

손상선박의 생존성 평가 시스템에 관한 연구

이동곤^{†*}

해양(연) 해양시스템안전연구소*

A Study on the Survivability Assessment System of Damaged Ships

Dongkon Lee*

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering/KORDI*

Abstract

Ship damage due to maritime casualties lead to marine pollution, loss of life and properties. The maritime casualties come from the rough sea and bad weather condition generally. Therefore the large-scaled casualties will be derived from loss of structural strength and stability due to the progressive flooding and enlargement of damage by the effect of wave and wind. The improvement of damage survivability is very important in maritime safety.

This paper described the damage survivability assessment system which can be evaluate and improve the ship safety in consideration of loading, sea and damage condition. The components of the system and decision criteria for damage stability and structural safety is established. The ship modeler and behavior analysis program in wave is developed. Finally further research work is also discussed.

※Keywords: Damage(손상), Survivability(생존성), Safety(안전), Ship(선박)

1. 서언

선박은 설계될 때 어느 정도 사고를 대비하여 사고에 대한 여유를 갖도록 설계되므로, 선박이 사고 순간에 전복 혹은 침몰되는 치명적인 사고의

발생 확률은 극히 낮다. 그러나 선박 사고의 대부분이 높은 파도, 강한 비바람, 안개와 같은 악천후 상태 상태에서 발생할 가능성이 높으므로, 경미한 사고의 경우에도 손상이 계속 진행되어 마침내 전복되거나 침몰로 이어지는 2차 사고로 확대되어 막대한 인명과 재산의 손실 그리고 환경오염을 초래하는 경우가 많다. 이러한 2차 사고의 예는 2002년 스페인 앞바다에서 침몰한 Prestige 호의 경우가 대표적이다.

접수일: 2003년 2월 6일, 승인일: 2003년 3월 5일

† 주저자, E-mail : dklee@kriso.re.kr.

Tel: 042-868-7222

따라서 손상 선박의 손상 확대 방지를 통한 2차 사고를 방지하고 선박의 안전성을 확보할 수 있는 기술이 필요하며, 이러한 기술을 생존성(Damage Survivability) 평가 기술이라 부른다. 생존성 평가 기술은 선박이 손상을 받았을 경우, 주어진 해상상태에서 선박의 침하와 경사가 계속 진행될 것인지, 계속된다면 얼마 후에 전복이나 침몰이 발생할 것인지, 그 과정에서 Prestige 호처럼 선체가 구조적으로 완전히 파괴될 것인지 등을 기술적으로 해석하고 평가하는 것을 말하며, 평가 결과를 바탕으로 어떠한 조치를 취하여야 보다 안전한 상태로 만들 수 있는가에 대한 대안의 제시를 포함하는 기술이다. 나아가서 평가 기술을 바탕으로 보다 안전한 내부 구조를 갖도록, 선박 설계의 초기단계에서 가장 손상 시나리오에 의한 손상 최적화를 통하여 선박의 안전성을 향상시키는 안전설계 기술로도 사용된다.

본 논문에서는 손상선박의 손상 복원성과 구조 안전성을 고려하여 생존성을 평가할 수 있는 시스템에 관하여 기술하였다. 먼저 관련 연구 현황을 살펴보고, 시스템 구성요소와 요구사항에 관하여 논한 후, 손상 복원성과 구조 안전성을 판단할 수 있는 평가기준에 관하여 기술하였다. 그리고 손상 선박의 선형, 구획, 구조부재를 표현할 수 있는 모델러와 파도중에서의 손상선박의 거동해석을 위한 거동해석 프로그램 개발에 관하여 기술하였고, 마지막으로 향후 개발 계획을 설명하였다.

