

M&S를 통한 함정의 침수상황 가시화 및 손상통제기법 연구

안병권^{†*}, 유재문^{*}

충남대학교 선박해양공학과^{*}

A Study on the Damage Control System and Flooding Simulation of Naval Vessels Using M&S

Byoung-Kwon Ahn^{†*} and Jae-Moon Lew^{*}

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National Univ.^{*}

Abstract

It should be primarily aimed to increase survivability consisting of susceptibility, vulnerability and recoverability of naval vessels including ship hull, armament system as well as crews from the design stage to practical operations. With this in mind, swift and efficient actions should be executed on the basis of accurate calculations for the recoverability of damaged vessels. In this paper, it is established how the damage control system of naval vessels is embodied through step-by-step processes intending to cope with various damaged situations that may possibly occur during real operations. It is validated that this system has the applicability to naval vessels through the case study of the battle ship which has been damaged during the operation.

※Keywords: Flooding simulation(침수상황 해석), Flooding casualty control system(침수손상 통제시스템), Hull structure survival system(선체구조 생존시스템), Intelligent decision aid(지능형 의사결정 지원), Stability analysis(안정성 해석)

1. 서론

더욱더 고도화되고 복잡해지는 전장 환경 하에서 함정의 선체구조, 무기체계, 장비 시스템 및 승조원의 생존성 확보는 함정 설계 및 운용 시 최우선적으로 고려되어야 할 사항이다. 함정의 생존성은 피격성(susceptibility), 취약성(vulnerability) 및

회복성(recoverability)으로 구성되는 데, 일반적으로 각 구성 요소에 대한 개별적 관점에서 생존성 향상을 위한 대책들이 고려되고 있는 실정이다. 정정훈 등(2006)은 함정의 생존성 설계 개념 및 생존성 향상 대책들을 연구한 바 있다. 함정이 손상을 받게 되면 승조원들은 손상 부위의 확인을 통해 함정 성능회복을 위한 대책을 강구하게 되며, 이로 인한 대응시간의 지연으로 돌이킬 수 없는 상태에 이를 수도 있으므로 체계적이며 효과적인 손상통제 기법을 필요로 한다(이동근 2003, 이

접수일: 2007년 1월 30일, 승인일: 2007년 10월 1일

† 교신저자: jmllew@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-6628

동곤 등 2006, 이창민 등 2004). 좌초, 충돌 및 피격 등에 의한 함정 손상으로 침수구역이 발생 시 해수의 유입을 막거나 유입된 해수를 유출시키는 것만이 유일한 대응 방안으로 알려져 왔으나, 선체종강도 계산을 통해 상황에 맞게 유입된 해수를 통제하는 것이 필요하다. 이를 효과적으로 수행하기 위해서는 함정 운용 시 발생할 수 있는 침수 상황에 대한 정확한 계산이 필수적이며, 그 결과에 기초한 대처 방안을 승조원에게 사전 교육함으로써 발생 가능한 극한 상황에 대한 함정의 생존성을 극대화 할 수 있다.

본 연구는 함정이 파랑 중 손상을 받아 침수되는 경우 함정의 침수상황을 가시화하고 복원성능 계산을 수행하여 침수 함정의 생존성 향상을 위해 필요한 대응방안을 제시하는 함정 손상통제 개념을 정립하는 데 그 목적이 있다. 먼저 현재 미 해군에서 함정 생존성 향상 프로그램의 일환으로 사용되고 있는 FCCS(Flooding Casualty Control Software), HSSS(Hull Structure Survival System) 및 IDA(Intelligent Decision Aid) 해석과정에 대한 개념을 정립하였다. 다음으로 대한민국 해군에서 실전 배치되어 운용된 사례가 있는 대상 함정의 실제 침수상황을 설정하고 이에 대한 손상 통제 해석과정 및 그 결과를 검증하고 해군 함정의 적용가능성을 평가하였다.

