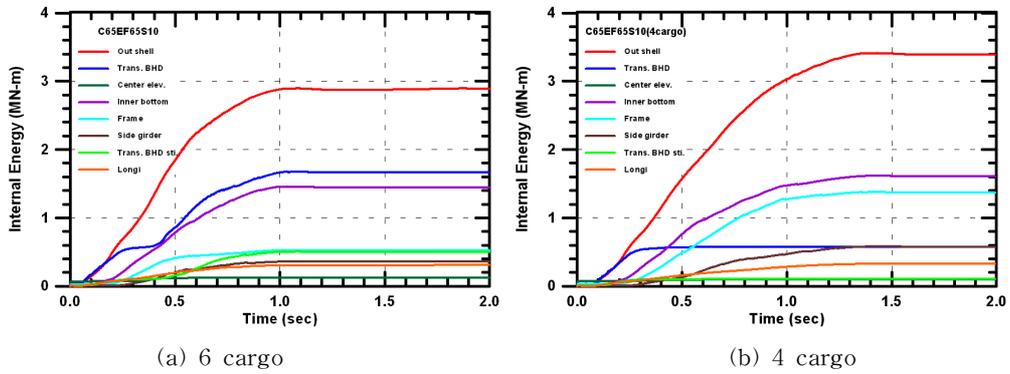


Fig. 4.19 Grounding responses of member internal energy of 6 & 4 cargo holders

15노트 좌초선속에서는 암초가 선폭방향으로 선박의 중앙선(C65EF65C15)과 중앙선과 선측 거어더 사이(C65EF65B15), 선측 거어더(C65EF65S15) 상에 부딪칠 경우 화물창 6개일 경우 내저판에 모두 파단이 발생하지만 4개일 경우는 단지 암초가 선측 거어더에 부딪치는 경우에만 내저판에 파단이 발생하였다. Figs. 4.20~4.22의 두 유조선의 수평 및 수직 충돌력의 좌초응답에서 이러한 경향을 다시 확인할 수 있다.

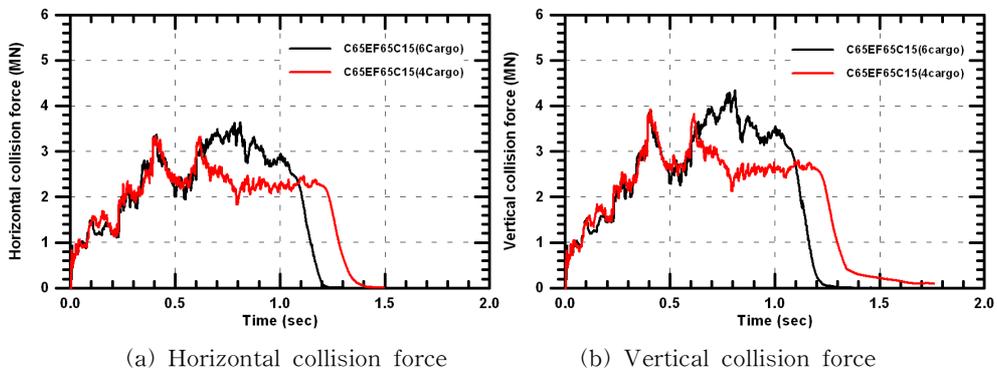
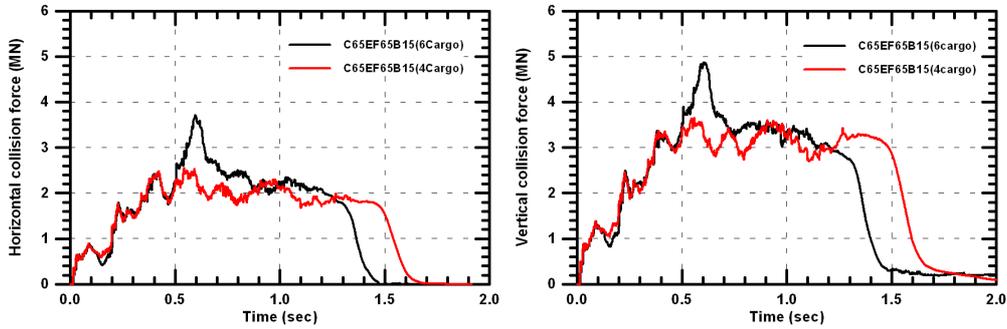


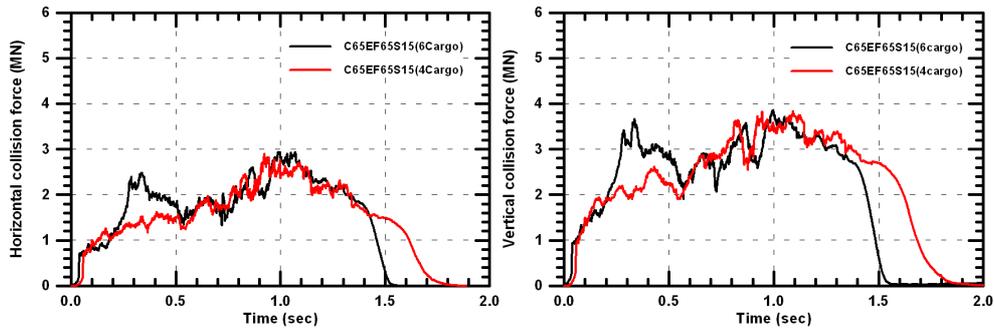
Fig. 4.20 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders with center rock position



(a) Horizontal collision force

(b) Vertical collision force

Fig. 4.21 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders with between rock position



(a) Horizontal collision force

(b) Vertical collision force

Fig. 4.22 Grounding responses of Ship C with 6 & 4 cargo holders with side rock position

4.5 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석 대한 고찰

국내 선박의 좌초사고 관련 손상자료가 매우 부족하여 소형 유조선의 내좌초 구조해석 시나리오를 도출하기 어려웠지만, 암초와 이중저 구조 내저판과의 상하 위치와 선폭방향으로의 위치, 선체의 트림 및 하중상태, 선체의 진행속도 등 내좌초에 대하여 중요한 인자들을 다양하게 고려하여 내좌초 구조해석을 수행하였으며, 다음과 같은 실선 이중저 구조 소형 유조선의 내좌초 구조해석에 대한 결과를 도출할 수 있었다.

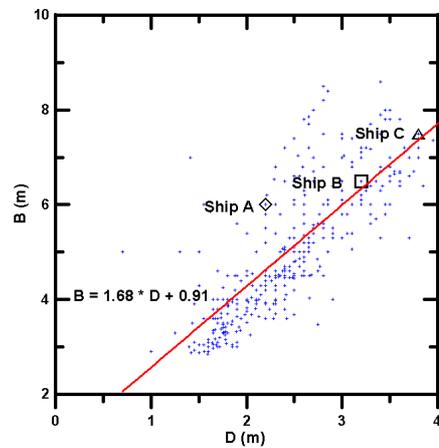
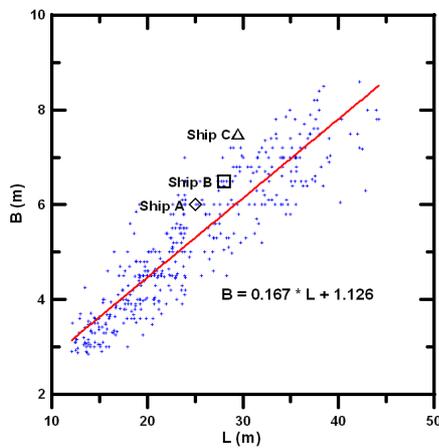
1. 암초의 높이가 이중저 구조 내저판을 기준으로 높이 솟아 있을수록 내저판에

파단이 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 내저판의 파손 경향과는 달리 선저부는 압초 높이가 낮을수록 파손이 길게 발생하지만 파손 범위와 정도는 압초 높이가 높은 경우에 비하여 대체로 작다는 것을 알 수 있었다. 본 실선 이중저 구조 소형 유조선의 내좌초 구조해석을 통하여 이중저 구조가 예상보다 내좌초 성능에 훨씬 더 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 유조선이 일반적으로 압초에 좌초될 때 선저부에 손상이 가장 크게 발생하므로 선저부가 가장 큰 내부에너지를 흡수한다. 이중저 구조 내저판 높이, 압초의 내저판으로부터의 높이 및 선박의 폭 방향으로의 위치에 따라 이중저 구조의 각 부재가 좌초로 인한 내부에너지의 흡수 능력이 달라진다. 전반적인 선박의 내부에너지, 좌초선속, 수평 및 수직 충돌력 등의 좌초응답이외에 이중저 구조의 각 부재가 내좌초에 기여하는 내부에너지의 흡수능력의 분석을 이용하여 내좌초에 우수한 구조부재의 배치 및 크기를 조절할 수가 있다.
3. Ship C 및 B의 이중저 구조 내저판 높이를 각각 0.85 및 0.75m로 높이면 대부분의 본 내좌초 구조해석 시나리오에서 내저판에 파단이 발생하지 않거나 매우 경미하였다. 이는 이중저 구조의 내저판 높이가 높을수록 내좌초에 대해 우수하다는 것을 재확인할 수 있었다. 그러나 Ship A는 앞의 두 선박과 달리 대부분의 내좌초 구조해석 시나리오에서 선저부에 파손은 크게 발생하였지만 파단은 대체로 작았고 내저판에는 파단이 발생하지 않았다. 이것은 Ship A가 다른 두 선박에 비하여 재화중량이 상대적으로 작아 대체로 작은 충돌에너지에 의해 선박에 손상을 작게 주었고, 선저부의 최소 두께로도 상대적으로 내좌초에 크게 기여할 수 있었던 것으로 사료된다.
4. 구조강도 상 적합한 유조선 화물창의 개수를 파악하기 위해 수행한 Ship C의 내좌초 구조해석에서 화물창 수가 4개인 경우가 6개인 경우에 비하여 횡격벽과 내저판이 이루는 선측 이중저 구조가 다소 유연해지므로 같은 조건에서 선저의 손상은 길어지지만, 이중저 구조의 내저판의 파단은 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 내좌초에 보다 우수한 이중저 구조로서는 손상 시 복원 성능에 문제가 없는 범위 내에서 화물창의 개수를 줄이는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

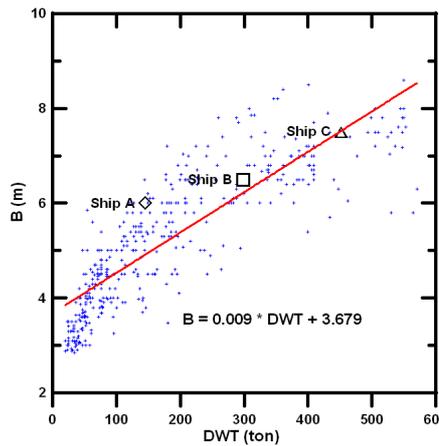
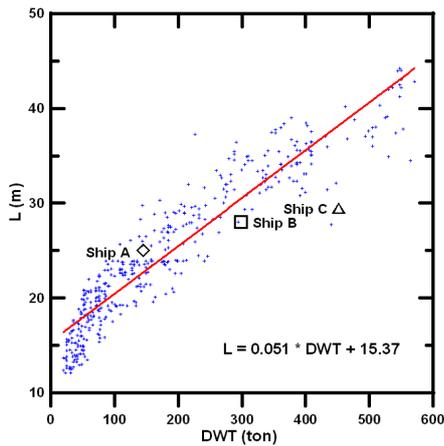
5. 재화중량 500톤 미만 소형 유조선 이중저 구조 검토

4장에서 실선 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석을 수행하기 위하여 Fig. 5.1에서와 같이 현재 국내 운항중인 재화중량 500톤 미만의 소형 유조선의 자료를 기초로 하여 Table 3.1의 단저구조 유조선 Ship A, B 및 C를 이중저 구조로 구조 변경하였으며 변경된 주요제원을 Table 4.2에 요약하였다.