2. 관련 연구 현황

2.1 EU의 연구

북해에서 Herald of Free Enterprise호와 Estonia 호의 전복사고로 수 백 명의 인명 손실이 발생함에 따라 Ro-Ro Passenger 선의 손상시 생존성에 관한 관심이 급격하게 고조되었다. 이에 따라 최근 종료된 안전 설계에 관한 연구가 EU 회원국을 중심으로 수행되었다(Vassalos 1999). 본 연구에서는 손상안전과 관련하여 Ro-Ro Passenger 선을 대상으로 확률론적 기법에 의한 선박의 안전성 평가 방법의 개발, 수치 해석 기법 및 도구의 개발, 실험을 통한 이론적 방법의 검증

등이 주요 연구 목표였다. 최근에는 본 연구사업에 대한 2단계 연구가 기획중인 것으로 알려졌다.

2.2 미 해군의 연구

미 해군은 자국의 함정이 평상시 작전 중에 발생할 수 있는 충돌이나 좌초 등과 같은 일반적인 손상과 적과의 교전에 의한 손상으로부터 함정의 생존성을 향상시키기 위한 시스템(Hull Structural Survival System, HSSS)을 개발하여 시험 탑재하였다(Garber 등 1996). 시스템에는 함정의 선형, 내부구획, 중량중심, 주요 구조부재 등의 주요 선박에 관련된 정보와 생존성 해석에 필요한 프로그램이 미리 컴퓨터 내에 입력, 저장되어 있다. 손상시 복원성과 구조 강도간의 경합해소를 위하여 인공지능 기법에 기초한 지식기반 시스템의 도입으로 시스템의 성능을 향상시킨 것이 주요 특징 중의 하나이다.

본 시스템의 지능형 의사결정 지원 모듈(Intelligent Decision Aid, IDA)은 크게 Hull strength expert system capability와 Stability expert system capability로 이루어져 있다. IDA는 2개의 전문가시스템과 손상 데이터 및 경합해소 함수를 제어하여 선박의 자세 제어에 필요한 조언을 도출한다.

2.3 IMO의 동향

IMO의 해사안전위원회(MSC, Maritime Safety Committee)에서는 대형 여객선의 인명안전에 있어서, 선박의 손상시 승객들이 구명정을 타고 대피하는 것보다 본선의 생존성을 향상시켜 본선에 머무는 것이 보다 안전하다는 개념("The ship is its own best lifeboat")아래 생존성을 강화시키는 방향의 개념을 도입하고 있다.

또한 최근에는 선박의 손상 안전성 취급에 있어 손상 복원성뿐만 아니라 구조 안전성을 동시에 고려하는 것이 필요하며(IMO 2002), 선박의 안전을 위하여 의사결정 시스템을 탑재하는 것을 권고하는 문서가 제출되고 있다(IMO 2003).

3. 시스템 구성 요소

손상 생존성을 평가하기 위한 시스템의 구성요소를 Fig. 1에 나타내었다. 시스템은 크게 손상선박에 관한 선박모델, 구조 안전성 및 손상 복원성 계산, 생존성 평가 및 대안을 위한 지식기반시스템으로 구성된다. 각 구성 요소의 주요 기능은 다음과 같다.

선박모델은 생존성을 평가할 대상 선박의 선형, 구획 및 구조 부재의 표현은 물론, 손상부위와 적하상태를 표현할 수 있어야 한다. 표현된 정보를 바탕으로 손상거동 해석과 구조 안전성 평가에 필요한 해석모델을 생성하는 물론 유체정역학적인 계산을 수행하는 기능을 포함한다.

구조 안전성 및 손상 복원성을 계산하는 부분은 손상된 부위와 파랑하중을 고려하여 종강도를 계산하고, 파도의 영향을 고려하여 거동을 해석한다.

지식기반시스템은 구조 안전성과 손상 복원성 계산 결과를 바탕으로 생존 가능여부를 판단하고, 생존성을 향상시킬 수 있는 대안을 제시한다.

