

해양시스템의 위험도 평가 및 관리

1. 개 요

해양사고(marine casualty)란 선박(vessel), 하역터미널(terminal), 항만(port), 해양구조물(offshore platform) 등의 해양시스템(marine system)과 관련하여 인명, 재산, 환경, 업무(maritime commerce)에 부정적인 영향을 주는 일련의 사건(events)으로 정의한다.

해양사고는 일반적으로 예기치 못하는 상황에서 인간의 오류, 장비의 고장 혹은 외부 사건에 의해 일어나며, 경제, 안전 및 보건, 환경에 영향을 초래한다. 그러나 이러한 사고는 인간의 오류나 장비의 고장을 일으키게 하는 근본 원인(root cause)이 내재되어 있는 경우가 많으며, 사고 전 미리 발견할 수 있는 관련 징후들이 나타나고, 따라서 대부분 완전히 없앨 수는 없어도 효과적인 관리는 가능하다.

그림 1은 사고의 이러한 특징을 잘 보여주고 있다. 사고를 예방하기 위해서는 겉으로 나타난 현상만 해결할 것이 아니라 근본적으로 내재되어있는 문제를 해결해야 한다. 기존에도 이러한 사고의 발생을 줄이기 위해서 정부차원에서나 기업차원에서 많은 노력들이 이루어져 왔다. 하지만 정부차원의 노력은 주로 수면위로 드러난 부분(대형사고)에만 초점을 맞추고 있고, 기업이나 개인들도 수면위로 드러나는 손실에만 초점을 맞추고 있다. 정부차원 및 기업차원에서 행해진 노력들에 의해 빙산의 윗부분이 제거되었다고 해도 수면 아래 부분이 제거되지 않는 한 빙산은 부력의 법칙에 의해 떠오르게 되며, 따라서 사고는 항상 나타날 수밖에 없으며, 빙산을 수면 아래로 가라앉히기 위해서는 즉 수면 아래의 부분, 즉 사고의 근본 원인요소들을 제거하기 위한 노력이 필요하다.



이 종 갑

- 1954년 9월 10일생
- 1977년 부산대 조선공학과
- 현 재 : 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소
- 관심분야 : Risk management
- 연 락 처 : 042-868-7226
- E-mail : jklee@kriso.re.kr

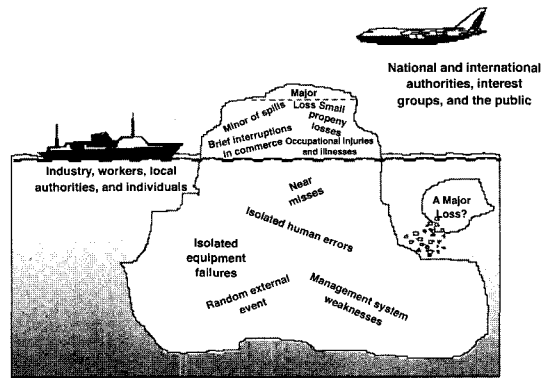


그림 1. Loss Prevention Iceberg [1]

위험도 평가 및 관리(risk assessment and management)란 사고의 근본 원인을 파악하고 제거하기 위한 수단으로서 제품개발이나 시스템기술 분야 뿐 만 아니라 정부나 기업의 경영, 자연 재해나 테러 등 인위적인 재해의 예방을 위한 새로운 접근방법론으로서 광범위하게 적용되고 있다. 특히, 확률론적 위험평가기법(Probabilistic Risk Assessment)은 기존의 법규나 경험에 의존한 접근방법(rule-based approach)의 한계를 극복하고 실험, 해석, 시뮬레이션 등의 공학적인 기법(performance-based approach)과 결합한 새로운 접근 방법이다.

확률론적 안전성 평가를 가장 먼저 시작한 곳 중의 하나는 원자력 발전소이다. 원자력 발전소는 그 특성상 단 한번의 사고만으로도 주변에 막대한 영향을 끼치기 때문에 사고를 예방하기위해 많은 노력을 기울여 왔고 그 일환으로 이러한 기법들이 오래 전부터 적용되어 왔다. 석유화학도 안전성 평가를 가장 많이 사용하는 대표적인 산업분야이다. 석유화학 공장은 폭발 및 연소성이 강한 물체를 자주 취급하기 때문에 사고 발생률이 높고 작은 사고도 거대한 재해로 연결될 가능성이 높기 때문에 세계 여러 나라에서는 석유화학 공장에 안전성 평가를 의무화하고 있으며, 우리나라에서도 한국산업공단에서 IRMS(Integrated Risk Management System)을 구축해 놓고 석유화학 공장의 안전성을 종합적으로 평가하고 관리하고 있다.

우주항공분야에서는 시스템공학(Systems engineering) 프로세스의 핵심요소로서 위험관리를 요구하고 있다. 미국항공우주국(NASA)에서도 오래전부터 안전성 평가를 중요시 해왔다. NASA에서 진행하는 프로그램의 특성상 그 규모가 매우 크고 다양하고 복잡한 시스템이 사용되기 때문에 물리적인 시스템의 안전뿐만 아니라 프로젝트 관리 관점에서도 PRA 기법을 사용하고 있으며, 현재 NASA에서 진행하는 프로그램들은 모두 그 계획단계에서 안전성 평가를 어떻게 할 것인지에 관한 계획을 제출하도록 되어 있다.