2. 생존성 향상을 위한 통합 해석과정

FCCS, HSSS 및 IDA는 세계에서 가장 현대화된 미 해군에서 현재 사용하고 있는 함정 생존성 향상을 위한 일련의 프로그램 중 일부로 좌초, 충돌 및 피격 등에 의한 함정 손상 발생 시 방대한 함정 데이터와 복잡한 해석 과정을 통합적으로 짧은 시간에 처리하여 실시간으로 함정의 안정성 및 구조강도를 평가하며, 이를 바탕으로 신속하게 함정의 생존성을 향상시킬 수 있는 대처방안을 제시해주는 프로그램이다. 함정 침수손상 통제시스템의 전체적인 해석 수행절차는 먼저 함정에 대한 수치계산용 모델링을 수행하고, 가상의 파랑 중 함정 손상으로 인한 횡경사 및 종경사를 고려한 실시간 침수상황을 가시화한다. 그 후 FCCS를 이

용하여 손상 함정의 복원성을 계산하고, HSSS를 이용하여 손상 함정에 대한 선체종강도를 계산한다. 그 결과를 가시적으로 보여주며, IDA를 통한 생존성 향상을 위한 대응방안을 제시해 준다.

3. 단계별 해석과정

3.1 함정 모델링

SHCP(Ship Hull Characteristics Program)는 대상 함정의 기본적인 형상관련 정보를 입력 자료로 하여 유체 정역학적 특성, 선체종강도 및 복원력을 계산하는 선박계산 프로그램(Rosborough 2004)의 일종으로 함정의 운용 변화에 따른 흘수 변화, 구조 및 안정성 등의 상태변화 가시화를 위한 시뮬레이션의 데이터베이스 구축을 위해 선체 및 갑판, 각 적재구획의 형상특성을 생성, 수정 및 보완 하는 데 사용되는 프로그램이다. 또한 SHCP는 윈도우즈용 응용프로그램으로서 계산에 필요한 각각의 모듈이 분리되어 배치파일에 의한 프로그램 실행을 특징으로 한다. 따라서 필요한 계산만을 선택적으로 수행 가능하기 때문에 입력자료 작성 및 프로그램 실행에 소요되는 시간을 단축할 수 있는 장점을 가지고 있다.

3.2 복원력 계산

FCCS는 운용 변화 또는 손상 침수에 따른 함정의 하중변화 시 트림 및 리스트 변화, 흘수 변화, 구조 및 유체역학적 특성변화, 안정성 평가 등을 효과적으로 수행할 수 있는 하중관리 및 안정성 평가를 목적으로 하는 시뮬레이션 프로그램(CCS 2006)이다. FCCS 프로그램의 특징은 함정의 손상 또는 침수 등의 상황 발생에 대한 함정 전반의 안정성 평가를 신속하게 수행하고 이에 대한 경보 및 대응방안을 도출하여 사용자의 의사결정을 지원한다. FCCS는 대상 함정의 데이터베이스 구축을 위한 FDBEdit(CCS 2003)와 작성된 데이터베이스 파일을 이용하여 시뮬레이션을 실행하는 FCCSWin으로 구성된다. FCCSWin은 SHCP 및 FDBEdit를 통해 구축된 시뮬레이션 데이터베이스로 사용자 관점에서 하중변화에 의한 구조 및 유체역학적 특성변화를 가시적으로 확인가능하게

하는 시뮬레이션 프로그램이다. FDBEdit에서 구축된 데이터베이스를 바탕으로 현재 함정의 상태를 보여주며 기본 적재물의 하중조건에 대한 변화 뿐만 아니라 함정 손상에 의한 침수구역 발생 및 여러 가지 해상조건 변화요인 등에 대한 계산을 신속하게 수행하고 이를 대상선박의 그래픽 모델을 이용하여 가시적으로 표현함으로써 함정에 발생 가능한 다양한 상황에 대한 함정 구조강도 및 안정성 검토를 위한 시뮬레이션 체계 구축에 효과적인 프로그램이다.