(a) Breadth distribution according to length

(b) Breadth distribution according to depth



(c) length distribution according to DWT

(d) Breadth distribution according to DWT.

Fig. 5.1 Distributions of domestic small oil tankers under DWT 500 ton

Table 5.1에는 구조변경 전 후의 화물창 용적의 변화량과 그 비율을 요약하였고, Fig. 5.2에 재화중량에 대한 분포로 나타내었다. 각 경우의 변경 전 용적은 단저 구조 유조선에서의 화물창 용적을 의미한다.

Table 5.1 Volume change of cargo tank (unit : m³)

	SHIP A			SHIP B			SHIP C		
	before	after	ratio	before	after	ratio	before	after	ratio
065	130.68	98.60	0.75	295.99	246.70	0.83	413.25	355.39	0.86
075				295.99	239.39	0.81	413.25	347.38	0.84
085							413.25	339.29	0.82

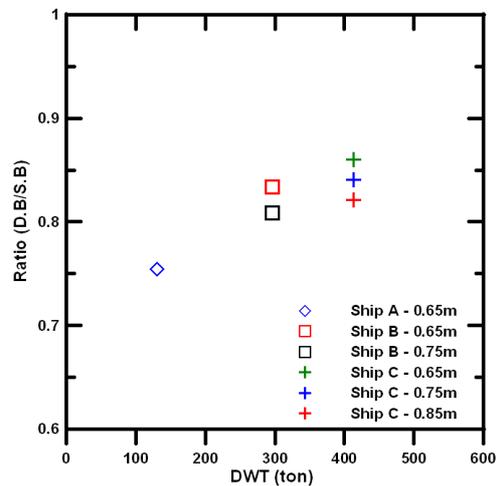


Fig. 5.2 Volume change of cargo tank

이중저 구조의 최소 내저판 높이가 0.65m인 점을 고려한다면 Ship A는 약 75%의 용적률로 떨어지게 되고, Ship B는 약 81~83%, Ship C는 82~86%로 80%를 상회하게 된다. 선박의 크기가 작아질수록 이중저 구조로 인해 용적률이 크게 줄어든다는 것을 확인할 수 있었다. 용적률의 감소로 인한 운송비용 감소는 한국해운조합의 운송비용 산정 근거자료[20]에 의거하여 정리하면 Table 5.2와 같다. 그리고 이중저 구조 건조로 인한 자재 중량 및 개조비 또는 부가 건조비는 Table 5.3에서와 같이 선박의 크기가 작아질수록 이중저 구조의 건조로 인한 중량 및 개조비 또는 부가 건조비의 단저 및 이중저 구조 선체 전체 전체에 대한 비율이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 5.2 Decrement of transportation cost (unit : 원)

	SHIP A			SHIP B			SHIP C		
	volume decrease	short distance	long distance	volume decrease	short distance	long distance	volume decrease	short distance	long distance
065	32.08	115,488	160,400	49.29	177,444	246,450	57.86	208,296	289,300
075				56.60	203,760	283,000	65.87	237,132	329,350
085							73.96	266,256	369,800

Table 5.3 Production cost according to double bottom structure (unit : ton)

Ship type	Ship A	Ship B		Ship C		
D.B. height	0.65m	0.65m	0.75m	0.65m	0.75m	0.85m
Inner bottom	3.762	4.753	5.354	5.166	5.664	6.161
Stiffener	0.812	2.953	3.112	3.491	3.596	3.701
Floor	1.528	1.840	1.923	1.867	1.963	2.058
∑ Double bottom	6.102	9.546	10.389	10.524	11.407	12.326
Single bottom hull	54.050	103.133	103.133	185.130	185.130	185.130
Double bottom hull	60.152	112.679	113.522	195.654	196.537	197.456
Additional cost(만원)	1,830	2,864	3,117	3,157	3,422	3,698
Ratio(%)	11.3/10.1	9.3/8.5	10.7/9.2	5.7/5.4	6.2/5.8	6.7/6.2

* note : 건조비 약 300만원/ton (자재비, 인건비 등 모든 항목 포함)

현재 재화중량 500톤 이상의 유조선에 적용되는 이중저 구조는 해양오염방지법 시행규칙 별표6의 18호에 따라 최소높이가 B/15m 이상이 되어야 하고 최소값은 0.76m(재화중량 600톤 미만의 경우 0.65m) 이상으로 규정하고 있다. 재화중량 2,000톤 미만의 국내 소형 유조선의 재화중량톤수에 대한 선평의 분포를 재화중량톤수에 대한 이중저 구조 내저판 높이 $h=B/15$, $B/12$, $B/10 \sim B/7$ 의 분포로 개조하여 Fig. 5.3에서와 같이 나타내면, 재화중량 500톤~2,000톤 사이의 국내 소형 유조선의 이중저 구조 내저판 높이 $h=B/15$ 는 대부분 0.76m 이하이고, 심지어 최소 이중저 구조 선저높이 0.65m 보다 작다는 것을 알 수 있다. 해양오염방지법 시행규칙 별표6의 18호에 부합하려고 한다면 이중저 구조 내저판 높이는 $h=B/10$ 또는 $B/9$ 이상이 되어야 하고 최소값 0.76m 이상이 되어야 한다고 규정하는 것이 타당할 것이다.

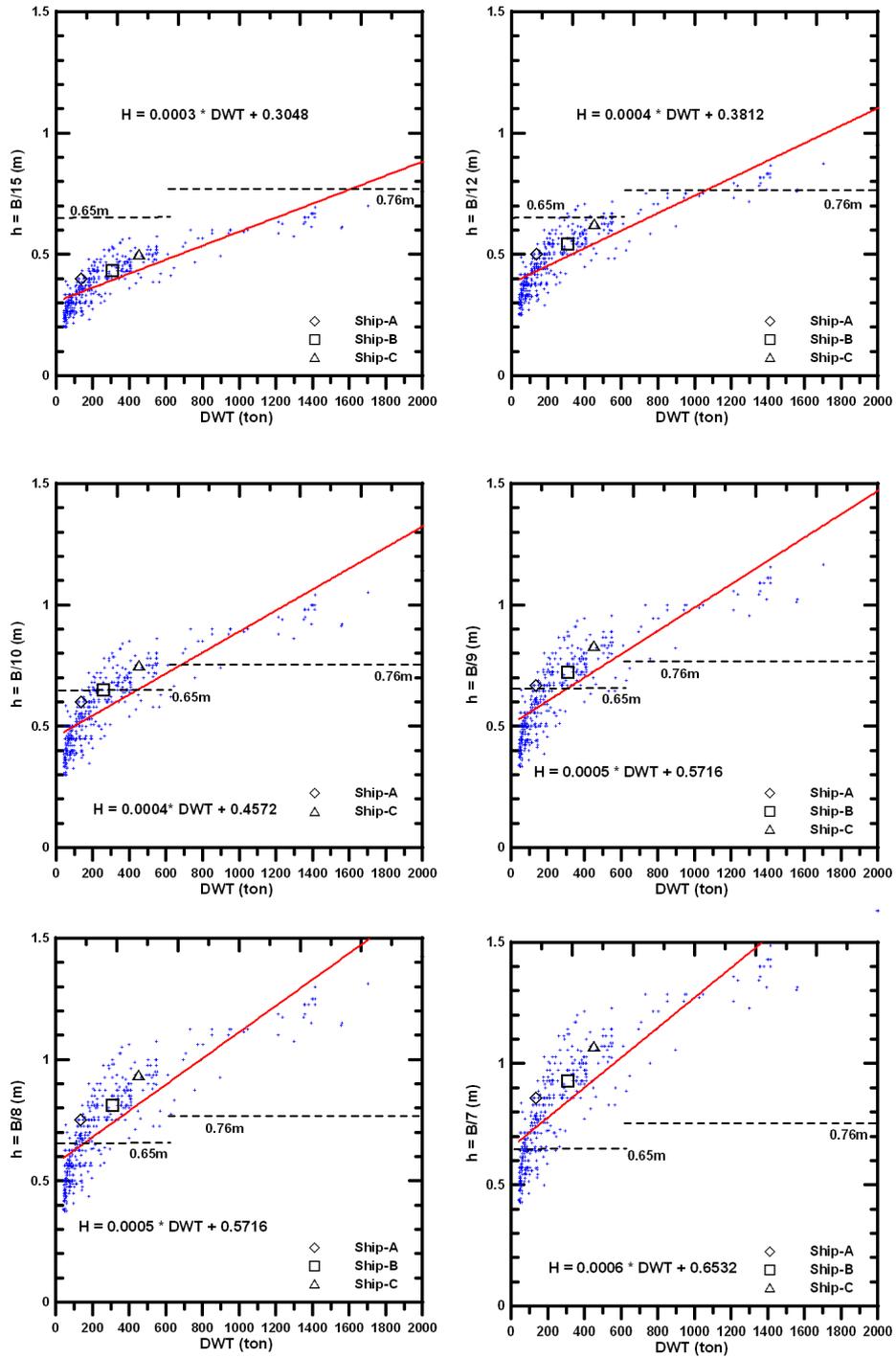


Fig. 5.3 D.B. height distribution of tanker under DWT 2,000 with DWT

Fig. 5.3의 재화중량 2,000톤 미만의 국내 소형 유조선의 재화중량톤수에 대한 내저판 높이 $h=B/15$, $B/12$, $B/10\sim B/7$ 의 분포를 재화중량 600톤 미만의 국내 소형 유조선의 재화중량톤수에 대한 내저판 높이 $h=B/12$, $B/10\sim B/7$ 의 분포로 수정하여 Fig. 5.4에 나타내었다. 이들 구조 변경한 각 이중저 구조 유조선의 재화중량톤수에 대하여 각각의 내저판 높이 $h=B/7\sim B/10$ 의 평균적인 내저판 높이($H=0.00x*DWT + 0.xxx$)에 대응하는 내저판 높이를 Table 5.4에 정리하였다.

