

공학석사 학위논문

**SOLAS 규정검토 및 내충돌 성능에 우수한
선수구조부 구조설계**

**Review of SOLAS Regulation and Structural Design
of Bow Structure superior to Crashworthiness**

지도교수 이 상 갑

2003년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

송 명 근

본 논문을 송명근의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 신 영 식

위 원 공학박사 최 경 식

위 원 공학박사 이 상 갑

2003년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과 송 명 근

목 차

목 차	i
도 표 목 록	ii
그 립 목 록	iii
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 충돌 시뮬레이션 code의 검증	4
3. 충돌 시나리오와 시뮬레이션 모델	7
4. 충돌 수치 시뮬레이션 결과 및 고찰	14
4.1 충돌 시뮬레이션 결과	14
4.2 300,000 DWT VLCC 충돌 시뮬레이션 결과에 대한 고찰	20
4.3 6,800 TEU 컨테이너선 충돌 시뮬레이션 결과에 대한 고찰	21
4.4 종합적인 충돌 시뮬레이션 결과에 대한 고찰	23
5. 결 론	24
참고문헌	26
부록 A : 300,000 DWT VLCC 선박간 충돌 시뮬레이션 결과	27
부록 B : 300,000 DWT VLCC 강제 충돌 충돌 시뮬레이션 결과	45
부록 C : 6,800 TEU 컨테이너선 선박간 충돌 시뮬레이션 결과	61
부록 D : 6,800 TEU 컨테이너선 강제 충돌 시뮬레이션 결과	74

도 표 목 록

Table 1.1 Location of collision bulkhead required by SOLAS	2
Table 2.1 Material property (ASTM A569)	5
Table 2.2 Error measure factors of simulation results	6
Table 3.1 Finite element numbers of each ship models	10
Table 3.2 Material properties	10
Table 3.3 Collision scenarios of VLCC	12
Table 3.4 Collision scenarios of containership	13
Table 4.1 Deformation and rupture status of ship-to-ship scenarios of VLCC	16
Table 4.2 Deformation and rupture status of ship-to-rigid scenarios of VLCC	16
Table 4.3 Absorbed energy of striking ship in ship-to-ship scenarios of VLCC	17
Table 4.4 Member absorbed energy of struck ship in ship-to-ship scenarios of VLCC	17
Table 4.5 Absorbed energy of striking ship in ship-to-rigid scenarios of VLCC	18
Table 4.6 Deformation and rupture status of ship-to-ship scenarios of containership	18
Table 4.7 Deformation and rupture status of ship-to-rigid scenarios of containership	18
Table 4.8 Absorbed energy of striking ship in ship-to-ship scenarios of containership	19
Table 4.9 Member absorbed energy of striking ship in ship-to-ship scenarios of containership	19
Table 4.10 Absorbed energy of striking ship in ship-to-rigid scenarios of containership	19

그림 목록

Fig. 1.1 Ship bow collision accidents	1
Fig. 1.2 Location of bow collision bulkhead	2
Fig. 1.3 Location of reference point (R.P.)	2
Fig. 2.1 Geometry of grounding model (T-5 Paul Buck)	4
Fig. 2.2 Configuration of finite element mesh	4
Fig. 2.3 Rupture configuration of grounding model	5
Fig. 2.4 Comparison of experiment and simulation results	5
Fig. 3.1 Arrangement of collision scenario and collision bulkhead position	7
Fig. 3.2 Total configurations of finite element meshes	8
Fig. 3.3 Configurations of finite element mesh of 300,000 DWT VLCC	8
Fig. 3.4 Configurations of finite element mesh of 6,800 TEU containership	9
Fig. 3.5 Configurations of finite element mesh of 300,000 DWT VLCC	9
Fig. 3.6 Configurations of finite element mesh of 6,800 TEU containership	9
Fig. 3.7 Drawings of center line elevation	11
Fig. A.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROS-11.25	28
Fig. A.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROS-15.00	29
Fig. A.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROT-11.25	29
Fig. A.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROT-15.00	30
Fig. A.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOS-11.25	30
Fig. A.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOS-15.00	31
Fig. A.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOT-11.25	31
Fig. A.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOT-15.00	32
Fig. A.9 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMS-11.25	32
Fig. A.10 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMS-15.00	33
Fig. A.11 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMT-11.25	33
Fig. A.12 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMT-15.00	34
Fig. A.13 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMS-11.25	35
Fig. A.14 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMS-15.00	35
Fig. A.15 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMT-11.25	36
Fig. A.16 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMT-15.00	36
Fig. A.17 Absorbed energy responses of Case VROS-11.25	37
Fig. A.18 Absorbed energy responses of Case VROS-15.00	37
Fig. A.19 Absorbed energy responses of Case VROT-11.25	38
Fig. A.20 Absorbed energy responses of Case VROT-15.00	38
Fig. A.21 Absorbed energy responses of Case VSOS-11.25	39
Fig. A.22 Absorbed energy responses of Case VSOS-15.00	39

Fig. A.23 Absorbed energy responses of Case VSOT-11.25	40
Fig. A.24 Absorbed energy responses of Case VSOT-15.00	40
Fig. A.25 Absorbed energy responses of Case VRMS-11.25	41
Fig. A.26 Absorbed energy responses of Case VRMS-15.00	41
Fig. A.27 Absorbed energy responses of Case VRMT-11.25	42
Fig. A.28 Absorbed energy responses of Case VRMT-15.00	42
Fig. A.29 Absorbed energy responses of Case VSMS-11.25	43
Fig. A.30 Absorbed energy responses of Case VSMS-15.00	43
Fig. A.31 Absorbed energy responses of Case VSMT-11.25	44
Fig. A.32 Absorbed energy responses of Case VSMT-15.00	44
Fig. B.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROP-11.25	46
Fig. B.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROP-15.00	46
Fig. B.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROF-11.25	47
Fig. B.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROF-15.00	47
Fig. B.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOP-11.25	48
Fig. B.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOF-11.25	48
Fig. B.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOF-15.00	49
Fig. B.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMP-7.50	49
Fig. B.9 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMP-11.25	50
Fig. B.10 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMF-7.50	50
Fig. B.11 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMF-11.25	51
Fig. B.12 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMP-7.50	51
Fig. B.13 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMP-11.25	52
Fig. B.14 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMF-7.50	52
Fig. B.15 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMF-11.25	53
Fig. B.16 Absorbed energy responses of Case VROP-11.25	53
Fig. B.17 Absorbed energy responses of Case VROP-15.00	54
Fig. B.18 Absorbed energy responses of Case VROF-11.25	54
Fig. B.19 Absorbed energy responses of Case VROF-15.00	55
Fig. B.20 Absorbed energy responses of Case VSOP-11.25	55
Fig. B.21 Absorbed energy responses of Case VSOF-11.25	56
Fig. B.22 Absorbed energy responses of Case VSOF-15.00	56
Fig. B.23 Absorbed energy responses of Case VRMP-7.50	57
Fig. B.24 Absorbed energy responses of Case VRMP-11.25	57
Fig. B.25 Absorbed energy responses of Case VRMF-7.50	58
Fig. B.26 Absorbed energy responses of Case VRMF-11.25	58
Fig. B.27 Absorbed energy responses of Case VSMP-7.50	59
Fig. B.28 Absorbed energy responses of Case VSMP-11.25	59
Fig. B.29 Absorbed energy responses of Case VSMF-7.50	60

Fig. B.30 Absorbed energy responses of Case VSMF-11.25	60
Fig. C.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COS-18.75	62
Fig. C.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COS-25.00	63
Fig. C.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COT-12.50	63
Fig. C.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COT-18.75	64
Fig. C.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COT-25.00	64
Fig. C.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-12.50	65
Fig. C.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-18.75	65
Fig. C.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-25.00	66
Fig. C.9 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMT-12.50	67
Fig. C.10 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMT-18.75	67
Fig. C.11 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMT-25.00	68
Fig. C.12 Absorbed energy responses of Case COS-18.75	68
Fig. C.13 Absorbed energy responses of Case COS-25.00	69
Fig. C.14 Absorbed energy responses of Case COT-12.50	69
Fig. C.15 Absorbed energy responses of Case COT-18.75	70
Fig. C.16 Absorbed energy responses of Case COT-25.00	70
Fig. C.17 Absorbed energy responses of Case CMS-12.50	71
Fig. C.18 Absorbed energy responses of Case CMS-18.75	71
Fig. C.19 Absorbed energy responses of Case CMS-25.00	72
Fig. C.20 Absorbed energy responses of Case CMT-12.50	72
Fig. C.21 Absorbed energy responses of Case CMT-18.75	73
Fig. C.22 Absorbed energy responses of Case CMT-25.00	73
Fig. D.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COP-12.50	75
Fig. D.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COP-18.75	75
Fig. D.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COF-12.50	76
Fig. D.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COF-18.75	76
Fig. D.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMP-12.50	77
Fig. D.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMP-18.75	77
Fig. D.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMF-12.50	78
Fig. D.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMF-18.75	78
Fig. D.9 Absorbed energy responses of Case COP-12.50	79
Fig. D.10 Absorbed energy responses of Case COP-18.75	79
Fig. D.11 Absorbed energy responses of Case COF-12.50	80
Fig. D.12 Absorbed energy responses of Case COF-18.75	80
Fig. D.13 Absorbed energy responses of Case CMP-12.50	81
Fig. D.14 Absorbed energy responses of Case CMP-18.75	81
Fig. D.15 Absorbed energy responses of Case CMF-12.50	82
Fig. D.16 Absorbed energy responses of Case CMF-18.75	82

1. 서 론

여러 가지 형태의 선박충돌로 인하여 지금까지 수많은 해양오염은 물론 인명과 재산의 손실이 있어 왔다. 특히 유조선 및 화학제품 운반선(chemical tanker) 들의 충돌사고는 해양오염의 주요원인 중의 하나이고 그 피해는 매우 심각하게 나타나고 있다. 또한 모든 선박들은 잠재적으로 충돌사고 위험성에 노출되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 충돌사고로 인한 해양오염으로부터 최소한의 안전을 확보하기 위하여 관련 국제법규가 발효되어 있다. 이들 국제법규로서는 SOLAS 1974에 의한 충돌격벽(collision bulkhead)의 위치[1], MARPOL 73/78 협약에 의한 유조선의 이중선체구조(double hull structure) 배치[2]와 IBC code에 의한 화학제품 운반선의 구획배치(cargo segregation) 등이다. Fig. 1.1은 선수충돌(bow collision) 사고에 의한 손상의 예를 보여주고 있다.



Fig. 1.1 Ship bow collision accidents

충돌격벽의 위치 및 설치에 관한 SOLAS 협약은 1974년 채택되어 1980년 발효되었다. 이는 당시 건조된 선박들의 운항성능을 기준으로 정해진 것이고 이후 보완된 바 없으므로, 오늘날 대형화 및 고속화되고 있는 선박들의 운항성능과는 상이하다고 볼 수 있다. 현재의 규정에 의하면 충돌격벽의 위치는 선종, 운항속도, 크기 및 구조적 조건에 관계없이 단순히 선박길이 만의 요소로 결정되고 있으므로 동일한 길이를 갖는 15노트 내외의 유조선 및 살물선(bulk carrier)이나 25노트 내외의 컨테이너선의 경우 모두 동일한 충돌격벽의 위치를 요구하고 있다. 이는 선수충돌에서 속도의 자승에 비례하는 충돌 운동에너지(collision kinetic energy) 크기에 따라 실제 충돌거동(collision behavior)에 큰 차이가 발생함에도 불구하고 현 규정은 이를 전혀 고려하지 못하는 점이다.

이러한 미비점은 1974년대의 소형 및 저속의 선박건조 경향을 기준으로 SOLAS 규정이 제정되어 오늘날 건조 선박에 이를 적용할 시에는 이들 선박들의 충돌사고 시 충돌격벽의 기능 및 안전성에 심대한 결함이 있음을 의미한다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 선종, 운항속도 및 선박크기와 충돌격벽의 위치에 관한 상관관계를 조사하고 SOLAS 협약의 보완점을 제시하였다. SOLAS 1974 제 II-1장, 규칙 10의 여객선 및 규칙 11에 따른 모든 화물선의 충돌격벽의 설치위치를 Table 1.1과 Figs. 1.2와 1.3

에 나타내었다.

Table 1.1 Location of collision bulkhead required by SOLAS

Location	Passenger Ships (Ch. II-1, Reg. 10)	Cargo Ships (Ch. II-1, Reg. 11)
not less than y_1 from F.P.	$0.05 L_r$ m	$0.05 L_r$ or 10m whichever is less
not more than y_2 from F.P.	$0.05 L_r + 3m$	$0.08 L_r$

※Notes

Where a bulbous bow extends forward of the forward perpendicular (F.P.), the distance stipulated in the table shall be measured from a point either, whichever is least :

1. at the mid-length of such extension; or
2. at a distance 1.5% of the length of the ship forward of the F.P.; or
3. at a distance 3 m forward of the F.P.

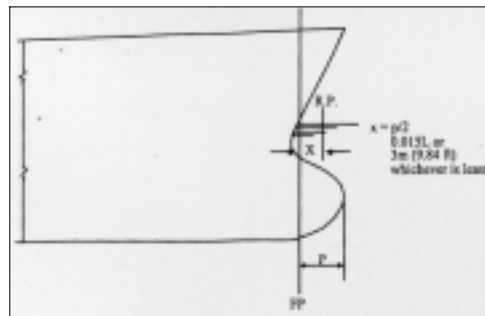
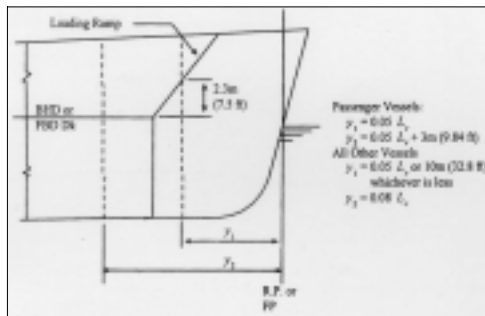


Fig. 1.2 Location of bow collision bulkhead Fig. 1.3 Location of reference point (R.P.)

충돌격벽과 선수구조부(bow structure)의 충돌거동과 붕괴형태(collapse type)는 선수구조부의 강성구조(rigid structure) 또는 연성구조(soft structure)에 따라 동일 선박의 운항성능 조건에서도 붕괴거동(collapse behavior)에 차이를 나타낸다. 일반적으로 결빙지역과 같은 특별한 운항구역에서는 내빙구조로 설계가 이루어져서 선수구조부의 강성이 큰 구조형태를 갖게되나, 일반적으로 선수구조부는 자체의 독특한 기하학적 형태에 따른 구조배치와 과량하중을 고려한 설계여건에 의해서 기본적으로 강성구조화 되어있다. 선수구조부가 강성구조일 경우에는 충돌에너지의 흡수가 적기 때문에 일반적으로 피충돌선(struck ship)에 매우 큰 붕괴현상을 유발하나 연성구조일 경우에는 자체적으로 충돌에너지 흡수가 커서 아코디언 같은 붕괴현상을 보이므로 상대적으로 피충돌선의 붕괴거동도 작아지게 된다. 충돌격벽은 선수충돌 시 충돌붕괴로부터 화물창을 보호하고 손상복원성을 유지하는 것이 그 목적으로서 충돌격벽의 손상 시 유조선의 경우 극심한 해양환경 오염을, 일반 화물선 또는 여객선의 경우에는 손상복원성 부족으로 전복을 야기하게 된다. 따라서 충돌격벽의 위치는 현재의 SOLAS 규정에서 요구하는 선박길이 뿐 아니라 선박의 선종, 운항성능, 크기 및 선수구조부 형태를 복합적으로 고려하여 규정되어야 할 것이다[3~5].

충돌현상에 대한 연구의 가장 유효한 방법으로는 실선충돌실험으로 충돌거동을 보다

정확히 추정할 수 있겠으나 막대한 비용이 요구되고 다양한 충돌 시나리오에 대한 연구에 있어서는 한계가 있으므로 현실적으로 가능하지 않다. 한편 축소모형을 이용하는 방법이 있으나 치수효과(scale factor)등의 문제로 그 정도(accuracy)가 매우 낮으며 국부적인 현상만을 나타내기 때문에 실선 충돌거동과는 큰 차이가 있을 수 있다. 또한 간이식들이 유도되어 많이 사용되고 있으나 대부분 기본구조부재들의 실험결과를 근거로 도출되어서 복잡하고 거대한 실선의 충돌현상을 나타내기에는 적절하지 못하다. LS/DYNA3D[6]와 MSC/DYTRAN[7] 등의 동적 비선형 유한요소 프로그램을 사용하여 실선 선수구조부의 충돌격벽의 위치, 종 및 횡늑골(longitudinal and transverse frame)의 형태, 주요 구조부재(primary member)의 배치 등의 변경을 통하여 선수구조부의 붕괴거동과 파괴형태, 구조배치별 충돌에너지 흡수능력 및 압괴거리(penetration or indentation depth) 등을 비교 검토하는 것이 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다[3~5,8,9].

본 연구에서는 SOLAS에서 요구하는 충돌격벽의 최소거리 위치에 대한 규칙의 적합성 여부를 검토하기 위하여 300,000 DWT VLCC와 6,800 TEU급 컨테이너선을 이용하여 실선 충돌해석 시뮬레이션을 수행하고 선박간 충돌조건(ship to ship collision condition)과 강체 충돌조건(ship to rigid collision condition)에서의 선수구조부의 붕괴거동과 충돌격벽에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구의 수행에 사용되는 수치 시뮬레이션 LS/DYNA3D code의 해석능력을 검증하고, 두 선박의 선수구조부가 300,000 DWT 유조선의 중앙부에 충돌하는 선박간 충돌과 해상의 견고한 구조물 등의 강체에 전면충돌(full collision) 및 부분충돌(partial collision)에 대한 충돌해석 시뮬레이션을 수행하여 그들의 결과를 검토하였다. 또한 충돌선(striking ship) 선수구조부의 강성 및 연성구조가 내충돌 성능에 미치는 영향을 비교·검토하기 위하여 300,000 DWT VLCC의 강성 선수구조부를 연성구조로 설계 변경하여 각각 선박간 충돌과 강체 충돌해석 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 충돌 시뮬레이션 code의 검증

충돌수치 시뮬레이션 code LS/DYNA3D 및 충돌 해석능력의 검증으로서 미국 CDNSWC에서 수행한 좌초실험 결과[10]와 비교·검토하였다. Fig. 2.1에서와 같이 좌초실험을 위하여 30,000~40,000 DWT 유조선을 1/5 비율로 축소한 T-5 Paul Buck 이중선체 유조선의 선저 모델은 차량 아래에 부착되어 있고, 차량은 레일로부터 이탈하지 않도록 하기 위하여 받침쇠로 지지되어 있다. 시험 모델은 수평 방향에 대하여 7.4°기울어져 있어 내저판이 찢어지는 현상이 다소 늦게 발생하여 관찰이 용이하도록 하였다.

Fig. 2.2는 좌초 시뮬레이션을 위한 유한요소 모델을 보여주고 있다. Fig. 2.3은 선저 모델이 암초를 벗어났을 때의 파손(damage) 상태를, Fig. 2.4는 수평 및 수직 저항력(resisting force)에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여주고 있다. Table 2.1은 재료의 물성치를 요약하였다.

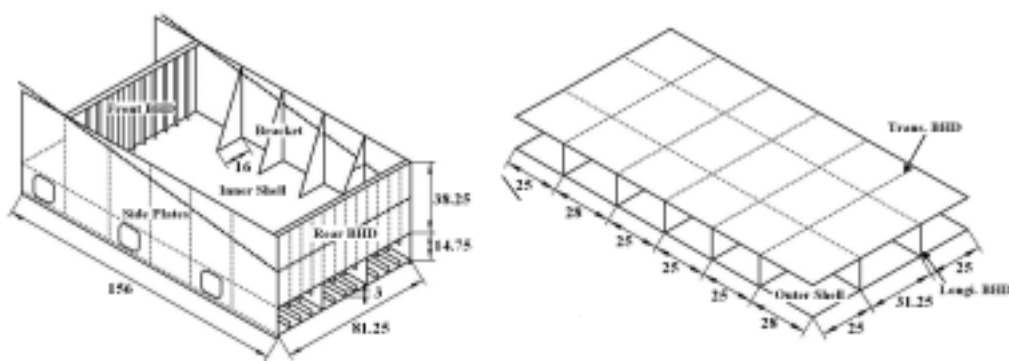


Fig. 2.1 Geometry of grounding model (T-5 Paul Buck)

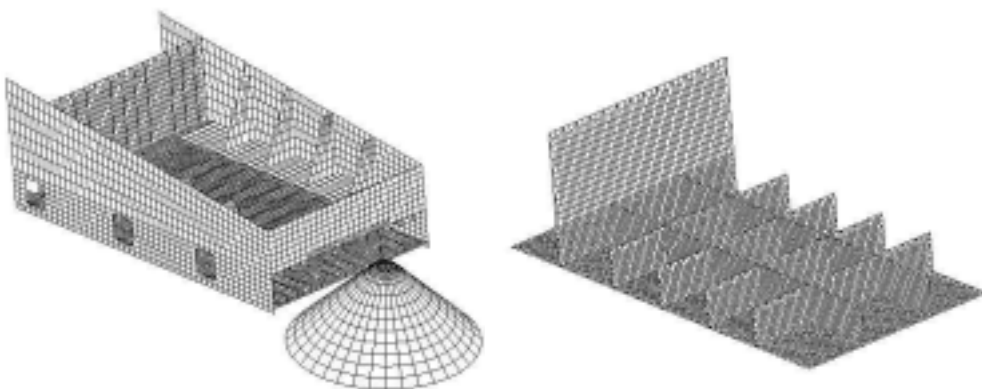


Fig. 2.2 Configuration of finite element mesh

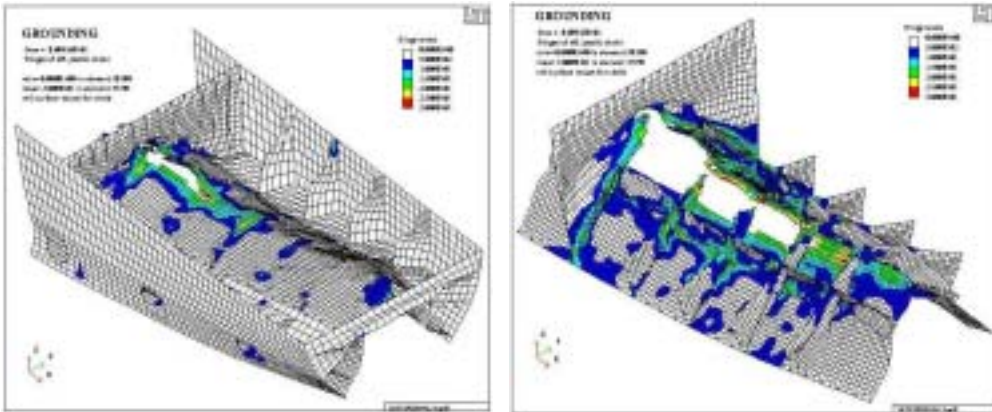


Fig. 2.3 Rupture configuration of grounding model

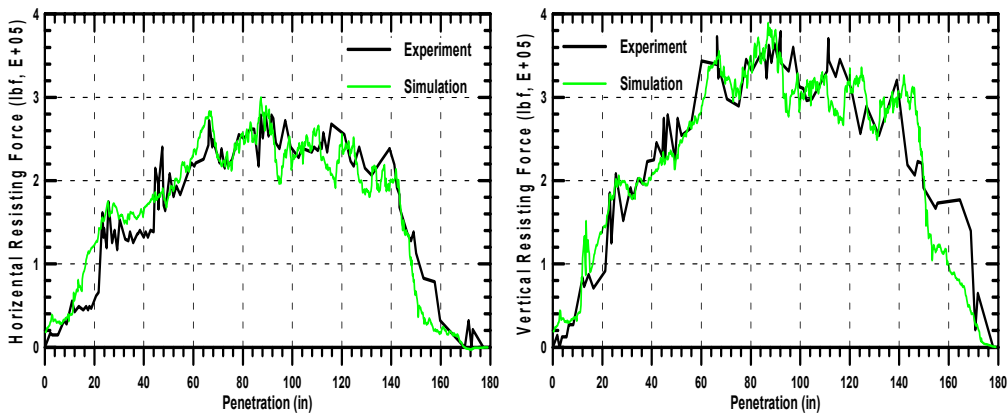


Fig. 2.4 Comparison of experiment and simulation results

Table 2.1 Material property (ASTM A569)

Young's modulus	3.00×10 ⁷ ksi			
Density	7.43×10 ⁻⁴ lb _f · s/in ²			
Poisson's ratio	0.3			
Yield stress	41.00 ksi			
Ultimate stress	50.00 ksi			
Failure strain	0.25			
Dynamic yield stress constants	D = 40.4 s ⁻¹ , p = 5			
Plastic strain	0.000	0.013	0.198	0.300
Stress (ksi)	41.0	41.2	50.0	50.0

실험이나 수치 시뮬레이션을 통해 얻은 임의의 과도응답 특성에 대하여 이미 수행되었거나 연구가 완료된 데이터에 대한 비교·분석은 상당히 주관적인 요소가 많이 포함되어지므로 객관적인 자료의 검증을 위하여 오차측정방법(error measure method)이 많이 사용되고 있다. 여기서는 과도응답 해석 결과의 정확도 검증을 위하여 두 과도응답 데이터의 상대크기(relative magnitude)와 위상차이(phase difference)에 대하여 각각 크기오차계수(magnitude error factor)와 위상오차계수(phase error factor), 그리고 이 두 가지 오차인자 모두를 고려한 종합오차계수(comprehensive error factor)를 유도하고, 각 응답에 있는 오차측정계수(error measure factor)가 0.2 이상을 넘지 않으면 상당히 신뢰성 있는 응답이라고 정의하고 있다[11,12].

Table 2.2는 수평 및 수직 저항력의 실험 결과에 대한 수치 시뮬레이션의 오차측정계수들을 보여주고 있다. 이상에서 실험 결과와 비교하여 매우 근접한 시뮬레이션 저항력을 추정할 수 있으므로, 본 연구에서 사용되는 수치 시뮬레이션 code 및 시뮬레이션 해석은 충분한 정도로서 손상을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2.2 Error measure factors of simulation results

Resisting forces	Magnitude error factor	Phase error factor	Comprehensive error factor
Horizontal	- 0.0127	0.0485	0.0444
Vertical	- 0.0156	0.0479	0.0446

3. 충돌 시나리오와 시뮬레이션 모델

300,000 DWT VLCC와 6,800 TEU 컨테이너선이 각각 300,000 DWT VLCC 중앙부에 충돌하는 선박간 충돌과 강체의 전면과 부분에 충돌하는 전면 및 부분 강체충돌 시나리오로 실선 충돌해석 시뮬레이션을 수행하였다. 선박간 충돌의 경우 충돌선은 피충돌선 유조선 중앙 화물창의 화물창 횡격벽(transverse BHD)과 제수격벽(swash BHD)에 충돌하는 두 가지 경우를 고려하였다. 횡격벽의 구조적 강성은 제수격벽보다 크다. 강체충돌의 경우는 선수구조부 전면이 해상 시설물 등의 강체에 충돌하는 경우와 충돌선 만재흡수선 상부 1.0m 정도 아래 부분이 강체에 충돌하는 경우로 설정하였다. 충돌각도는 피충돌선 및 강체에 직각으로 충돌하는 것으로 설정하였으며, 선박간 충돌 시의 충돌배치와 각 충돌선의 SOLAS 규칙에 따른 최소 및 최대 충돌격벽의 위치(minimum and maximum collision BHD position) Fig. 3.1에 나타내었다. 여기에서 충돌선 유조선과 컨테이너선의 실제 충돌격벽의 설계위치(current position)는 SOLAS 규칙에 따른 최소 충돌격벽의 위치에서 선미방향으로 각각 48% 및 61%에 위치하고 있음을 알 수 있다.