4. 생존성 평가 기준

4.1 손상 복원성

손상 받은 선박이 양의 복원력을 가지는 경우에도 복원력의 크기와 범위 등에 따라서 전복할 가능성이 있다. 이것은 손상 복원력 계산을 위하여 입력한 데이터의 오차나 바람이나 파도 등의 외부 요인에 기인한 외력의 영향이 복원성을 약화시키는 원인으로 작용하기 때문이다. 따라서 이러한 상황을 고려할 때, 손상 생존성을 평가하기 위한

기준은 수치적인 결과 값을 제공하는 것도 중요하지만 사용자의 판단을 효과적으로 지원하기 위한 수단이 필요하다. 즉 결과 값이 안전한지, 안전하다면 충분히 안전한지 혹은 위험한지 등을 판단할 수 있도록 하여야 한다. 그러므로 설계 단계에서 손상 복원성이나 구조 안전성을 평가하는 기준처럼 만족 혹은 불만족의 2단계 기준 만으로는 충분하지 않다. 허용 기준을 약한 범위 내에서 만족할 경우에도 생존할 수 있다고 판단하는 것은 위험한 결정이 된다. 이는 데이터의 부정확, 규명되지 않은 물리적 현상, 사용자의 실수 등을 고려하지 않은 결정이 될 수 있다. 따라서 생존성 평가를 위한 기준은 이러한 점을 고려하여 만족, 약한 만족, 불만족 등과 같이 완충 지역을 설정하는 것이 필요하다. 미 해군에서 개발하여 미국의 함정에 시험 탑재한 생존성 평가 시스템에서는 설계단계에서 만족해야 하는 손상 복원력의 기준을 사용하여 손상 생존성을 평가하는 기준으로 사용하였다(Garber 등 1999). 설계단계에서 요구하는 기준 이하의 값을 가질 경우에는 불만족(Red Zone)으로 정하여 복원성을 향상시키는 조치를 요구하고, 기준 값보다 약간의 여유가 있을 경우에는 약한 만족(Yellow Zone)으로 설정하여 가능하다면 복원력 향상을 위한 조치를 취한다. 만족(Green Zone)은 충분한 복원력을 가지는 상태를 표시하는데 기준에서 상당한 여유가 있을 경우이다.

본 연구에서는 미 해군의 기준과 기존 손상 복원력 기준(IMO 1966, IMO 1973, IMO 1988, IMO 1996)을 바탕으로 생존성 평가 기준을 선종에 따라 잠정 설정하였고 Table 1에 여객선에 대한 부분적 예를 보였다. 본 기준은 앞으로 이론적 분석 결과와 모형 시험과정을 통하여 확인 보완될 것이다.

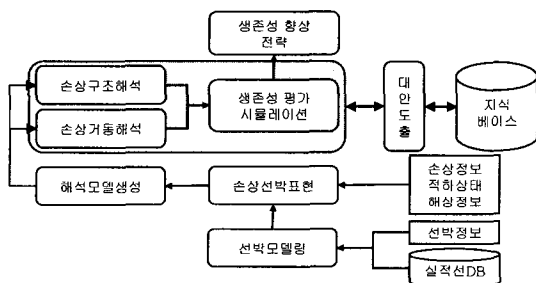


Fig. 1 System configuration

Table 1 Example of decision criteria for damage stability

기준	만족(Green)	약한 만족(Yellow)	불만족(Red)
GM (m)	$x > 0.10$	$0.10 \geq x > 0.05$	$0.05 \geq x$
경사각(degree)	$x \leq 7$	$7 < x \leq 12$	$12 < x$
정복원력	$x > 20$	$20 \geq x > 15$	$15 \geq x$