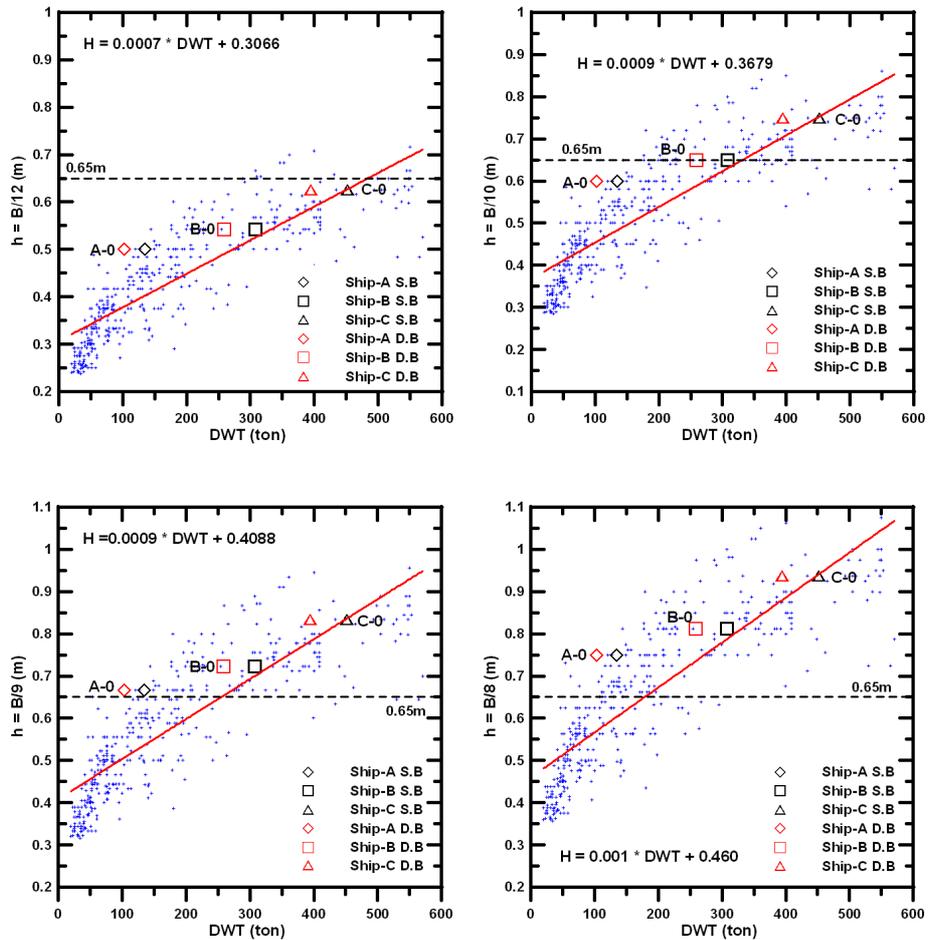


Fig. 5.4 D.B. height distribution of small oil tanker according to DWT (contd.)

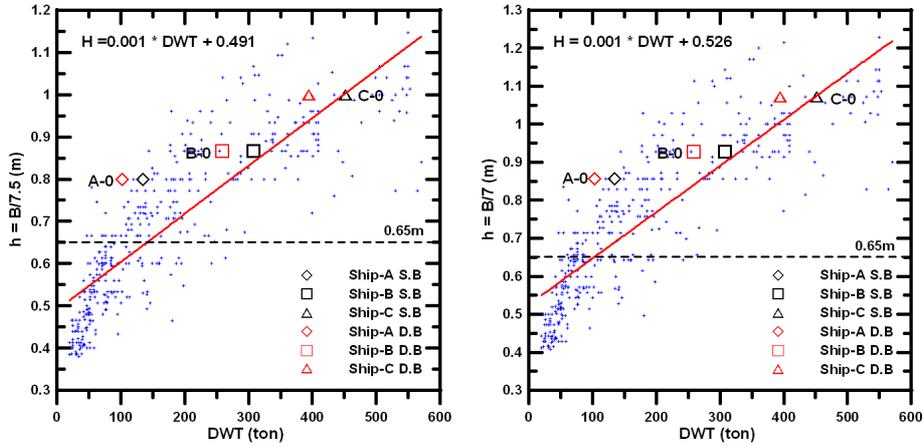


Fig. 5.4 D.B. height distribution of small oil tanker according to DWT

Table 5.4 D.B. height of small oil tanker according to DWT

		DWT(ton)	H=0.00x * DWT + 0.xxx			
			h=B/7	h=B/7.5	h=B/8	h=B/9
Ship A	A-0	116.86	0.64	0.61	0.58	0.51
Ship B	B-0	258.45	0.78	0.75	0.72	0.64
		251.13	0.78	0.74	0.71	0.63
Ship C	C-0	394.20	0.92	0.89	0.85	0.76
		370.94	0.90	0.86	0.83	0.74
		301.28	0.83	0.79	0.76	0.68

4장에서 수행한 3척의 실선 이중저 구조 소형 유조선의 내좌초 구조해석 결과에 의하면 Ship A, B 및 C의 이중저 구조 내저판 높이로서 각각 0.65, 0.75 및 0.85m가 본 연구에서 제안한 내좌초 구조해석 시나리오를 대체로 만족시킨다는 것을 알 수 있었다. 이러한 관점에서 Fig. 5.4와 Table 5.4로부터 재화중량 500톤 미만의 국내 소형 유조선의 이중저 구조 내저판 높이는 $h=B/7.5$ 이상이 되어야 하고 최소값 0.65m 이상이 되는 것이 타당할 것으로 사료된다.

소형 유조선의 이중저 구조로의 구조 변경으로 인하여 재화중량톤수가 작아지면 화물창의 용적률 감소율과 이중저 구조 개조비 비율이 더 커지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 소형 유조선으로서의 경제적인 문제점 이외에, 실선 소형 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석 결과에 의하면 재화중량 약 120톤 정도의 Ship A는 작은 중량으로 인해 상대적으로 큰 유조선에 비하여 내좌초 성능이 대체로 크게 나쁘지 않았다는 점 등을 감안하면 재화중량 약 150톤 미만의 유조선은 이중저 구조의 설치를 면제하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

6. 결 론

MARPOL 73/78의 개정 내용이 2005년 4월 5일 발효됨에 따라 국내에서는 2005년 3월 12일 해양오염방지법시행규칙을 개정하여 단일선체 유조선에 의한 해양오염사고 방지를 위하여 재화중량톤수 500톤 미만의 소형유조선에 대해서도 이중저구조 설치를 의무화하였다. 본 연구개발의 목표는 내좌초에 우수한 500톤 미만의 소형 유조선의 이중저 구조를 개발하고 그에 적합한 이중저 구조 기준을 확립하는 것이다.

내좌초에 우수한 500톤 미만의 소형 유조선의 이중저 구조를 개발하고 그에 적합한 이중저 구조 기준을 확립하고자 다음과 같은 세부연구를 수행하였다.

- 국내 유조선 좌초사고 사례조사/분석
- 국내 소형유조선의 톤급별 단저/이중저구조 형태 분석
- 소형유조선 이중저구조 시공/유지관리 분석을 통한 최소 이중저높이 결정
- 소형 유조선의 단저구조와 이중저구조의 건조선가 비교
- 이중저 설치에 따른 화물창 용적감소 분석
- 유조선 실선 좌초 시뮬레이션을 통한 이중저 내좌초 성능해석
- 소형유조선 이중저구조 기준설정
- 이중저 설치 면제 선박크기 추정

본 연구를 위한 추진전략으로서 LS/DYNA3D code를 이용한 내좌초 구조해석을 수행하는 것으로서 미국 NSWCCD에서 수행한 좌초모형 유조선 실험 결과들을 이용하여 LS/DYNA3D code 및 좌초 수치해석 능력을 검증하고, 국내 소형 단저 및 이중저 구조 유조선과 좌초모형 유조선 실험 모델을 이용하여 내좌초에 우수하고 국내 소형 유조선 이중저에 적합한 이중저 구조 모델을 제안하여 톤급별 소형유조선 전선 내좌초 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

이상의 연구결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 내좌초 구조해석에 사용한 LS/DYNA3D code는 충분한 정도로서 손상을 추정할 수 있었고 본 연구진들의 수치해석 시뮬레이션 해석능력은 본 연구개발 과제를 수행하기에 적합하다고 사료된다. 유한요소 모델로서 상세

유한요소 모델을 사용하는 것이 바람직하고, 파단 발생기준이 되는 파단 변형률은 유한요소의 크기와 관계가 있었다.

2. Small Oil Tanker 선저모델이 다른 모델에 비하여 내좌초에 우수하였으므로 실선 내좌초 구조해석과 손상 시 복원성능 검토에 채택하였다. 부족한 국내 선박의 좌초사고 관련 손상자료로 인해 전형적인 소형 유조선의 내좌초 구조해석 시나리오를 제안하기란 어려웠지만, 내좌초 구조해석에 중요한 인자들을 다양하게 고려하였다.
3. 일반적으로 선저부가 내좌초에 가장 큰 비중을 차지하는 부재이고, 이중저구조 내저판 높이, 암초의 내저판으로부터의 좌초 높이 및 선박의 폭 방향으로의 위치에 따라 이중저 구조의 각 부재의 내좌초 내부에너지의 흡수 능력이 달라진다. 전반적인 좌초응답이외에 각 부재의 내좌초 기여 내부에너지의 흡수능력을 분석함으로써 내좌초에 우수한 이중저 구조를 도출할 수 있음을 확인할 수 있었다.
4. 암초가 이중저 구조 내저판보다 높이가 높을수록 내저판에 파단이 발생할 가능성이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 본 실선 이중저 구조 소형 유조선의 내좌초 구조해석을 통하여 이중저 구조가 예상보다 내좌초 성능에 훨씬 더 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 이중저 구조의 내저판 높이가 크면 클수록 내좌초에 우수하지만, Ship A, B 및 C의 이중저 구조 내저판 높이로서 각각 0.65, 0.75 및 0.85m 이상이 적합하다고 사료된다.
5. 내좌초에 보다 우수한 이중저 구조로서는 손상 시 복원성능에 문제가 없는 범위 내에서 화물창의 개수를 줄이는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 재화중량 500톤 미만의 국낸 소형 유조선의 이중저 구조 내저판 높이는 $h=B/7.5$ 이상이 되어야 하고 최소값 0.65m 이상이 되는 것이 타당할 것으로 사료된다.

6. 소형 유조선의 이중저 구조로의 구조 변경으로 인하여 재화중량톤수가 작아지면 화물창의 용적률 감소율과 이중저 구조 개조비 비율이 더 커지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 소형 유조선으로서의 경제적인 문제점 이외에, 실선 소형 이중저 구조 유조선의 내좌초 구조해석 결과에 의하면 재화중량 약 150톤 미만의 유조선은 이중저 구조의 설치를 면제하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

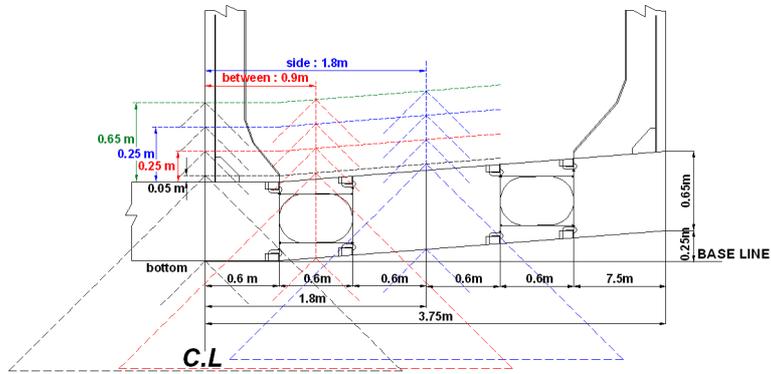
참 고 문 헌

- [1] LSTC, LS/DYNA3D User's manual, Version 970, (2004), Livermore Soft Technology Corporation, USA.
- [2] Kim, J.Y., Lee, K.J., Kang, J.M. and Kim, D.H., 1995, "Behavior of Double Hull VLCCs in Collision," The 6th International Symposium PRADS, pp. 2.857-2.868.
- [3] Che, J.S. and Jang, G.B., (1995), "Numerical Simulation of Structural Response of D/H VLCC in Collision," The 6th International Symposium PRADS, pp. 2.1036-2.1047.
- [4] Lee, S.G., Shin, Y., Song, M. and Jang, H. (2001), "Crashworthy structural design of bow structure," The 15th TEAM, pp/ 124-135, Jochiwon, Korea.
- [5] Rodd, J.L. and Sikora, J.P. (1995), "Double Hull Grounding Experiments", Proc. of 5th ISOPE, pp. 446-456, Hague, Netherlands.
- [6] Card, J.C. (1975), "Effectiveness of Double Bottoms in Preventing Oil Outflow from Tanker Double Bottoms", Marine Technology.
- [7] ASIS, (1993) The Conference on "Prediction Methodology of Tanker Structural Failure & Consequential Oil Spill", Association of Structural Improvement Shipbuilding Industry of Japan, III.9~III.47.
- [8] Ludolph, J.W.L., Wevers, L.J. and Vredeveldt, A.W., (1995), "Full Scale Ship Grounding Experiments with Modified Double Hull Structure", SAVIAC
- [9] Kuroiwa, T., Kawamoto, Y. and Yuhara, T., (1992), "Study on Damage of Ship Bottom Structure due to Grounding", The 1st Joint Conference on Marine Safety and Environment/Ship Production, Delft University of Technology.
- [10] Kuroiwa, T., (1996), "Numerical Simulation of Actual Collision and Grounding Experiments", Proceedings of the International Conference on Design and Methodology for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco.
- [11] Rodd, J.L. (1996a), "Large Scale Tanker Grounding Experiments", Proc. of the 6th ISOPE, pp. 1-12, LA, USA.