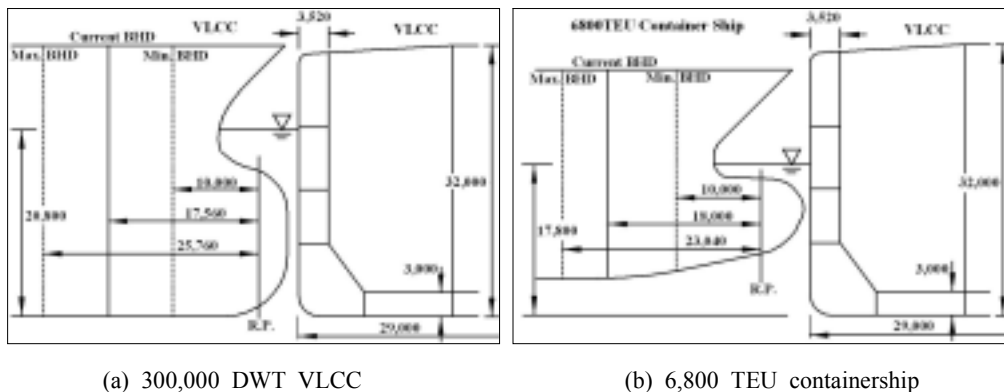
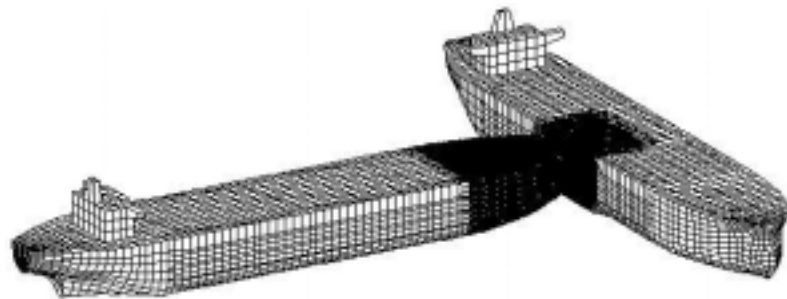
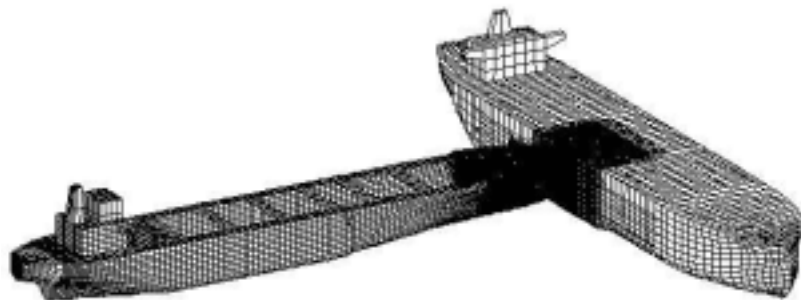


Fig. 3.1 Arrangement of collision scenario and collision bulkhead position

Fig. 3.2는 충돌해석 시뮬레이션을 위한 충돌선 300,000 DWT VLCC와 6,800 TEU 컨테이너선의 선수구조부가 피충돌선 300,000 DWT VLCC의 중앙부에 충돌하는 전체 유한요소모델을 보여주고 있다. 유한요소모델의 전선은 강체로, 충돌 부위는 파단이 가능한 탄소성재료로 구성되어 있고, 선박간 충돌과 강체충돌에서 강체부위를 제외한 유한요소모델은 각각 Figs. 3.3/3.4와 Figs. 3.5/3.6과 같다. 작은 크기의 보강재(stiffener)의 웹(web)까지는 셸(shell) 요소를, 플랜지(flange)는 보(beam) 요소를 사용하였으며 각 선박의 셸 및 보 요소의 개수는 Table 3.1에 요약되어 있다. 충돌선 및 피충돌선은 크게 연강(mild steel)과 고장력강(high tensile steel)으로 구성되어 있으며, 재료 물성치는 Table 3.2에 요약되어 있다. 충돌속도는 VLCC 및 컨테이너선의 경우 각각 최대운항속도 15.0 및 25.0노트와 최대운항속도의 75%, 50%의 속도로 각각 충돌하는 것으로 하였다.

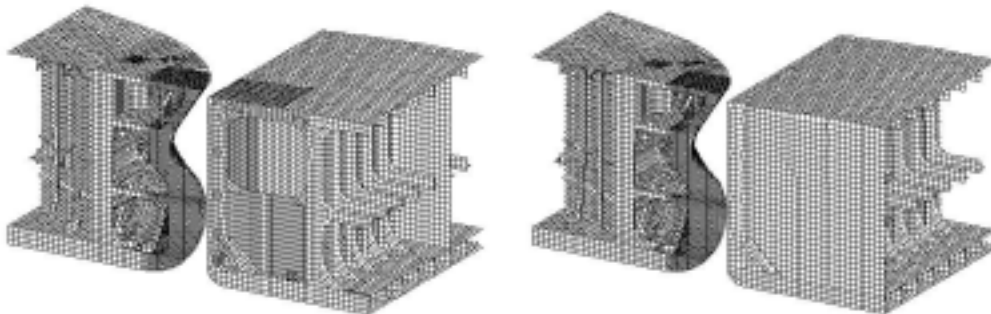


(a) 300,000 DWT VLCC



(b) 6,800 TEU containership

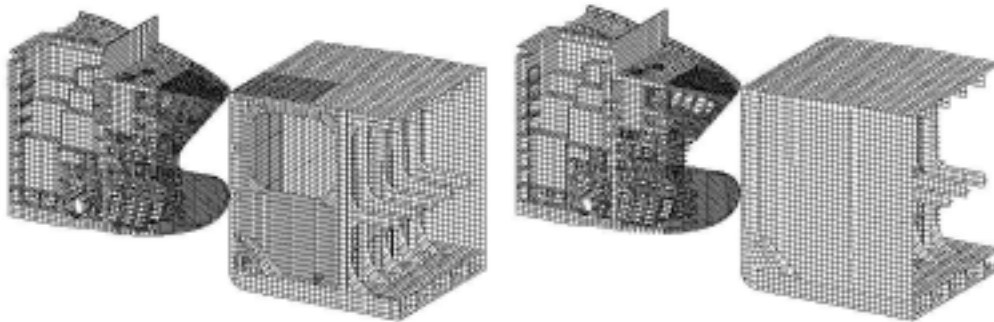
Fig. 3.2 Total configurations of finite element meshes



(a) to swash BHD of struck VLCC

(b) to transverse BHD of struck VLCC

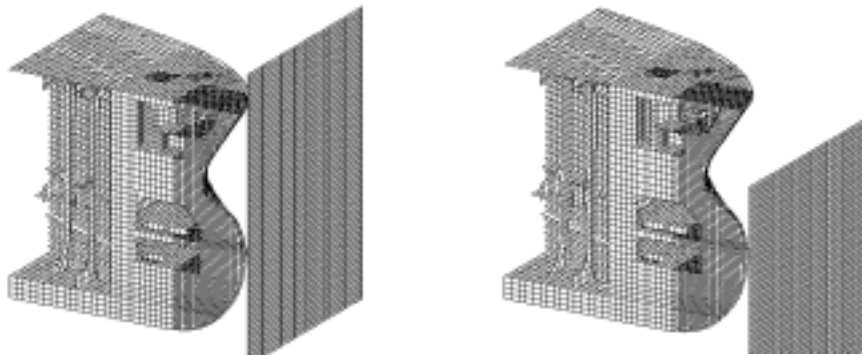
Fig. 3.3 Configurations of finite element mesh of 300,000 DWT VLCC



(a) to swash BHD of struck VLCC

(b) to transverse BHD of struck VLCC

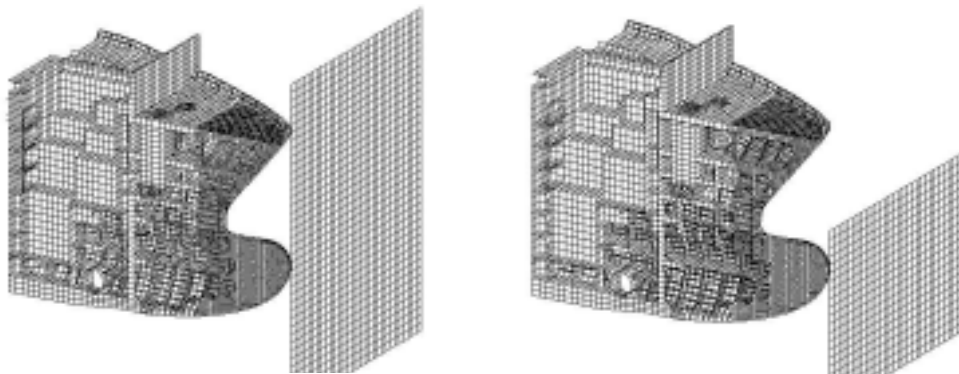
Fig. 3.4 Configurations of finite element mesh of 6,800 TEU containership



(a) to full rigid struck

(b) to partial rigid struck

Fig. 3.5 Configurations of finite element mesh of 300,000 DWT VLCC



(a) to full rigid struck

(b) to partial rigid struck

Fig. 3.6 Configurations of finite element mesh of 6,800 TEU containership

Table 3.1 Finite element numbers of each ship models

Type Element		300,000 DWT VLCC		6,800 TEU containership	
		Striking ship (VLCC)	Struck ship (VLCC)	Striking ship (containership)	Struck ship (VLCC)
Deformable body	Nodes	19,500	26,700	14,800	14,800
	Shell elements	27,700	38,700	16,400	13,800
	Beam elements	6,400	12,800	3,200	6,900
Rigid body	Nodes	14,700	6,400	6,700	6,700
	Shell elements	15,300	6,200	7,400	6,400

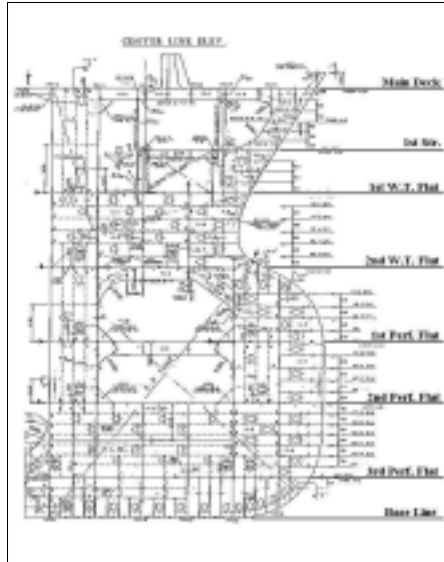
Table 3.2 Material properties

Property	Mild steel				High tensile steel(AH32)				High tensile steel(AH36)			
Young's modulus	2.06×10 ⁶ MPa				2.06×10 ⁶ MPa				2.06×10 ⁶ MPa			
Density	7.83×10 ⁻⁹ ton/mm ³				7.83×10 ⁻⁹ ton/mm ³				7.83×10 ⁻⁹ ton/mm ³			
Yield stress	235.0 MPa				315.0 MPa				355.0 MPa			
Ultimate stress	445.0 MPa				525.0 MPa				565.0 MPa			
Failure strain	0.2				0.2				0.2			
Dynamic yield stress constants	D=40.4 s ⁻¹ , p = 5				D=3200.0 s ⁻¹ , p = 5				D=3200.0 s ⁻¹ , p = 5			
Plastic strain	0.000	0.0158	0.198	0.300	0.000	0.0158	0.198	0.300	0.000	0.0158	0.198	0.300
Stress (MPa)	235.0	245.0	445.0	445.0	315.0	325.0	525.0	525.0	355.0	365.0	565.0	565.0

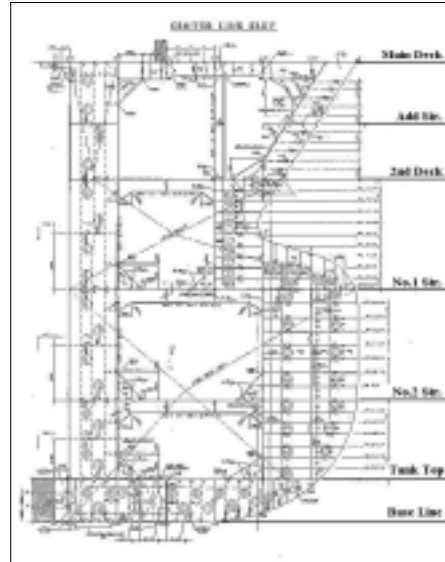
현재 운항중인 300,000 DWT VLCC의 선수구조부는 Figs. 3.7(a),(b)와 같이 강성이 큰 강성 선수구조부(rigid bow)와 강성이 작은 연성 선수구조부(soft bow)로 크게 나눌 수 있다. 이러한 선수구조부의 강성이 충돌선 및 피충돌선에 미치는 내충돌 성능을 비교·검토하기 위하여 Fig. 3.7(a)의 강성 선수구조부를 Fig. 3.7(c)와 같이 연성 선수구조부로 설계 변경하여 두 가지 선수구조부에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3.7(d)는 6,800 TEU 컨테이너선의 선수구조부의 구조도를 보여주고 있다. Tables 3.3과 3.4는 각각 본 연구에서 수행할 300,000 DWT VLCC와 6,800 TEU 컨테이너선의 충돌 시나리오를 요약하였다. 여기서는 Fig. 3.1과 같이 각 경우에 대하여 충돌격벽의 위치를 최소위치로 이동시켰을 경우에 대한 내충돌 성능과 SOLAS 규정의 적합성을 검증하였다.

Tables 3.3과 3.4에서 각 Case를 간단하게 인용하기 위하여 다음과 같이 간이기호로 나타내었다. 유조선의 경우는 4개, 컨테이너선의 경우는 3개의 영문자를 사용하였다. 첫 번째 영문자는 VLCC 또는 Containership을 의미하고, 유조선의 경우에만 Rigid bow 또는 Soft bow를 의미하는 두 번째 영문자를 사용하여 나타내었다. 순서대로 충돌격벽의 위치는 Original current position 또는 Minimum position으로, 선박간 충돌

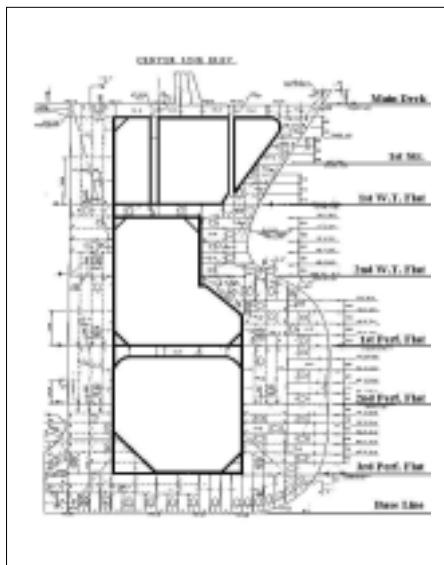
의 경우 피충돌선의 Swash BHD 또는 Transverse BHD와 강제충돌의 경우 강제충돌 범위를 나타내는 Full rigid 또는 Partial rigid로 나타내었다.



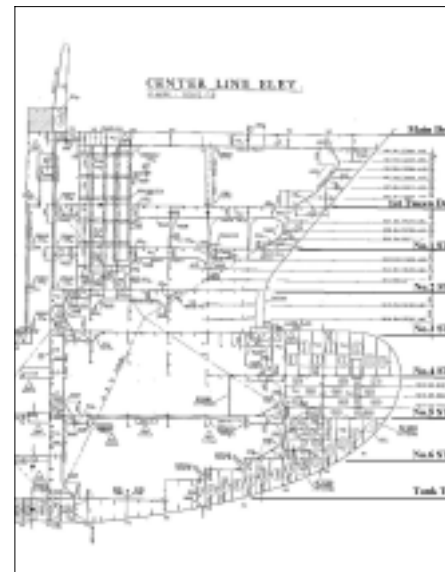
(a) Rigid bow of 300,000 DWT VLCC



(b) Soft bow of 300,000 DWT VLCC



(c) Modified soft bow of 300,000 DWT VLCC



(d) Bow of 6,800 TEU containership

Fig. 3.7 Drawings of center line elevation

Table 3.3 Collision scenarios of VLCC

Collision type	Bow structure strength	Collision BHD position	Struck type	Collision velocity (knots)	Case
ship to ship	Rigid bow	Original position	Swash	11.25	VROS-11.25
				15.00	VROS-15.00
			Transverse	11.25	VROT-11.25
				15.00	VROT-15.00
	Soft bow		Swash	11.25	VSOS-11.25
				15.00	VSOS-15.00
			Transverse	11.25	VSOT-11.25
				15.00	VSOT-15.00
	Rigid bow	Minimum position	Swash	11.25	VRMS-11.25
				15.00	VRMS-15.00
			Transverse	11.25	VRMT-11.25
				15.00	VRMT-15.00
Soft bow			Swash	11.25	VSMS-11.25
				15.00	VSMS-15.00
			Transverse	11.25	VSMT-11.25
				15.00	VSMT-15.00
ship to rigid body	Rigid bow	Original position	Partial	11.25	VROP-11.25
				15.00	VROP-15.00
			Full	11.25	VROF-11.25
				15.00	VROF-15.00
	Soft bow		Partial	11.25	VSOP-11.25
				15.00	VSOP-15.00
			Full	11.25	VSOF-11.25
				15.00	VSOF-15.00
	Rigid bow	Minimum position	Partial	7.50	VRMP- 7.50
				11.25	VRMP-11.25
			Full	7.50	VRMF- 7.50
				11.25	VRMF-11.25
Soft bow			Partial	7.50	VSMP- 7.50
				11.25	VSMP-11.25
			Full	7.50	VSMF- 7.50
				11.25	VSMF-11.25

Table 3.4 Collision scenarios of containership

Collision type	Collision BHD position	Struck type	Collision velocity (knots)	Case
ship to ship	Original position	Swash	18.75	COS-18.75
			25.00	COS-25.00
		Transverse	12.50	COT-12.50
			18.75	COT-18.75
			25.00	COT-25.00
			12.50	CMS-12.50
	Minimum position	Swash	18.75	CMS-18.75
			25.00	CMS-25.00
			12.50	CMT-12.50
		Transverse	18.75	CMT-18.75
			25.00	CMT-25.00
			12.50	COP-12.50
ship to rigid body	Original position	Partial	18.75	COP-18.75
			12.50	COF-12.50
		Full	18.75	COF-18.75
			12.50	CMP-12.50
	Minimum position	Partial	18.75	CMP-18.75
			12.50	CMF-12.50
		Full	18.75	CMF-18.75
			12.50	

4. 충돌 수치 시뮬레이션 결과 및 고찰

3장의 충돌 시나리오에 대한 수치 시뮬레이션의 결과로서 충돌선과 피충돌선의 파손 상태 및 충돌 흡수에너지(collision absorbed energy)에 대하여 고찰하였다. 충돌 후 리바운딩(rebounding) 직후까지만 시뮬레이션을 수행하였고, 파손상태를 보다 자세히 살펴보기 위하여 강제부위를 제거하였다. 충돌선의 경우는 충돌격벽, 피충돌선의 경우는 외판 바로 안쪽의 선측종격벽판(Side longitudinal BHD)의 파열(rupture)로 인한 화물창으로부터의 유류 및 화물 유출과 화물창으로의 해수 유입이 기준이 됨으로 이러한 부위의 파열에 대한 결과를 자세히 검토하였다. 충돌선과 피충돌선 전체 또는 각 부재의 흡수에너지는 내충돌 성능에 우수한 구조배치 및 각 부재의 기여도를 추정할 수 있으므로 이들의 크기를 비교·검토하였다.

4.1 충돌 시뮬레이션 결과

모든 충돌 수치 시뮬레이션의 결과는 부록 A~D에 정리하였다: 충돌선 300,000 DWT VLCC의 선박간 충돌과 강제충돌의 결과는 각각 부록 A와 B에, 충돌선 6,800 TEU 컨테이너선의 선박간 충돌과 강제충돌의 결과는 각각 부록 C와 D에 정리되어 있다. 각 부록에는 각 Case에 대하여 충돌선이 피충돌선이나 강체에 리바운딩한 직후의 전체 및 관심 부위의 파손상태와 소성변형률(plastic strain)의 분포를, 또한 충돌선 또는 피충돌선의 전체 및 주요부재별 충돌 흡수에너지의 시간에 대한 이력(time history)도 그래프로 나타내었다. 아래에 언급되는 대표적인 Case를 제외하고는 기본적인 파손상태와 소성변형률 분포를 나타내었다.

충돌선 300,000 DWT VLCC의 선박간 충돌 시나리오 중 대표적으로 Case VROS-11.25와 VSMS-11.25의 파손상태 및 소성변형률 분포는 부록 A의 각각 Figs. A.1과 A.13에, 충돌선과 피충돌선의 전체 및 주요부재별 충돌 흡수에너지의 시간에 대한 이력은 각각 Figs. A.17과 A.25에 나타내었다. 선박간 충돌에 대한 충돌선 전체의 압괴거리와 리바운딩 시간, 충돌선의 충돌격벽 및 피충돌선의 선측종격벽판의 변형 및 파손상태와 파열크기에 대한 결과를 정량적으로 Table 4.1에 요약하였다. Table 4.3에 시뮬레이션 마지막 시간에서의 충돌선과 피충돌선의 전체 충돌 흡수에너지 및 충돌선의 주요부재별 충돌 흡수энер지를, Table 4.4에 피충돌선의 주요부재별 충돌 흡수энер지를 요약하였다. 여기서 충돌선의 충돌격벽과 피충돌선의 선측종격벽판에 파열이 발생한 경우에는 Tables 4.3과 4.4에 음영(shadow)을 나타내었다. 각 Case에서의 충돌선과 피충돌선의 흡수에너지는 전체 흡수에너지에 대하여, 각 주요부재는 충돌선 및 피충돌선의 흡수에너지에 대하여 차지하는 비율로 나타내어 그들의 내충돌에 대한 기여도를 분석하였다.

충돌선 300,000 DWT VLCC의 강제충돌 시나리오 중 대표적으로 Case VSOP-11.25와 VRMF-11.25의 파손상태 및 소성변형률 분포는 부록 B의 각각 Figs. B.5와 B.11에, 충돌선의 전체 및 주요부재별 충돌 흡수에너지의 시간에 대한 이력은 각각 Figs. B.20과 B.26에 나타내었다. 강제충돌에 대한 충돌선 전체의 압괴거리와 리바운딩 시간, 충돌선의 충돌격벽의 변형 및 파손상태와 파열크기에 대한 결과를 정량적으로 Table 4.2에 요약하였다. Table 4.5에 시뮬레이션 마지막 시간에서의 충돌선의 전체 충돌 흡수에너지 및 충돌선의 주요부재별 충돌 흡수에너지를 요약하였다. 여기서 충돌선의 충돌격벽에 파열이 발생한 경우에는 Table 4.5에 음영을 나타내었다. 각 Case에서의 주요부재는 충돌선의 흡수에너지에 대하여 차지하는 비율로 나타내어 그들의 내충돌에 대한 기여도를 분석하였다.

충돌선 6,800 TEU 컨테이너선과 피충돌선 300,000 DWT VLCC의 선박간 충돌 시나리오 중 대표적으로 COT-18.75와 CMS-18.75의 파손상태 및 소성변형률 분포는 부록 C의 각각 Figs. C.1과 C.7에, 충돌선과 피충돌선의 전체 및 주요부재별 충돌 흡수에너지의 시간에 대한 이력은 각각 Figs. C.15와 C.18에 나타내었다. 선박간 충돌에 대한 충돌선 전체의 압괴거리와 리바운딩 시간, 충돌선의 충돌격벽 및 피충돌선의 선측중격벽판의 변형 및 파손상태와 파열크기에 대한 결과를 정량적으로 Table 4.6에 요약하였다. Table 4.8에 시뮬레이션 마지막 시간에서의 충돌선과 피충돌선의 전체 충돌 흡수에너지 및 충돌선의 주요부재별 충돌 흡수에너지를, Table 4.9에 피충돌선의 주요부재별 충돌 흡수에너지를 요약하였다. 여기서 충돌선의 충돌격벽과 피충돌선의 선측중격벽판에 파열이 발생한 경우에는 충돌선 VLCC의 선박간 충돌에서와 같이 Tables 4.8과 4.9에 음영을 나타내었다. 각 Case에서의 충돌선과 피충돌선의 흡수에너지는 전체 흡수에너지에 대하여, 각 주요부재는 충돌선 및 피충돌선의 흡수에너지에 대하여 차지하는 비율로 나타내어 그들의 내충돌에 대한 기여도를 분석하였다.

충돌선 6,800 TEU 컨테이너선의 강제충돌 시나리오 중 대표적으로 Case COP-18.75와 CMF-18.75의 파손상태 및 소성변형률 분포는 부록 D의 각각 Figs. D.2와 D.8에, 충돌선의 전체 및 주요부재별 충돌 흡수에너지의 시간에 대한 이력은 각각 Figs. D.10과 D.16에 나타내었다. 강제충돌에 대한 충돌선 전체의 압괴거리와 리바운딩 시간, 충돌선의 충돌격벽의 변형 및 파손상태와 파열크기에 대한 결과를 정량적으로 Table 4.7에 요약하였다. Table 4.10에 시뮬레이션 마지막 시간에서의 충돌선의 전체 충돌 흡수에너지 및 충돌선의 주요부재별 충돌 흡수에너지를 요약하였다. 여기서 충돌선의 충돌격벽에 파열이 발생한 경우에는 충돌선 VLCC의 강제충돌에서와 같이 Table 4.10에 음영을 나타내었다. 각 Case에서의 주요부재는 충돌선의 흡수에너지에 대하여 차지하는 비율로 나타내어 그들의 내충돌에 대한 기여도를 분석하였다.