4.2 구조 안전성

선박이 손상을 받았을 경우에 안전성을 확보하기 위한 조치로 지금까지는 손상 복원성의 측면에서 주로 접근하였다. 그러나 선박에 손상이 발생하면 필연적으로 수반되는 구조적인 손상을 고려하여야 실제적으로 생존성을 평가하는 것이 가능하여 진다. 손상 복원성과 구조 안전성 간의 중요도는 사고의 종류나 선종 등에 따라 달라질 수 있지만, 일반적으로는 복원성을 우선하는 경향이 있다. 이는 구조적인 안전성의 결여로 선박이 파손되었을 경우, 복원성을 확보하고 있다면 극단적인 침몰이나 전복과 같은 사고가 발생하지 않기 때문일 것이다. 하지만 구조적인 불안전에 기인한 사고의 확대나 손상의 진행에 따른 피해 확산의 가능성 측면에서 구조안전성도 생존성 평가에 함께 고려하여야 할 사항이다. 또한 생존성을 향상시키기 위한 각종 조치사항, 예를 들어 화물의 이동이나 발라스팅을 통한 하중조건의 변화에 따른 구조적 안전성이 확보되는지에 대한 평가의 측면에서도 중요한 사항이다.

손상 선박의 구조 안전성은 종강도의 측면에서 접근하는 것이 일반적이다. 횡강도와 국부강도도 중요한 요소이긴 하나 전체적인 관점에서 보면 종강도가 지배인자이다. 또한 국부강도와 횡강도를 평가하기 위해서는 선박의 모든 구조부재를 정의하여야 하는데 이는 긴급한 상황에서 사용자가 정의하는 것이 어렵고, 관련된 데이터를 확보하는 것도 쉽지 않을 뿐만 아니라 안전성 해석에도 많은 시간이 필요하여 실용성이 떨어진다.

손상 선박의 종강도를 평가하기 위해서는 종강도에 관련된 선박의 구조부재를 정의하고, 손상 정보를 바탕으로 구조적인 손상 상황을 반영하는 것이 필요하다. 충돌이나 좌초 등과 같은 사고가 발생하였을 경우, 구조 부재는 손상을 받게 된다. 손상 받은 구조부재가 선박의 강도에 기여할 수 있는 강성을 가지는지, 만약 종강도에 기여하지 못한다면 어느 영역까지 파급효과가 미칠 것인지에 대한 판단이 필요하다.

구조 부재의 손상에 대한 기본적인 자료와 정보가 마련되면, 화물의 적재상태와 종류 그리고 부력의 변화와 파도의 영향을 고려하여 하중조건을

Table 2 Structural safety criteria at hogging condition

선종	선저 손상
산적 화물선	$[1.19 - 0.22\left(\frac{Y-5}{15}\right)] M_t > \eta M_{act}$
이중선체 유조선	$[1.08 - 0.21\left(\frac{Y-5}{15}\right)] M_t > \eta M_{act}$
컨테이너 운반선	$[1.25 - 0.35\left(\frac{Y-5}{15}\right)] M_t > \eta M_{act}$

계산하고, 이를 바탕으로 선박의 굽힘강도, 전단강도, 좌굴강도를 계산한다. 본 연구를 통하여 부식이 고려된 손상선박의 구조안전성 기준을 정의하였다. 선저손상을 기준으로 선종별로 Hogging 상태에서 생존성 평가기준을 정의하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다(이동근 등 2002).

5. 선박 모델러

손상선박의 생존성을 평가하기 위한 선박 모델러는 설계단계에서 사용하는 것과 같이 매우 정교한 기능을 요구하지 않는 대신에 신속하게 손상선박을 표현하는 것이 중요하다. 손상선박의 모델러에 요구되는 기능은 다음과 같다.

- 상부구조를 포함한 선형 모델링 기능
- 내부구획 모델링 기능
- 주요 구조부재의 표현 기능
- 유체정역학적 제 계산 기능
- 손상부위 및 손상 구조부재의 정의
- 적재상태 표현 기능
- 손상거동해석에 필요한 형상모델 생성
- 실적선 데이터를 이용한 변환 기능

이러한 기능을 갖는 모델러를 개발하기 위하여 본 연구에서는 IDEF(KBSI 1995) 방법에 의한 기능 모델링 및 프로세스 모델링을 통하여 손상선박의 선형 및 구획 모델링 시스템의 기능과 절차에 관련 정보들을 Activity diagram, Process flow diagram, Object state transition diagram 등의 형태로 문서화하였다. 또한 이들을 통하여 손상선박의 선형 및 구획모델을 구성하는 객체요소(Application objects)들을 정의하였으며, 여기에

는 선형(Hull form) 및 이를 생성하는 데 필요한 곡선(Curve), 구획(Compartment) 및 이를 정의하기 위한 공간요소(Space, Room 등), 화물(Cargo), 그 밖에 손상선박의 특성 및 거동을 표현하기 위한 기능요소들을 포함하고 있다.