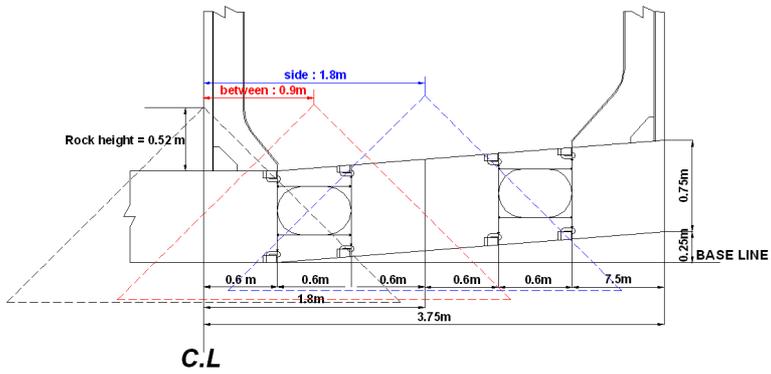
- [12] J.L. Rodd, (1996b), "Observations on conventional and advanced double hull grounding experiments", Conf. of Designs and Methodologies for Collisions and Grounding Protection of Ships, San Francisco, USA, pp. 13.1-13.13.
- [13] Simonsen, B.C., (1988), "DAMAGE Theory Validation", Report No. 63, Joint MIT-Industry Program on Tanker Safety.
- [14] Zhang, S. (1999), The Mechanics of Ship Collision, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- [15] Simonsen, B.C., Lutzen, M. and Tornqvist, R. (2004), MCA Research Project 501: HSC ranking damage, Technical Report Mo. 1-5, Maritime and Coastguard Agency, UK.
- [16] Tornqvist, R. and Simonsen, B.C. (2004), "Safety and structural crashworthiness of ship structures: Modeling tools and application in design", The 3rd ICCGS, Izu, Japan.
- [17] Kajaste-Rudnitski, J., Varsta, P.M. and Matusiak, J.E., (2004), "Dynamics of ship grounding, PRADS, Luebeck-Travemuende, Germany.
- [18] Jastrzebski, T., Taczala, M. and Grabowiecki, K. (2004), "Numerical simulation of crash and grounding of inland waterway transportation barges", PRADS, Luebeck-Travemuende, Germany.
- [19] Tornqvist R., 2003, Design of Crashworthy Ship Structures, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark.
- [20] 한국해운조합 (2007), "500톤급 유조선 이중선체 설계연구 관련 자료".

부록 A

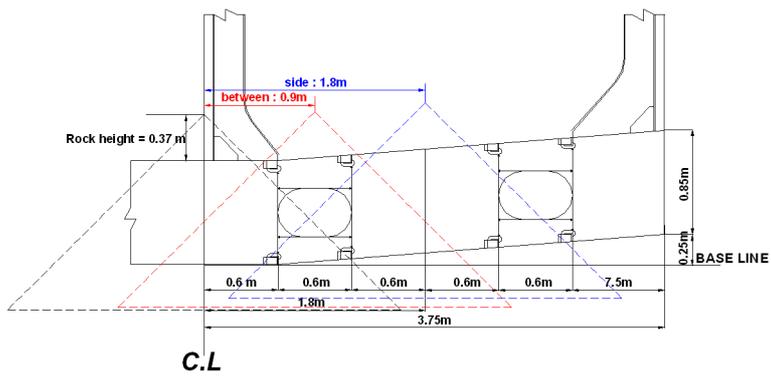
내좌초 구조해석 시나리오



(a) C65EFxx

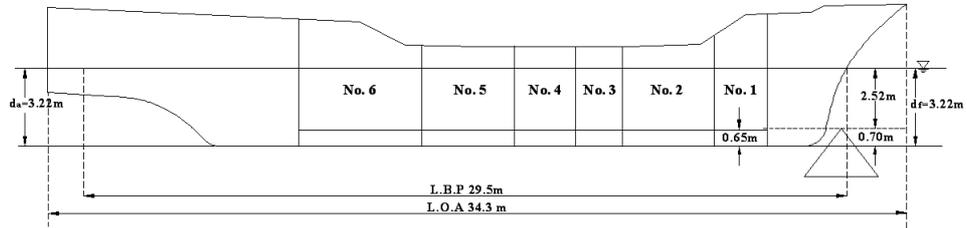


(b) C75EF52

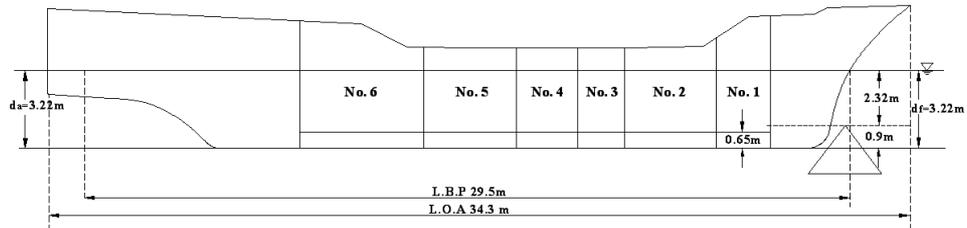


(c) C85EF37

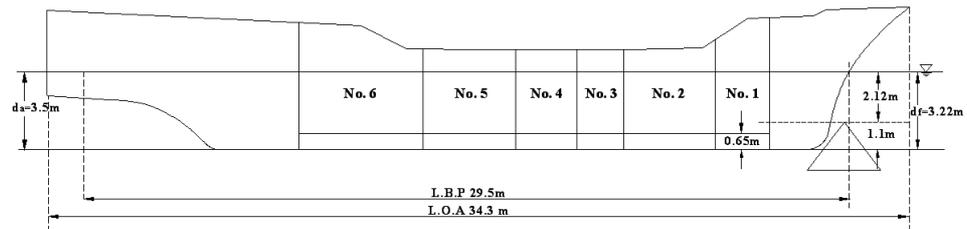
Fig. A.1 Configuration of rock position and height in Ship C



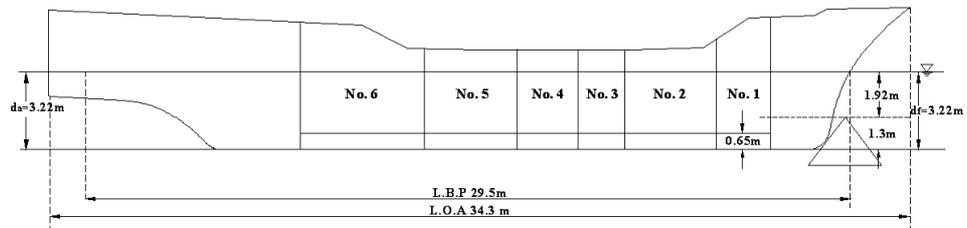
(a) C65EF05



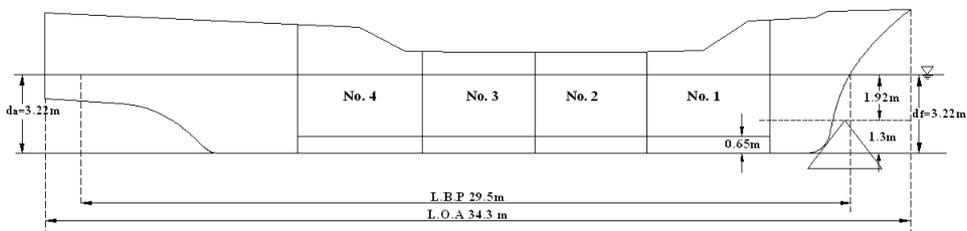
(b) C65EF25



(c) C65EF45

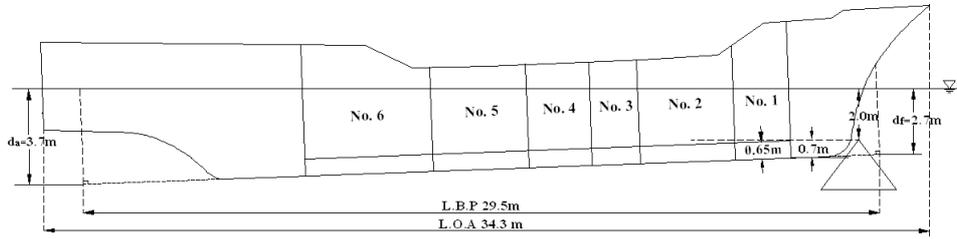


(d) C65EF65

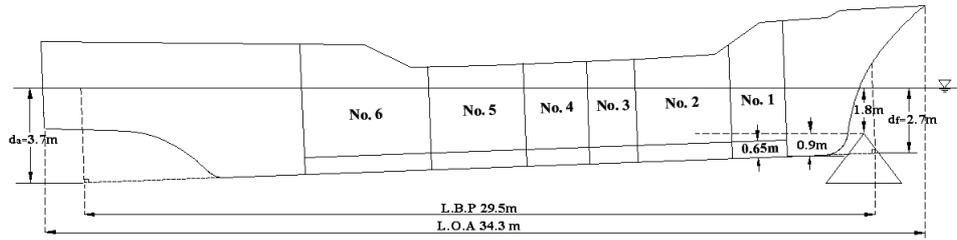


(e) C65EF65(4 cargo)

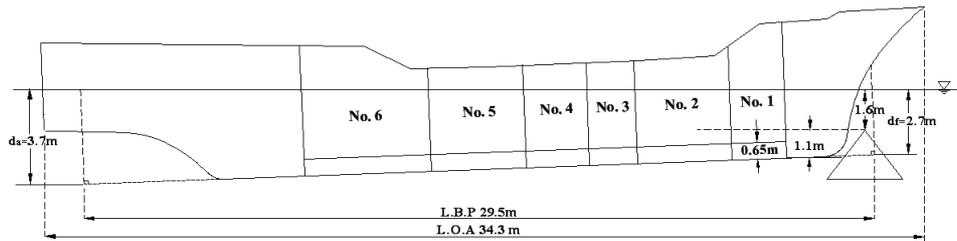
Fig. A.2 Configuration of Scenario in Ship C (continued)



