손상 선박의 생존성 평가 기술

이 동 곤/해양(연) 해양시스템안전연구소 책임연구원

1. 서 언

사고 방지를 위한 각고의 노력에도 불구하고 해양사고는 지속적으로 발생하고 있으며, 최근에는 해양 오염을 유발하는 대형 사고들이 지면을 장식하곤 한다. 이에 따라 국제해사기구(IMO)에서는 사고 방지는 물론 사고 발생시에 피해를 최소화하기 위한 각종 수단을 도입하거나 강화하고 있다(IMO 2002, 2003). 예를 들면 MSC 78에서 비록 강제화가 되지는 않았지만 Bulk Carrier의 이중선체 도입, Coal Based Standard, 손상 복원성 규정의 Harmonization 등은 궁극적으로 해양에서의 안전을 확보하기 위한 움직임으로 이해할 수 있다.

그러나 특수한 목적의 경우를 제외하면, 선박은 운항을 통한 경제적 이익의 추구가 근본 목표이므로 안전과 경제적 이익은 Trade-off 관계가 성립한다. 따라서 단기간에 선박의 안전을 확보하기 위한 제반 규정의 강화나 새로운 규약이 발효되기는 쉽지 않은 것이 현실이다. 한편으로 안전한 선박을 설계하였다 하더라도 선박 운항자의 과실이나 불가항력에 의한 사고는 피할 수 없으므로, 사고 발생에 따른 피해 최소화를 어떻게 접근할 것인가 하는 것도 매우 중요한 일이다.

이러한 개념에 따라, 선급에서는 사고가 발생한 선박의 사고 확대 방지를 통한 2차 사고를 방지하고 선박의 생존성을 향상시키기 위한 긴급대응시스템(Emergency Response System, ERS)을 운용하고 있으며, 미 해군의 경우에는 함정이 사고나 피격으로 손상을 받았을 경우 지속적인 전투력 유지와 함정의 생존성 향상을 위한 탑재 시스템(Hull Structural Survival System, HSSS)을 운용하고 있다. 이러한 시스템은 사고 발생시에 신속한 대응을 통하여 선박의 안전성을 향상시킬 수 있어 매우 효과적인 수단이나, 실제 해상상태를 고려하지 못하는 단점이 있다. 즉, 파도의 방향이나 높이를 고려한 점진 침수와 파도의 외력에 의한 복원성과 구조 안전성을 평가하지 못한다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 실제 해상상태를 고려하여 선박의 생존성을 평가하기 위한 기술을 개발하였다. 즉, 손상선박의 파도중에서의 거동해석을 통한 손상 복원성 평가와, 거동해석의 결과인 파도의 동적효과(Dynamic Effect)를 반영한 선박의 구조 안전성 평가를 수행하여 복원성과 구조 안전성을 동시에 고려한 생존성 평가 시스템을 개발하였다. 안전성 평가를 결과를 바탕으로 긴박한 상황에서 선박의 운용자에게 적절한 대응 방법을 제안하는 지능형 의사결정 시스템을 구현하였다.

2. 시스템 구성 요소

손상선박의 생존성 평가를 위한 시스템의 주요 구성요소는 다음과 같으며, 그 구성도를 Fig. 1에 나타내었다.

3-D 형상 모델러(3-D Geometric Modeler)는 손상 선박의 선형, 구획, 구조부재 및 상부 구조물의 형상과 치수를 정의하는 부분이다. 사용자는 선박의 주요치수를 비롯한 각종 기술적 데이터를 입력함으로서 대상 선박을 정의할 수 있으며, 선박의 적하상태(Loading Condition)와 손상 부위의 위치와 형상을 결정한다. 3차원 형상 모델러를 이용하여 정의된 선박은 선박 정역학적 계산 프로그램과 연결되어 생존성 평가에 필요한 조선공학적 제반 계산을 수행한다. 정의된 형상 정보는 파도중에서의 손상거동 해석을 위한 형상 정보와 구조 안전성 평가에 필요한 정보를 추출하여 저장한다.

거동해석 프로그램(Behavior Analysis)은 형상 모델러에서 만들어진 해석용 선형 모델과 해상상태 입력 자료를 바탕으로 시간의 경과에 따른 점진침수를 고려하여 횡경사, 종경사, 침하량, 횡요 및 종요각을 계산하고, 구조 안전성 평가를 위한 하중을 계산한다.