Table 4.1 Deformation and rupture status of ship-to-ship scenarios of VLCC

Case	Penetration (m)	Rebound time (sec)	Collision BHD Deformation (Rupture state)(m)			Side longitudinal BHD Deformation (Rupture state)(m)	
			Upper	Center	Lower	Depth	Width
VROS-11.25	19.82	6.09	0.00	C, 0.10	0.00	22.6	12.6
VROS-15.00	29.48	6.80	S, 0.60	0.00	S, 0.60	28.0	29.0
VROT-11.25	15.85	4.86	0.00	C, 0.20	0.00	1.0	2.8
VROT-15.00	22.46	5.03	0.00	C, 0.90	0.00	3.0	3.6
VSOS-11.25	20.39	6.49	0.00	0.00	0.00	18.0	5.0
VSOS-15.00	30.42	7.24	S, 0.60	0.00	S, 0.60	28.0	16.0
VSOT-11.25	17.62	5.02	0.00	C, 0.70	0.00	2.1 Transverse BHD side CU	
VSOT-15.00	23.78	5.11	C, 0.60	C, 1.30	0.00	13.0	3.4
VRMS-11.25	19.78	6.03	S, 0.80	0.00	S, 0.80	24.0	11.2
VRMS-15.00	28.03	6.24	S, 1.23	0.00	S, 1.23	28.0	40.0
VRMT-11.25	15.24	4.45	C, 0.50	C, 1.00	0.00	1.0	2.8
VRMT-15.00	21.85	5.07	S, 2.40	S, 2.40	S, 2.40	22.0	4.0
VSMS-11.25	19.19	5.98	S, 1.50	C, 1.00	S, 1.50	23.0	7.0
VSMS-15.00	28.70	7.04	S, 3.40	C, 3.00	S, 3.40	28.0	15.0
VSMT-11.25	17.26	5.24	0.00	C, 0.80	0.00	6.2 Transverse BHD side CU	
VSMT-15.00	22.60	5.13	S, 3.00	C, 3.20	S, 3.20	27.0	5.6

C : center area, S : near side shell, W : whole area

Table 4.2 Deformation and rupture status of ship-to-rigid scenarios of VLCC

Case	Penetration (m)	Rebound time (sec)	Collision BHD in striking ship Deformation (Rupture state)(m)		
			Upper	Center	Lower
VROP-11.25	19.53	5.62	0.00	C, 3.30	C, 3.30
VROP-15.00	28.81	6.81	0.00	C, 12.80	C, 12.80
VROF-11.25	16.22	5.00	C, 1.50	W, 2.40	C, 1.00
VROF-15.00	24.12	6.10	C, 5.00	W, 9.80	C, 3.00
VSOP-11.25	21.20	5.84	0.00	W, 5.00	C, 3.50
VSOE-11.25	17.70	5.16	C, 2.00	W, 3.00	C, 1.50
VSOE-15.00	22.70	5.05	C, 6.00	W, 7.40	C, 2.00
VRMP- 7.50	12.33	5.24	0.00	0.00	C, 1.25
VRMP-11.25	19.00	5.95	0.00	W, 8.70	C, 2.50
VRMF- 7.50	9.77	4.22	C, 0.50	C, 0.20	0.00
VRMF-11.25	15.77	4.97	C, 3.50	W, 6.00	C, 5.00
VSMP- 7.50	12.84	5.18	0.00	C, 2.20	0.00
VSMP-11.25	19.64	5.79	0.00	W, 9.30	W, 8.00
VSMF- 7.50	10.47	4.58	C, 0.20	C, 0.90	0.00
VSMF-11.25	16.58	5.01	C, 3.20	W, 6.80	C, 3.20

C : center area, W : whole area

Table 4.3 Absorbed energy of striking ship in ship-to-ship scenarios of VLCC

Case	Absorbed energy (MN-m)			Member absorbed energy in striking ship (MN-m)				
	Striking	Struck	Total	Shell	Upper deck	Primary member	Collision BHD	Stiffener
VROS-11.25	567(20)	2,302(80)	2,869	239.6(42.3)	64.7(11.4)	55.9(9.8)	0.23(0.0)	52.0(9.2)
VROS-15.00	955(27)	2,502(73)	3,457	304.2(31.8)	92.1(9.6)	38.4(4.0)	1.12(0.1)	141.7(14.8)
VROT-11.25	1,365(47)	1,545(53)	2,910	412.6(30.3)	71.7(5.3)	194.4(14.2)	0.42(0.0)	143.5(10.5)
VROT-15.00	1,960(52)	1,745(48)	3,705	547.5(27.9)	117.4(6.0)	294.2(15.0)	14.34(0.7)	186.2(9.5)
VSOS-11.25	927(41)	1,337(59)	2,264	295.8(31.9)	68.5(7.4)	97.4(10.5)	0.17(0.0)	91.5(9.9)
VSOS-15.00	1,311(34)	2,236(66)	3,547	418.3(31.9)	105.9(8.1)	133.9(10.1)	6.05(0.5)	140.8(10.7)
VSOT-11.25	1,431(66)	753(34)	2,184	454.8(31.8)	87.3(6.1)	142.4(9.9)	4.70(0.3)	140.6(9.8)
VSOT-15.00	1,758(48)	1,890(52)	3,648	543.6(30.9)	108.0(6.1)	178.2(10.1)	20.56(1.2)	175.4(10.0)
VRMS-11.25	580(20)	2,304(80)	2,884	182.3(31.4)	57.8(10.0)	58.9(10.2)	9.94(1.7)	61.5(10.6)
VRMS-15.00	1,112(22)	3,892(78)	5004	341.9(30.8)	99.1(8.9)	100.1(9.0)	25.38(2.3)	129.5(11.6)
VRMT-11.25	1,184(41)	1,733(59)	2,917	374.8(31.6)	51.1(5.0)	162.3(13.7)	14.51(1.2)	122.4(10.3)
VRMT-15.00	1,499(43)	1,989(57)	3,488	466.7(41.9)	87.6(5.9)	144.3(9.6)	45.54(3.0)	162.7(10.9)
VSMS-11.25	932(42)	1,291(58)	2,214	314.7(33.7)	75.5(8.1)	82.9(8.9)	25.55(2.7)	113.4(12.2)
VSMS-15.00	1,458(40)	2,149(60)	3,607	476.7(32.7)	123.1(8.4)	99.2(6.8)	66.59(4.5)	184.3(12.6)
VSMT-11.25	1,895(59)	1,335(41)	3,230	333.4(17.6)	51.7(2.7)	86.5(4.5)	7.30(0.4)	85.3(4.5)
VSMT-15.00	1,620(45)	1,968(55)	3,588	517.2(31.9)	107.8(6.7)	108.9(6.7)	76.46(4.7)	178.5(11.0)

Table 4.4 Member absorbed energy of struck ship in ship-to-ship scenarios of VLCC

Case	Member absorbed energy in struck ship (MN-m)							
	Shell	Upper deck	Side long. BHD	Stringer	Web frame	Stiffener	Swash BHD	transverse BHD
VROS-11.25	283.7(12.4)	155.0(6.7)	197.6(8.6)	138.9(6.0)	167.0(7.3)	331.8(14.4)	88.6(3.8)	0.9(0.0)
VROS-15.00	309.7(12.3)	417.7(16.7)	303.0(12.1)	151.8(6.0)	418.2(16.7)	515.3(20.6)	50.6(2.0)	2.0(0.1)
VROT-11.25	214.4(13.9)	54.1(3.5)	71.7(4.7)	84.7(5.5)	121.4(7.8)	185.6(12.0)	2.7(0.2)	44.2(2.9)
VROT-15.00	338.2(19.3)	134.2(7.7)	62.3(3.6)	192.3(11.0)	218.9(12.6)	403.7(23.1)	20.7(1.2)	86.5(4.9)
VSOS-11.25	273.0(20.4)	158.5(11.8)	186.5(13.9)	155.1(11.6)	185.4(13.8)	256.8(19.2)	45.7(3.4)	7.0(0.5)
VSOS-15.00	390.9(17.4)	316.3(14.1)	318.5(14.2)	201.3(9.0)	304.7(13.6)	438.4(19.6)	86.6(3.8)	11.7(0.5)
VSOT-11.25	202.4(26.8)	46.1(6.1)	45.0(6.0)	74.7(10.0)	100.6(13.4)	159.3(21.1)	1.2(0.2)	44.8(6.0)
VSOT-15.00	374.8(19.8)	151.0(8.0)	252.0(13.3)	191.6(10.2)	215.4(11.4)	460.3(24.4)	24.9(1.3)	99.8(5.3)
VRMS-11.25	294.4(12.8)	174.1(7.6)	207.3(9.0)	146.1(6.3)	176.7(7.7)	347.6(15.1)	81.8(3.6)	0.8(0.0)
VRMS-15.00	432.0(11.1)	231.2(5.9)	295.4(7.6)	180.7(4.7)	290.1(7.5)	563.5(14.5)	148.8(3.8)	1.4(0.0)
VRMT-11.25	243.8(14.1)	61.6(3.6)	99.6(5.7)	116.5(6.7)	246.4(14.2)	254.0(14.7)	3.4(0.1)	53.5(3.1)
VRMT-15.00	373.8(18.8)	167.8(8.4)	263.2(13.2)	212.3(10.7)	224.4(11.3)	516.8(26.0)	15.1(0.8)	110.9(5.6)
VSMS-11.25	265.3(20.5)	115.6(8.9)	166.4(12.9)	147.3(11.4)	200.2(15.5)	281.4(21.8)	43.5(3.4)	3.3(0.0)
VSMS-15.00	420.3(19.5)	257.6(12.0)	278.3(12.9)	178.4(8.3)	187.2(8.7)	468.6(21.8)	54.3(2.5)	8.2(0.4)
VSMT-11.25	302.9(22.6)	110.8(8.3)	147.2(11.0)	170.8(12.8)	176.9(13.2)	263.5(19.7)	1.9(0.1)	105.5(7.9)
VSMT-15.00	390.8(19.9)	171.4(8.7)	245.3(12.4)	200.1(10.2)	218.7(11.1)	509.5(25.9)	15.2(0.8)	110.8(5.6)

Table 4.5 Absorbed energy of striking ship in ship-to-rigid scenarios of VLCC

Case	Total absorbed energy (MN-m)	Member absorbed energy in striking ship (MN-m)				
		Shell	Upper deck	Primary member	Collision BHD	Stiffener
VR0P-11.25	2,839	490.1(17.3)	0.4(0.0)	232.5(8.2)	62.71(2.2)	188.7(6.6)
VR0P-15.00	5,020	807.6(16.1)	1.7(0.0)	264.8(5.3)	168.54(3.3)	453.3(9.0)
VROF-11.25	2,871	498.8(17.3)	116.2(4.0)	252.3(8.8)	20.75(0.7)	182.3(6.3)
VROF-15.00	5,028	678.2(13.5)	151.8(3.0)	335.8(6.7)	128.42(2.5)	443.2(8.8)
VSOP-11.25	2,873	342.0(11.9)	0.5(0.0)	185.5(6.4)	117.25(4.1)	210.7(7.3)
VSOF-11.25	2,866	568.7(19.8)	129.7(4.5)	211.3(7.4)	30.14(1.0)	204.8(7.1)
VSOF-15.00	4,973	775.1(15.6)	202.8(4.1)	230.2(4.6)	205.10(4.1)	388.3(7.8)
VRMP- 7.50	1,304	230.5(17.7)	0.1(0.0)	99.4(7.6)	15.13(1.2)	73.9(5.7)
VRMP-11.25	2,886	469.0(16.3)	2.5(0.1)	138.7(4.8)	106.90(3.7)	336.9(11.7)
VRMF- 7.50	1,923	250.7(13.0)	55.0(2.9)	115.7(6.0)	5.57(0.3)	72.0(3.7)
VRMF-11.25	2,898	490.5(17.0)	131.4(4.5)	187.3(6.5)	96.75(3.3)	258.5(8.9)
VSMP- 7.50	1,309	239.3(18.3)	0.1(0.0)	82.4(6.3)	39.31(3.0)	76.4(5.8)
VSMP-11.25	2,910	476.2(16.9)	3.2(0.1)	112.0(3.8)	121.33(4.2)	254.5(8.7)
VSMF- 7.50	1,301	276.3(21.2)	64.2(4.9)	72.9(5.6)	12.10(1.0)	68.6(5.3)
VSMF-11.25	2,890	468.4(16.8)	136.9(4.7)	114.9(4.0)	105.40(3.6)	233.2(8.1)

Table 4.6 Deformation and rupture status of ship-to-ship scenarios of containership

Case	Penetration (m)	Rebound time (sec)	Collision BHD Deformation (Rupture state)(m)			Side longitudinal BHD Deformation (Rupture state)(m)	
			Upper	Center	Lower	Depth	Width
			COS-18.75	25.71	5.48	0.00	0.00
COS-25.00	42.26	6.18	0.00	0.00	C, 0.10	24.0	41.0
COT-12.50	13.89	3.69	0.00	0.00	0.00	0.3, Transverse BHD side U	
COT-18.75	22.61	4.00	C, 0.96	C, 0.02	W, 1.43	1.6, Transverse BHD side U	
COT-25.00	31.19	4.50	W, 8.79	W, 5.65	W, 8.29	2.5, Transverse BHD side U	
CMS-12.50	14.16	3.83	0.00	0.00	C, 0.24	2.0, Swash BHD CU	
CMS-18.75	23.59	4.38	W, 3.04	W, 0.63	W, 7.27	4.0	6.1
CMS-25.00	41.59	5.98	W, 2.35	C, 0.10	W, 7.37	24.0	41.0
CMT-12.50	13.79	3.68	C, 0.02	0.00	C, 0.37	0.4, Transverse BHD side U	
CMT-18.75	21.98	3.93	W, 5.24	W, 4.21	W, 8.26	1.7, Transverse BHD side U	
CMT-25.00	30.12	4.16	W, 9.44	W, 9.00	W, 15.1	10.2	30.7

C : center area, W : whole area

Table 4.7 Deformation and rupture status of ship-to-rigid scenarios of containership

Case	Penetration (m)	Rebound time (sec)	Collision BHD in striking ship Deformation (Rupture state)(m)		
			Upper	Center	Lower
COP-12.50	22.16	6.01	0.00	C, 0.81	C, 2.19
COP-18.75	36.00	-	0.00	W, 10.00	W, 10.00
COF-12.50	14.04	3.63	0.00	0.00	0.00
COF-18.75	22.55	4.01	W, 3.61	W, 1.66	C, 1.93
CMP-12.50	22.38	6.05	0.00	W, 8.08	W, 8.55
CMP-18.75	26.00	-	0.00	W, 10.00	W, 10.00
CMF-12.50	13.96	3.59	C, 0.83	C, 0.21	C, 0.49
CMF-18.75	22.21	4.01	W, 9.91	W, 7.50	W, 8.87

C : center area, W : whole area

Table 4.8 Absorbed energy of striking ship in ship-to-ship scenarios of containership

Case	Absorbed energy (MN-m)			Member absorbed energy in striking ship (MN-m)				
	Striking	Struck	Total	Shell	Upper deck	Primary member	Collision BHD	Stiffener
COS-18.75	1,765(66)	905(34)	2,670	317.7(18.0)	68.1(3.9)	65.5(3.7)	0.02(0.0)	87.2(4.9)
COS-25.00	2,638(57)	1,967(43)	4,605	349.9(13.3)	96.0(3.6)	74.5(2.8)	0.81(0.0)	85.1(3.3)
COT-12.50	1,055(90)	111(10)	1,166	246.5(23.4)	61.5(5.8)	50.9(5.8)	0.00(0.0)	68.8(6.7)
COT-18.75	2,217(85)	383(15)	2,600	398.4(18.0)	125.0(5.6)	100.0(4.5)	11.10(0.5)	92.0(4.3)
COT-25.00	3,780(85)	656(15)	4,436	582.2(15.4)	151.8(4.0)	190.2(5.0)	49.34(1.3)	110.3(3.0)
CMS-12.50	887(75)	290(25)	1,177	221.2(24.9)	42.2(4.8)	41.8(4.7)	0.30(0.0)	45.6(5.1)
CMS-18.75	1,743(67)	864(33)	2,607	300.8(17.3)	87.3(5.0)	72.9(4.2)	23.04(1.3)	91.1(5.1)
CMS-25.00	2,569(55)	2,099(45)	4,668	356.3(13.9)	87.0(3.4)	78.8(3.1)	23.91(0.9)	86.2(3.3)
CMT-12.50	1,050(90)	119(10)	1,169	255.3(24.3)	60.0(5.7)	49.8(4.7)	2.22(0.2)	75.8(7.2)
CMT-18.75	2,187(86)	353(24)	2,540	399.9(18.3)	101.9(4.7)	84.6(3.9)	32.04(1.5)	101.3(4.6)
CMT-25.00	3,542(79)	915(21)	4,457	509.3(14.4)	129.8(3.7)	139.2(3.9)	34.60(1.0)	98.1(2.7)

Table 4.9 Member absorbed energy of striking ship in ship-to-ship scenarios of containership

Case	Member absorbed energy in struck ship (MN-m)							
	Shell	Upper deck	Side long. BHD	Stringer	Web frame	Stiffener	Swash BHD	transverse BHD
COS-18.75	305.9(33.8)	68.3(7.5)	170.6(18.9)	99.3(11.0)	126.1(13.9)	153.6(17.0)	57.8(6.4)	
COS-25.00	306.4(15.6)	231.3(11.8)	236.8(12.0)	114.8(17.2)	223.3(11.4)	378.4(19.2)	166.1(8.4)	
COT-12.50	31.5(28.4)	0.3(0.3)	0.2(0.2)	7.7(6.9)	11.2(10.1)	29.6(26.7)		20.6(18.6)
COT-18.75	143.0(37.3)	12.0(3.1)	19.9(5.2)	34.2(8.9)	55.3(14.4)	84.1(22.0)		26.9(7.0)
COT-25.00	253.6(38.6)	39.3(6.0)	65.5(10.0)	65.0(9.9)	97.2(14.8)	152.3(23.2)		27.6(4.2)
CMS-12.50	86.0(29.7)	0.1(0.0)	14.7(5.1)	28.2(9.7)	38.1(13.1)	51.0(17.6)	33.2(11.4)	
CMS-18.75	218.9(25.3)	62.9(7.3)	125.0(14.5)	80.8(9.4)	101.9(11.8)	158.2(18.3)	41.8(4.8)	
CMS-25.00	291.3(13.9)	261.6(12.5)	250.3(11.9)	127.8(6.1)	230.7(11.0)	372.1(17.7)	167.5(8.0)	
CMT-12.50	30.8(25.9)	0.7(0.6)	0.9(0.8)	7.3(6.1)	16.7(14.0)	29.5(24.8)		23.2(19.5)
CMT-18.75	147.7(41.8)	14.6(4.1)	20.2(5.7)	34.2(9.7)	52.2(14.7)	87.6(24.8)		22.7(6.4)
CMT-25.00	218.0(23.8)	79.9(8.7)	139.0(15.2)	75.7(8.3)	99.9(10.9)	221.1(24.2)		21.8(2.4)

Table 4.10 Absorbed energy of striking ship in ship-to-rigid scenarios of containership

Case	Total absorbed energy (MN-m)	Member absorbed energy in striking ship (MN-m)				
		Shell	Upper deck	Primary member	Collision BHD	Stiffener
COP-18.75	1,200	257.6(21.5)	0.7(0.1)	72.9(6.1)	10.14(0.8)	49.9(4.2)
COP-25.00	1,446	188.2(13.0)	1.4(0.1)	46.8(3.2)	15.27(1.1)	50.3(3.5)
COF-18.75	1,167	437.4(37.5)	74.4(6.4)	61.5(5.3)	0.00(0.0)	76.3(6.5)
COF-25.00	2,600	506.3(19.5)	118.3(4.6)	85.2(3.3)	35.02(1.3)	110.3(4.2)
CMP-18.75	1,196	241.4(20.2)	0.7(0.1)	66.9(5.6)	12.74(1.1)	47.8(4.0)
CMP-25.00	1,297	262.9(20.3)	2.5(0.2)	80.6(6.2)	12.82(1.0)	50.1(3.9)
CMF-18.75	1,171	297.8(25.4)	73.6(6.3)	60.0(5.1)	8.51(0.7)	80.0(6.8)
CMF-25.00	2,599	509.6(19.6)	137.3(5.3)	131.8(5.1)	31.55(1.2)	104.9(4.0)

충돌선 300,000 DWT VLCC와 6,800 TEU 컨테이너선이 피충돌선 300,000 DWT VLCC와 강체에 충돌하는 다양한 시나리오에 대하여 본 연구에서 수행한 충돌 수치 시뮬레이션의 결과를 유조선과 컨테이너선에 대하여 각각 종합하여 고찰하면 다음과 같다.

4.2 300,000 DWT VLCC 충돌 시뮬레이션 결과에 대한 고찰

1. 선박간 충돌에서 SOLAS 규칙에 의한 최소거리에 충돌격벽이 위치한 유조선의 강성 및 연성 선수구조부가 피충돌선의 swash BHD에 충돌하는 경우 최대운항속도의 75% 충돌속도에서 충돌격벽의 상부와 외판이 접하는 부위가 파열되었고, 100% 충돌속도에서는 모든 조건에서 충돌격벽이 크게 파열하였다. 75% 충돌속도의 경우 충돌격벽의 중앙부에 0.0~1.0m 정도, 충돌격벽의 상하부와 외판이 접하는 부위는 0.8~1.5m 정도, 그리고 100% 충돌속도의 경우는 각각 2.4~3.2m와 1.2~3.4m 정도로 변형이 크게 발생하였다.
2. 선박간 충돌에서 운항중인 기준선(SOLAS 규칙에 의한 최소거리 충돌격벽 위치에서 48% 정도 선미방향에 충돌격벽이 위치) 유조선의 강성 및 연성 선수구조부의 경우 75% 충돌속도에서는 충돌격벽은 파열되지 않았지만 충돌격벽 중앙부에 0.1~0.7m 정도의 변형이 발생하였다. 하지만 100% 충돌속도로 강성 선수구조부가 swash BHD에 충돌하는 경우 충돌격벽의 상하부와 외판이 접하는 부위가 파열되었으며, 이때 강성/연성 선수구조부 모두는 충돌격벽의 상하부와 외판이 접하는 부위에 0.6m, 중앙부에 0.9~1.3m 정도의 변형을 발생시켰다.
3. 강체충돌에서 SOLAS 규칙에 의한 최소거리에 충돌격벽이 위치한 유조선의 강성 및 연성 선수구조부가 50% 충돌속도로 충돌하는 경우 모든 충돌격벽은 파열되지는 않았지만 0.2~2.2m 정도의 큰 변형이 발생하였고, 75% 충돌속도에서는 모든 충돌격벽이 파열되었고 그들의 역할을 상실하였다.
4. 강체충돌에서 기준선 유조선의 강성 선수구조부가 75% 충돌속도로 충돌하는 경우 충돌격벽은 파열되지 않았지만, 연성 선수구조부가 전면충돌하는 경우 충돌격벽의 중하부에 파열이 발생하였다. 100%의 충돌속도에서는 모든 조건에서 충돌격벽이 파열되어서 충돌격벽의 기능을 상실하였다. 그리고 파열이 발생하지 않은 경우의 충돌격벽에서도 1.0~3.3m 정도로 변형이 크게 발생하였다.
5. 연성 선수구조부가 피충돌선 transverse BHD에 75%의 충돌속도로 충돌하는 경우 이외는 피충돌선의 선측중격벽판에 파열이 발생하였다. 강성 선수구조부가 연성 선수구조부에 비하여 대체로 피충돌선의 선측중격벽판을 파열시키는 정도가 더 컸다.
6. 전반적으로 연성 선수구조부가 강성 선수구조부에 비하여 전체적으로 손상은 크게 나타났지만 선미방향으로의 충돌에너지 전달량이 작으므로 충돌격벽에서의 구조적 안전성은 더 유리하다고 판단된다. 또한 선박간 충돌에 있어서도 강성 선수구조부가 충돌하는 경우 피충돌선에 충돌에너지 전달량이 많아서 연성 선수구조부에 비하여 피충돌선에 손상을 더 크게 발생시켰다.

7. 충돌선과 피충돌선의 전체 충돌 흡수에너지의 크기에 있어서는 swash BHD에 충돌하는 경우 강성 선수구조부가 연성 선수구조부 보다 크고 transverse BHD에 충돌하는 경우에는 연성 선수구조부가 강성 선수구조부에 비하여 대체적으로 큰 반면, 전체적으로는 연성 선수구조부가 충돌에너지의 크기 및 전체 비율에 있어서 강성 선수구조부 보다 훨씬 크게 나타났다.
8. 선박간 충돌에서 충돌선의 각 주요부재의 충돌 흡수에너지는 대체로 외판이 가장 크고, 보강재, 주 구조부재 및 상갑판은 비슷하였다. 강체충돌 시에는 외판의 충돌 흡수에너지의 비율은 상당히 작아지고, 주 구조부재와 보강재의 비율이 상대적으로 증가하였다. 구상선수부가 강체에 충돌하는 경우는 충돌격벽이 상갑판 보다 훨씬 충돌에너지를 많이 흡수하였고, 전반적으로 강체에 충돌하는 경우 상갑판이 충돌에너지를 더 크게 흡수하지만 충돌격벽에 손상이 크게 발생하면 비슷한 크기였다.
9. 선박간 충돌 시 피충돌선에 있어서는 대체적으로 보강재, 외판, 선측중격벽판, 늑골(web frame), 스트링거(stringer) 및 상갑판 순서의 크기로 충돌에너지를 흡수하였고, swash BHD와 transverse BHD도 충돌부위에 따라 어느 정도 충돌에너지를 흡수하였다. 충돌격벽에 의한 충돌저항이 어느 정도 컸다고 할 수 있으며 충돌격벽의 전후부의 주 구조부재와 외판과의 접합 부위에서 주로 손상이 발생하였다. 현재의 SOLAS 규정에 의한 최소거리 충돌격벽의 위치를 유지하기 위해서는 이중 충돌격벽(double collision bulkhead) 등과 같은 구조 형상에 대한 검토도 필요하다고 사료된다.

4.3 6,800 TEU 컨테이너선 충돌 시뮬레이션 결과에 대한 고찰

1. 선박간 충돌에서 운항중인 기준선(SOLAS 규칙에 의한 최소거리 충돌격벽 위치에서 61% 정도 선미방향에 충돌격벽이 위치) 컨테이너선이 피충돌선의 swash BHD에 75% 충돌속도로 충돌하는 경우 충돌격벽이 손상되기 직전 리바운딩 하였으며, 100% 충돌속도에서는 충격격벽 하부에 0.1m 정도의 변형만 발생하였다. 그러나 피충돌선의 transverse BHD에 충돌하였을 경우 50% 충돌속도에서 충돌격벽에 손상없이 리바운딩 되었으나, 75% 충돌속도에서는 충돌격벽 하부 전체가 크게 파열하였고 100% 충돌속도에서는 충돌격벽 전반이 파열되었다.
2. 선박간 충돌에서 기준선 컨테이너선이 피충돌선의 swash BHD에 충돌하는 경우 피충돌선의 선측중격벽판이 대체로 크게 파열된 반면, transverse BHD에 충돌하는 경우 선측중격벽판은 파열되지 않았으나 충돌속도에 따라 transverse BHD 양쪽 4.0m 정도 떨어진 상부 선측중격벽판에 0.3~2.5m 정도의 변형이 발생하였다.
3. 선박간 충돌에서 SOLAS 규칙에 의한 최소거리에 충돌격벽이 위치한 컨테이너선이 50% 충돌속도에서 충돌격벽에 파손이 발생하지 않았지만 충돌격벽의 하부에 0.2~0.4m 정도 변형이 발생하였고, 75% 및 100% 충돌속도에서는 모든 조건에서 충돌격벽이 매우 크게 파열되었다.
4. 50%의 충돌속도에서 구상선수부가 강체충돌하는 경우에도 충돌격벽의 중앙부와

하부가 크게 파열되었고 최소거리 충돌격벽의 위치를 갖는 컨테이너선의 경우는 충돌격벽이 완전히 붕괴되었다. 또한 75%의 충돌속도에서도 모든 조건에서 충돌격벽이 완전히 붕괴되는 것으로 나타났다.

5. 선박간 충돌에서는 피충돌선 유조선보다 훨씬 큰 비율로 충돌에너지 대부분을 충돌선 컨테이너선이 흡수하였다. 이러한 현상은 피충돌선에 비하여 충돌선이 구조적으로 연성구조이기 때문이다. 특히 피충돌선의 transverse BHD에 충돌하는 경우에는 79~92% 정도의 충돌에너지를 충돌선이 흡수하였다.

6. 선박간 충돌에서 컨테이너선 충돌선의 각 부재가 흡수하는 충돌에너지는 유조선의 경우와 비슷하게 대체로 외판이 가장 크고, 상갑판, 보강재 및 주 구조부재는 비슷하였다. 충돌격벽에 큰 손상이 발생할 경우에는 유조선과 달리 충돌격벽의 충돌에너지 흡수능력은 크지 않았다. 구상선수부가 강체에 충돌하는 경우에는 상갑판의 충돌에너지의 흡수율은 매우 미미하였다. 선박간 충돌 시 피충돌선에 있어서는 대체적으로 외판, 보강재, 늑골, 스트링거, 선측중격벽판 및 상갑판 순서의 크기로 충돌에너지를 흡수하였다.

7. 본 연구에서 고려한 6,800 TEU 컨테이너선은 300,000 DWT 유조선에 비하여 중량은 작지만, 운항속도가 크기 때문에 전체적으로 피충돌선에 미치는 운동에너지는 크게 적지 않았다. 그리고 전자의 선수구조부가 후자에 비하여 연성구조로 되어 있으므로 피충돌선의 손상은 후자에 비하여 적은 편이다. 이러한 점에서 컨테이너선과 같이 고속화물선의 경우 SOLAS 규칙에 의한 충돌격벽의 위치는 유조선과 같이 저속 비대선과는 다른 방안이 요구된다.

4.4 종합적인 충돌 시뮬레이션 결과에 대한 고찰

1. 기준선 컨테이너선의 경우 75%의 충돌속도에서도 선박간 충돌 시 충돌격벽이 파열되었고, SOLAS 규칙에 의한 최소거리에 충돌격벽이 위치한 경우에는 유조선과 컨테이너선 모두 75%의 충돌속도에서 선박간 충돌에서도 충돌격벽이 파열되었다.
2. 강제 충돌 시 컨테이너선의 경우 50%의 충돌속도에서도 충돌격벽의 위치에 관계없이 파열되었다. 이러한 점에서 충돌격벽의 위치와 관련된 SOLAS 규칙과 이중 충돌격벽의 효율성에 대한 검토가 있어야 할 것이다. 본 연구에서 수행한 수치 시뮬레이션에서는 충돌 시 충돌격벽 뒤의 제1화물창의 유류 또는 화물로부터의 예상되는 2차 충격하중은 고려하지 않았다. 이를 고려한다면 충돌격벽에 대한 손상은 좀더 증가될 것으로 사료된다.
3. 유조선의 연성 및 강성 선수구조부에 대한 검토를 통하여 내충돌 및 중량감소 측면에서는 연성구조가 바람직하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 선수구조부의 내충돌에 우수한 최적 구조배치에 대하여 심도 있는 연구를 수행할 필요가 있다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 선종별 선수구조부의 붕괴거동과 그 영향에 의하여 충돌격벽에 미치는 영향을 검토하였다. 이 연구는 많은 시간과 고도의 설계 요소기술, 그리고 동적 비선형 유한요소 프로그램인 explicit hydrocode를 사용하여야 수행할 수 있기 때문에 지금까지 체계적인 연구가 이루어지지 못한 분야라고 할 수 있다. 본 연구에서는 좌초 실험의 결과와의 비교를 통하여 시뮬레이션 code LS/DYNA3D와 실선 충돌 시뮬레이션 해석능력을 검증하였고, SOLAS 규칙에 따라 건조된 300,000 DWT VLCC와 6,800 TEU 컨테이너선이 피충돌선으로 선정된 300,000 DWT VLCC 또는 강체에 충돌하는 경우 등 다양한 선수충돌 시나리오에 대하여 수행한 수치 시뮬레이션의 결과를 종합적으로 검토하였다.