정의된 객체요소들은 UML(Quatrani 1988) 모델의 초기 클래스(Initial class)가 되며, 객체지향 시스템 개발 지원도구인 Rational Rose를 이용한 일련의 모델링 작업 (User case diagram, Class diagram, Sequence diagram, Collaboration diagram, State diagram, 등)을 통하여 구체화하였다. 이들 UML 모델로부터 각 클래스에 대한 C++ 코드(*.H, *.Cpp)를 자동 생성하고, 실행에 필요한 내용을 추가하여 모두 120여개의 클래스 라이브러리(library)를 구현하였다.

Fig. 2에 손상선박의 생존성 평가를 위한 선형 및 구획모델링 시스템 및 이를 기반으로 한 유체정역학적 제 계산 프로그램을 위한 Use case diagram을 나타내었고, Fig. 3에 개발된 모델러를 사용하여 손상상태를 표현한 예를 나타내었다.

본 연구에서 개발한 시스템은 PC의 Windows 환경에서 상용 3차원 형상모델링 커널 및 3차원 그래픽 라이브러라인 OPEN GL을 이용하였다. 또한 시스템의 유연성과 작업 효율성을 높이기 위해 Visual Studio 시스템에서 제공하는 MFC (Microsoft Foundation Class) library를 이용하여 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 개발하였다. 손상선박의 선형 및 구획모델링 시스템에서 표현된 선형, 구획 및 주요부재들의 형상정보들은 쉽게 'SAT' 데이터 파일로 변환이 가능할 뿐만 아니라 다른 CAD 시스템과도 인터페이스가 쉽게 이루어 지도록 하였다. 선형 및 구획모델링 시스템내의 선형, 구획, 주요부재 및 유체정역학 제계산 결과 들은 파일로 작성된 데이터베이스를 통해서 영속성을 갖는 데이터로 저장하게 된다(이동곤 등 2001).

강도계산에 필요한 종강도 부재는 선형과 구획 정보에 속성정보를 부가하고, 보강재는 위치정보와 속성정보를 별도로 저장 관리한다. 손상 복원성을 위한 선박계산 기능은 SIKOB과 연계하여 수행한다(이경호/이동곤 1999).

모델러의 개발환경 및 도구를 간략하게 살펴보면 Table 3과 같다.

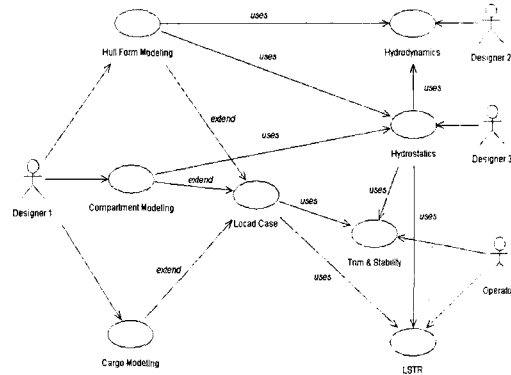


Fig. 2 Example of user case diagram

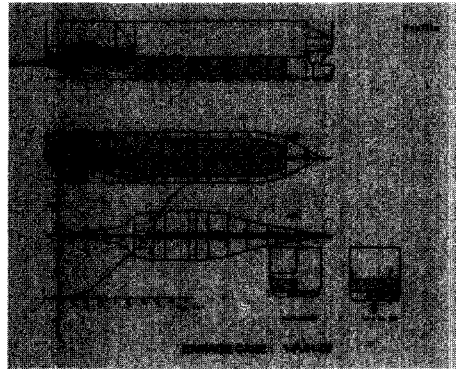


Fig. 3 Representation of damage case by modeler

Table 3 Developing environment and tools for ship modeler

구분	환경 및 도구
Hardware	PC Platform(펜티엄 III 이상)
Operating System	Window 9x, 2000, NT
Language	Visual C/C++, Digital Fortran
Database	File System
GUI	Visual Studio
Graphic Library	OPEN GL
Data Modeling	Rational Rose, IDEF0, IDEF1, IDEF4
Geometric Kernel	ACIS 3D Toolkit