해양시스템의 경우 Offshore 플랜트의 안전관리를 위한 수단으로 적용해 오고 있으며, 최근에는 IMO에서

확률론적 위험평가 기법을 기반으로 한 공식안전성평가(Formal Safety Assessment) 제도를 도입하여 선박을 중심으로 한 해양시스템 관련 법규의 제정은 물론 해양시스템의 안전성 평가 수단으로 정착되고 있다.

2. 위험도 평가 및 관리 방법론 (Risk Assessment Methods)

2.1 위험관리(Risk Management)

위험도(risk)란 원치 않은 사건(unwanted outcome)의 빈도수와 사고의 심각도를 조합한 결과로 다음과 같이 정의한다. 즉,

$$\text{위험도(risk)} = \text{빈도수(frequency)} \times \text{결과(consequence, or severity)}$$

그림 2는 ISO/IEC Guide51에서 정의하고 있는 시스템의 개발 및 운용 과정에서 위험도를 분석/평가하고 관리하는 과정을 보여주고 있다. 그림 에서 보는 바와 같이 위험관리는 정의된 시스템에 내재된 위해요소(hazard)를 식별하고, 이들이 사고로 이어질 확률과 그 결과를 계산(risk estimation)한 후 허용여부를 판단하고 수용할 수 없는 위험요소에 대하여 이를 제거하거나 저감하기 위한 수단(risk reduction options)을 강구하고 이를 유지하는 일련의 과정이다. 여기서

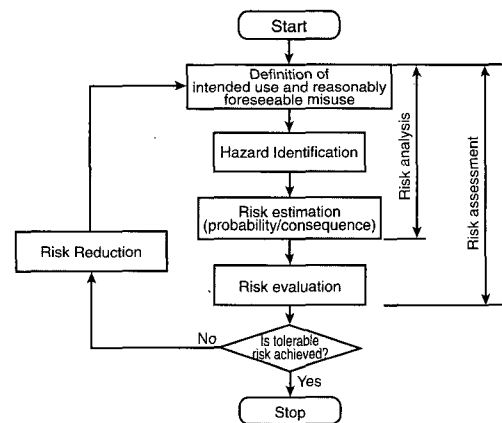


그림 2. 위험도 평가 및 관리 과정[2]

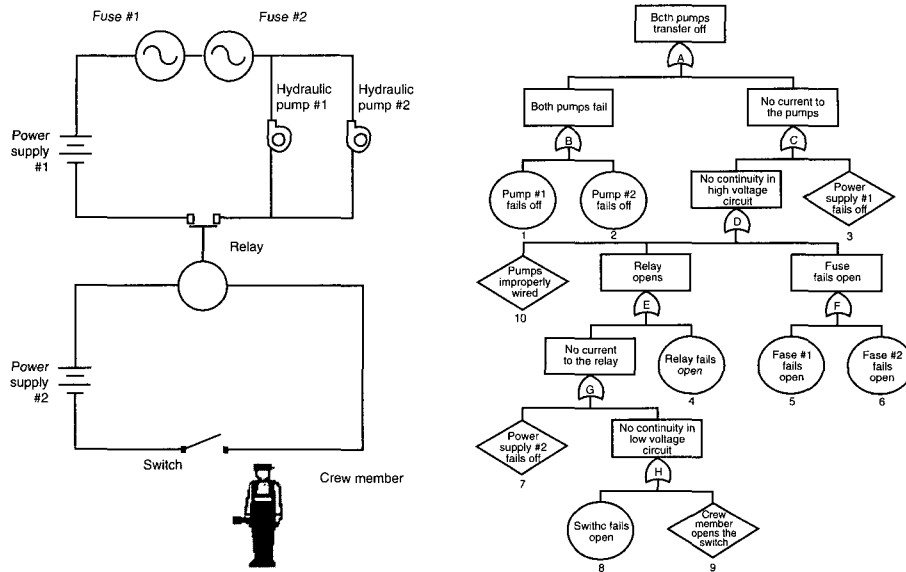


그림 3. Fault Tree Analysis Model의 예

위험도 분석(risk analysis)이란 대상 시스템을 선정하여 위험 요인을 찾아내고 그 위험도 값을 계산하기까지의 일련의 과정을 포함하며 분석 결과 얻어낸 위험도 값과 사고 시나리오는 위험도 평가 및 저감을 위한 기초 자료로 사용된다. 위험도 평가(risk assessment)란 위험도 분석 활동을 포함하여 위험도를 줄이기 위한 방안을 만들어 내기 위해서 이루어지는 활동들을 포함하며 위험도 분석의 결과로 얻어진 값들을 사용하여 위험도를 줄이는 방안을 제안할 수 있도록 조합하는 과정을 포함하고 있다.