본 연구 결과에 의하면 SOLAS 규칙에 의한 충돌격벽의 최소거리 위치조건은 해양오염방지과 운항안전 상 반드시 수정 및 보완되어야 한다고 사료되며 현재의 SOLAS 규칙 개정의 필요성을 국제해사기구에 제안하고자 한다. SOLAS 규칙에 의한 충돌격벽의 최소거리에 대한 적합성과 내충돌 성능에 우수한 선수구조부의 도출에 대한 연구를 위해서는 본 연구에서 수행한 결과를 바탕으로 보다 더 다양한 선종과 선박 크기에 대한 연구가 필요하다고 사료된다. 이러한 연구는 내충돌 성능에 우수한 선박을 건조함으로써 국내 조선기술의 핵심요소기술을 향상시키고 선박의 잠재적 충돌사고로 인한 해양오염 및 인명·재산 손실을 최소화시켜서 신조·수리부분의 수주 및 국제해사기구에서의 위상을 향상시키는 계기를 제공할 것으로 사료된다.

1. 선박간 충돌 시 운항중인 기준선 컨테이너선의 경우 최대운항속도의 75%의 충돌속도에서 충돌격벽이 파열되었다. 이는 최소거리에 충돌격벽이 위치한 유조선과 컨테이너선 모두의 경우에서도 동일하였다. 이러한 현상은 충돌격벽의 위치에 대한 SOLAS 규칙을 해석적 접근으로 검토할 때 고 에너지 충돌에서는 적합하지 못하다는 것을 의미한다.
2. 강체 충돌 시 컨테이너선의 경우에는 50%의 충돌속도에서도 충돌격벽의 위치에 관계없이 파열되었다. 여기서 충돌격벽의 파열이란 파공이 발생한 것을 의미하고, 파공이 발생하지 않았다고 하더라도 심한 손상을 받은 충돌격벽은 발생된 소성변형과 수압 등으로 쉽게 파열될 가능성이 크다고 볼 수 있다.
3. 전반적으로 선수구조부의 강성이 크면 압축강성이 크기 때문에 압괴거리는 짧으나 후부로 많은 잔류에너지가 전달되어 전체적으로 크고 넓게 탄소성 변형을 발생시켰다. 이러한 점은 충돌격벽에 직접 충돌에너지를 전달하게 되므로 충돌격벽의 안전성에 반드시 유리하다고 볼 수 없다.
4. 선박간 충돌에 있어서 강성 선수구조부가 충돌하는 경우 연성구조에 비하여 피충돌선의 선측중격벽판의 손상이 크게 발생하였다. 이는 충돌에너지를 피충돌선에서 더 많이 전달하기 때문이다.
5. 컨테이너선이 300,000 DWT VLCC에 충돌할 경우 유조선의 경우보다 훨씬 큰 비율로 충돌에너지의 대부분을 충돌선이 흡수하였다. 이것은 피충돌선에 비하여 충

돌선이 상대적으로 연성구조이기 때문에 나타난 현상이라고 본다.

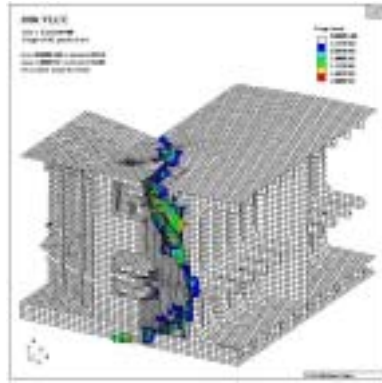
6. 충돌거동은 충돌체의 질량 증가보다는 충돌속도의 증가에 의하여 더 큰 영향을 받고 피충돌체의 중량과 강성 또한 충돌체의 내충돌 성능에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 본 연구에서 고려한 유조선 보다 작은 중·소형 유조선이 대형 유조선에 충돌한다면 충돌격벽을 포함한 손상은 훨씬 증가할 것으로 사료된다.

7. 전반적으로 충돌격벽에 손상이나 변형이 발생하였을 때 충돌격벽의 충돌에 대한 저항이 어느 정도 컸다고 할 수 있다. 현재의 SOLAS 규칙에 의한 최소거리 충돌격벽의 위치를 유지하기 위해서 또는 보다 내충돌에 우수한 선수구조부를 위해서는 이중충돌격벽 등의 새로운 구조 형상에 대한 검토가 요구된다.

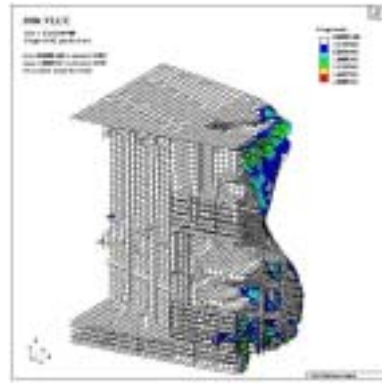
8. 내충돌성 향상, 피충돌선 손상저감 및 선수부 구조단순화로 인한 중량감소 측면에서 연성구조가 바람직하지만 연성 선수구조부의 내충돌에 대한 연구를 보다 더 심도 있게 수행할 필요가 있다고 사료된다.

부록 A

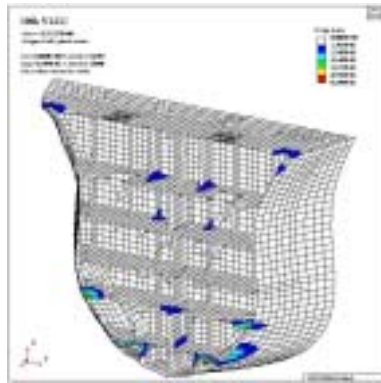
300,000 DWT VLCC 선박간 충돌 시뮬레이션 결과



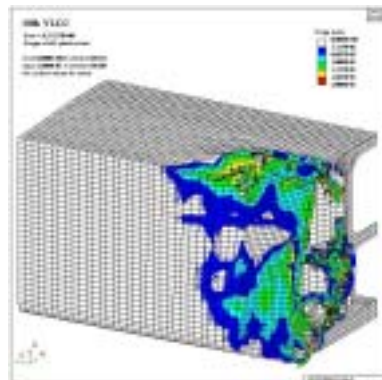
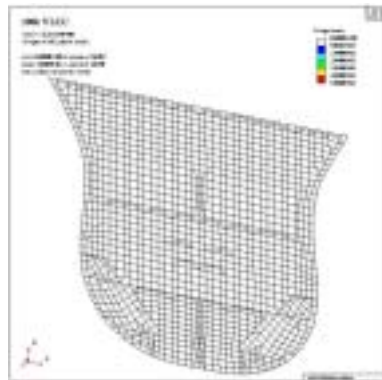
(a) Bow and side struck

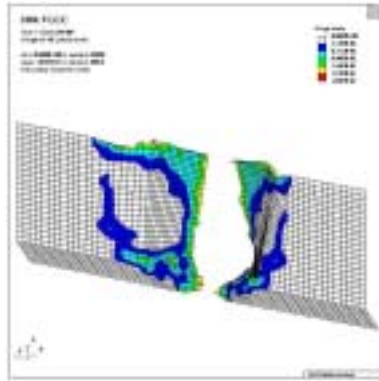


(c) Collision BHD



(b) Half of striking bow w/ primary members



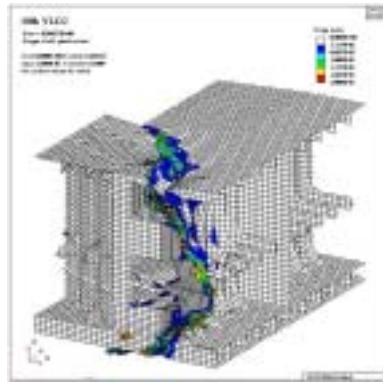


(d) Collision BHD

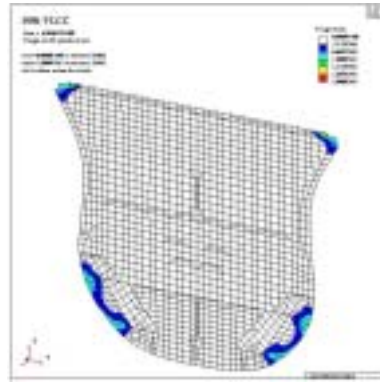
(e) Side struck
BHD

(f) Side longitudinal

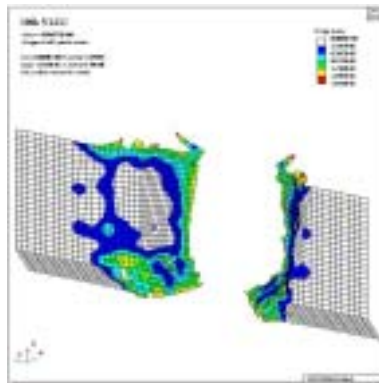
Fig. A.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROS-11.25



(a) Bow and side struck

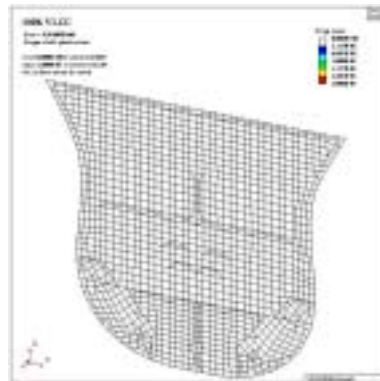
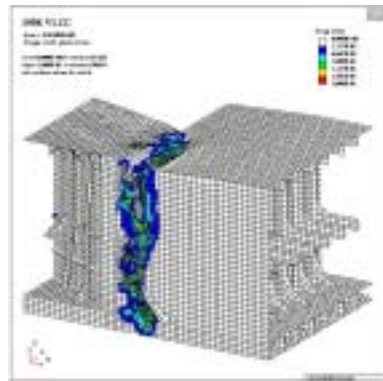


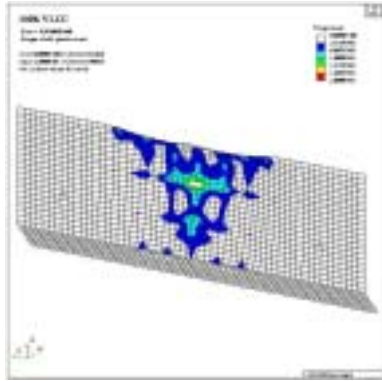
(b) Collision BHD
longitudinal BHD



(c) Side
longitudinal BHD

Fig. A.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROS-15.00



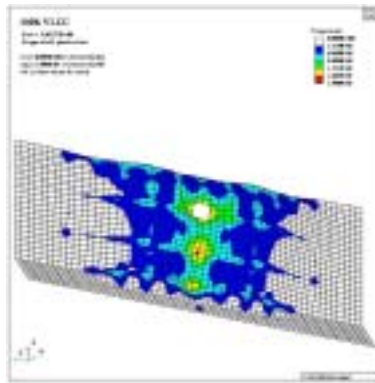
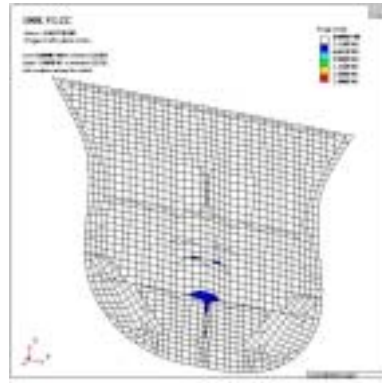
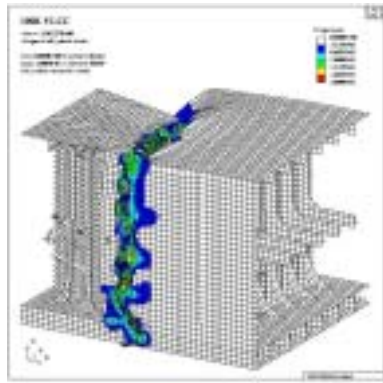


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROT-11.25

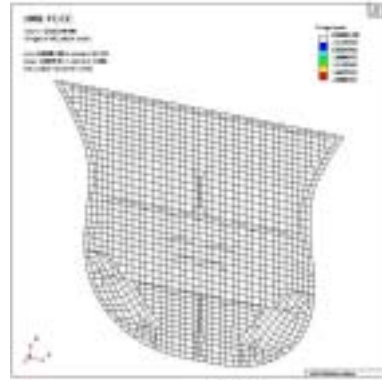
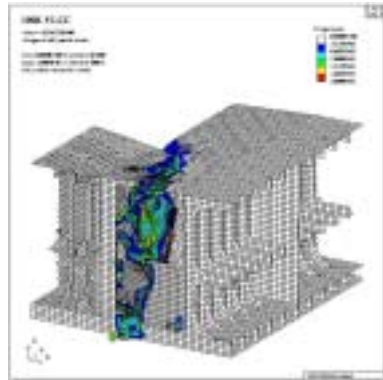


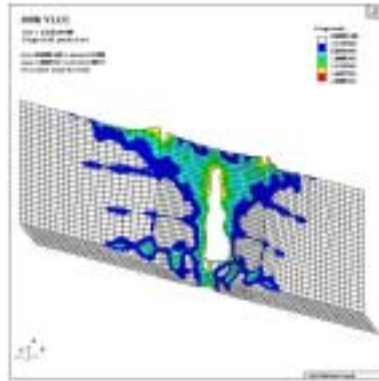
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROT-15.00



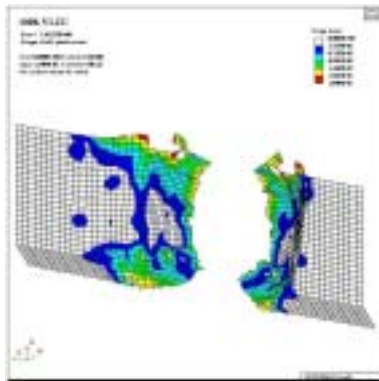
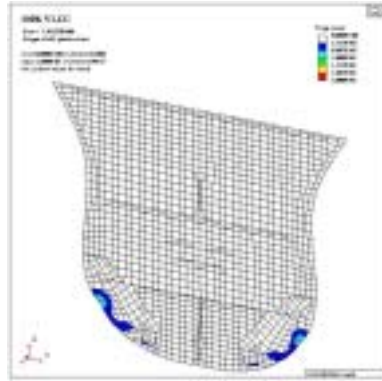
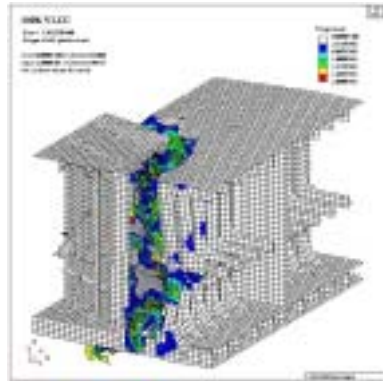


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOS-11.25

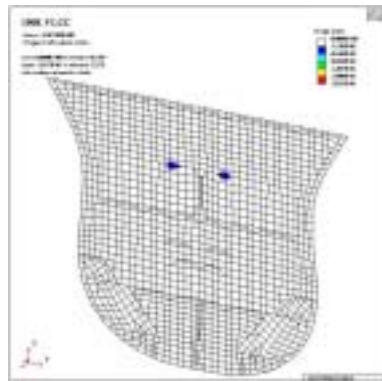
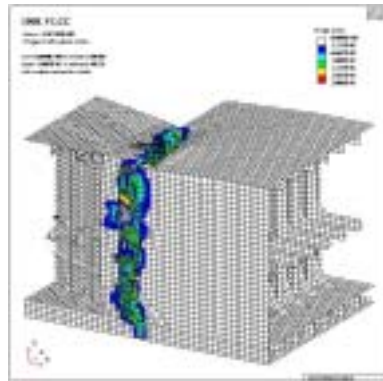


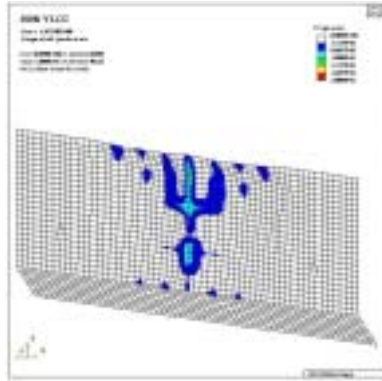
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOS-15.00



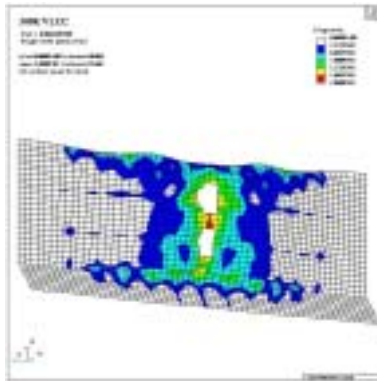
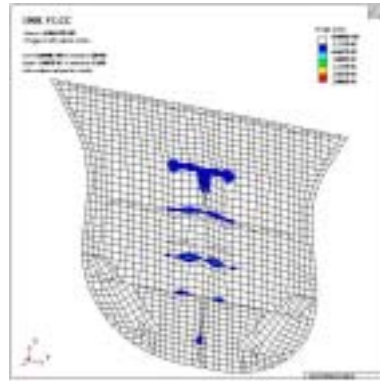
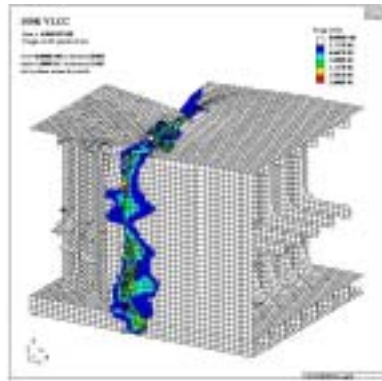


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOT-11.25

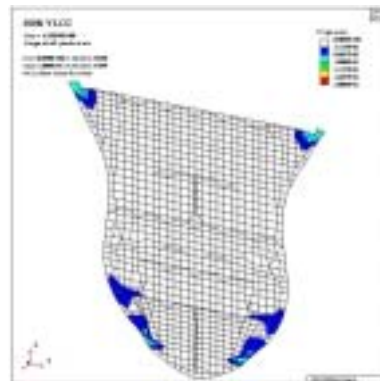
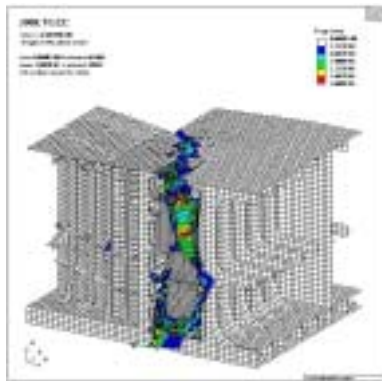


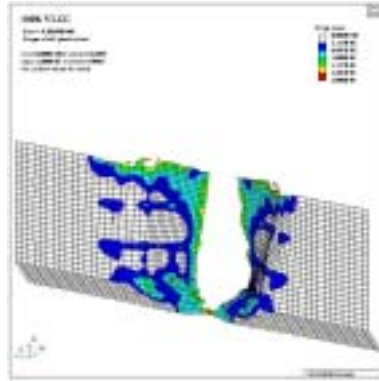
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOT-15.00



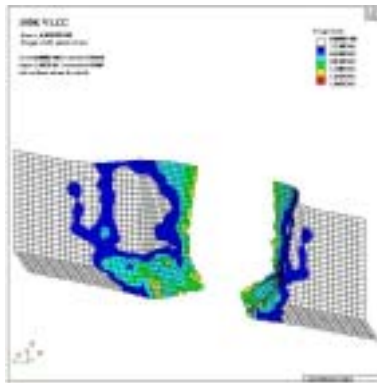
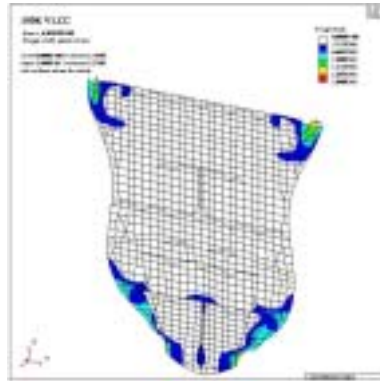
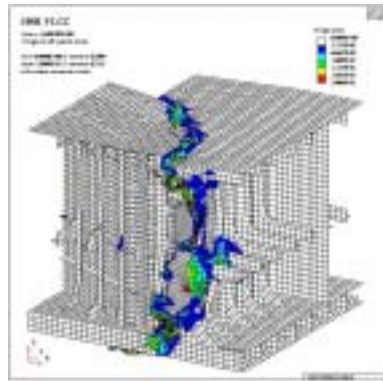


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.9 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMS-11.25

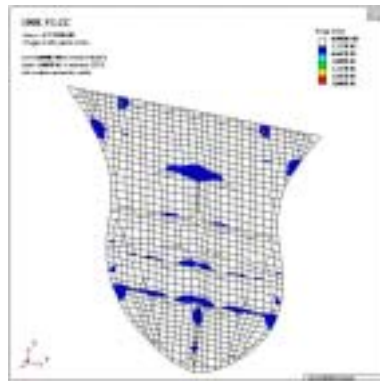
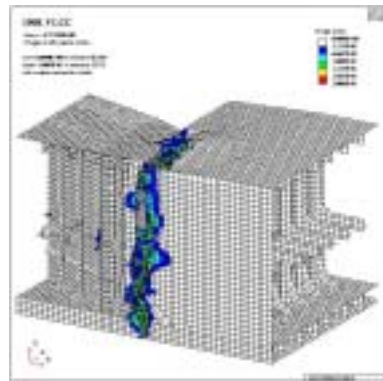


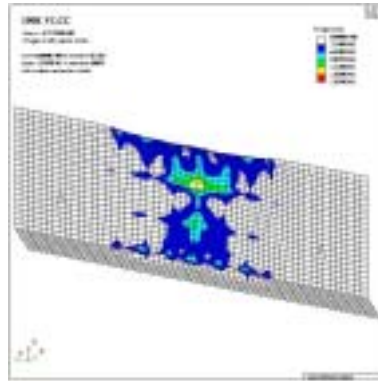
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.10 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMS-15.00



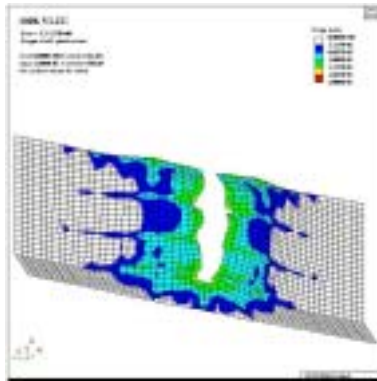
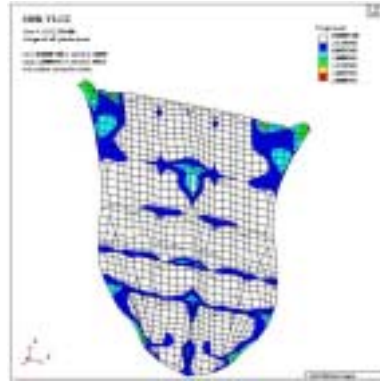
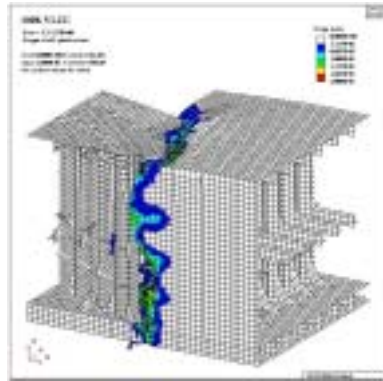


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.11 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMT-11.25

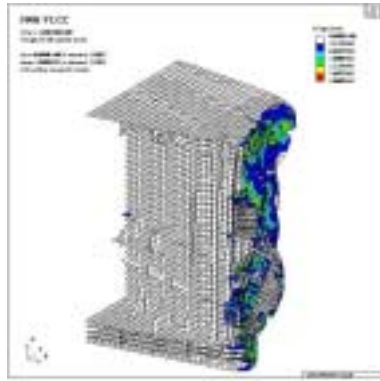
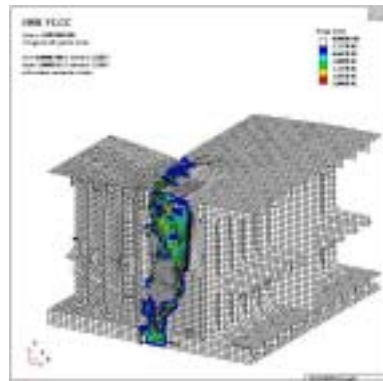


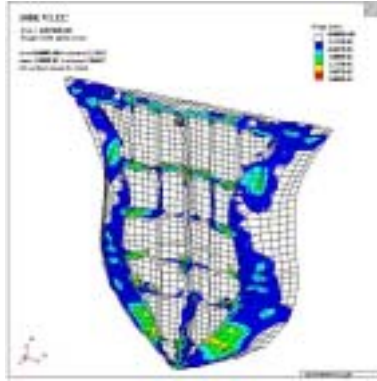
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.12 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMT-15.00



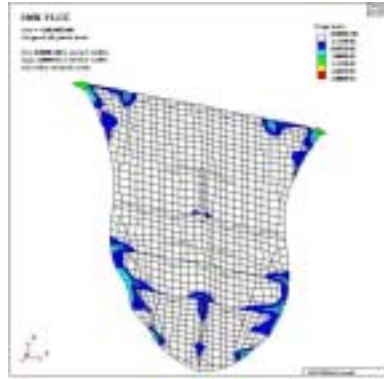


(a) Bow and side struck

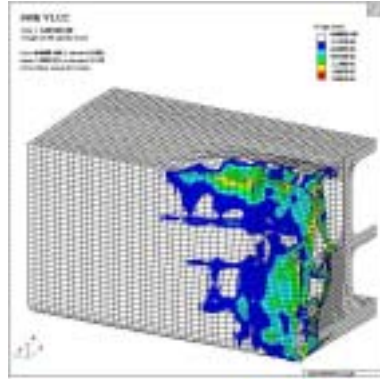
(b) Half of striking bow
w/ primary members

(c) Collision BHD

Fig. A.13 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMS-11.25
(continued)



(d) Collision BHD



(e) Side struck
BHD

(f) Side longitudinal
BHD

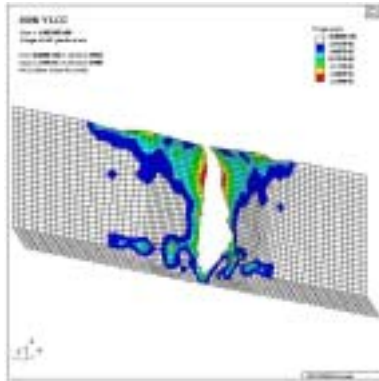
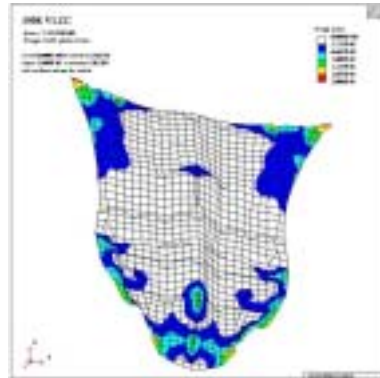
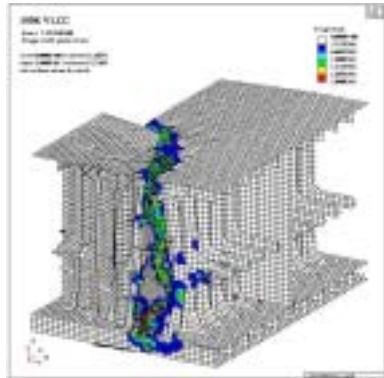
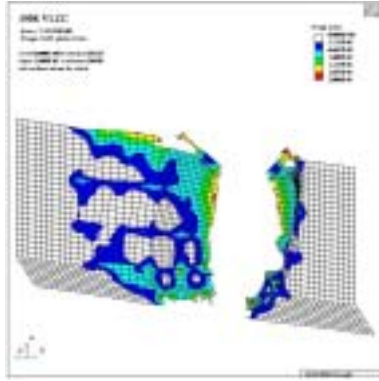