6. 거동해석 프로그램

손상된 선박의 전복이나 침몰 가능성을 예측하고, 이런 경우가 발생하는 데는 얼마의 시간이 소요되는지를 예측하기 위해서는 파도의 영향을 고려한 실시간 거동해석이 필요하다.

손상된 선박의 거동은 정상상태의 거동과 달라서, 주파수영역에서 해석이 불가능하고, 시간영역에서 해석을 하여야 한다. 또한 침수 및 기울어진 상태에서의 파도에 의한 힘을 예측하고 운동을 계산하며, 이에 따라 손상부위에서의 침수량을 계속 계산하여야 해석이 가능하며, 침입수의 영향도 운동방정식에 포함시켜야 한다. 본 연구에서 손상선박의 거동해석에 사용된 계산 방법을 요약하면 다음과 같다(이동근 등 2002).

- 6자유도 비선형 시간영역 운동 방정식을 도출한다.
- 선박의 운동에 따른 Radiation Force를 모든 주파수 영역에서 계산한 후, 이 것을 시간영역에서의 충격응답함수로 변환하고, 운동방정식에서는 Convolution Integral을 이용하여 시간영역에서의 힘을 얻는다.
- 파도에 의한 힘은 Froude-Krylov Force와 Diffraction Force로 구분하여, Froude-Krylov Force는 선체에 작용하는 동압력을 수면까지 적분하여 시간이 경과되면서 겪는 힘을 계속 계산하며, Diffraction Force는 Long Wave로 가정을 하여 Cross-Flow Force로 계산한다. Long Wave로 가정하여도 본 연구의 목적에 필요한 하중을 구하는 데는 큰 무리가 없다.
- 손상부위에서 해수의 유입과 출입은 내부 외부 압력차를 이용하여 유입, 유출량을 계산한다.
- 침수 영역 내에서의 유체유동은 작다고 가정하고, 평균값을 사용하되 기울어진 상태에 따라 침입수의 위치, 힘 등은 Quasi-steady 상태로 계산한다.
- 전복 및 침몰현상 해석을 위하여, 갑판위 상부구조물에 대한 부력 및 유체력을 계산한다.
- 주어진 적하상태에 따라, 종방향의 Shear Force 및 Bending 모멘트를 계산한다.

거동해석 프로그램에서 계산된 외력은 구조 안전성을 판단하기 위한 입력 자료로 사용된다. Fig. 4는 개발된 거동해석 프로그램을 사용하여 계산한 손상선박의 거동 예를 표시한 것이다.