3.3 선체중강도 계산

HSSS는 FCCSWin과 통합되어 있으며, 명시된 손상에 대한 함정 구조의 종방향 굽힘 모멘트 해석에 사용된다. HSSS는 FCCSWin의 선택 기능이며 일부 함정 데이터베이스에 대해서는 사용이 불가능하다. 사용자가 정의한 종방향 손상 구역이 결정되면, 이 구역은 구조손상의 종방향 근사 범위로 인식되며 각 구역에는 여러 개의 횡방향 구조단면이 삽입되고, 각 단면의 구조손상 정도가 그림으로 표시된다. 횡단면 요소가 손상된 경우 이는 구조해석 모드에서 제거되며, 손상되지 않은 구조에 대한 선체 종방향 굽힘 모멘트 및 전단력 계산이 수행된다. 손상정도가 완전하게 입력되면 HSSS는 정상 굽힘 모멘트 및 전단력 곡선을 손상 단면에 대해 감소한 굽힘 모멘트 및 전단력으로 수정한다. 이렇게 수정된 곡선은 정상 종방향 구조 모듈에서와 같은 방법을 사용하여 얻은 굽힘 모멘트와 비교된다. 최종적으로 구조해석에 대한 요약은 종방향 손상 구역과 감소 단면강도를 나타낸다.

3.4 손상통제 방안

IDA는 FCCSWin의 진보된 특징으로 선박의 안정성 및 잔류강도를 향상시킬 수 있도록 액체하중 수정에 대한 엄밀한 시험을 거친 대응방안을 제공한다. IDA는 인터페이스를 통해 FCCSWin과 교류하는 분리된 과정으로 실행되는데, 이 구조는 각 FCCS가 대상 함정의 명세 또는 분류에 맞는 규정 (NAVSEA 1979)을 따르게 하는 IDA를 사용하도록 한다. 내부적으로 IDA는 FCCS로부터 하중, 안정

성 및 구조강도에 대한 정보를 받아 대응방안을 찾아낸다. 대응방안은 여러 가지 실행목록 중의 하나 이상으로 구성되며, 이를 신속하게 적용하여 함정의 생존성을 향상시키게 된다.

4. 대상 함정에 대한 시뮬레이션 결과

위에서 개념적으로 정립한 함정 손상통제 프로그램의 해석 과정 및 결과 검증을 위해 소형 고속 함정을 해석 대상으로 선정하였다. 대상 함정에 대하여 실전에서 발생 가능한 손상 시나리오를 가정하고 이에 따른 침수상황에 대해 FCCS 및 HSSS 프로그램 모델링 및 수치계산을 수행하여 효과적인 대응방안을 적용하는 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 함정 모델링

Table 1은 대상 함정의 주요 제원을, Fig. 1은 대상 함정의 정면도를 보여준다.

대상 함정은 총 35개의 격실로 구성되어 있으며 각 격실 정보를 바탕으로 하여 Fig. 2와 같이 FCCS 및 HSSS 해석을 위한 침수 가능 구역을 설정한다.

Table 1 Ship information

L.O.A	37.0 m	BREATH	6.63 m
L.B.P	35.0 m	DEPTH	3.787 m
DRAFT	1.717 m	DISP.S.W.	156.5 ton