Fig. A.13 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMS-11.25



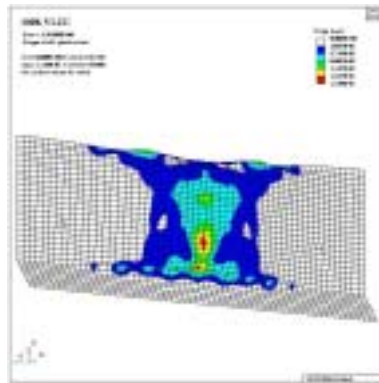
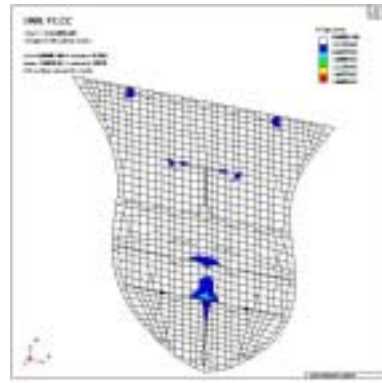
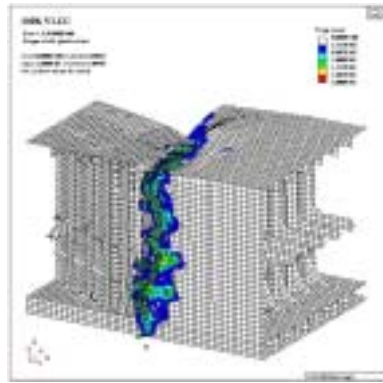


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.14 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMS-15.00

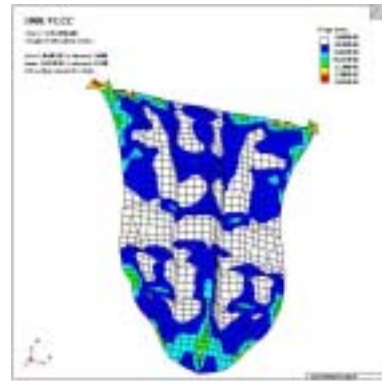
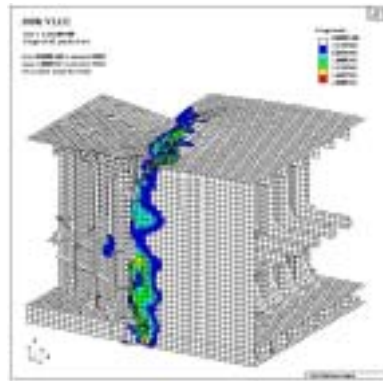


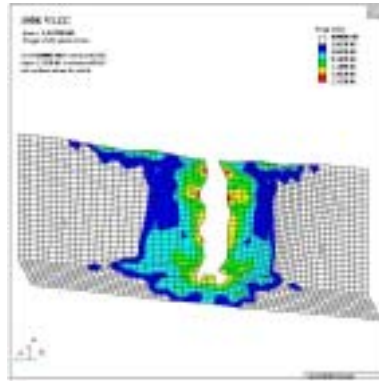
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.15 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMT-11.25



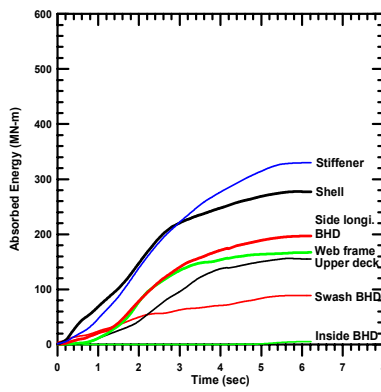
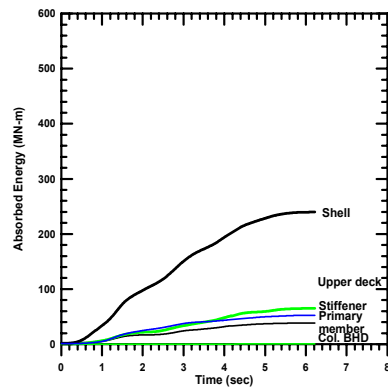
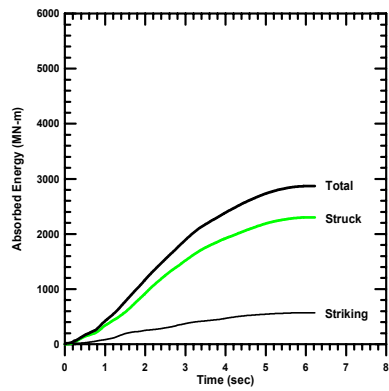


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. A.16 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMT-15.00

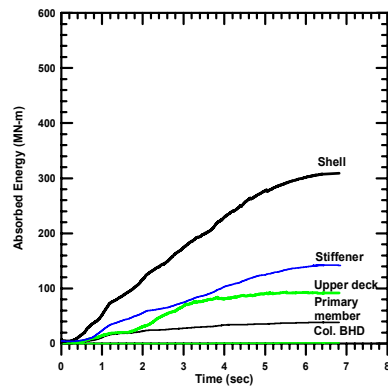
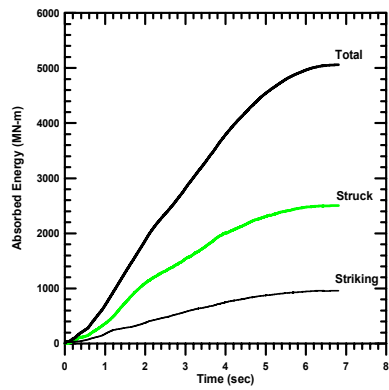


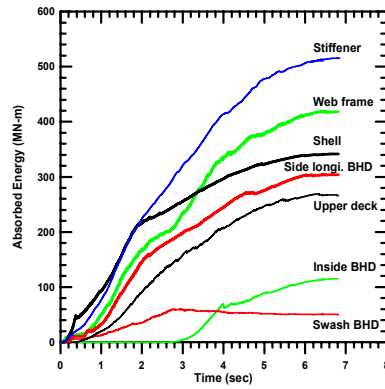
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.17 Absorbed energy responses of Case VROS-11.25



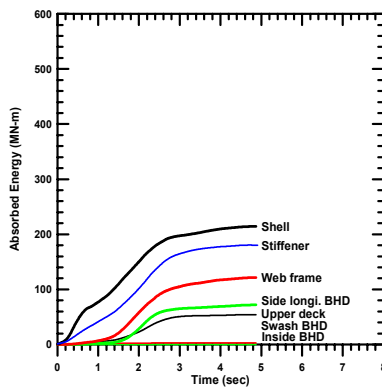
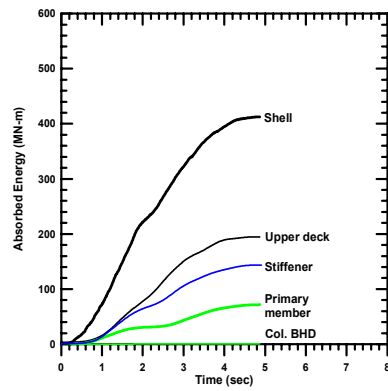
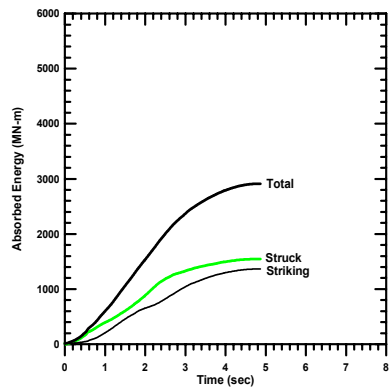


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.18 Absorbed energy responses of Case VROS-15.00

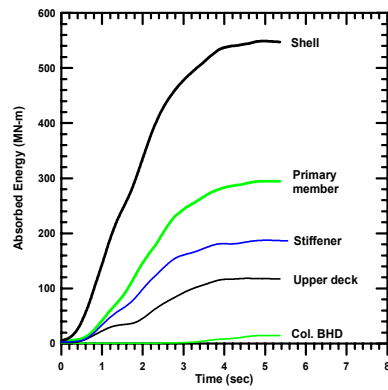
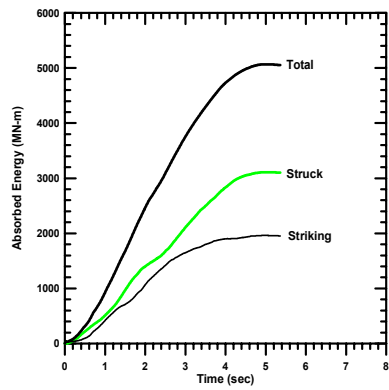


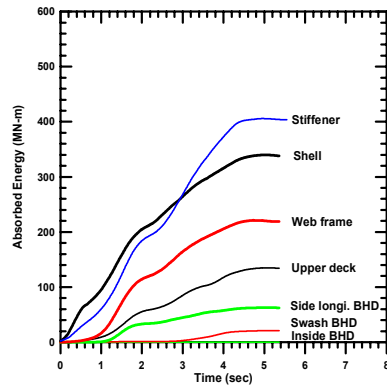
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.19 Absorbed energy responses of Case VROT-11.25



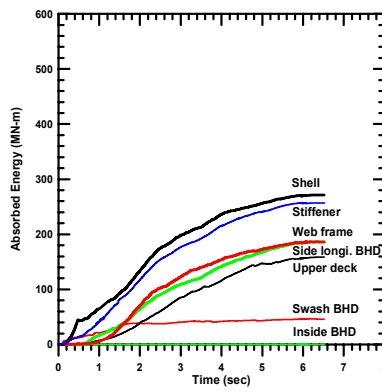
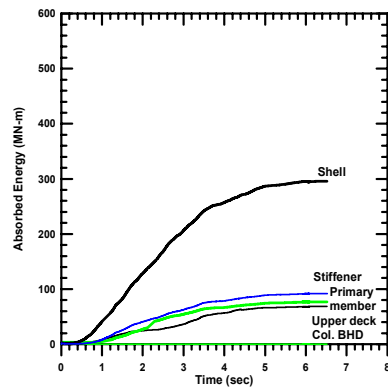
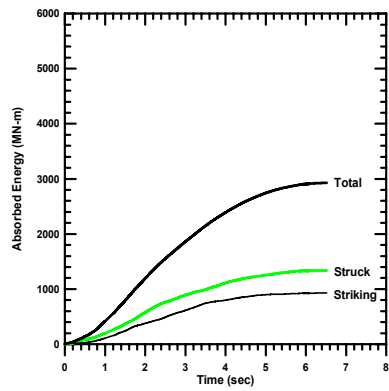


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.20 Absorbed energy responses of Case VROT-15.00

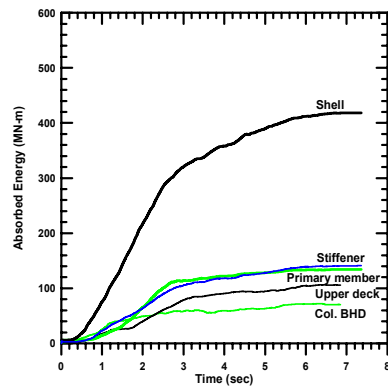
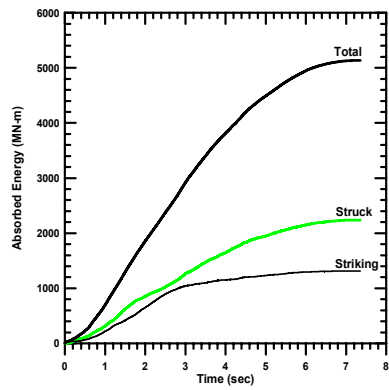


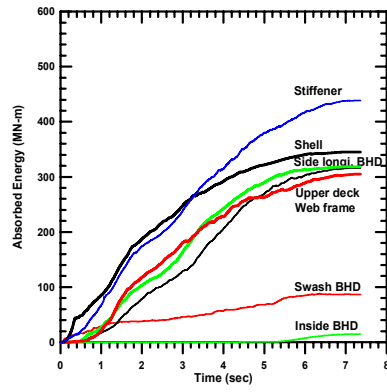
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.21 Absorbed energy responses of Case VSOS-11.25



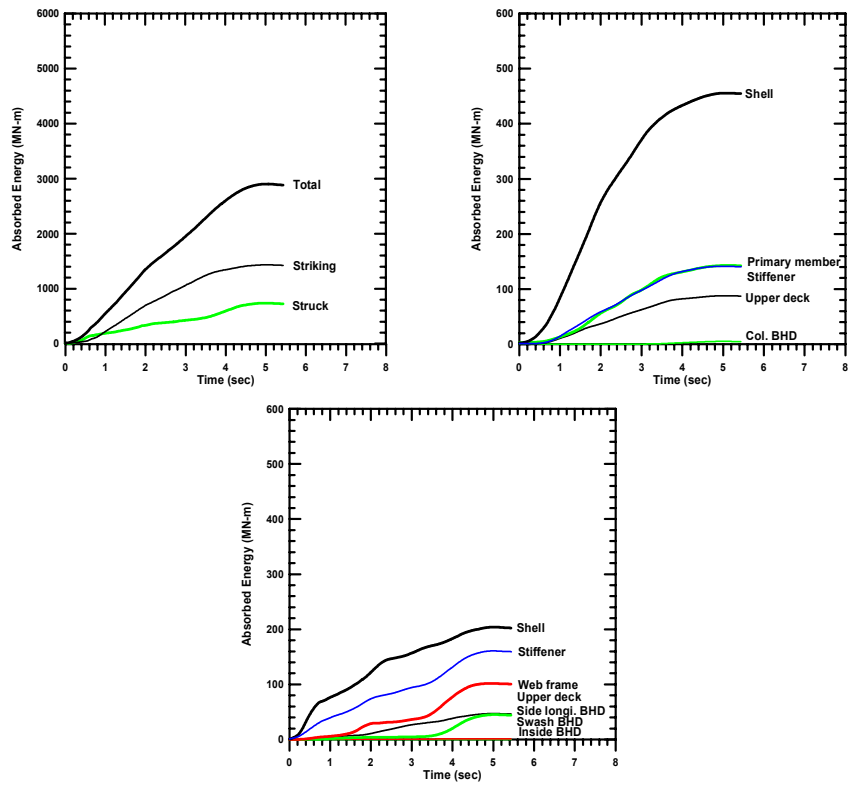


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.22 Absorbed energy responses of Case VSOS-15.00

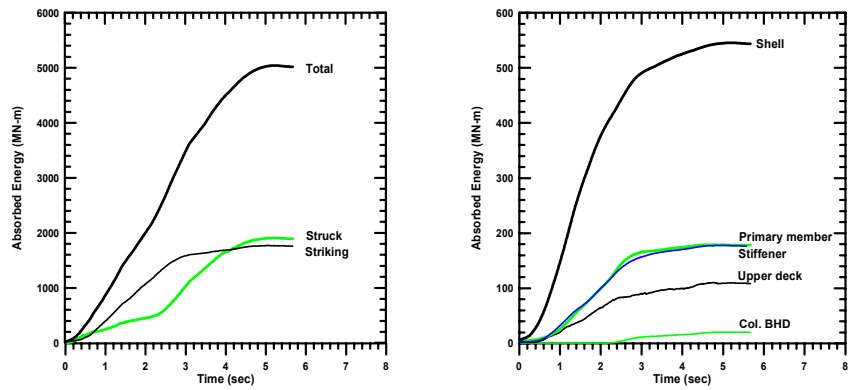


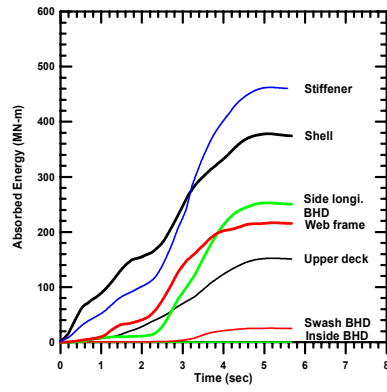
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.23 Absorbed energy responses of Case VSOT-11.25



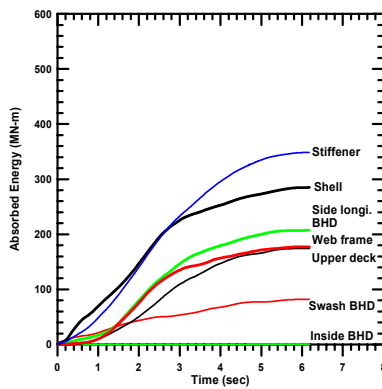
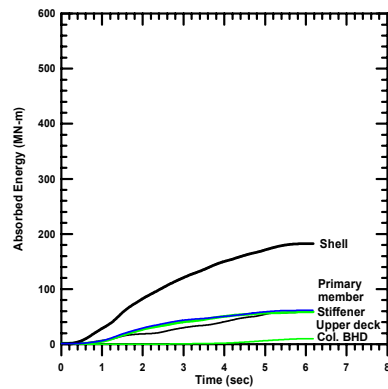
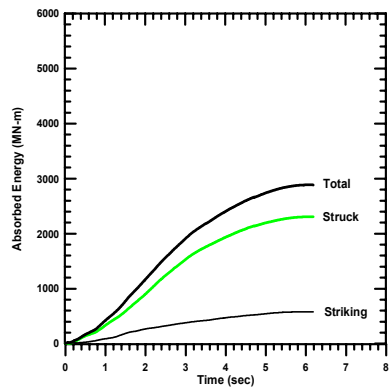


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.24 Absorbed energy responses of Case VSOT-15.00

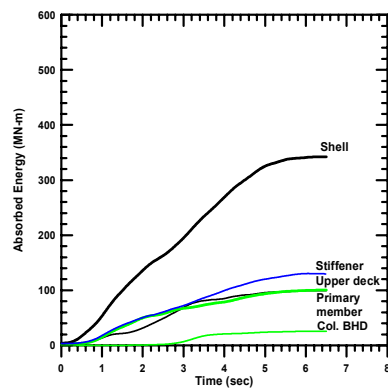
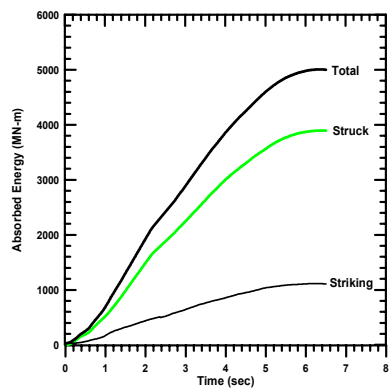


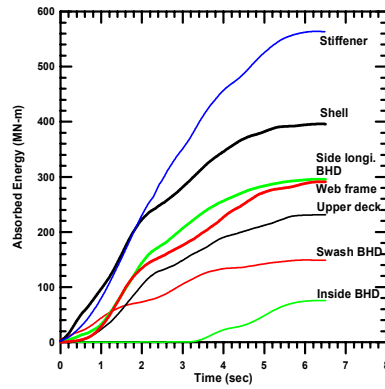
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.25 Absorbed energy responses of Case VRMS-11.25



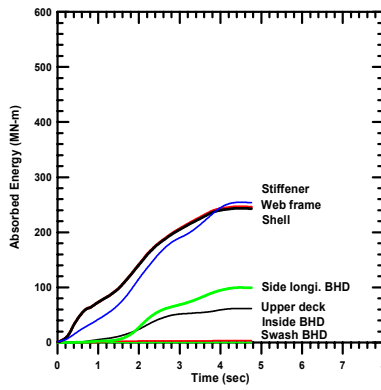
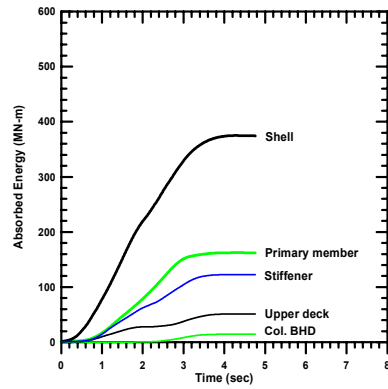
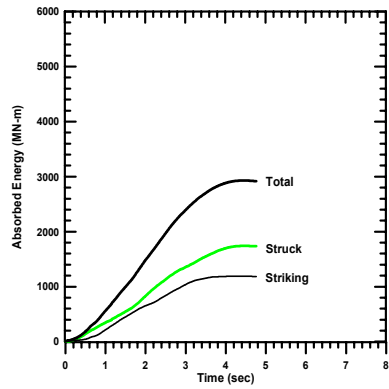


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.26 Absorbed energy responses of Case VRMS-15.00

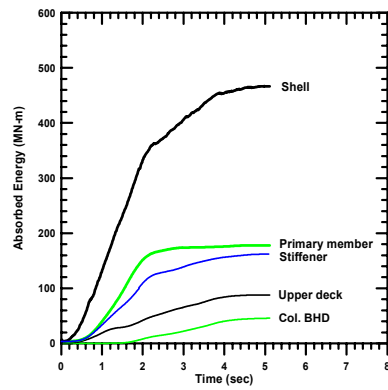
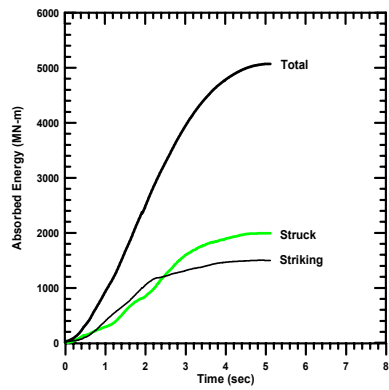


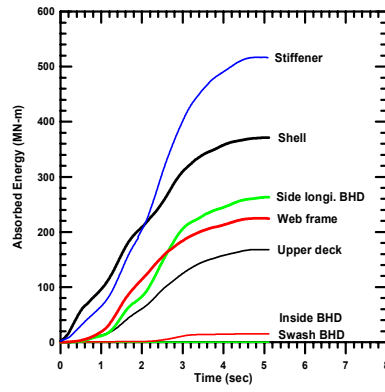
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.27 Absorbed energy responses of Case VRMT-11.25



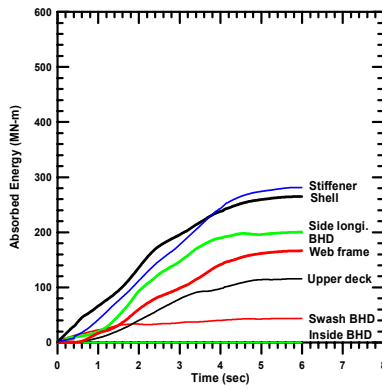
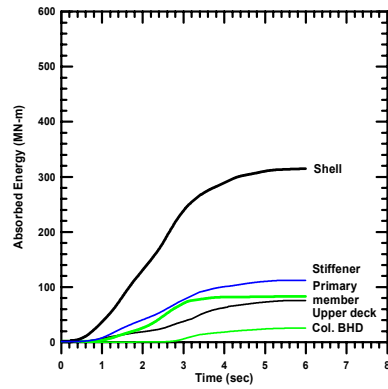
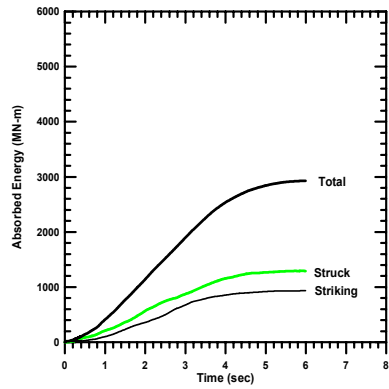


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.28 Absorbed energy responses of Case VRMT-15.00

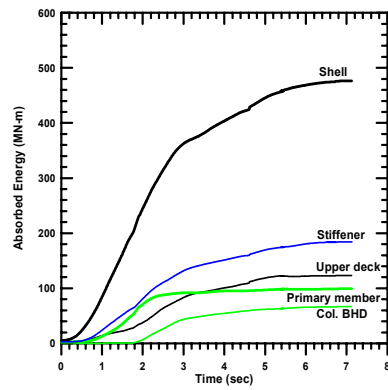
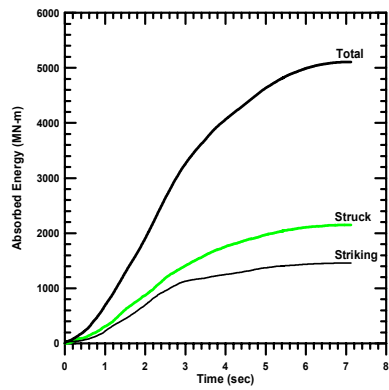


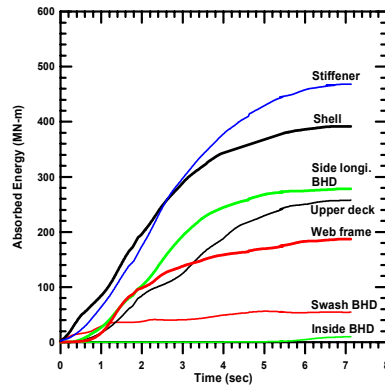
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.29 Absorbed energy responses of Case VSMS-11.25



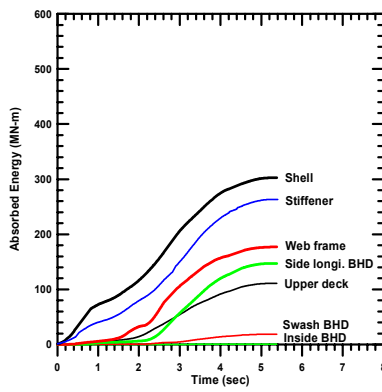
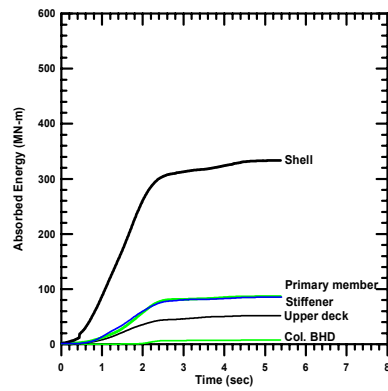
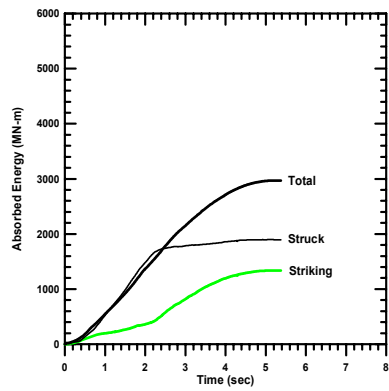


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.30 Absorbed energy responses of Case VSMS-15.00

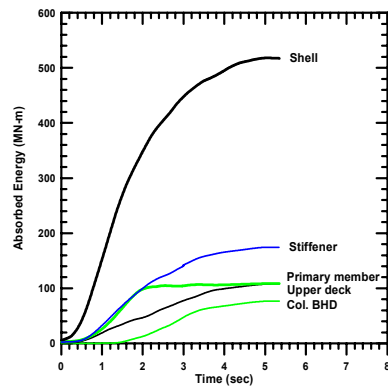
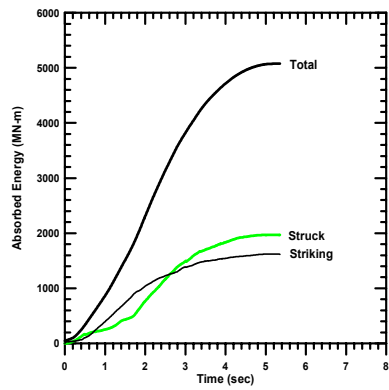


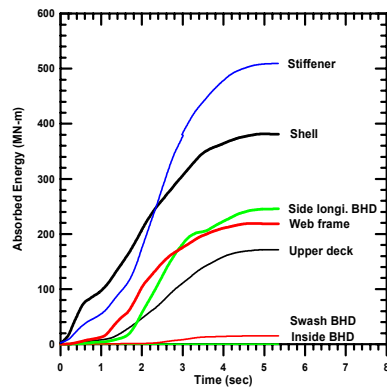
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. A.31 Absorbed energy responses of Case VSMT-11.25





(a) Total

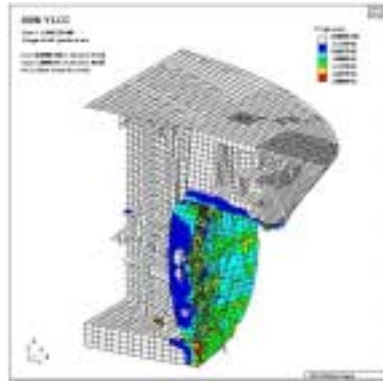
(b) Member in striking
Member in struck

(c)

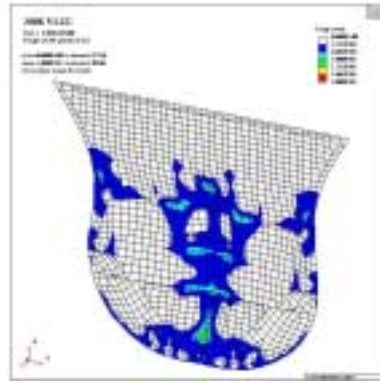
Fig. A.32 Absorbed energy responses of Case VSMT-15.00