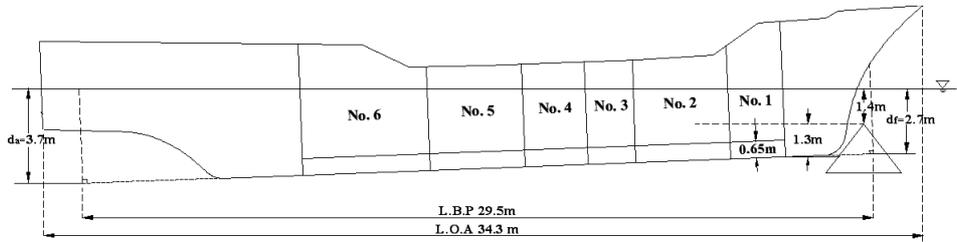
(f) C65TF05



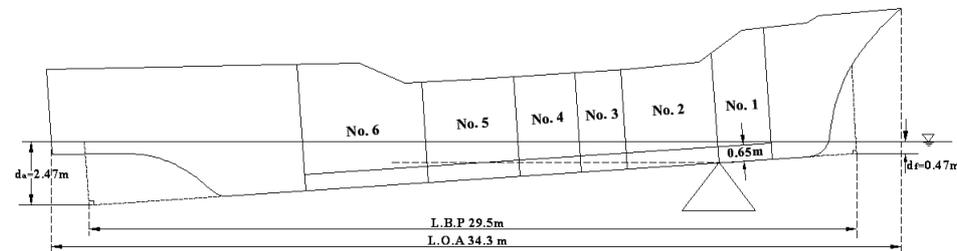
(g) C65TF25



(h) C65TF45

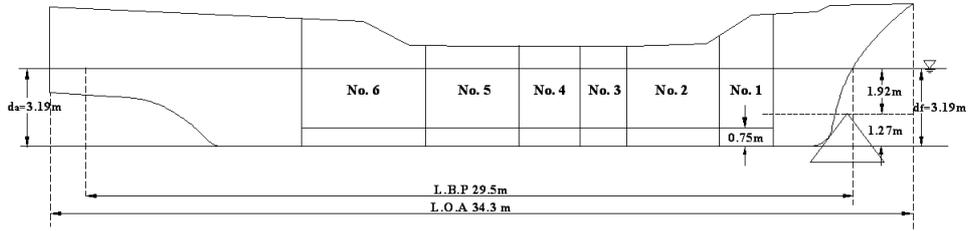


(i) C65TF65

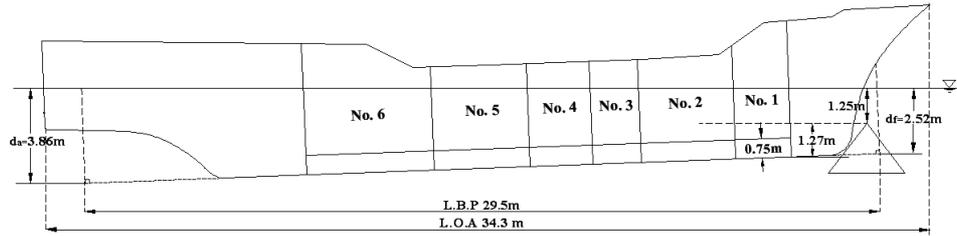


(j) C65TB8

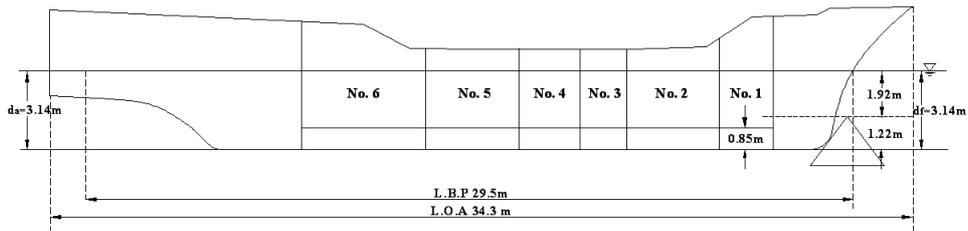
Fig. A.2 Configuration of Scenario in Ship C (continued)



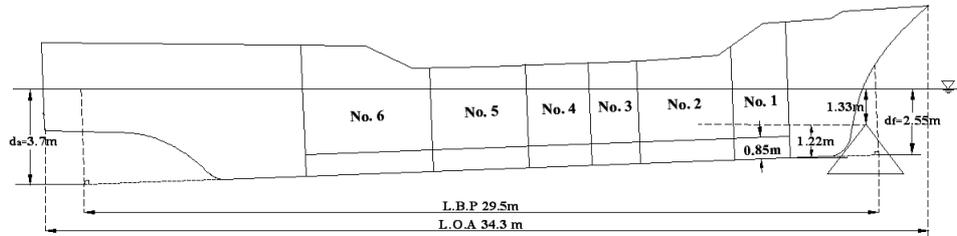
(k) C75EF52



(l) C75TF52

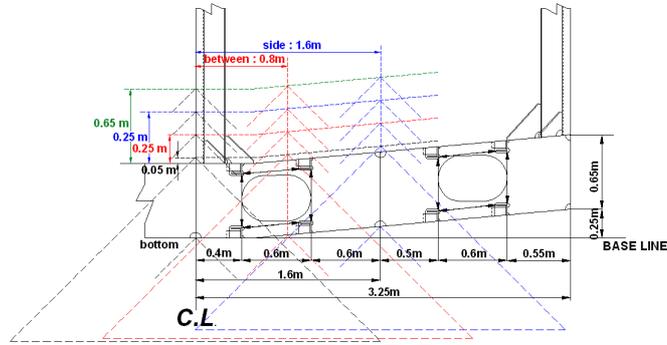


(m) C85EF37

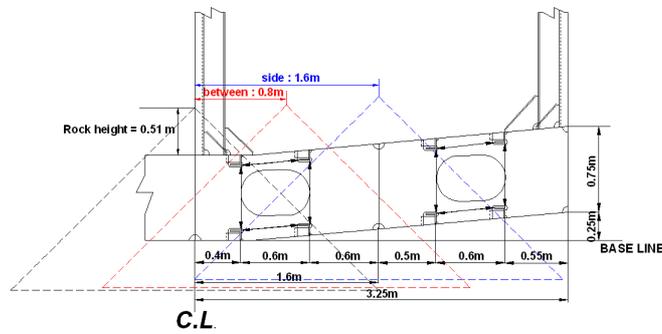


(n) C85TF37

Fig. A.2 Configuration of Scenario in Ship C

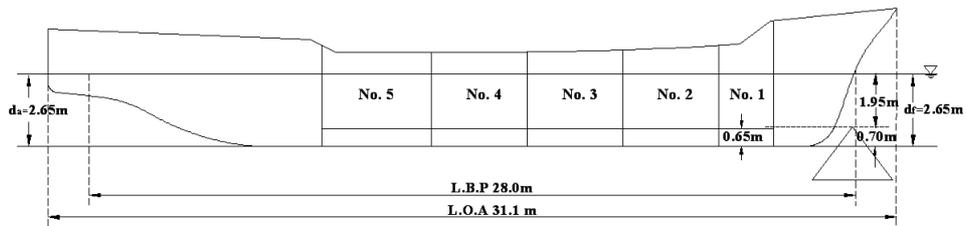


(a) B65EFxx

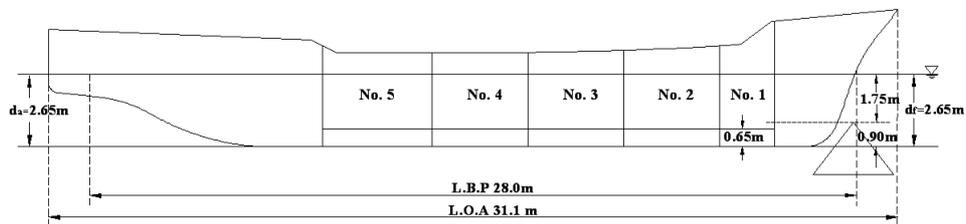


(b) B75EF51

Fig. A.3 Configuration of rock position and height in Ship B

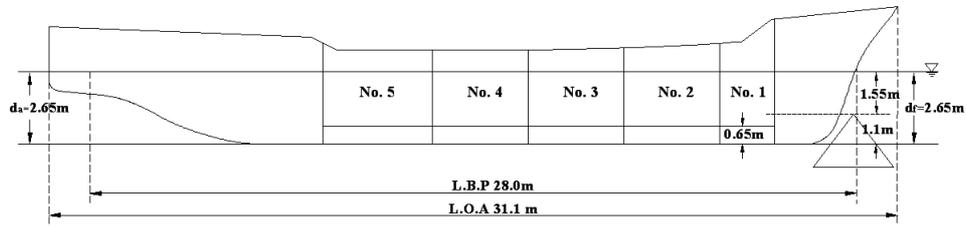


(a) B65EF05

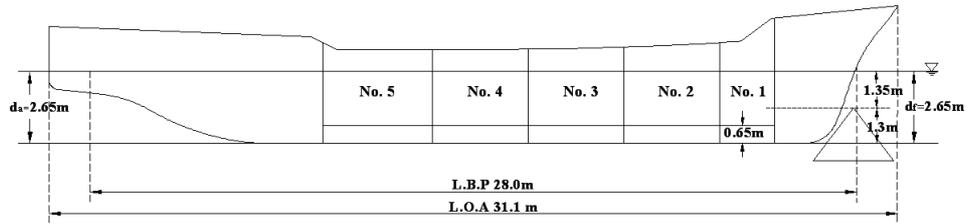


(b) B65EF25

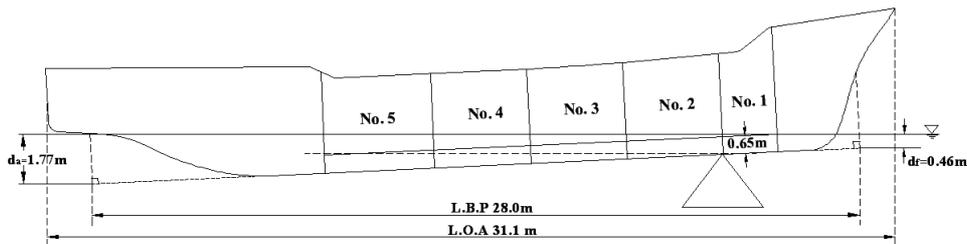
Fig. A.4 Configuration of Scenario in Ship B (continued)



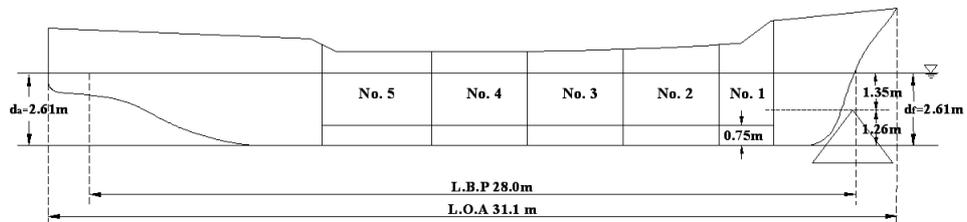
(c) B65EF45



(d) B65EF65

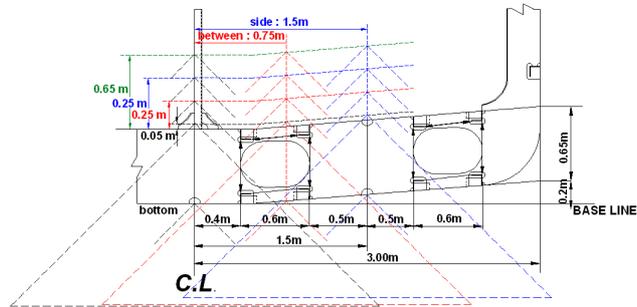


(e) B65TBB



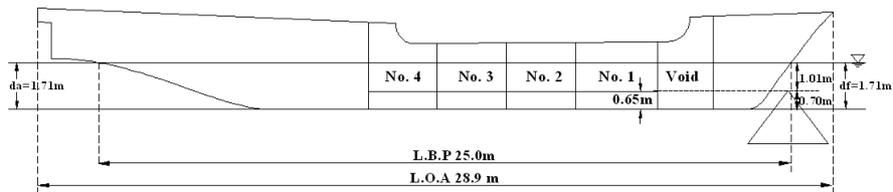
(f) B75EF51

Fig. A.4 Configuration of Scenario in Ship B

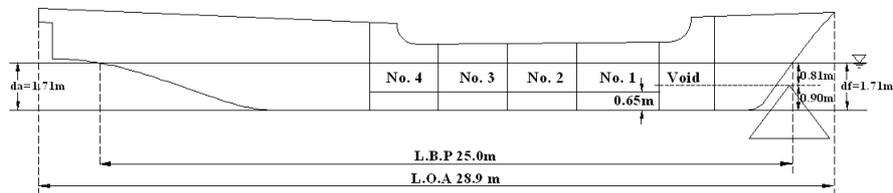


(a) A65EFxx

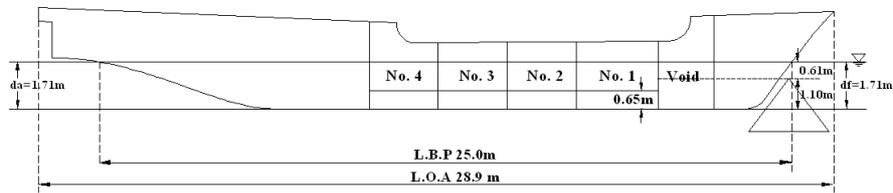
Fig. A.5 Configuration of rock position and height in Ship A