구조해석 프로그램(Structural Safety Analysis)은 손상상태에서 손상부분의 형태와 크기, 적하상태 및 파랑외력을 고려하여 종굽강도를 계산한다. 손상의 위치와 크기에 따라 선박의 강도에 미치는 영향이 다르므로, 본 연구에서는 선수와 선미부분 손상의 경우에는 선체가 절단되는 경우가 없다고 가정하여 중앙 평행부 손상의 경우에 대하여만 구조 안전성을 평가한다.

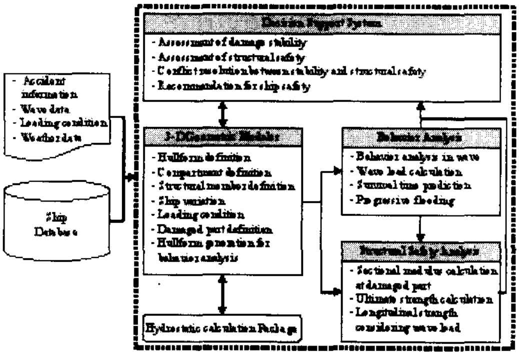


Fig. 1 System framework of the damage survivability assessment system

의사결정시스템(Decision Support System)은 거동해석 프로그램과 구조 안전성 평가 프로그램의 결과를 바탕으로 선박의 전복 가능성과 구조 붕괴 가능성을 판단하고, 선박의 생존성을 향상시키기 위한 발라스팅 방법을 제안한다. 만약 해석 결과에 따라 생존 가능성이 희박할 경우에는 전복까지 소요되는 시간을 추정하여 제시한다.

3. 3-D 형상 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, 여기에는

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.

본 연구에서 개발한 시스템은 PC의 Windows 환경에서 상용 3차원 형상모델링 커널 및 3차원 그래픽 라이브러리인 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 File로 변환이 가능할 뿐만 아니라 다른 CAD 시스템과도 인터페이스가 쉽게 이루어지도록 하였다. 선형 및 구획모델링 시스템 내의 선형, 구획, 주요부재 및 유체정역학 제계산 결과들은 File로 작성된 데이터베이스를 통해서 영속성을 갖는 데이터로 저장하게 된다(이동곤 등 2001).

강도계산에 필요한 종강도 부재는 선형과 구획정보에 속성정보를 부가하고, 보강재는 위치정보와 속성정보를 별도로 저장 관리한다. 손상 복원성을 위한 선박계산 기능은 SIKOB과 연계하여

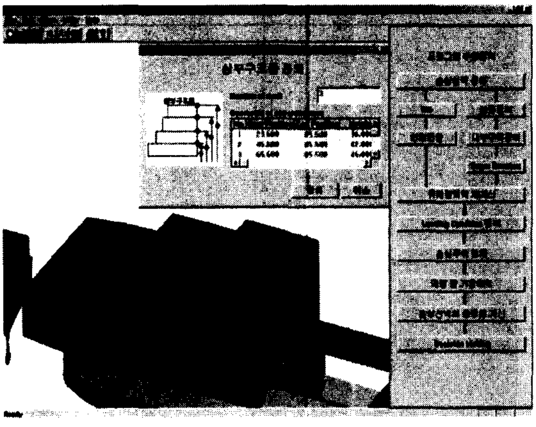


Fig. 2 Superstructure definition

수행한다(이경호/이동곤 1999). Fig. 2는 모델러를 사용하여 선박의 상부구조물을 정의하는 과정을 나타낸 것이다.

4. 거동해석 프로그램

손상된 선박의 전복이나 침몰 가능성을 예측하고, 이런 경우가 발생되는 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 포함시켜야한다. 본 연구에서 손상선박의 거동해석에 사용된 계산 방법을 요약하면 다음과 같다(이동곤 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 Wave 가정을 하여 Cross-Flow Force로 계산한다.
- 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.

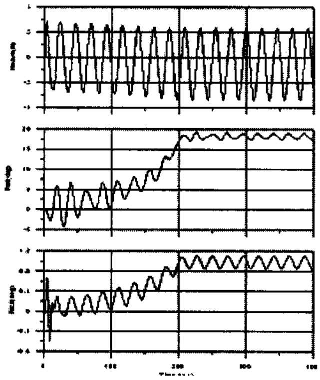
- 전복 및 침몰현상 해석을 위하여, 갑판위 상부구조물에 대한 부력 및 유체력을 계산한다.
- 주어진 적하상태에 따라, 종방향의 Shear Force 및 Bending 모멘트를 계산한다.