부록 B

300,000 DWT VLCC 강체충돌 시뮬레이션 결과

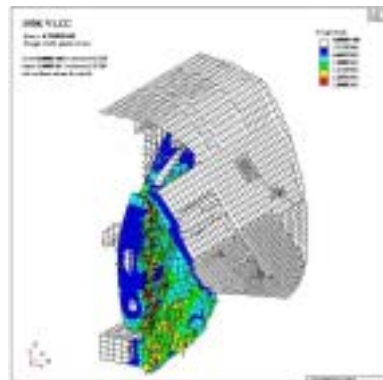


(a) Bow structure

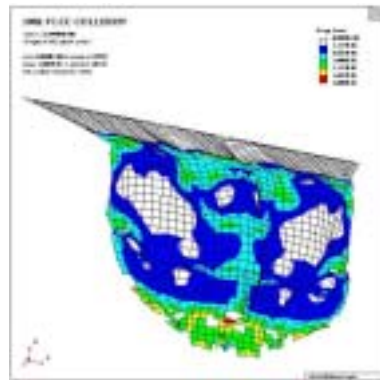


(b) Collision BHD

Fig. B.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROP-11.25

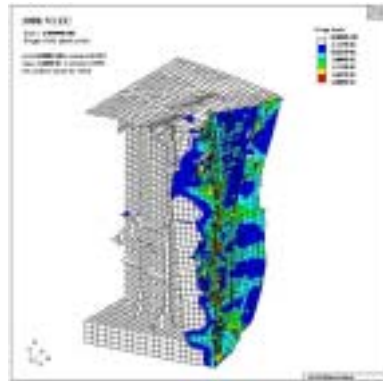


(a) Bow structure

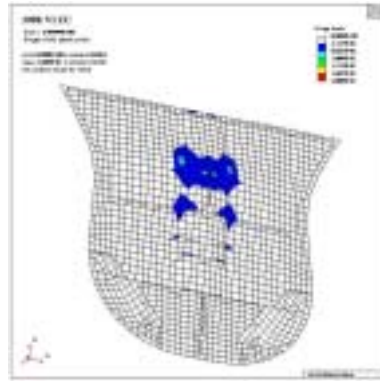


(b) Collision BHD

Fig. B.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROP-15.00

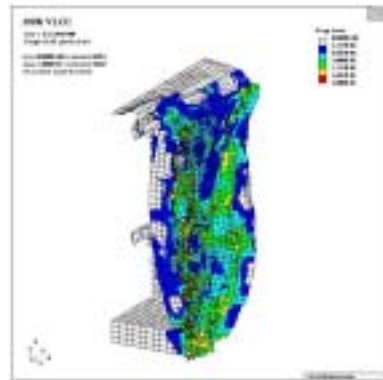


(a) Bow structure

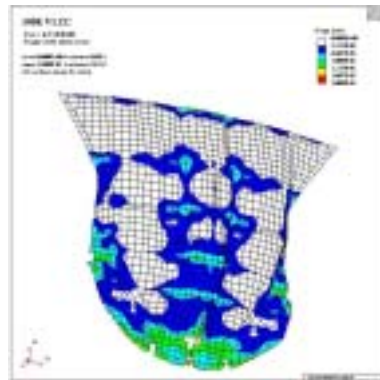


(b) Collision BHD

Fig. B.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROF-11.25

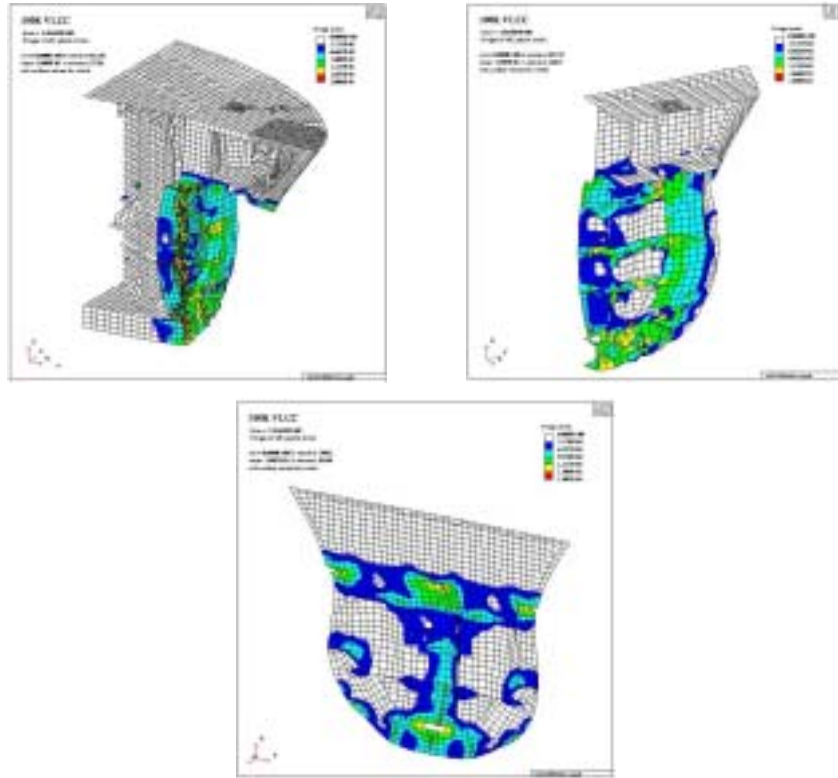


(a) Bow structure



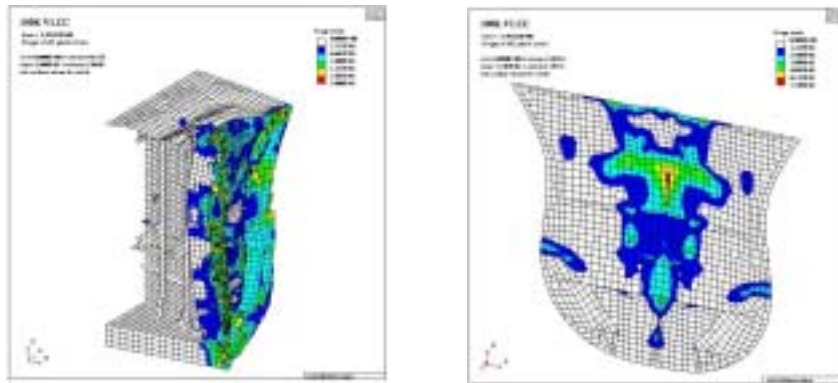
(b) Collision BHD

Fig. B.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VROF-15.00



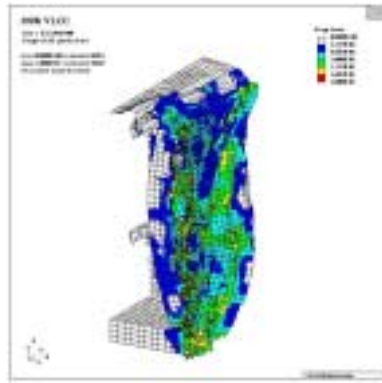
(a) Bow structure (b) Half Collision BHD w/ primary members (b) Collision BHD

Fig. B.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOP-11.25

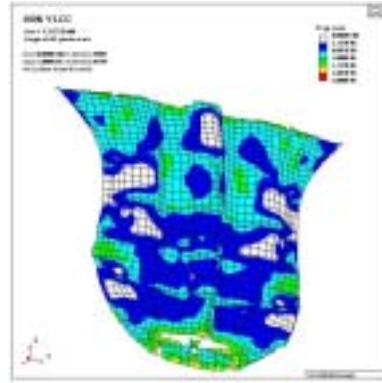


(a) Bow structure (b) Collision BHD

Fig. B.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOF-11.25

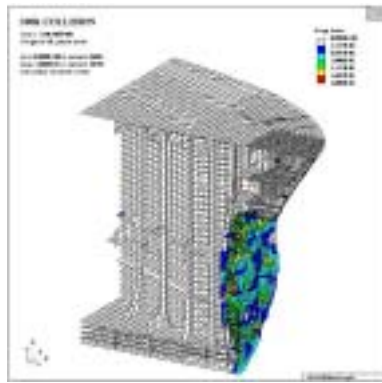


(a) Bow structure

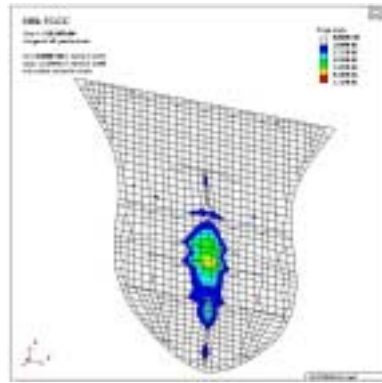


(b) Collision BHD

Fig. B.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSOF-15.00

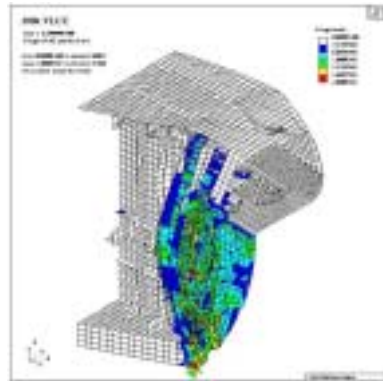


(a) Bow structure

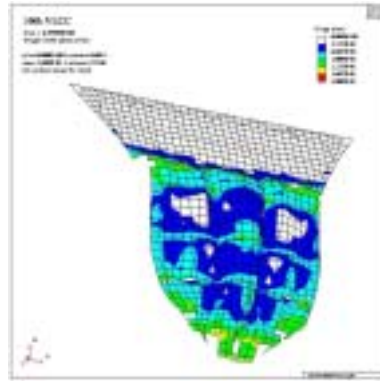


(b) Collision BHD

Fig. B.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMP-7.50

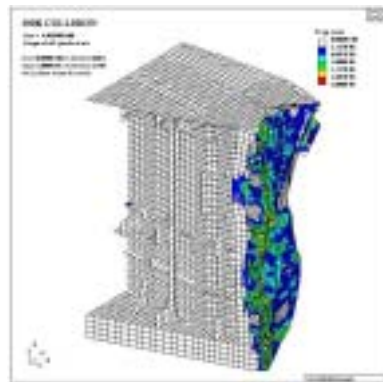


(a) Bow structure

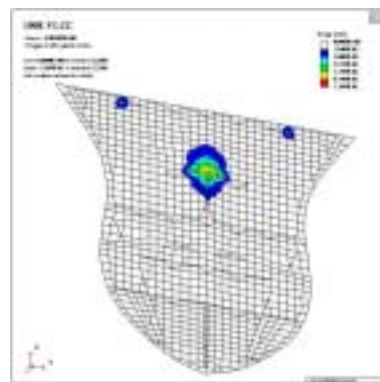


(b) Collision BHD

Fig. B.9 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMP-11.25

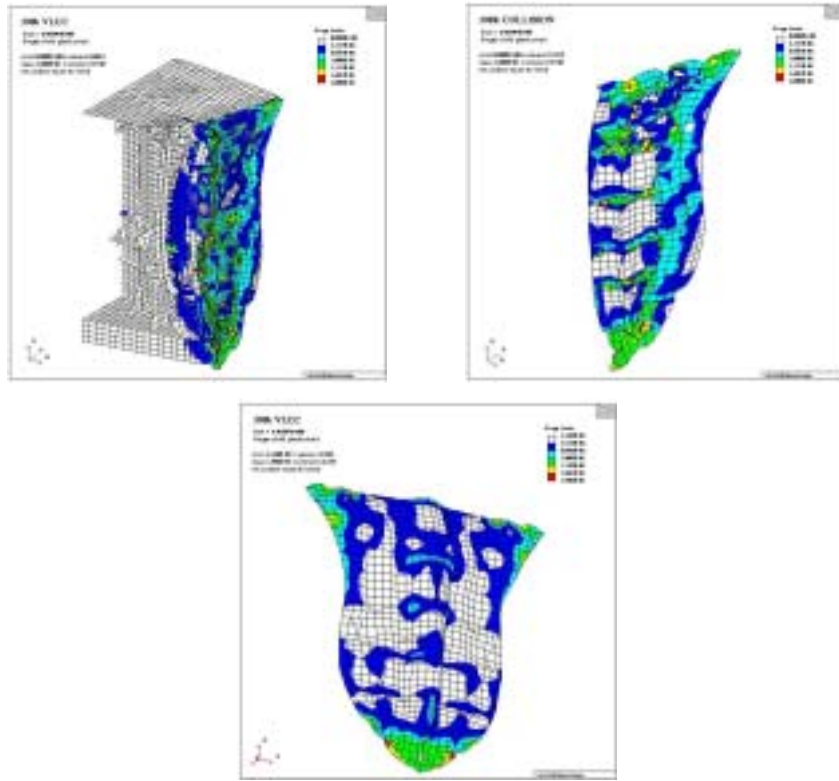


(a) Bow structure



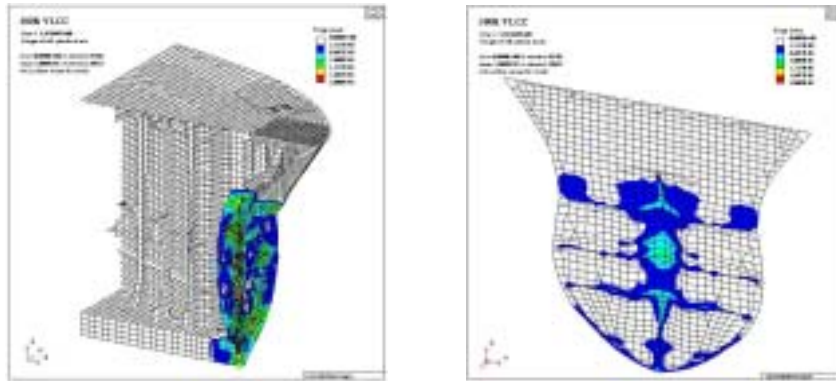
(b) Collision BHD

Fig. B.10 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMF-7.50



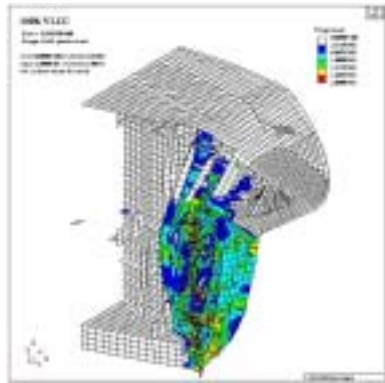
(a) Bow structure (b) Half Collision BHD w/ primary members (b) Collision BHD

Fig. B.11 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VRMF-11.25

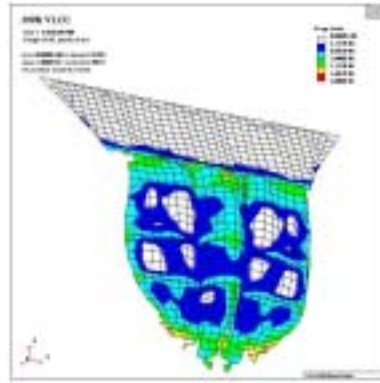


(a) Bow structure (b) Collision BHD

Fig. B.12 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMP-7.50

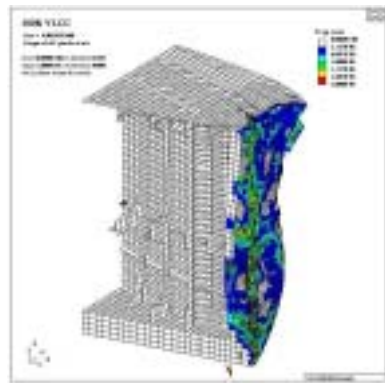


(a) Bow structure

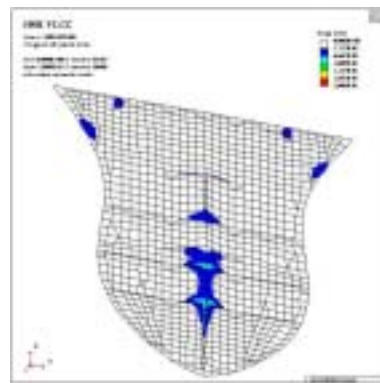


(b) Collision BHD

Fig. B.13 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMP-11.25

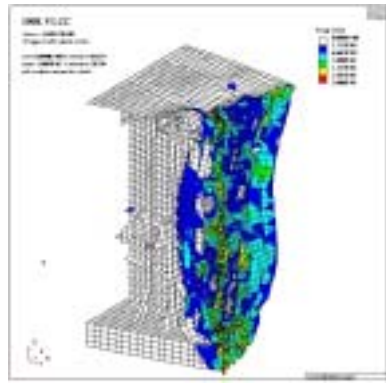


(a) Bow structure

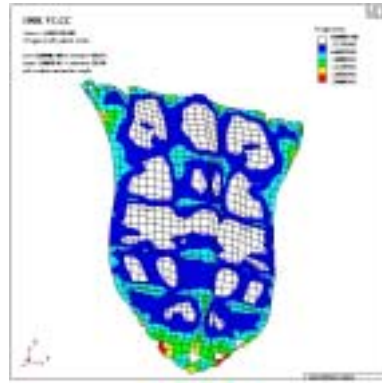


(b) Collision BHD

Fig. B.14 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMF-7.50

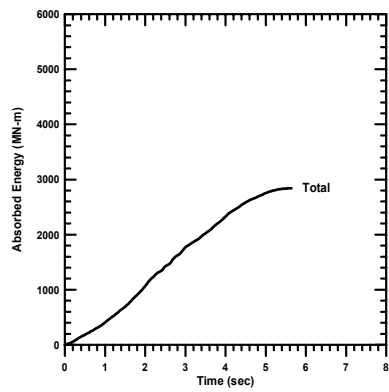


(a) Bow structure

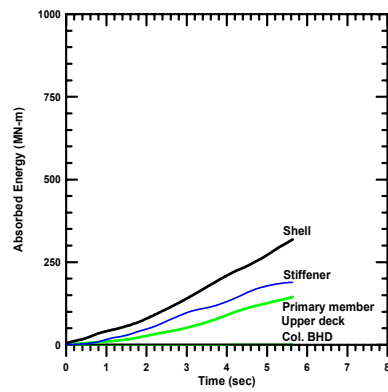


(b) Collision BHD

Fig. B.15 Damage configuration and plastic strain distribution of Case VSMF-11.25