(a) A65EF05

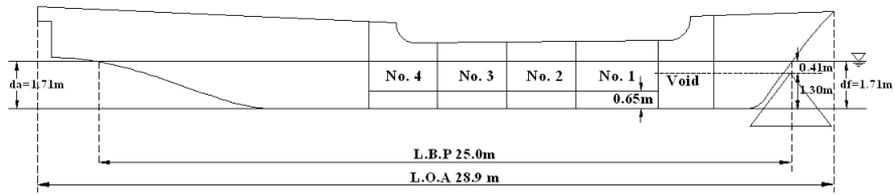


(b) A65EF25

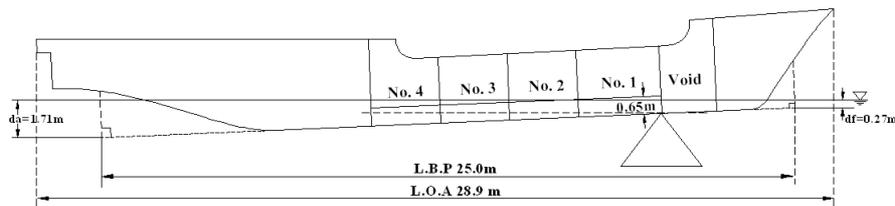


(c) A65EF45

Fig. A.6 Configuration of Scenario in Ship A (continued)



(d) A65EF65



(e) A65TB8

Fig. A.6 Configuration of Scenario in Ship A

부록 B

내좌초 구조해석 파손 결과 정리표

Table B.1 Summary of damage results of Ship C (continued)

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
C65EF05C10	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	-
	3.80	2.55	-
C65EF05B10	forebody ~ No.3 fore C.T.	No.1 mid ~ No.3 fore C.T.	-
	6.65	4.60	-
C65EF05S10	No.1 fore ~ No.3 mid C.T.	No.1 after ~ No.3 mid C.T.	-
	5.74	4.75	-
C65EF25C10	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	-
	3.11	1.48	-
C65EF25B10	forebody ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ No.2 mid C.T.	-
	4.14	1.95	-
C65EF25S10	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 mid C.T.	-
	4.53	3.27	-
C65EF45C10	forebody	forebody	-
	2.92	0.20	-
C65EF45B10	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 fore ~ mid C.T.	-
	3.61	1.35	-
C65EF45S10	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.
	3.70	1.81	1.06
C65EF65C10	forebody	forebody	-
	2.74	0.74	-
C65EF65B10	forebody ~ No.1 fore C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.
	3.38	0.15	0.14
C65EF65S10	No.1 fore ~ after C.T.	No.1 mid ~ after C.T.	No.1 mid ~ after C.T.
	3.12	0.91	1.04
C65EF65C10 (4 cargo)	forebody	forebody	-
	2.76	0.85	-
C65EF65B10 (4 cargo)	orebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.
	3.37	0.28	0.16
C65EF65S10 (4 cargo)	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 after ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid C.T.
	3.93	0.72	0.40
C65EF65C15	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 mid C.T.	No.1 fore C.T.
	4.60	0.83	0.28
C65EF65B15	forebody ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ No.2 mid C.T.	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.
	5.37	1.90	2.58
C65EF65S15	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.
	5.75	4.00	3.73

Table B.1 Summary of damage results of Ship C (continued)

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
C65EF65C15 (4 cargo)	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	-
	4.84	2.62	-
C65EF65B15 (4 cargo)	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 fore ~ after C.T.	-
	5.87	3.51	-
C65EF65S15 (4 cargo)	No.1 fore ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ after C.T.
	6.43	3.98	3.13
C65TF05C10	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	-
	3.62	1.48	-
C65TF05B10	forebody ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.	-
	5.647	3.91	-
C65TF05S10	No.1 fore ~ No.2 after C.T.	No.1 after ~ No.3 fore C.T.	-
	5.15	3.89	-
C65TF25C10	forebody ~ No.1 fore C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	-
	3.16	0.67	-
C65TF25B10	forebody ~ No.1 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.	-
	3.74	1.56	-
C65TF25S10	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 after ~ No.2 after C.T.	-
	4.19	2.38	-
C65TF45C10	forebody	forebody	-
	2.92	0.44	-
C65TF45B10	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 mid C.T.	-
	3.53	0.54	-
C65TF45S10	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ after C.T.
	3.60	1.50	0.99
C65TF65C10	forebody	forebody	-
	2.75	0.55	-
C65TF65B10	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.
	3.26	0.45	0.25
C65TF65S10	No.1 fore ~ after C.T.	No.1 mid ~ after C.T.	No.1 mid ~ after C.T.
	3.09	0.72	0.91
C65TF65C15	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 fore ~ mid C.T.
	4.50	1.67	1.1
C65TF65B15	forebody ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.	No.1 fore ~ No.2 fore C.T.
	5.04	1.48	1.97
C65TF65S15	forebody ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.
	5.41	3.23	3.08

Table B.1 Summary of damage results of Ship C (continued)

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
C65TBBC10	No.2 mid ~ No.4 fore C.T.	No.2 mid ~ No.4 fore C.T.	-
	5.00	2.37	-
C65TBBB10	No.2 mid ~ No.4 mid C.T.	No.3 after ~ No.4 after C.T.	-
	5.61	3.04	-
C65TBBS10	No.2 after ~ No.4 after C.T.	No.3 after ~ No.4 after C.T.	-
	4.52	2.98	-
C65TBBC15	No.2 mid ~ No.5 fore C.T.	No.3 fore ~ No.5 fore C.T.	-
	7.18	4.81	-
C65TBBB15	No.2 mid ~ No.5 mid C.T.	No.3 after ~ No.5 after C.T.	-
	8.31	6.02	-
C65TBBS15	No.2 after ~ No.5 after C.T.	No.3 after ~ No.5 after C.T.	-
	6.95	5.62	-
C75EF52C10	forebody	forebody	-
	2.81	0.41	-
C75EF52B10	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.	-
	3.40	0.23	-
C75EF52S10	forebody ~ No.1 after C.T.	No.1 mid C.T.	No.1 mid ~ after C.T.
	3.13	0.56	1.35
C75EF52C15	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 after C.T.	No.1 fore ~ mid C.T.
	4.58	1.73	0.92
C75EF52B15	forebody ~ No.2 mid C.T.	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 fore C.T.
	5.63	3.34	0.17
C75EF52S15	No.1 fore ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.
	5.85	4.34	4.07
C75TF52C10	forebody	forebody	-
	2.71	0.56	-
C75TF52B10	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.	-
	3.16	0.55	-
C75TF52S10	forebody ~ No.1 after C.T.	No.1 mid C.T.	-
	2.94	0.46	-
C75TF52C15	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 after C.T.	No.1 fore C.T.
	4.44	1.81	0.25m
C75TF52B15	forebody ~ No.2 fore C.T.	No.1 fore ~ No.2 fore C.T.	No.2 fore C.T.
	4.96	2.51	0.32
C75TF52S15	No.1 fore ~ No.2 after C.T.	No.1 mid ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.
	5.14	3.25	1.07

Table B.1 Summary of damage results of Ship C

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
C85EF37C10	forebody	forebody	-
	2.65	0.46	-
C85EF37B10	forebody ~ No.1 fore C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	-
	3.60	0.21	-
C85EF37S10	No.1 fore ~ after C.T.	No.1 fore ~ after C.T.	-
	3.23	1.00	-
C85EF37C15	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	-
	4.39	2.43	-
C85EF37B15	forebody ~ No.2 mid C.T.	forebody ~ No.2 mid C.T.	-
	5.72	3.05	-
C85EF37S15	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.	-
	5.77	3.75	-
C85TF37C10	forebody	forebody	-
	2.71	0.82	-
C85TF37C10	forebody ~ No.1 fore C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	-
	3.19	0.47	-
C85TF37C10	No.1 fore ~ after C.T.	No.1 mid ~ after C.T.	-
	2.77	0.75	-
C85TF37C15	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	-
	2.72	2.31	-
C85TF37C15	forebody ~ No.2 mid C.T.	forebody ~ No.2 mid C.T.	-
	5.02	2.89	-
C85TF37C15	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 mid ~ No.2 after C.T.	-
	5.13	3.67	-

Table B.2 Summary of damage results of Ship B (continued)

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
B65EF05C10	forebody ~ No.1 fore C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	-
	3.02	0.45	-
B65EF05B10	No.1 fore ~ No.2 fore C.T.	No.1 fore ~ No.2 fore C.T.	-
	4.03	2.61	-
B65EF05S10	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	No.1 after ~ No.2 mid C.T.	-
	3.81	2.52	-
B65EF25C10	forebody	forebody	-
	2.67	0.36	-
B65EF25B10	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 mid C.T.	-
	3.41	0.62	-
B65EF25S10	No.1 fore ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.	-
	2.83	0.89	-
B65EF45C10	forebody	forebody	-
	2.63	0.25	-
B65EF45B10	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.	-
	2.90	0.15	-
B65EF45S10	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 mid C.T.	No.1 fore C.T.
	2.48	0.51	0.07
B65EF65C10	forebody	forebody	-
	2.57	0.29	-
B65EF65B10	forebody	-	-
	2.62	-	-
B65EF65S10	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 mid C.T.	No.1 fore C.T.
	2.31	0.26	0.07
B65EF65C15	forebody ~ No.1 fore C.T.	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.
	3.80	0.40	0.15
B65EF65B15	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 fore C.T.	No.1 mid C.T.
	3.94	0.38	0.40
B65EF65S15	forebody ~ No.2 fore C.T.	No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ No.2 fore C.T.
	3.84	0.68	1.58
B65TBBC10	No.2 fore ~ after C.T.	-	-
	3.47	-	-
B65TBBB10	No.2 fore ~ after C.T.	No.2 mid C.T.	-
	3.48	0.77	-
B65TBBS10	No.2 fore ~ after C.T.	No.2 mid C.T.	-
	2.46	1.21	-