손상상태에서 거동해석은 이론적인 방법으로 완전한 해를 얻는 것이 매우 어렵기 때문에 개발된 프로그램의 정확도를 개선하기 위하여 손상모형 실험을 수행하였고, 보다 우수한 결과를 얻기 위하여 지속적으로 프로그램을 보완하고 있다. Fig. 3은 손상선박의 모형실험 장면을 나타낸 것이며, Fig. 4는 Ro-Ro Passenger 선의 중앙부(수선근처 상부) 손상에 대하여 개발된 거동해석 프로그램과 실험의 결과를 비교한 것이다.

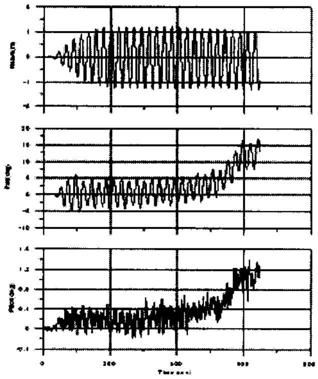
Fig. 3 Scene of model test with damaged condition in wave

5. 구조 안전성 평가 프로그램

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 생존성을 평가하는데 있어서 반드시 고려하여야 할 사항이다. 또한 생존성을 향상시키기 위한 각종 조치사항, 예를 들어 화물의 이동이나 발라스팅을 통한 하중조건의 변화에 따른 구조적 안전성이 확보되는지에 대한 평가의



a) Experimental Result



b) Estimation Result

Fig. 4 Comparison of calculated motions with experiments (Damaged, Wave Heading 90 degree, Wave Height 5m, λ/L=5.0)

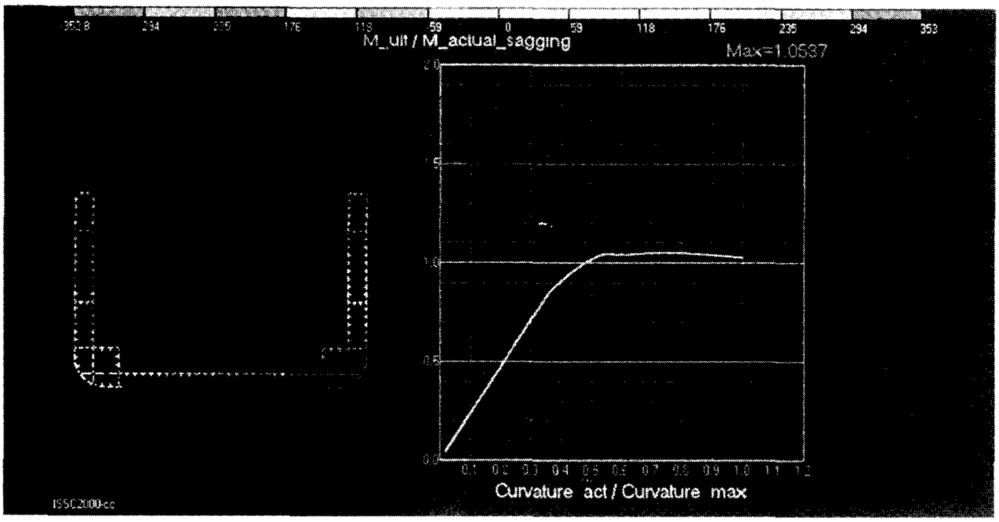


Fig. 5 Analysis of structural safety in case of bottom damage

측면에서도 중요한 사항이다.

구조 부재의 손상에 대한 기본적인 자료와 정보가 마련되면, 화물의 적재상태와 종류 그리고 부력의 변화와 파도의 영향을 고려하여 하중조건을 계산하고, 이를 바탕으로 선박의 굽힘강도, 전단강도, 좌굴강도를 계산한다. 본 연구를 통하여 부식이 고려된 손상선박의 구조안전성 기준을 정의하였다. Fig. 5는 선저 손상의 경우에 대한 구조안전성을 평가한 결과를 나타낸 것이다(이동곤 등 2003).