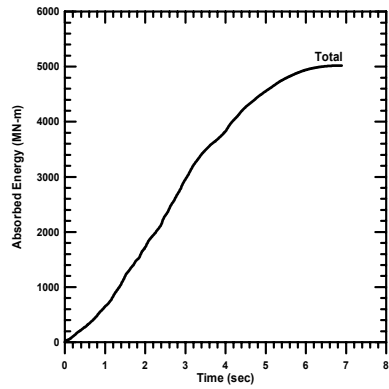


(a) Total

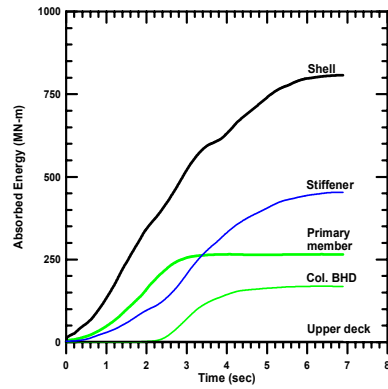


(b) Member in striking

Fig. B.16 Absorbed energy responses of Case VROP-11.25

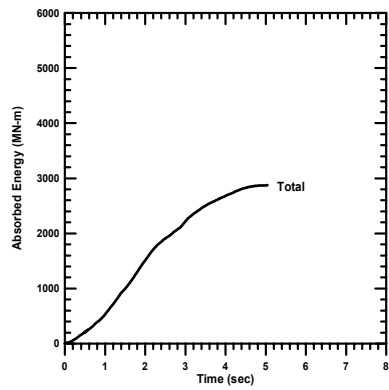


(a) Total

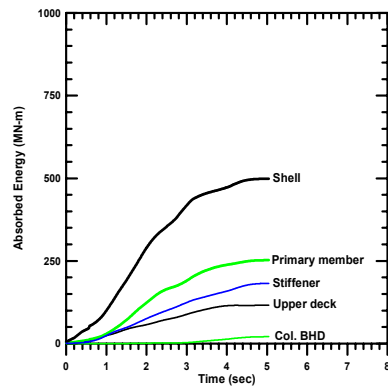


(b) Member in striking

Fig. B.17 Absorbed energy responses of Case VROP-15.00

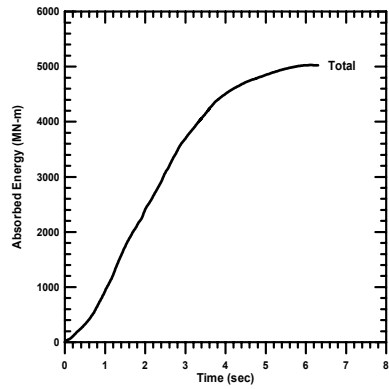


(a) Total

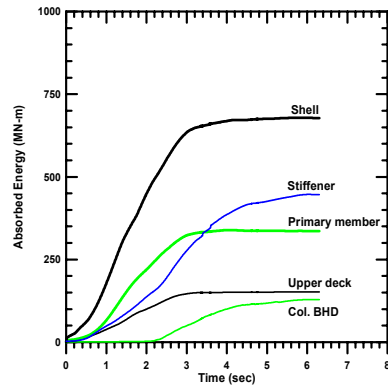


(b) Member in striking

Fig. B.18 Absorbed energy responses of Case VROF-11.25

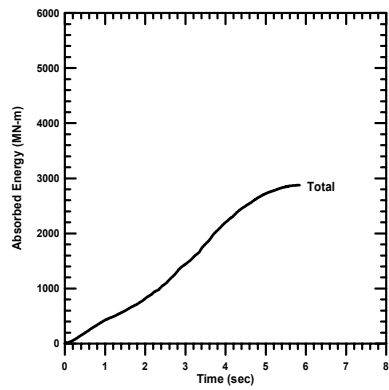


(a) Total

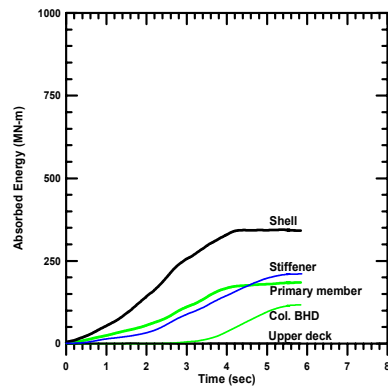


(b) Member in striking

Fig. B.19 Absorbed energy responses of Case VROF-15.00

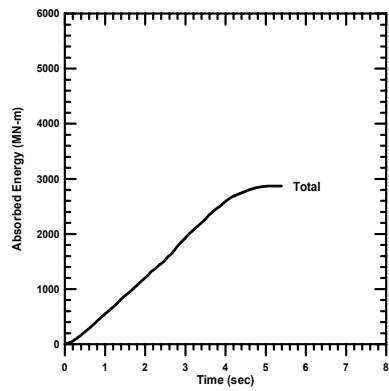


(a) Total

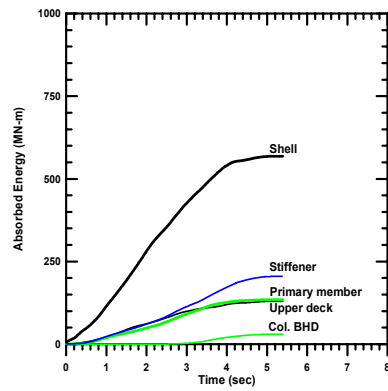


(b) Member in striking

Fig. B.20 Absorbed energy responses of Case VSOP-11.25

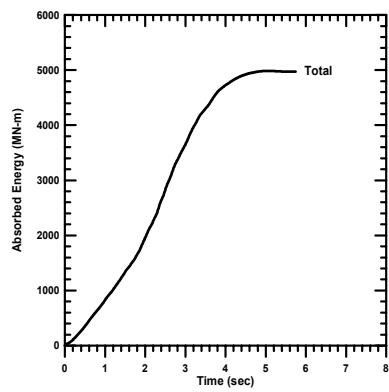


(a) Total

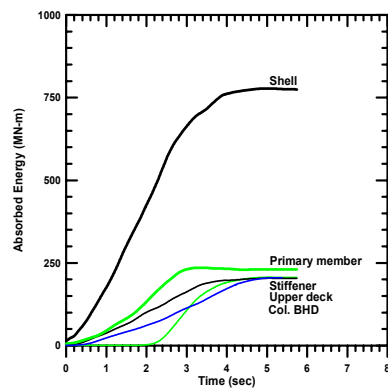


(b) Member in striking

Fig. B.21 Absorbed energy responses of Case VSOF-11.25

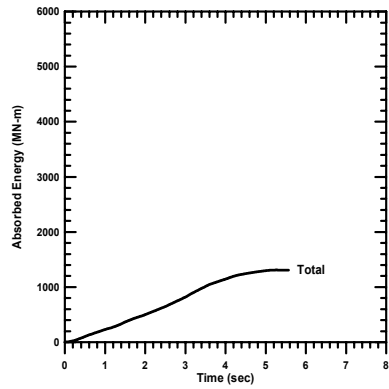


(a) Total

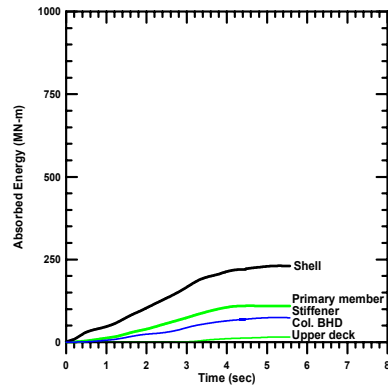


(b) Member in striking

Fig. B.22 Absorbed energy responses of Case VSOF-15.00

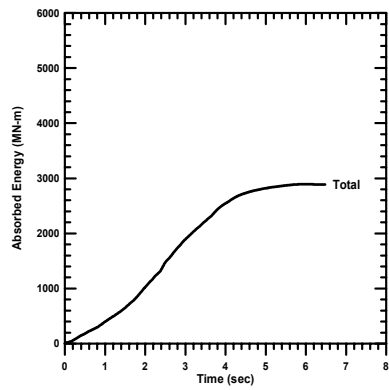


(a) Total

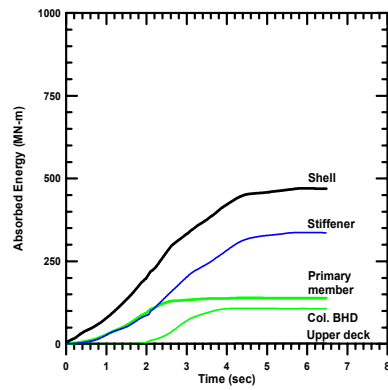


(b) Member in striking

Fig. B.23 Absorbed energy responses of Case VRMP-7.50

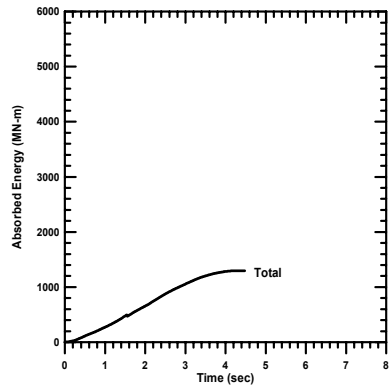


(a) Total

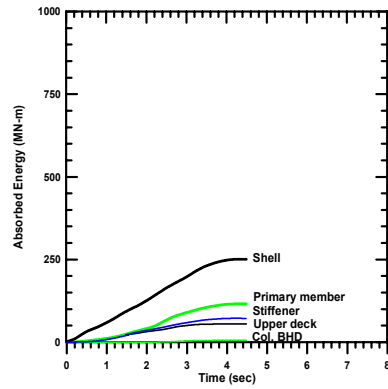


(b) Member in striking

Fig. B.24 Absorbed energy responses of Case VRMP-11.25

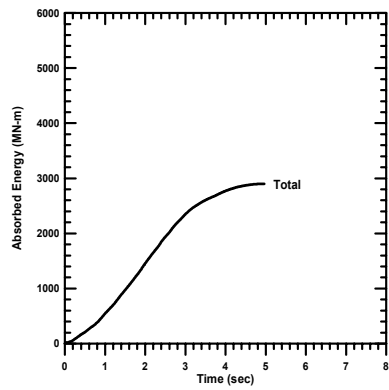


(a) Total

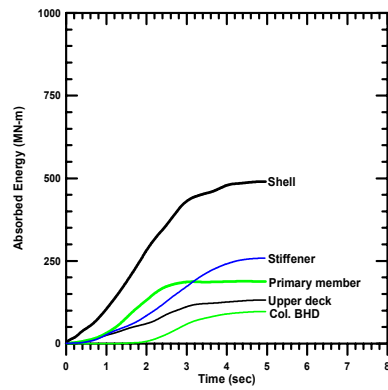


(b) Member in striking

Fig. B.25 Absorbed energy responses of Case VRMF-7.50

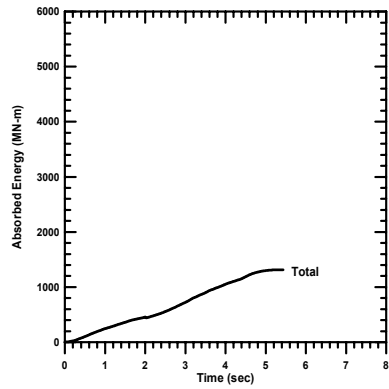


(a) Total

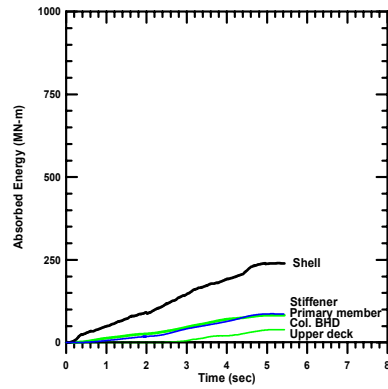


(b) Member in striking

Fig. B.26 Absorbed energy responses of Case VRMF-11.25

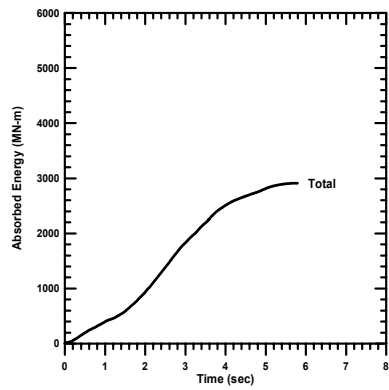


(a) Total

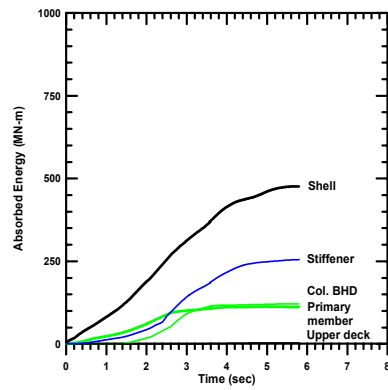


(b) Member in striking

Fig. B.27 Absorbed energy responses of Case VSMP-7.50

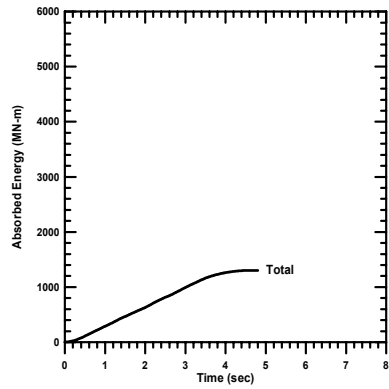


(a) Total

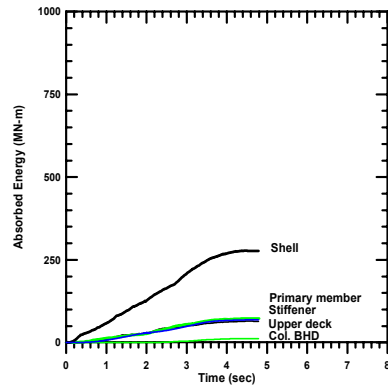


(b) Member in striking

Fig. B.28 Absorbed energy responses of Case VSMP-11.25

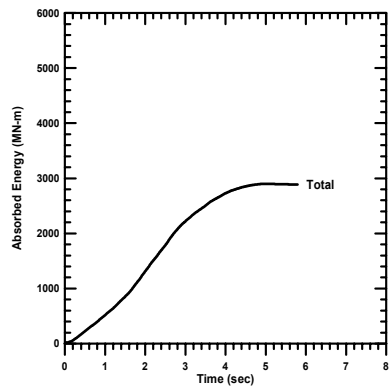


(a) Total

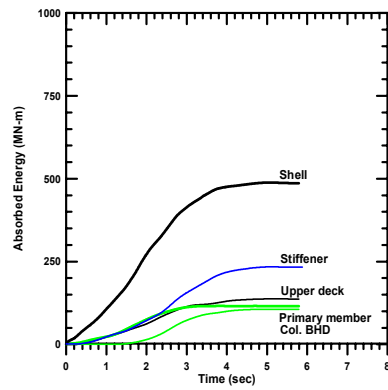


(b) Member in striking

Fig. B.29 Absorbed energy responses of Case VSMF-7.50



(a) Total

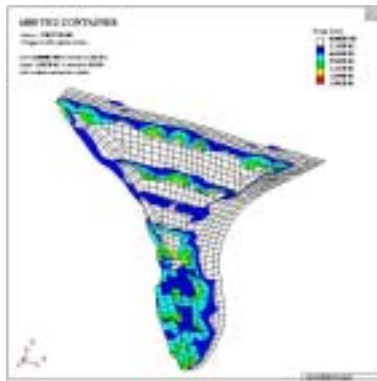
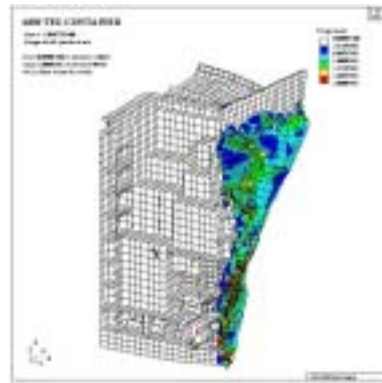
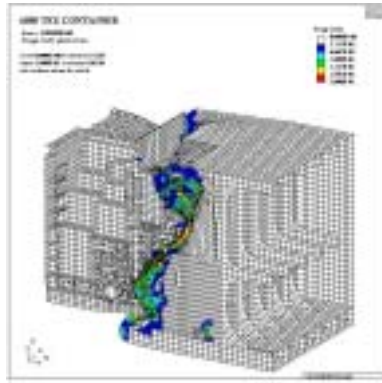


(b) Member in striking

Fig. B.30 Absorbed energy responses of Case VSMF-11.25

부록 C

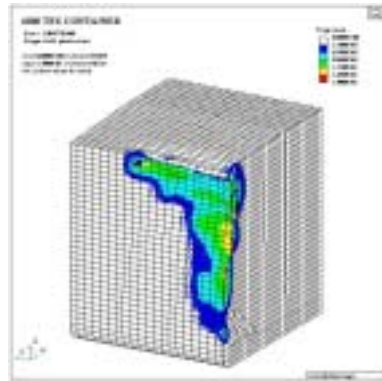
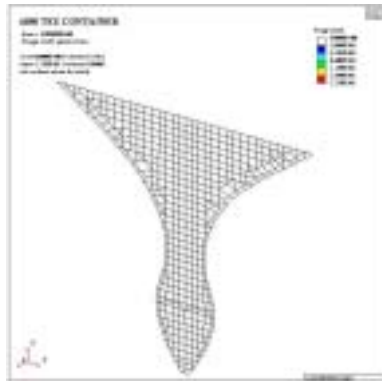
6,800 TEU 컨테이너선 선박간 충돌 시뮬레이션 결과

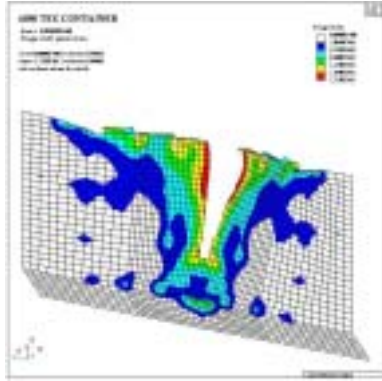


(a) Bow and side struck

(b) Half of striking bow
w/ primary members

(c) Collision BHD



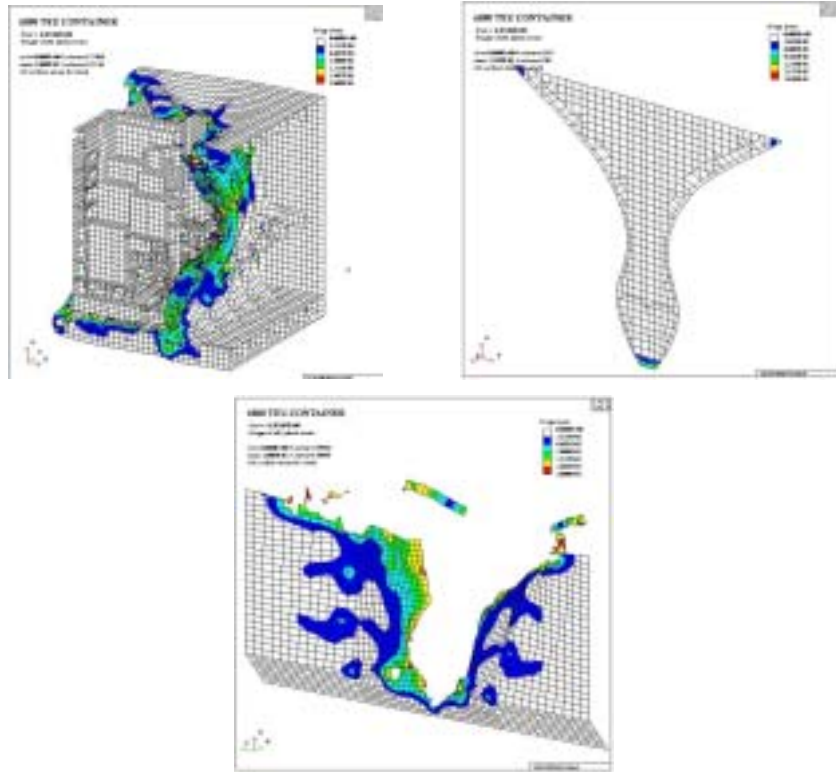


(d) Collision BHD

(e) Side struck
BHD

(f) Side longitudinal

Fig. C.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COS-18.75

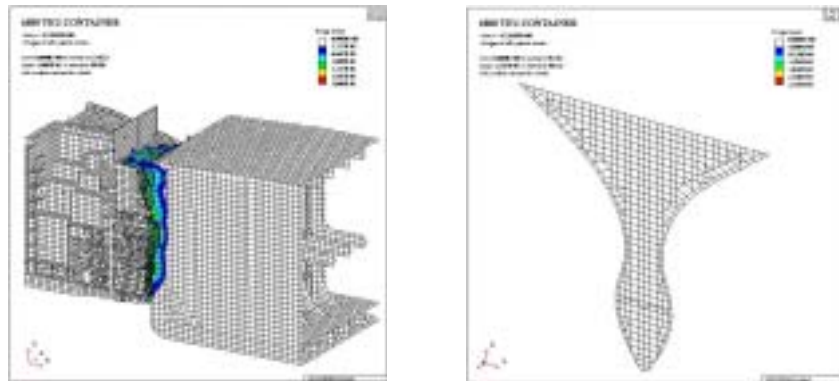


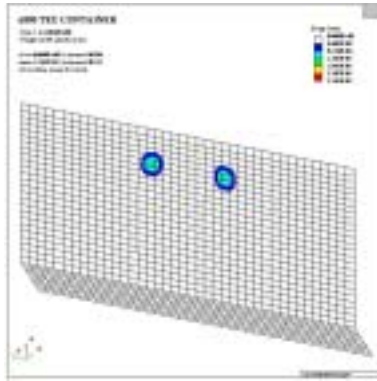
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. C.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COS-25.00



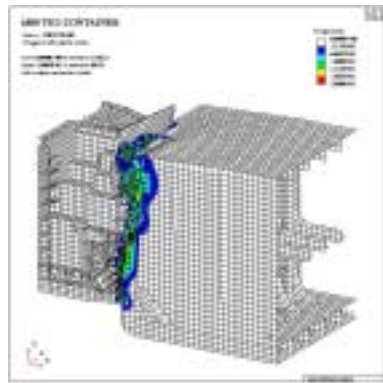


(a) Bow and side struck

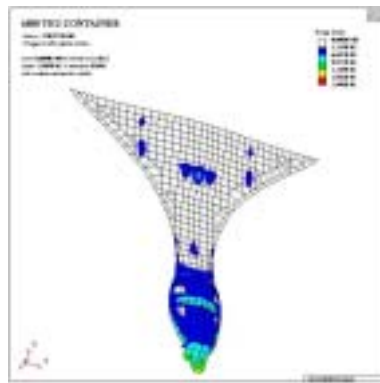
(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

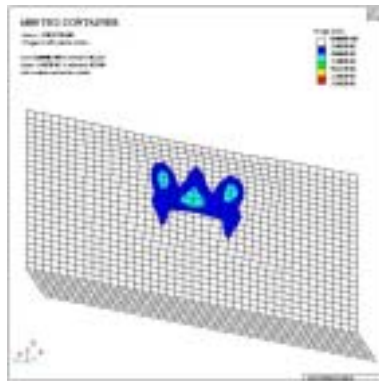
Fig. C.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COT-12.50



(a) Bow and side struck

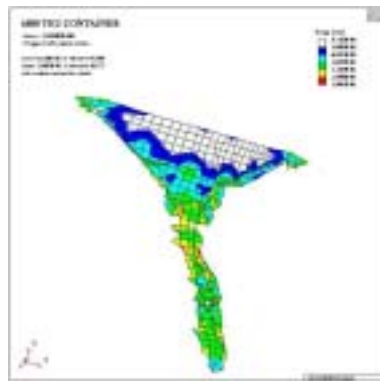
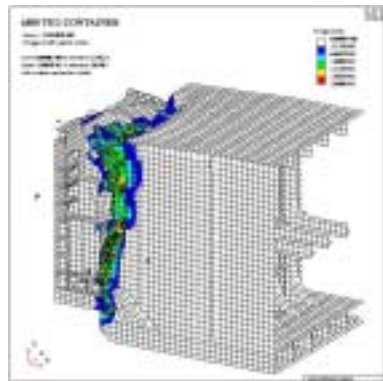


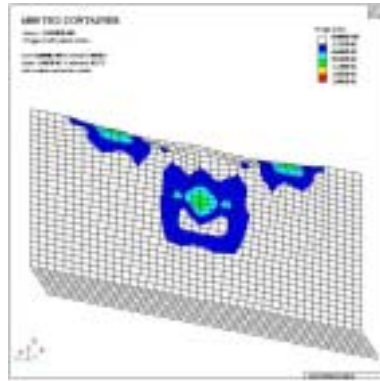
(b) Collision BHD
longitudinal BHD



(c) Side longitudinal BHD

Fig. C.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COT-18.75



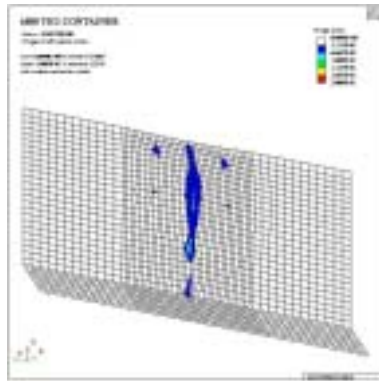
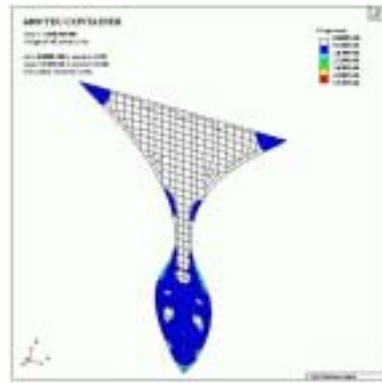
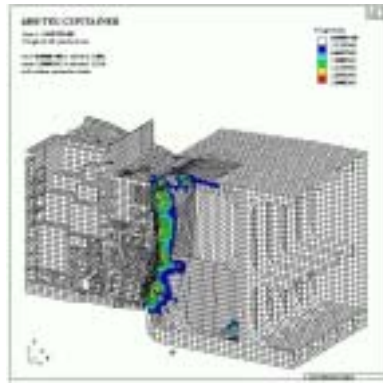


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. C.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COT-25.00

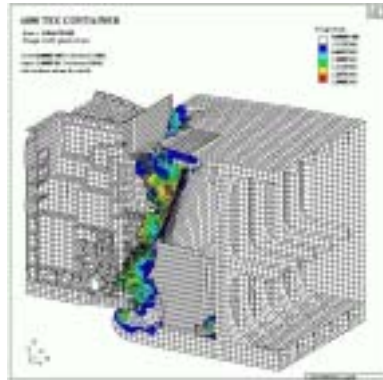


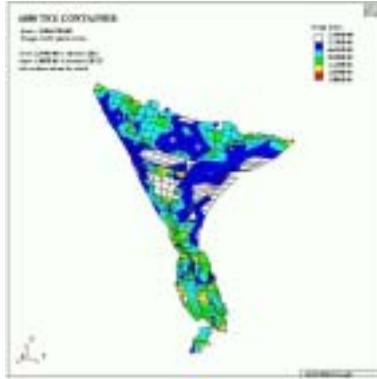
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. C.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-12.50



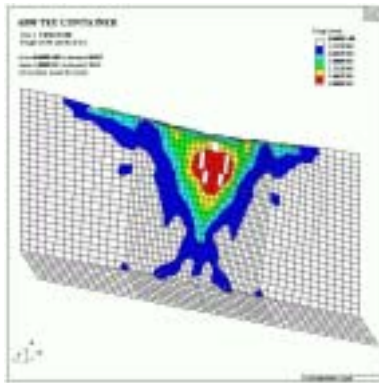
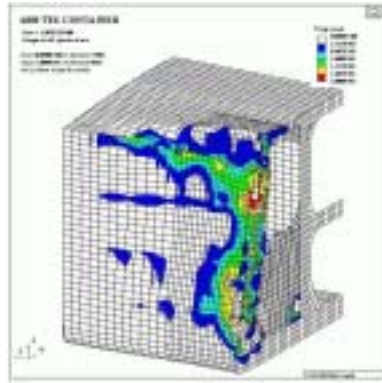
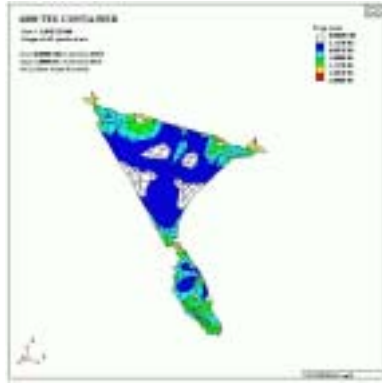


(a) Bow and side struck

(b) Half of striking bow
w/ primary members

(c) Collision BHD

Fig. C.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-18.75
(continued)

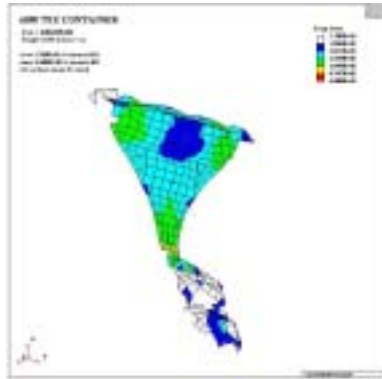
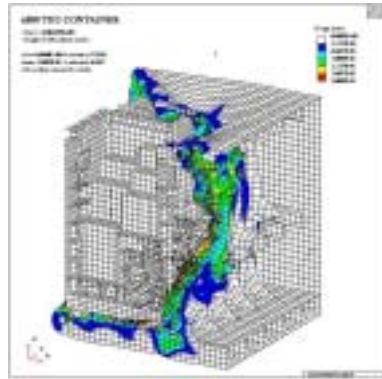


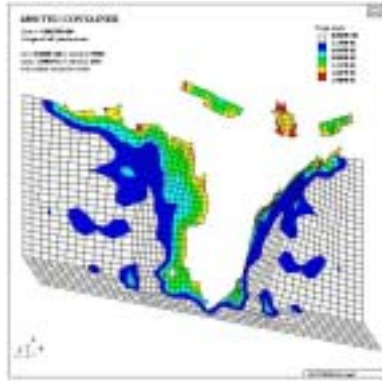
(d) Collision BHD

(e) Side struck
BHD

(f) Side longitudinal

Fig. C.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-18.75



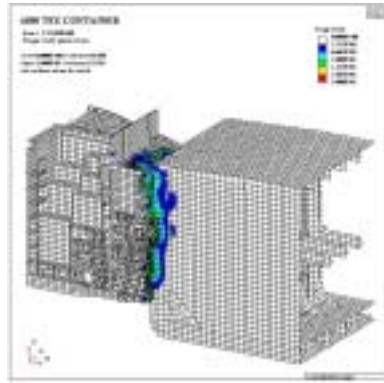


(a) Bow and side struck

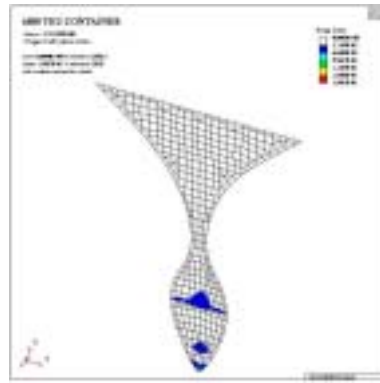
(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

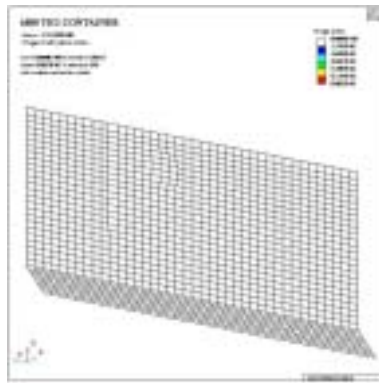
Fig. C.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMS-25.00



(a) Bow and side struck

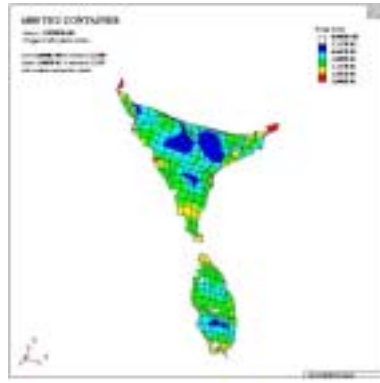
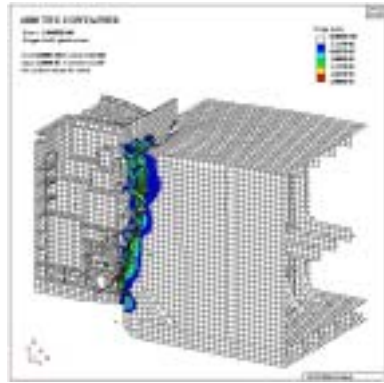


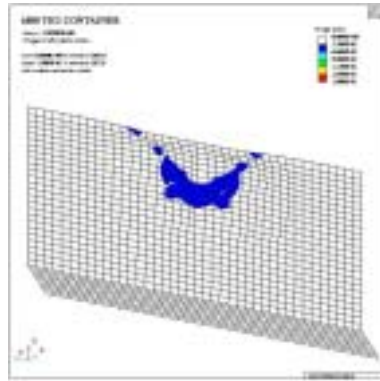
(b) Collision BHD



(c) Side longitudinal BHD

Fig. C.9 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMT-12.50



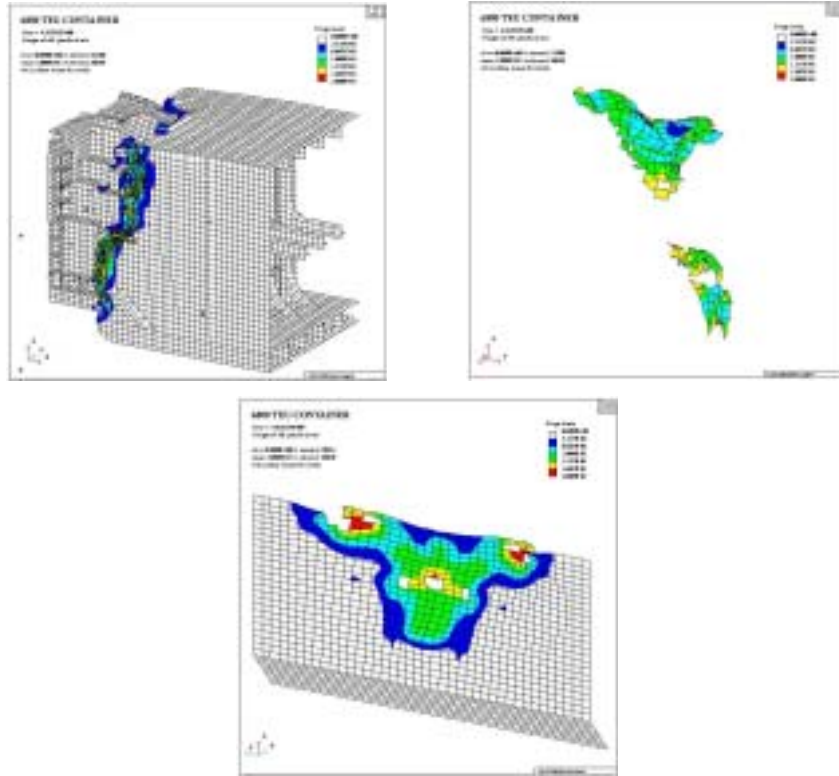


(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. C.10 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMT-18.75

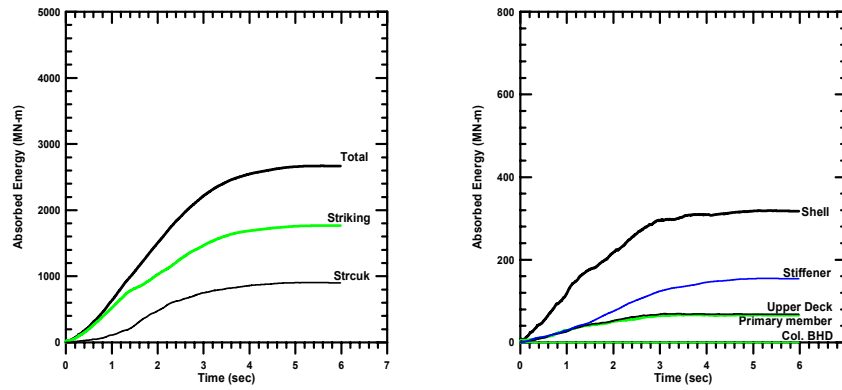


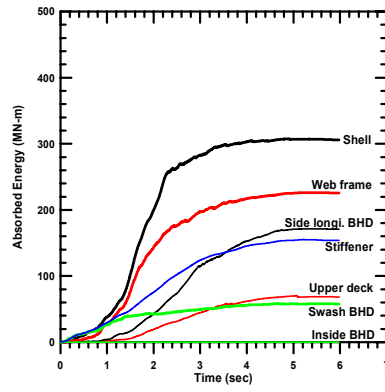
(a) Bow and side struck

(b) Collision BHD
longitudinal BHD

(c) Side

Fig. C.11 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMT-25.00



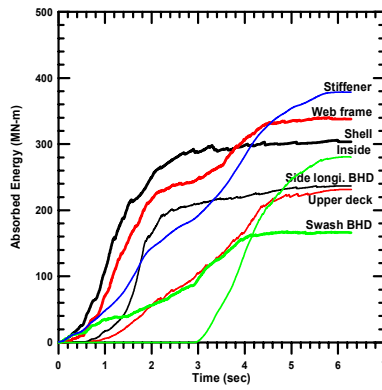
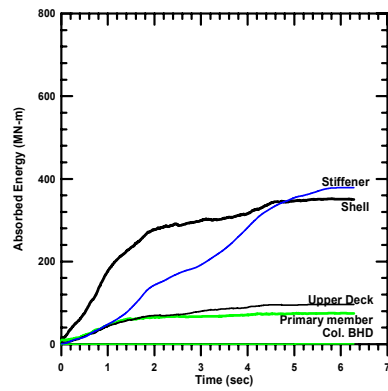
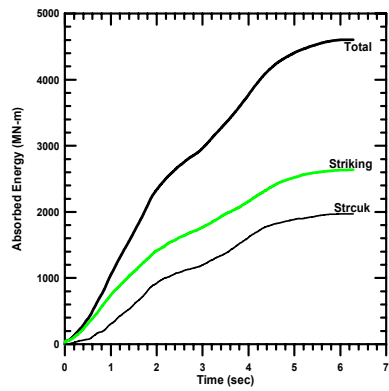


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.12 Absorbed energy responses of Case COS-18.75

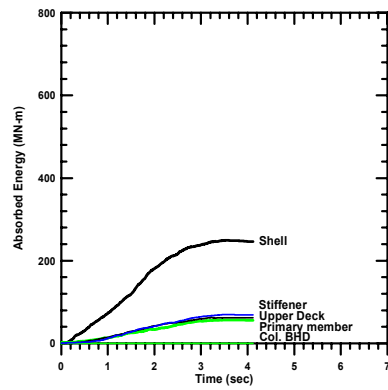
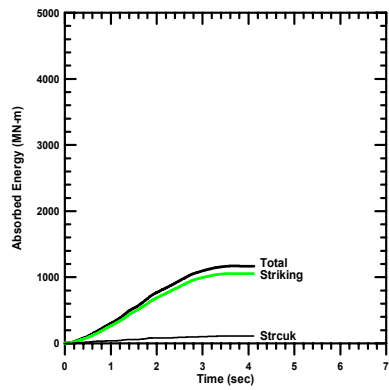