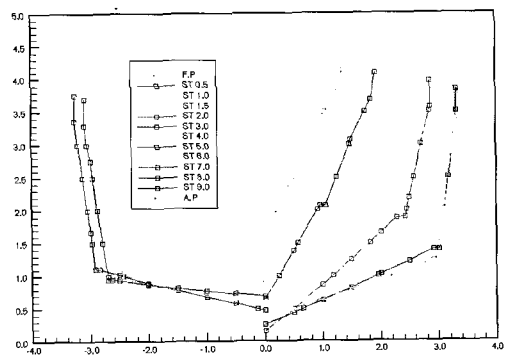


Fig. 1 Body plan

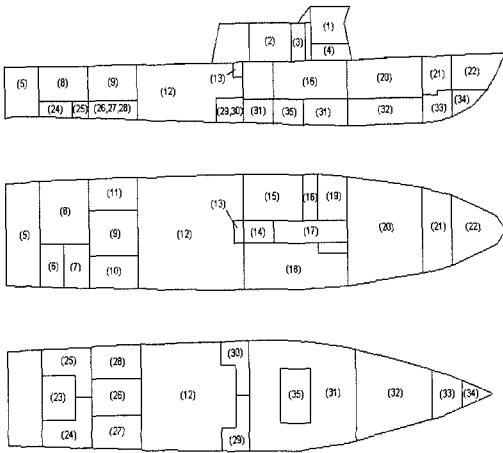


Fig. 2 Compartments

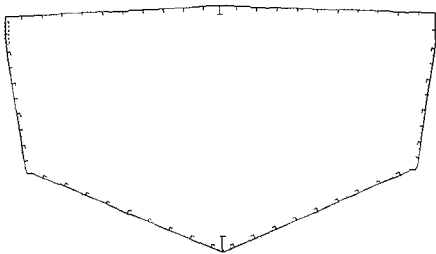


Fig. 3 ULTSTR section modeling

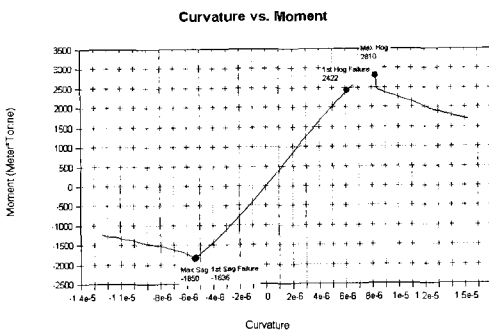


Fig. 4 Calculation of sectional strength

Fig. 3은 대상 함정의 선체종강도 해석을 위한 구조단면의 ULTSTR Section 모델링을 보여주며, Fig. 4는 해당 단면에 대한 계산 결과를 보여준다. 본 연구에서는 미 해군의 최종강도 해석 프로그

램인 ULTSTR을 이용하여 총 6개의 구조 단면을 모델링하였으며 FCCS 및 HSSS에서 이러한 계산 결과를 바탕으로 구조 손상 해석을 수행하였다.

4.2 가상 손상 및 침수 시나리오

대상 함정의 손상 및 침수 시뮬레이션 해석을 위해 적함 포격에 의한 선체 손상 및 침수 상황을 해석 시나리오로 설정하여 손상 시 함정의 운용 상태와 손상 범위, 손상 구역 및 구역별 침수 진행 속도 등을 다음과 같이 가정하여 해석을 수행하였다.

(1) 정상 함정 운용 상태

Table 2와 3은 손상 이전의 함정 운용 상태를 보여준다.

(2) 가상 손상 직후 함정 상태

적에 의해 좌현 엔진부에 집중적인 피격을 입었으며, 선체 손상에 따른 침수 발생으로 함정이 좌현으로 5도 기울어진 상태가 되었다. Table 4는 적함에 의한 가상 피격에 따른 해당 침수 구역과 손상 크기 및 분당 침수량을 보여준다.

여기서 수선 하부는 피격과 동시에 침수가 시작되었으며, 상부는 피격 5분 이후부터 침수 시작된다고 가정하였으며, 파공의 크기가 2inch인 경우 $0.38\text{m}^3/\text{min}$, 8inch인 경우 $7.38\text{m}^3/\text{min}$ 로 침수속도로 계산하였다.

4.3 해석 결과 (피격 전후의 상태 비교)

(1) 안정성 및 선체종강도 평가

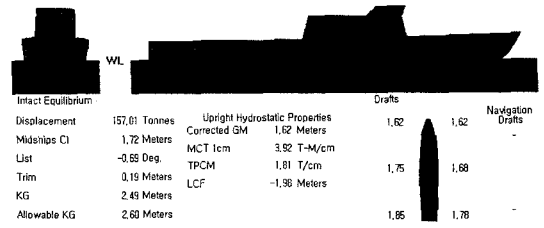
Fig. 5는 피격 직후에 대한 안정성 및 선체종강도 계산 결과이다. 모든 해상상태에 대해 선체종강도 계산으로는 안전하지만, 리스트, 고속 선회, 예인 및 승조원의 편현 이동에 대해서는 안정성이 한계(Marginal) 상태에 놓이게 됨을 보여준다.