Table B.2 Summary of damage results of Ship B

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
B65TBBC15	No.2 fore ~ 3 mid C.T.	No.3 fore ~ mid C.T.	-
	4.39	1.89	-
B65TBBB15	No.2 fore ~ 3 mid C.T.	No.2 after ~ 3 mid C.T.	-
	4.94	2.82	-
B65TBBS15	No.2 fore ~ 3 fore C.T.	No.2 mid ~ 3 for C.T.	-
	3.69	2.63	-
B75EF51C10	forebody	forebody	-
	2.48	0.35	-
B75EF51B10	forebody	-	-
	2.68	-	-
B75EF51S10	forebody ~ No.1 mid C.T.	forebody ~ No.1 mid C.T.	-
	2.24	0.20	-
B75EF51C15	forebody ~ No.1 fore C.T.	No.1 fore C.T.	-
	3.67	0.41	-
B75EF51B15	forebody ~ No.1 mid C.T.	No.1 fore C.T.	-
	3.99	0.21	-
B75EF51S15	forebody ~ No.2 fore C.T.	No.1 mid ~ after C.T.	No.1 mid ~ after C.T.
	3.70	0.72	1.39

Table B.3 Summary of damage results of Ship A (continued)

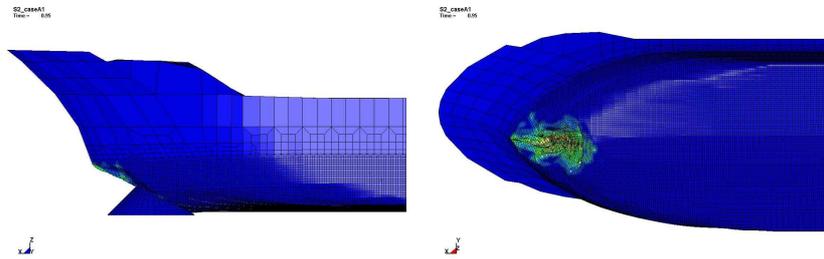
case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
A65EF05C10	forebody	forebody	-
	1.76	0.14	-
A65EF05B10	forebody ~ void	-	-
	2.67	-	-
A65EF05S10	forebody ~ void	-	-
	2.46	-	-
A65EF25C10	forebody	forebody	-
	1.71	0.07	-
A65EF25B10	forebody	forebody	-
	2.13	0.07	-
A65EF25S10	forebody ~ void	-	-
	2.36	-	-
A65EF45C10	forebody	forebody	-
	1.58	0.14	-
A65EF45B10	forebody	forebody	-
	1.86	0.07	-
A65EF45S10	forebody ~ void	-	-
	2.01	-	-
A65EF65C10	forebody	forebody	-
	1.51	0.14	-
A65EF65B10	forebody	forebody	-
	1.80	0.27	-
A65EF65S10	forebody	-	-
	1.92	-	-
A65EF65C15	forebody	forebody	-
	2.60	0.32	-
A65EF65B15	forebody	forebody	-
	2.85	0.31	-
A65EF65S15	forebody ~ void	-	-
	3.10	-	-
A65TBBC10	No.1 fore ~ 1 after C.T.	-	-
	2.66 m	-	-
A65TBBB10	No.1 fore ~ 2 fore C.T.	-	-
	3.00 m	-	-
A65TBBS10	No.1 fore ~ 1 after C.T.	-	-
	2.24 m	-	-

Table B.3 Summary of damage results of Ship A

case	rock penetration length(m)	fracture length(m)	
		bottom	inner bottom
A65TBBC15	No.1 fore ~ No.2 mid C.T.	-	-
	3.94	-	-
A65TBBB15	No.1 fore ~ No.2 after C.T.	-	-
	4.52	-	-
A65TBBS15	No.1 fore ~ after C.T.	No.1 after C.T.	-
	2.79	0.42	-

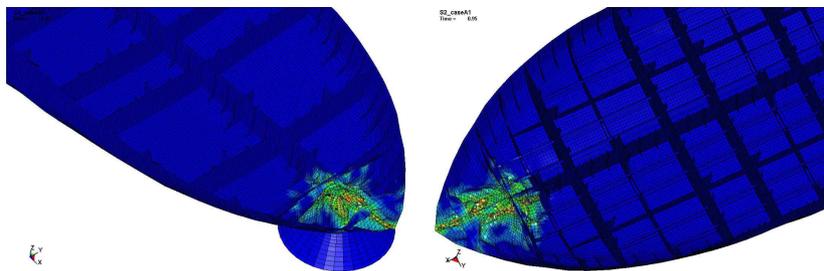
부록 C

내좌초 구조해석 파손 결과



(a) side view

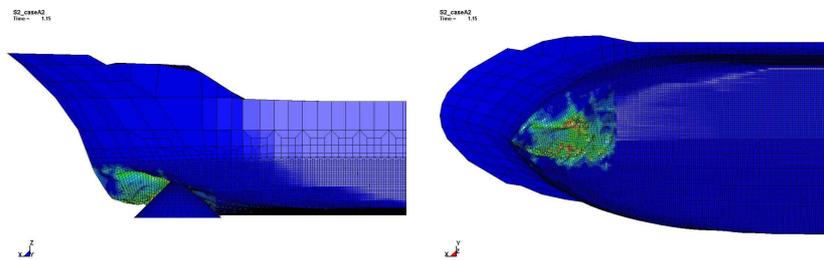
(b) bottom view



(c) inner bottom

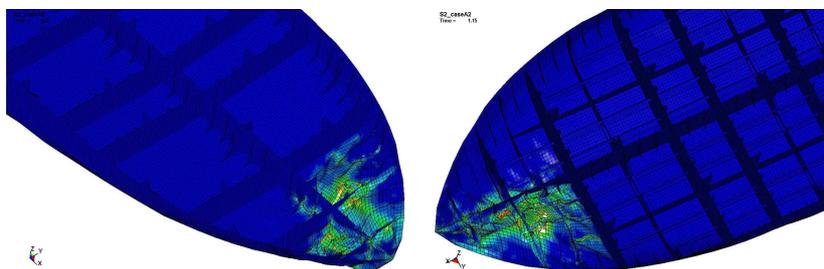
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.1 Damage configuration of C65EF65C10



(a) side view

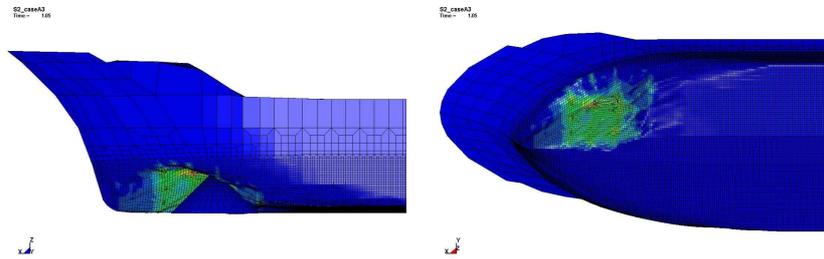
(b) bottom view



(c) inner bottom

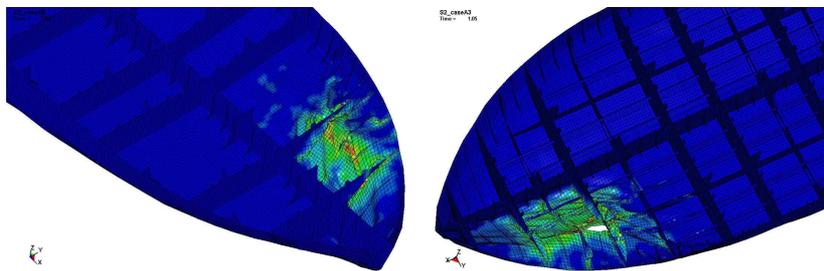
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.2 Damage configuration of C65EF65B10



(a) side view

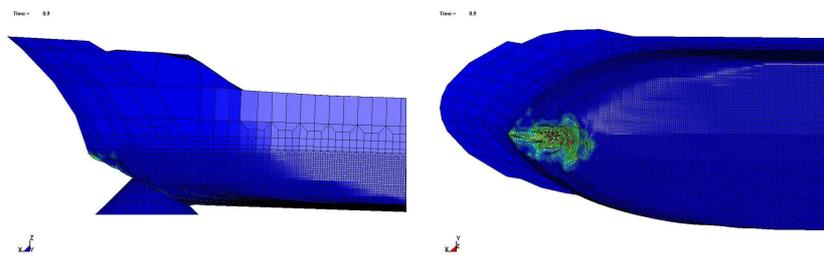
(b) bottom view



(c) inner bottom

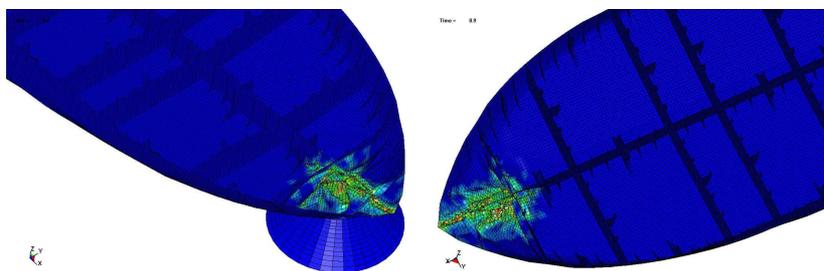
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.3 Damage configuration of C65EF65S10



(a) side view

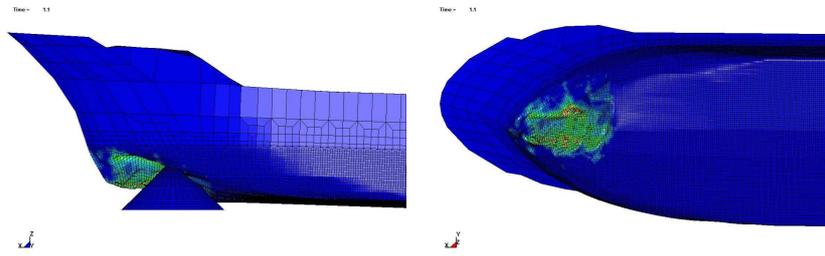
(b) bottom view



(c) inner bottom

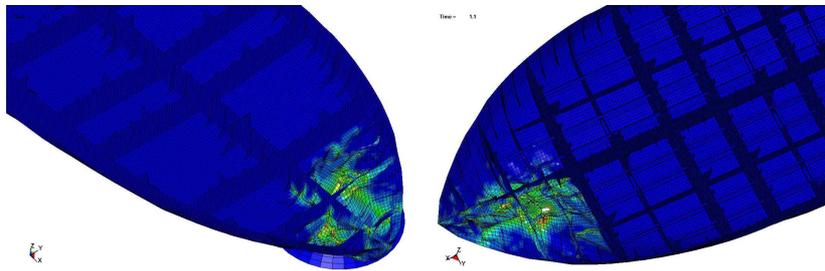
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.4 Damage configuration of C65TF65C10



(a) side view

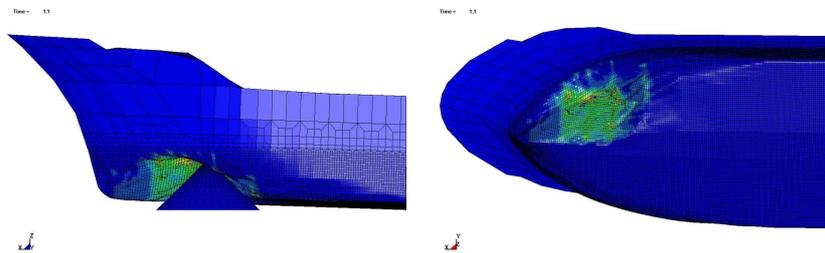
(b) bottom view



(c) inner bottom

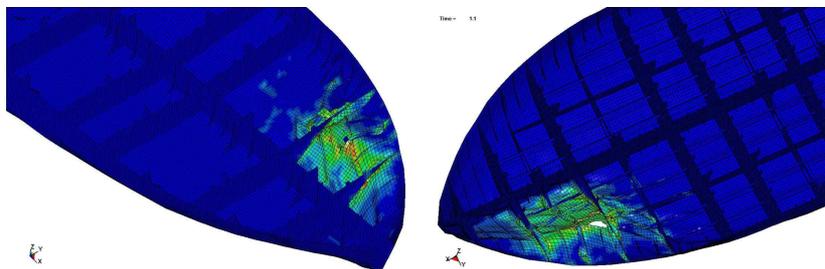
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.5 Damage configuration of C65TF65B10