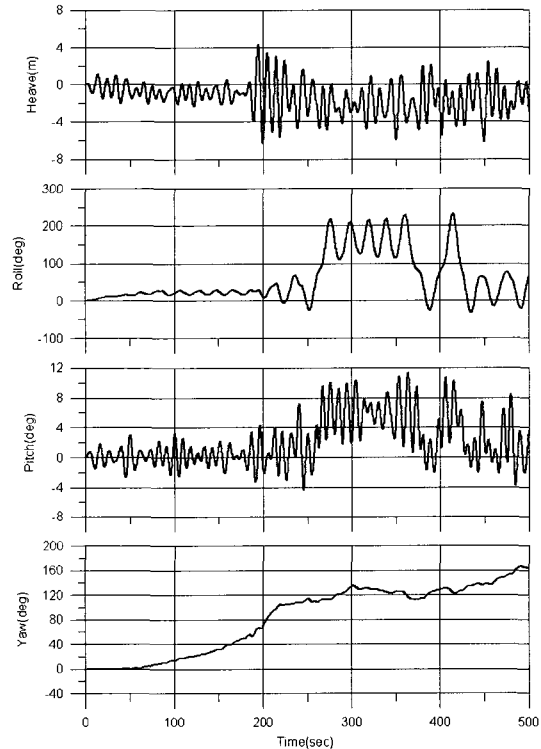


Fig. 4 Example of behavior analysis in wave for damaged ship

7. 결론 및 향후 계획

해양사고는 많은 방지 노력에도 불구하고 지속적으로 발생하고 있으며, 최근의 해양사고는 단순한 재산상의 손실뿐만 아니라 인명피해는 물론 막대한 환경오염을 수반하고 있다. 최근 Prestige 호의 사고는 손상된 선박을 효과적으로 제어할 수 있는 수단이 매우 중요함을 알려주는 교훈이라 할 수 있다. 사고에 의한 선박의 생존성을 향상시키기 위한 노력이 유럽과 IMO를 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 이러한 노력의 결과는 궁극적으로 안전에 관한 법규의 강화로 이어질 것이다.

본 연구에서는 이러한 경향에 대처하고, 해양사

고에 의한 환경오염과 인명의 안전을 위하여 사고 선박의 생존성을 향상시키기 위한 전반적인 시스템을 구성하였고, 생존성 평가 기준 설정, 모델러 개발, 거동해석 프로그램 개발 등과 같은 핵심적인 기술을 개발하였다.

그러나 전체 시스템을 구성하기 위해서는 추가적인 연구와 정도 향상을 위한 노력이 필요하다. 예를 들어 구조 안전성을 평가하기 위한 프로그램의 개발, 거동해석 프로그램의 정도 향상을 위한 손상 모형시험의 수행이 필요하며, 2003년에 이에 대한 연구가 수행될 것이다. 나아가서 선박의 운항자나 육상의 사고 대응자를 위한 의사결정 지원 시스템을 개발하고, 전체를 시스템화하는 과정도 중요하다. 개발된 시스템이 직접 현장에서 사용되기 위해서는 빠르고 쉽게 사용하도록 해야 하며, 가능한 한 많은 선박의 데이터를 수집하여 데이터 베이스화하는 것도 필요하다 생각한다.

후 기

본 연구는 해양수산부가 지원한 '선박 생존성 평가 시스템 개발' 연구의 일부분임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 이경호, 이동곤 1999 "선박 안전성 평가 및 구난지원 시스템," 대한조선학회논문집, 제36권 제3호, pp.115-121.
- 이동곤 외 2001 "선박 생존성 평가 시스템 개발 ~ 1차년도 연구보고서," 한국해양연구원, BSM00290-2340
- 이동곤 외 2002 "선박 생존성 평가 시스템 개발 ~ 2차년도 연구보고서," 한국해양연구원, BSM00400-2398
- Garber, J, Bourne, J., Snyder, J. 1996 "The Hull structure survival system," Advanced Marine Enterprise

- IMO 1966, "International convention on load lines"
- IMO 1973 "International convention for the prevention of pollution from ships"
- IMO 1996 "Code of safe practice for solid bulk cargos"
- IMO 1988 "International code for the construction and equipment of ships carrying dangerous chemicals in bulk"
- IMO 2002 "Large passenger ship safety : Outcome of NAV 47, SLF 44, STW 33 and FP 46," MSC 75/4
- IMO 2003 "Large passenger ship safety : cruise ship safety forum recommendation," MSC/FP 47/7/1
- KBSI 1995 "IDEF Family of methods for concurrent engineering and business re-engineering applications," Knowledge Based Systems, Inc. & Mani Information Systems, Inc
- Quatrani, T. 1998 "Visual Modeling with Rational Rose and UML, Addison-Wesley
- Vassalos, D. 1999 "Design for safety," Design for Safety Conference, pp. 1-15.



< 이 동 곤 >