Table 2 Loading condition

ITEM	WEIGHT	VCG	LCG	TCG
LIGHT. w	133.293	2.628	-2.498	0.002
LOAD	23.280	1.846	-3.208	0.049
TOTAL	156.573	2.512	-2.604	0.009

Table 3 Operation condition

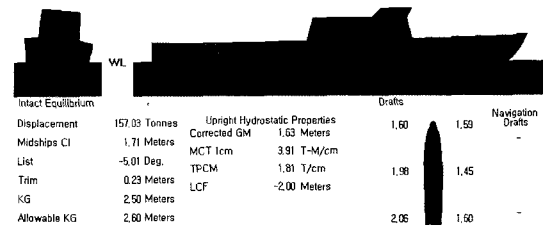
배수량(ton)	156.57	MCT (ton-m/cm)	4.10
KM(m)	4.28	Trim(cm)	15.1
KG(m)	2.51	LCF(m)	-1.91
GM(m)	1.72	df(m)	1.63
LCB(m)	-2.20	da(m)	1.78
LCG(m)	-2.64	dmm(m)	1.71



(a) Before flooding

Table 4 Flooding specification

침수구역	위 치	손상 크기	침수량/분
기관실	수선하부	2inch 7개 8inch 1개	7.38 ton
발전기실	수선하부	2inch 2개	0.76 ton
식당	수선하부	2inch 4개	1.52 ton
후타실	수선하부	2inch 6개	2.28 ton
공탱크	수선하부	2inch 6개	2.28 ton
탄약고	수선하부	2inch 6개	2.28 ton
선수창고	수선상부	2inch 4개	1.52 ton
사병침실	수선상부	2inch 4개	1.52 ton
정장실	수선상부	2inch 6개	2.28 ton



(b) After flooding

Fig. 6 Vessel's status

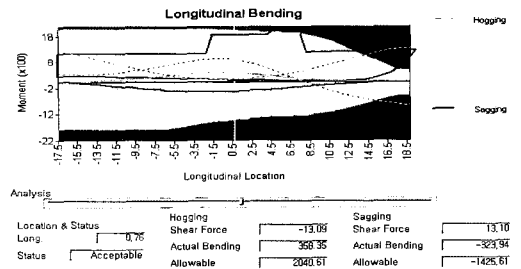


Fig. 7 Hull girder strength calculation

Stability	Structures
Foundering: SAFE	Extreme Wave: SAFE
Capsize: SAFE	Sea State 19: SAFE <-Observed SS
GM: SAFE	
KG: SAFE	Sea State 8: SAFE
Excessive List: MARGINAL	Sea State 7: SAFE
Displacement: SAFE	Sea State 6: SAFE
Draft Limits: SAFE	Sea State 5: SAFE
Beam Winds: SAFE	Sea State 4: SAFE
	Sea State 3: SAFE
High Speed Turn: MARGINAL	Sea State 2: SAFE
Towing: MARGINAL	Sea State 1: SAFE
Crowding: MARGINAL	Still Water: SAFE

Fig. 5 Stability and strength status

(2) 트림 및 리스트 변화

Fig. 6 (a)는 적함에 의한 피격 전 정상의 함정 상태를 보여주며 (b)는 좌현의 집중적인 적함 피

격으로 인해 침수상황이 발생하여 함정이 좌현으로 5도 정도 기울어진 상황을 가시적으로 보여주고 있다.

(3) 선체중강도 평가

Fig. 7은 해상 상태를 반영하여 호강 및 새강 모멘트를 포함한 종방향 굽힘 모멘트를 계산한 결과를 보여주고 있다.

(4) 피격 후 시간 변화에 따른 침수 상황

Table 5는 피격 후 시간변화에 따른 각 구획별 침수량 변화를 보여준다. 여기서 선수창고 및 사병침실은 5분 이후부터 침수되는 것으로 가정하였

Table 5 Changes in flooding amount

침수구역	침수량 (ton)		
	5분 후	10분 후	15분 후
기관실	38.6	73.6	110.4
발전기실	3.8	7.6	11.4
식당	7.38	14.76	22.1
후타실	11.4	22.8	34.2
공탱크	5.25	5.25	5.25
탄약고	5.00	5.00	5.00
선수창고	-	7.6	10.2
사병침실	-	7.6	11.4
정장실	-	11.4	11.4
계	69.6	155.6	221.4

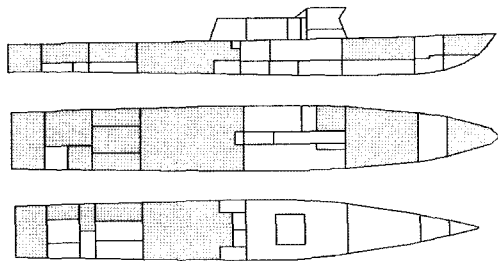


Fig. 8 Flooding areas

다. 해당 데이터베이스가 완성되면 FCCS는 Fig. 8과 같이 피격에 따른 침수발생 구역을 구분하여 가시적으로 보여준다.