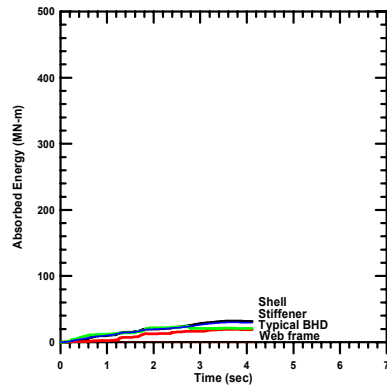
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.13 Absorbed energy responses of Case COS-25.00



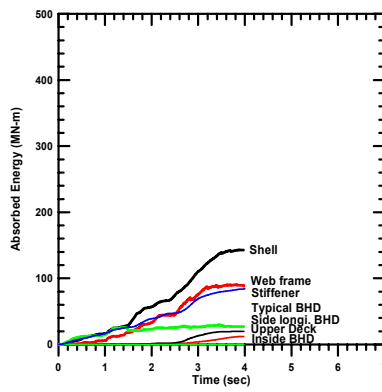
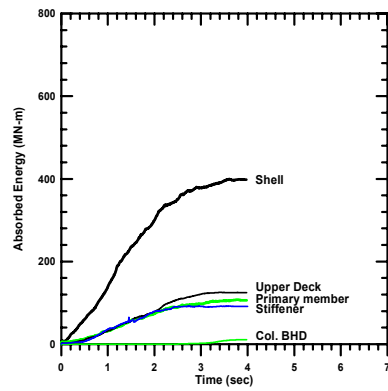
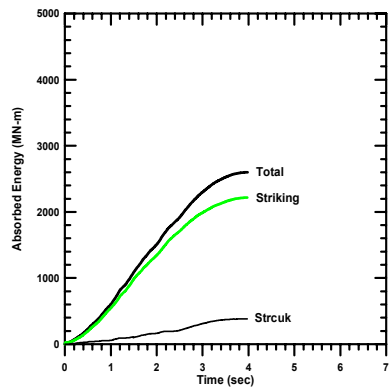


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.14 Absorbed energy responses of Case COT-12.50

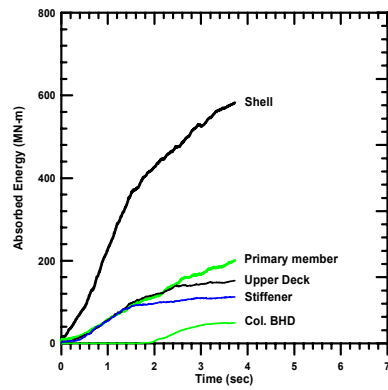
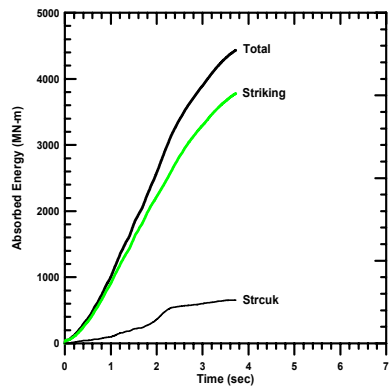


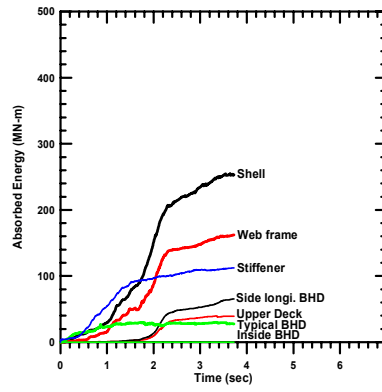
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.15 Absorbed energy responses of Case COT-18.75



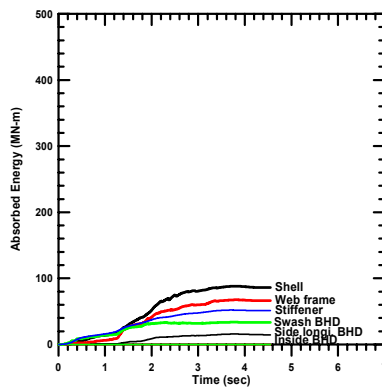
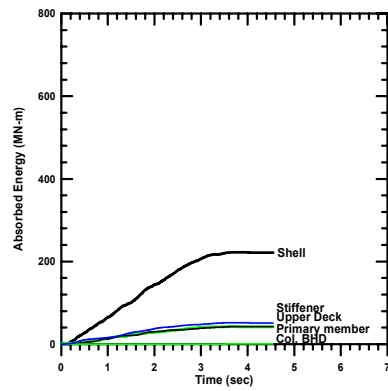
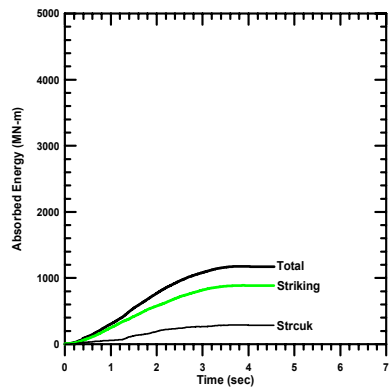


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.16 Absorbed energy responses of Case COT-25.00

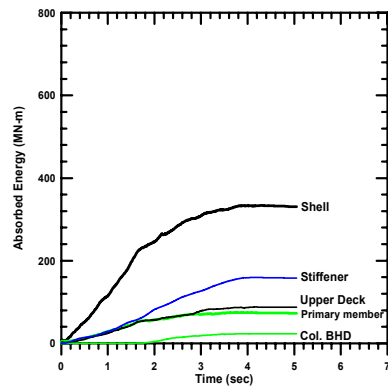
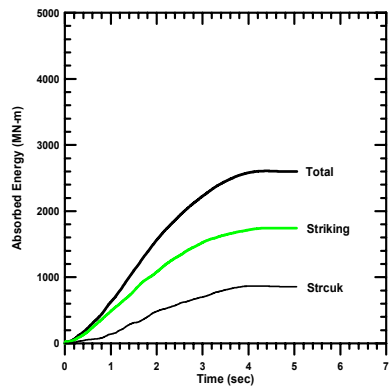


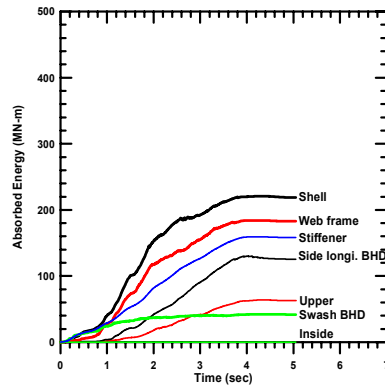
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.17 Absorbed energy responses of Case CMS-12.50



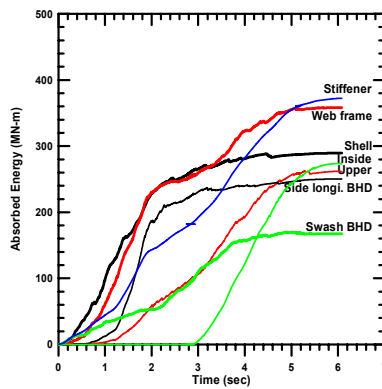
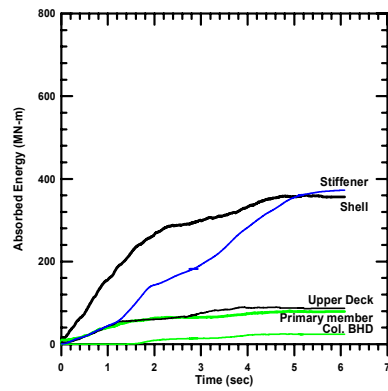
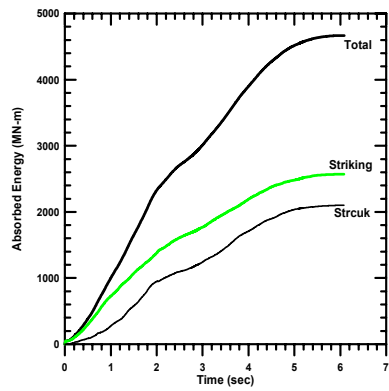


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.18 Absorbed energy responses of Case CMS-18.75

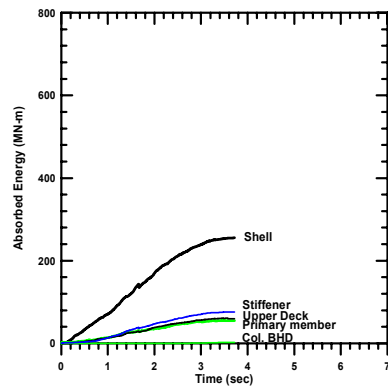
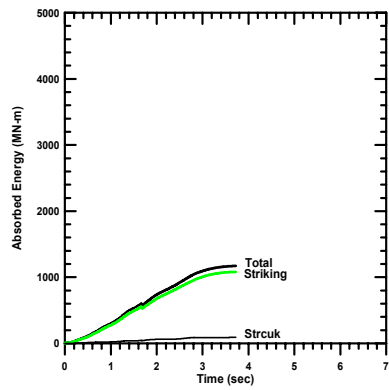


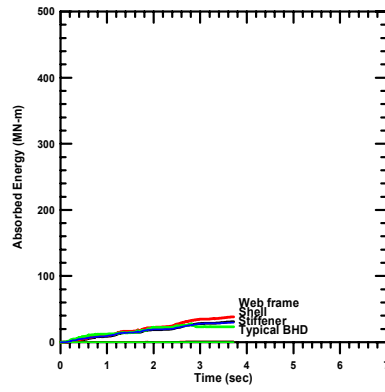
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.19 Absorbed energy responses of Case CMS-25.00



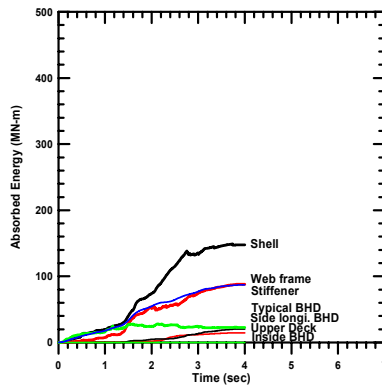
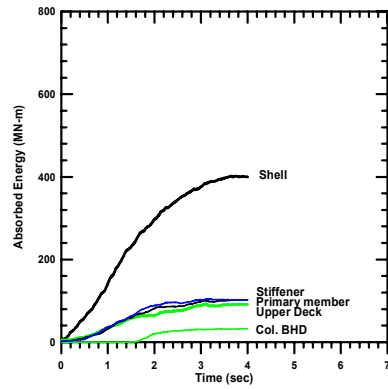
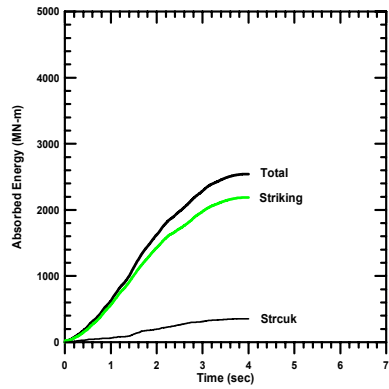


(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.20 Absorbed energy responses of Case CMT-12.50

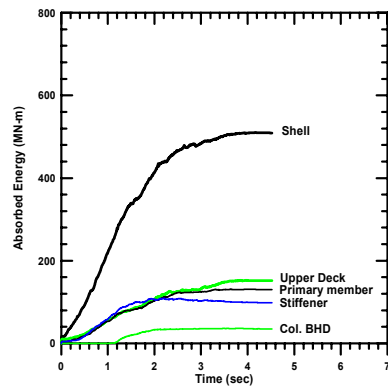
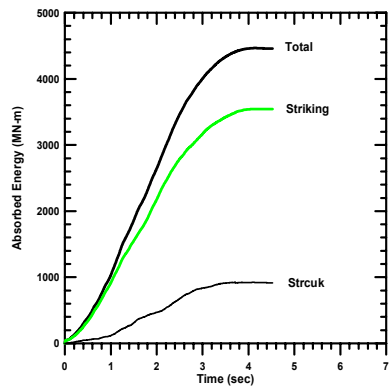


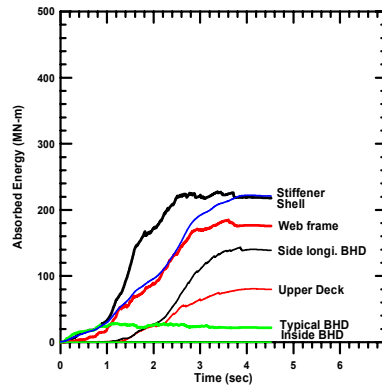
(a) Total

(b) Member in striking
Member in struck

(c)

Fig. C.21 Absorbed energy responses of Case CMT-18.75





(a) Total

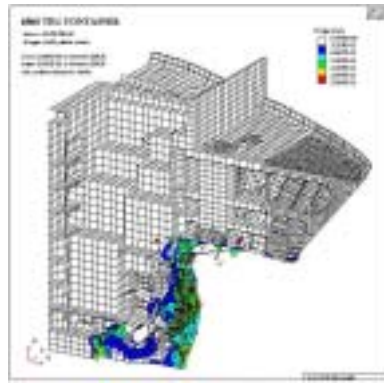
(b) Member in striking
Member in struck

(c)

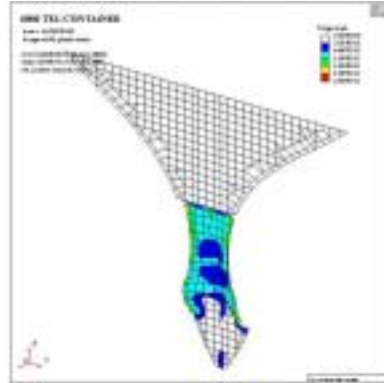
Fig. C.22 Absorbed energy responses of Case CMT-25.00

부록 D

6,800 TEU 컨테이너선 강제충돌 시뮬레이션 결과



(a) Bow structure

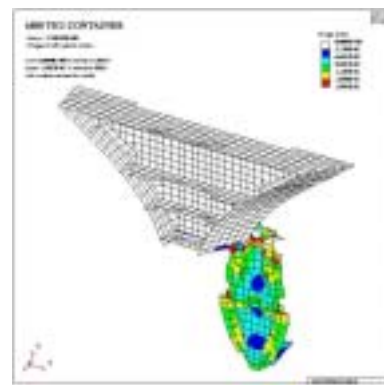


(b) Collision BHD

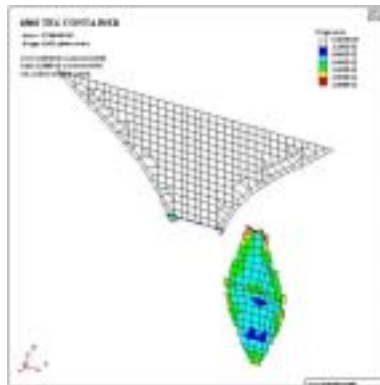
Fig. D.1 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COP-12.50



(a) Bow structure



(b) Half Collision BHD w/ primary members

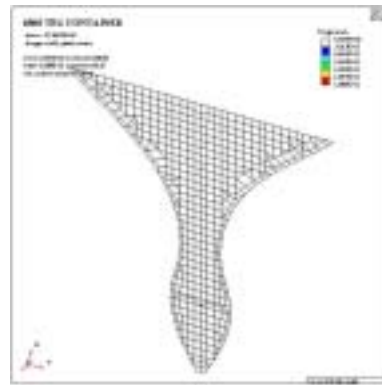


(b) Collision BHD

Fig. D.2 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COP-18.75

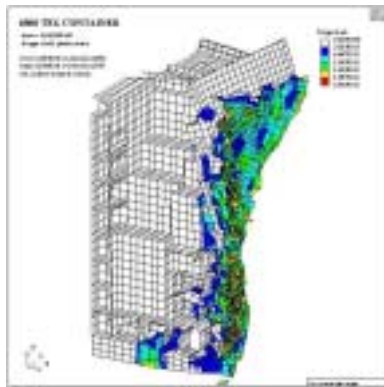


(a) Bow structure

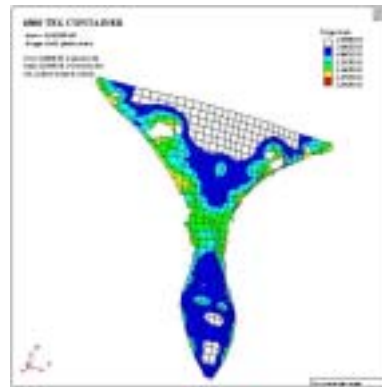


(b) Collision BHD

Fig. D.3 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COF-12.50



(a) Bow structure

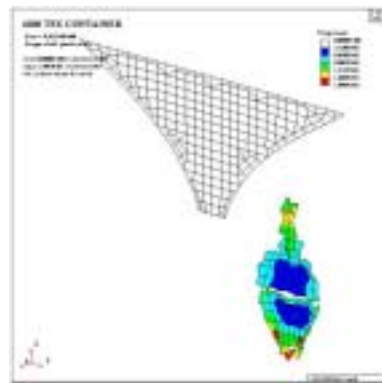


(b) Collision BHD

Fig. D.4 Damage configuration and plastic strain distribution of Case COF-18.75



(a) Bow structure

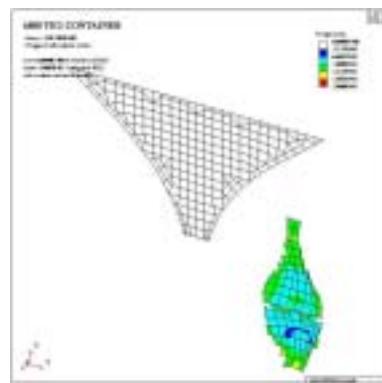


(b) Collision BHD

Fig. D.5 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMP-12.50



(a) Bow structure

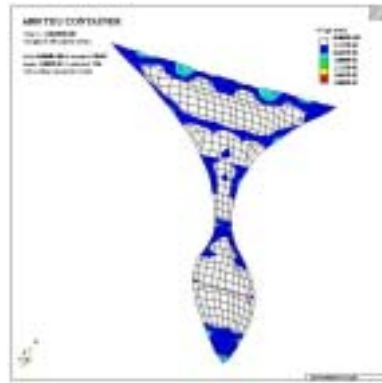


(b) Collision BHD

Fig. D.6 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMP-18.75

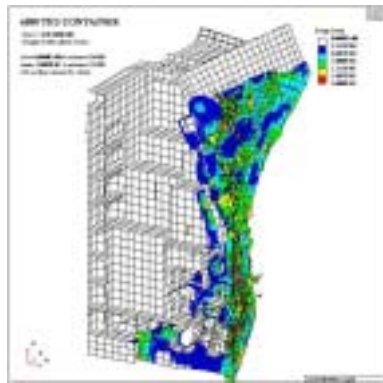


(a) Bow structure

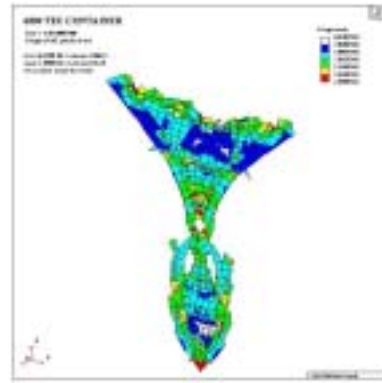


(b) Collision BHD

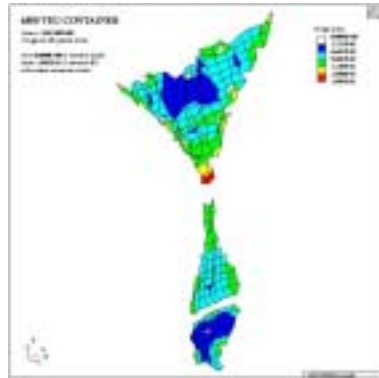
Fig. D.7 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMF-12.50



(a) Bow structure

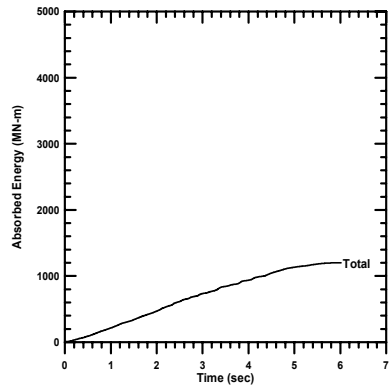


(b) Half Collision BHD w/ primary members

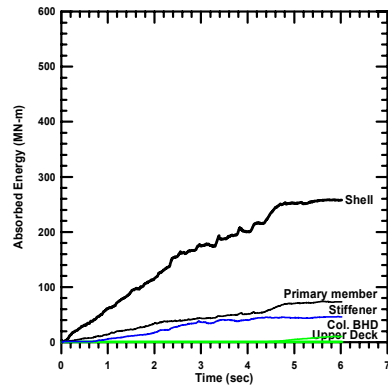


(b) Collision BHD

Fig. D.8 Damage configuration and plastic strain distribution of Case CMF-18.75

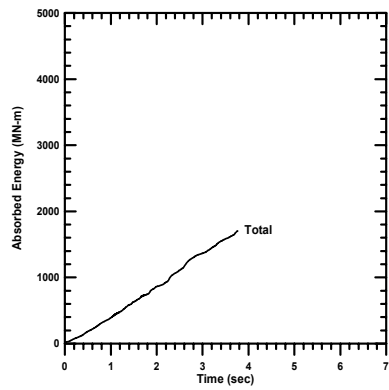


(a) Total

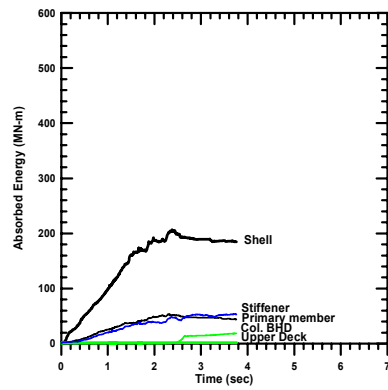


(b) Member in striking

Fig. D.9 Absorbed energy responses of Case COP-12.50

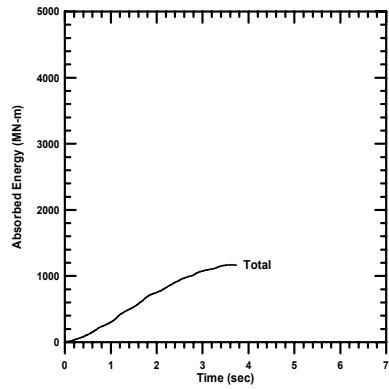


(a) Total

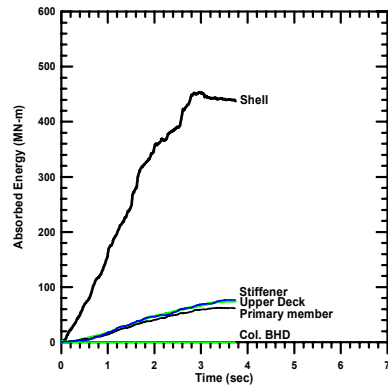


(b) Member in striking

Fig. D.10 Absorbed energy responses of Case COP-18.75

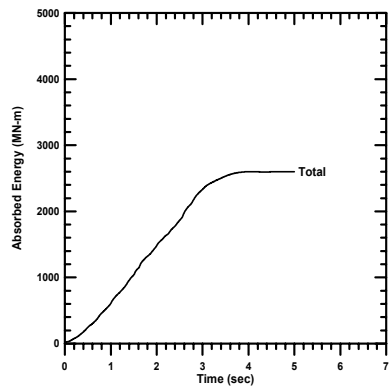


(a) Total

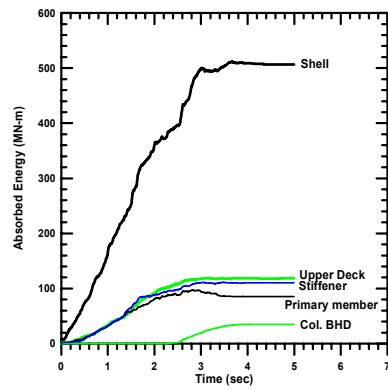


(b) Member in striking

Fig. D.11 Absorbed energy responses of Case COF-12.50

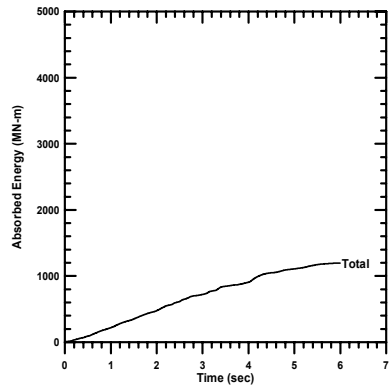


(a) Total

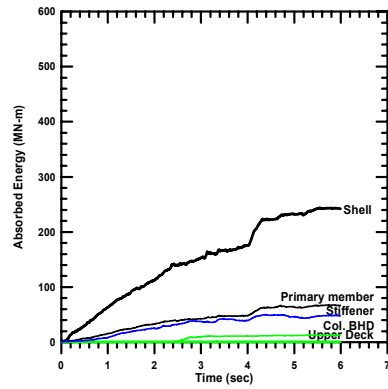


(b) Member in striking

Fig. D.12 Absorbed energy responses of Case COF-18.75

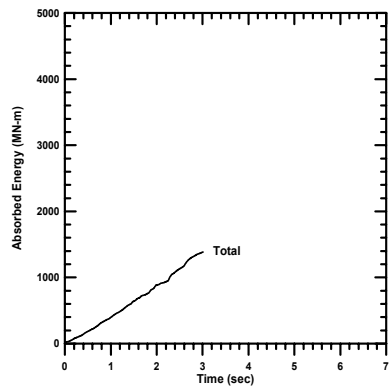


(a) Total

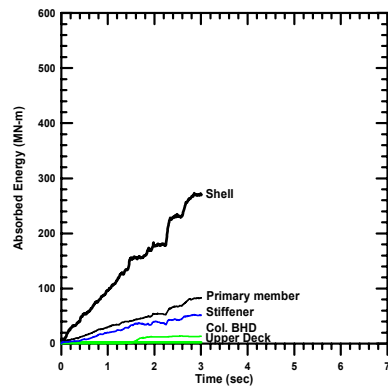


(b) Member in striking

Fig. D.13 Absorbed energy responses of Case CMP-12.50

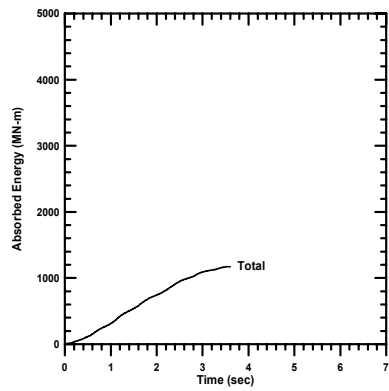


(a) Total

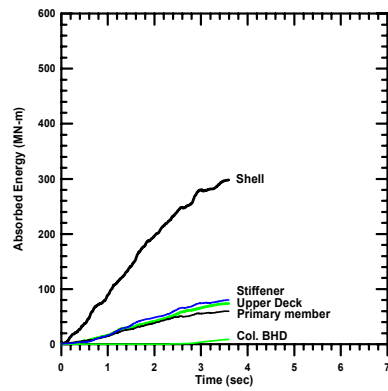


(b) Member in striking

Fig. D.14 Absorbed energy responses of Case CMP-18.75

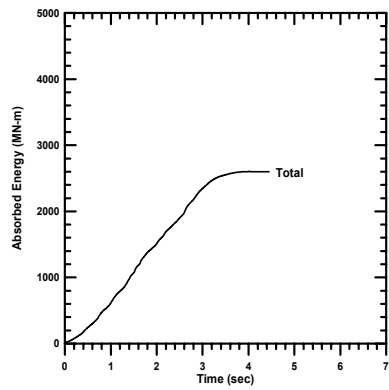


(a) Total

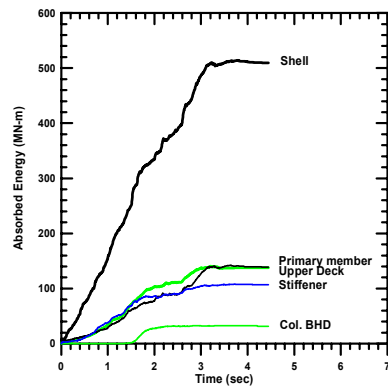


(b) Member in striking

Fig. D.15 Absorbed energy responses of Case CMF-12.50



(a) Total



(b) Member in striking

Fig. D.16 Absorbed energy responses of Case CMF-18.75