6. 의사결정시스템

손상 선박의 생존성 향상과 관련된 발라스팅 기법, 화물의 투기, 화물의 이동 등과 같은 자세제어 기술은 손상 선박의 생존성을 향상시키는데 있어서 중요한 요소이다. 손상 선박의 자세제어는 선박의 손상 상태, 화물의 적재 상태인 Loading condition, Ballasting 이나 De-ballasting이 가능한 탱크의 위치와 크기, 해상 상태 등에 의하여 영향을 받고 제한을 받게 된다.

본 연구에서는 선박이 선체에 손상을 받았을 경우에 자세 제어를 통하여, 복원성과 종강도의 안전성을 효과적으로 향상시킬 수 있는 지식기반시스템을 구축하기 위하여, 손상 선박의 효과적인 자세제어를 위한 Ballasting과 De-Ballasting 구획의 선정 및 발라스팅 전략에 관한 지식을 도출하고 지식베이스를 구축하였다. 자세 제어를 위한 지식기반시스템의 지식베이스에는 손상 지역에 따른 적절한 Ballasting 과 De-ballasting 탱크의 위치 선정뿐만 아니라, Ballasting 탱크, 청수 탱크, Void, 빈 연료유 탱크 등에 대한 각 탱크의 종류별 우선순위를 결정하는 지식도 추출, 저장되어야 한다.

또한 지식기반시스템은 자세 제어 전략 수립뿐만 아니라, 여러 개의 제어 전략 대안 가운데서 복원성의 측면과 구조적인 안전성의 관점에서 충돌이 발생할 경우에 충돌 해소(Conflict resolution) 분야에도 적용이 필요하다. 즉, 자세 제어 전략이 복원성은 향상되는 반면에 구조적인 관점에서는 불리하거나, 혹은 그 반대의 경우에 적절한 대안을 선택하는 분야에 적용 가능하다. Fig. 6은 지식베이스에서 최적 발라스트 대안을 도출하기 위한 지식베이스의 추론과정을 나타낸 것이다.

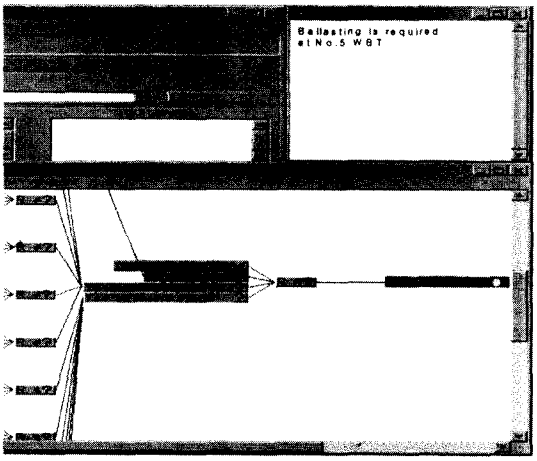


Fig. 6 Inference process in knowledge base

7. 결 언

해양사고는 많은 방지 노력에도 불구하고 지속적으로 발생하고 있으며, 최근의 해양사고는 단순한 재산상의 손실뿐만 아니라 인명피해는 물론 막대한 환경오염을 수반하고 있다. 최근 Prestige호의 사고는 손상된 선박을 효과적으로 제어할 수 있는 수단이 매우 중요함을 알려주는 교훈이라 할 수 있다. 사고 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, 해양사고에 의한 환경오염과 인명의 안전을 위하여 사고 선박의 생존성을 향상시키기 위한 전반적인 시스템을 구성하였고, 핵심적인 기술을 개발하였다. 소형 선박의 경우에는 대형선박에 비하여 손상에 의한 민감도가 높기 때문에 대응할 수 있는 시간이 상대적으로 제한되어 있다. 따라서 이와 같은 시스템을 선박에 탑재하여 대응 시간을 줄이는 것이 대안이 될 것이며, 설계단계에서 손상을 고려한 손상 안전설계를 통하여 안전성을 높이는 것이 무엇보다 중요한 과제라 생각된다.

후 기

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

참고문헌

- 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
- 이동곤 외 2003 "선박 생존성 평가 시스템 개발 - 2차년도 연구보고서," 한국해양연구원, BSM00490-2472
- Garber, J, Bourne, J., Snyder, J. 1996 "The Hull structure survival system," Advanced Marine Enterprise
- IMO 2002 "Large passeneger ship safety : Outcome of NAV 47, SLF 44, STW 33 and FP 46," MSC 75/4
- IMO 2003 "Large passeneger ship safety : cruise ship safety forum recommendation," MSC/FP 47/7/1