Fig. 9는 피격 후 침수량 증가에 따른 트림 및 리스트 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것처럼 피격 후 침수량 증가에 따른 트림 및 리스트 변화가 증가되어 결국 15분 후에는 함정이 완전히 전복되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 침수 5분 후(a)와 10분 후(b) 상황에 대한 복원력 평가 결과를 보여주고 있다. 침수 5분 후까지 한계상태(MARGINAL)에 있던 함정은 침수 10분(총 침수량 155.6톤) 이후에는 위험(DANGER) 상태에 도달하는 것을 볼 수 있다.

4.1 손상통제 수행 결과

Fig. 11은 침수 10분 후 상태에 대한 안정성 및 구조강도 계산을 수행하여 도출한 IDA 방안을 보여주고 있다. 침수된 해수를 유출시키는 것이

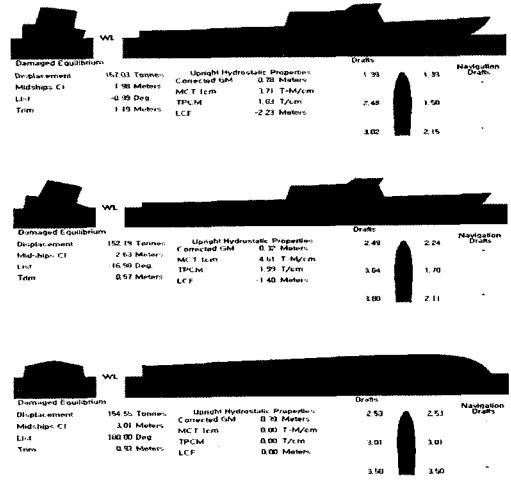
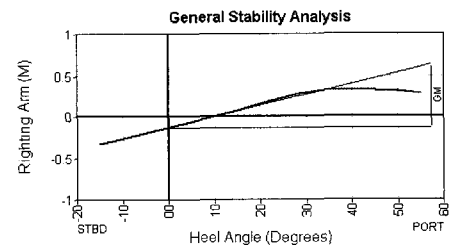
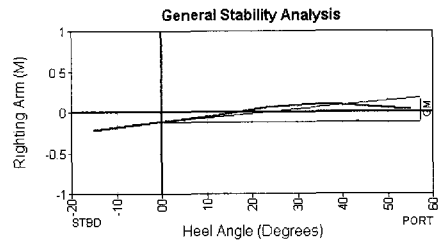


Fig. 9 Vessel's status with flooding



Criteria	Status	Current Value	Criteria Thresholds	
			Marginal	Danger
Required GMI	SAFE	0.773	0.030	0.000
Allowable Heel Angle	MARGINAL	10.218	10.000	15.000

(a) 5 minutes after flooding



Criteria	Status	Current Value	Criteria Thresholds	
			Marginal	Danger
Required GMI	SAFE	0.303	0.030	0.000
Allowable Heel Angle	DANGER	16.672	10.000	15.000

(b) 10 minutes after flooding

Fig. 10 Righting arm curves

Action	Compartments		Amount M ³	Resulting Status		Remove Solution
	From	To		Stability	Strength	
1 Initial Condition					SAFE	
2 DeWater	2-6-0-Q	Ocean	4		SAFE	Remove
3 DeWater	2-9-2-E	Ocean	2		SAFE	Remove
4 Ballast	Ocean	3-24-0-V	26		SAFE	Remove
5 Ballast	Ocean	3-9-1-V	5	MARGINAL	SAFE	Remove
6 Ballast	Ocean	3-6-1-V	5	MARGINAL	SAFE	Remove
7 Ballast	Ocean	3-29-D-V	17	MARGINAL	SAFE	Remove
8 Ballast	Ocean	3-17-1-F	1	SAFE	SAFE	Remove