(a) side view

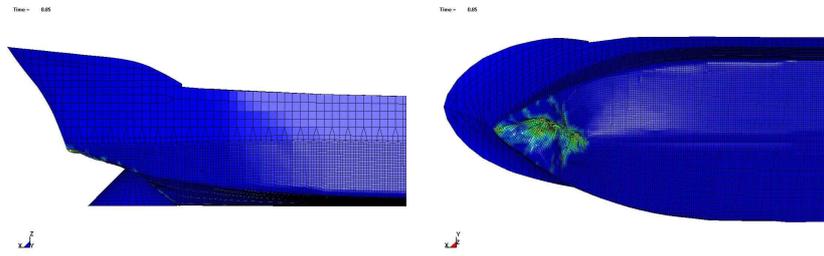
(b) bottom view



(c) inner bottom

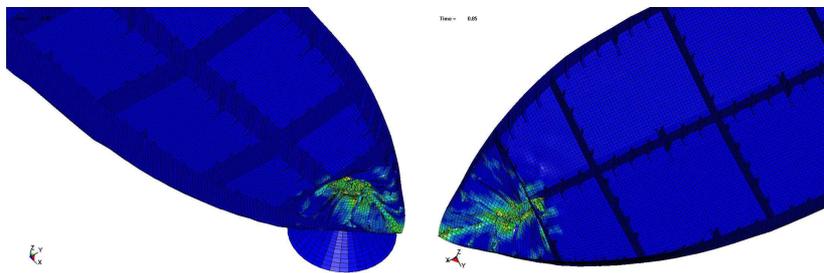
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.6 Damage configuration of C65TF65S10



(a) side view

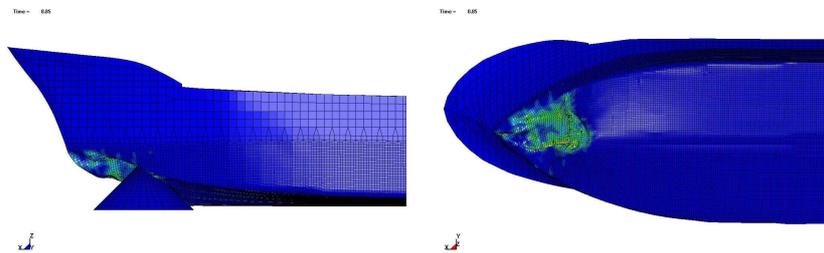
(b) bottom view



(c) inner bottom

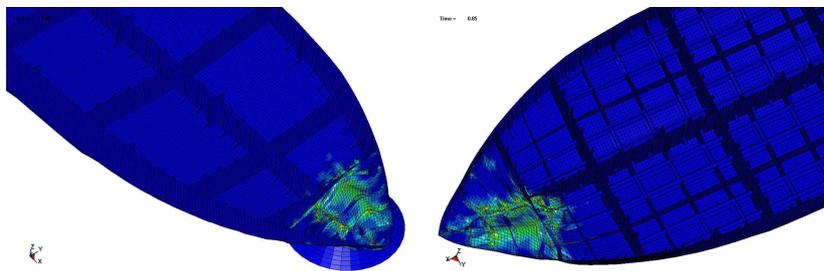
(d) bottom without inner bottom

Fig. C.7 Damage configuration of B65EF65C10



(a) side view

(b) bottom view



(c) inner bottom

(d) bottom without inner bottom

Fig. C.8 Damage configuration of B65EF65B10

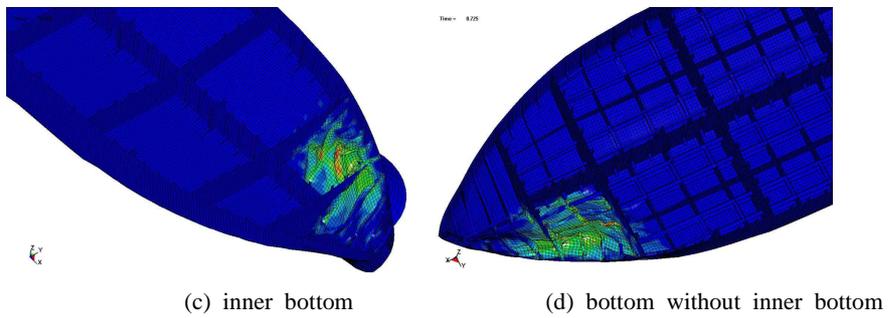
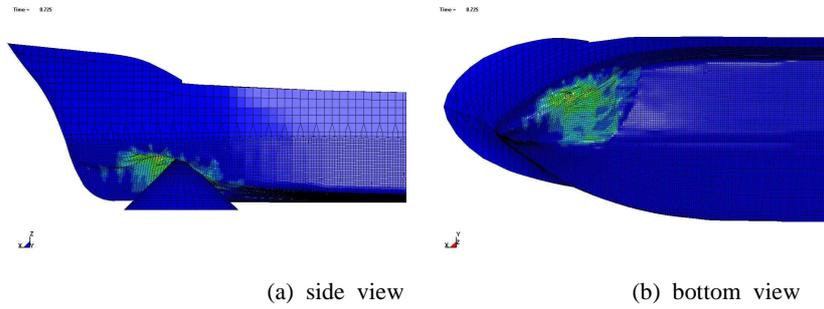


Fig. C.9 Damage configuration of B65EF65S10

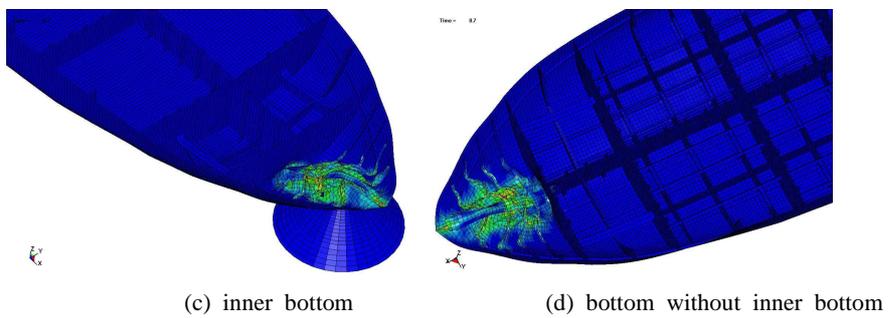
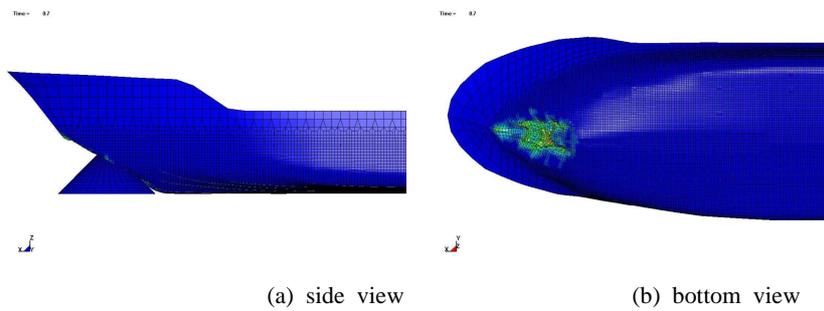


Fig. C.10 Damage configuration of A65EF65C10

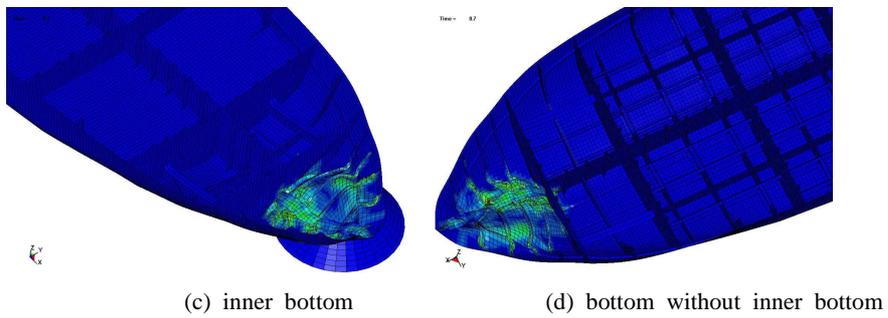
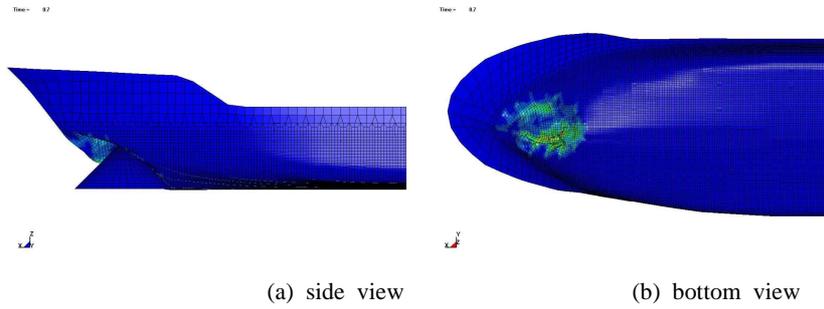


Fig. C.11 Damage configuration of A65EF65B10

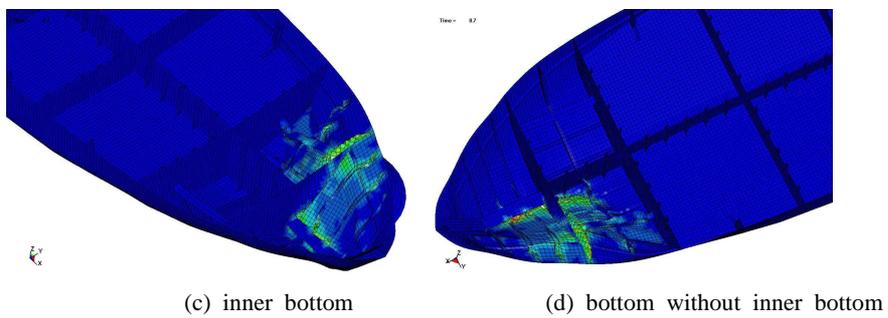
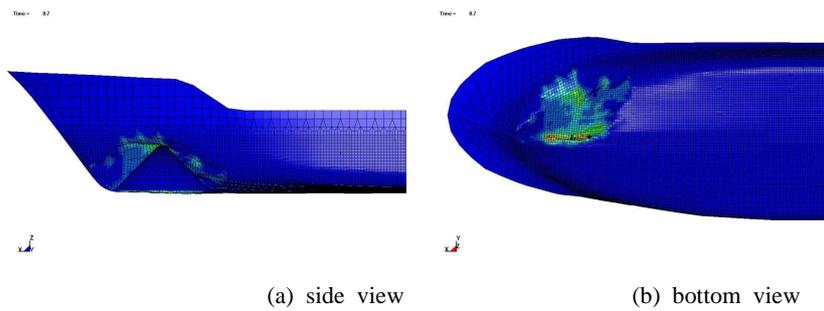


Fig. C.12 Damage configuration of A65EF65S10