Fig. 11 IDA recommendations

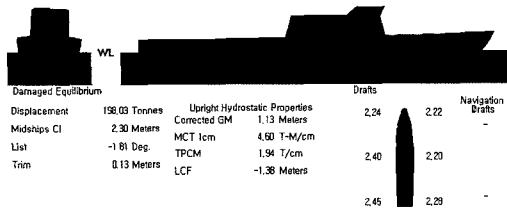


Fig. 12 Vessel's status after applying IDA

아니라 지시하는 우선순위에 따라 해당 구역에 필요한 양의 해수로 발라스트함으로써 위험요소들을 제거하여 안전한 상태로 회복시킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 12는 침수 10분 후 상태에 대해 위에서 도출한 대응방안을 적용하여 다시 해석한 결과를 보여주고 있다. 대응방안을 적용한 결과 손상 이전에 비해 배수량은 증가 했지만, 피격 후 대상 함정의 허용 경사각은 한계값(10도)보다 작아지게 되며 복원력을 회복시켜 안정상태(SAFE)에 놓이게 된다. 제시된 대응방안을 단계별로 적용한 후에 선체종강도 및 안정성 평가는 Fig. 7과 Fig. 10과 같은 형태로 세부 해석결과를 확인해 볼 수 있다.

5. 결론

함정 및 승조원의 생존성 확보는 함정 운용 시 최우선적으로 고려되어야 할 사항으로 생존성을 극대화하기 위해서는 손상에 따른 취약성 및 회복성에 대한 빠르고 정확한 계산이 필수적이며 이를 바탕으로 효과적인 손상통제가 이루어져야 한다. 본 연구를 통해 기본적인 적재물의 하중조건에

의한 변화 뿐 만아니라 함정 손상에 의한 침수구역 발생 시 여러 가지 해상조건의 변화요인 등에 대한 안정성 계산을 신속하게 수행하고 이를 대상 함정의 그래픽 모델을 이용하여 가시적으로 표현함으로써 함정에 발생 가능한 다양한 상황에 대한 함정 구조강도 및 안정성 검토를 위한 시뮬레이션 체계를 구축하고 손상에 대한 실시간 대응방안을 짧은 시간 안에 도출해 내는 과정을 검증하였다. FCCS, HSSS 및 IDA는 함정에 대한 다양한 가상 손상 시나리오를 설정하고 이에 따른 생존성 확보 방안의 우선순위를 도출 할 수 있으며, 이를 바탕으로 승조원들에게 실전에서 발생할 수 있는 함정 손상상황을 가시적으로 체험하고 훈련할 수 있게 함으로써 전투력 향상에 효과적으로 사용할 수 있는 생존성 평가 수단이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 대한민국 해군 전투발전단의 의뢰로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 위 기관의 연구비 지원에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이동근, 2003, "손상선박의 생존성 평가 시스템에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 2호, pp. 34-40.
- 이동근, 홍사영, 이경중, 2006, "파랑중 손상선박의 거동에 관한 이론적 실험적 연구," 대한조선학회 논문집, 제 43권, 제 1호, pp. 1-14.
- 이창민, 이현엽, 김원돈, 송무석, 안자일, 2004, "M&S기술을 적용한 함정 Ballast체계 설계 검증 기법 개발," 이동근, 2003, "손상선박의 생존성 평가 시스템에 관한 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 402-409.
- 정정훈, 이현엽, 유재문, 조대승, 박상일, 임길혁, 박준길, 2006, "함정 생존성 설계기술 개발의 필요성 및 관련 국내기술의 발전방향," 대한조선학회 지, 제 43권, 제 4호, pp. 41-49.
- CCS Advanced Marine Center, 2003, "FDBEdit User's Manual," Ver. 4.3.

- CCS Advanced Marine Center, 2006, "FCCS User's Manual." Ver. 5.2.
- NAVSEA, 1979, "Stability and Buoyancy of U. S. Naval Surface Ships," DDS 079-1.
- Rosborough, J., 2004, "SHCP User's Manual, Naval Surface Warfare Center," Carderock Division, Ver. 4.3.3.



< 안 병 권 >



< 유 재 문 >