2.2 위험도 분석 기법

해양시스템의 위험도 분석 및 평가에 사용되는 대표적인 기법으로는 HAZOP(Hazard and Operability Studies), FTA(Fault Tree Analysis), ETA(Event Tree Analysis), FMEA(Failure Modes and Effects Analysis) 등이 있다.

HAZOP은 새로운 시스템을 설계할 때 잠재적인 위험 요인과 운영상의 문제점을 파악하기 위한 방법으로 주로 위해요소 식별(hazard identification) 단계에

서 사용되는 정성적인 분석 방법이다. 설계상의 정상적인 상황을 벗어나는 경우(deviation)를 가정하여 그 원인과 영향을 파악하는 방법으로 화학 공장 설비 등 과같이 연속적인 시스템에 많이 사용된다.

FTA는 시스템이 내재되어 있는 위험 인자를 파악하고 그 위험도를 계산하기 위한 top-down 방식의 분석법이다. 분석 방법이 간단하고 비교적 쉽게 위험도를 파악할 수 있기 때문에 위험도 분석시 가장 많이 사용되는 기법중 하나이다. FTA는 시스템을 구성하고 있는 부품의 고장과 인간의 오류, 그리고 외부 사건이 논리적으로 조합되어 특정한 사고를 야기시키는 지를 가시적으로 모델링하여 분석하는 방법이다. 분석하는 방법은 우선 분석하고자 하는 최고 사상을 정의하고 이 최고사상의 원인들을 AND와 OR의 논리 게이트로 조합하여 fault tree를 그린 다음 미리 정의된 공식을 이용하여 최고 사상의 위험도 값 및 최고사상에 이르는 경로를 찾아내는 것이다. 그림 3은 FTA를 이용한 위험분석 모델의 예를 보이고 있다.

ETA는 FTA와는 반대로 bottom-up 방식을 이용해서 시작 사건으로부터 나올 수 있는 결과를 의사결정

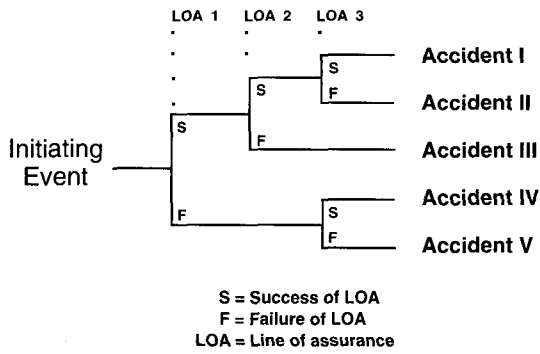


그림 4. ETA model의 기본구조

트리(decision tree)를 이용하여 분석하는 방법이다. 특히 여러 개의 안전장치가 마련되어 있는 시스템의 위험도를 파악하기 위해 많이 사용된다. ETA를 이용하여 분석하는 방법은 우선 최초의 시작사건을 정의하고 이로부터 발생 가능한 경우를 decision tree를 이용하여 그려 나가는 것이다. 이렇게 하여 얻은 event tree를 이용하여 특정 사건으로부터 어떤 결과가 발생 가능한지와 위험도 값을 얻을 수 있다. ETA의 장점으로 여러 사건이 복잡하게 얽혀져 있거나 도미노 현상에 의해 발생하는 결과를 파악할 수 있다는 것이며 안전성 평가기법으로서 외에 위해요소 식별 단계에서 시나리오를 구성하는 기법으로도 널리 사용되고 있다.

FMEA는 각 부품의 고장이 어떻게 전체 시스템에 영향을 미치는지를 분석하여 각 고장에 대응하는 적절한 안전장치가 마련되어 있는지를 분석하는 방법이다. 주로 정성적인 분석을 할 때 사용되며 물리적인 부품으로 구성되어 있는 시스템의 위험도 분석에 적절한 기법이다. 주로 기계장치 또는 전기장치 시스템을 검토하는 데 사용되며 장비의 유지보수를 최적화 하는데 자주 사용된다. 또한 시스템에 문제가 생겼을 때 이를 해결하기 위한 정보를 얻기 위해서도 많이 사용된다. FMEA 방법은 각 부품의 고장유형(failure mode)을 먼저 적고 그 고장의 영향을 local, higher level, end로 나누어 작성한 다음 그 원인(cause)과 고장시 나타나는 현상(indication) 및 마련된 안전장치(safeguards)를 작성한다. 그리고 이들을 검토하여 최종적으로 이

문제를 해결할 수 있는 제안사항(recommendations)을 적게 된다. 이렇게 발생 가능한 모든 부품의 고장유형에 대해서 분석이 가능하다.

그 밖에 브레인스토밍 기법을 기반으로 한 What-If Analysis, risk assessment 다음 단계인 risk control option(RCO)을 만들 때 어디에 중점을 두어야 하는 지를 파악하기 위한 Risk Contribution Tree (RCT), 위험도와 관련한 영향도를 파악하고 민감도를 분석하는 데 사용되는 Influence Diagram 등이 있다.

2.3 FSA (Formal Safety Assessment)

FSA란 국제해사기구(IMO)에서 개발한 안전성평가 방법론으로 “인명, 해상환경 및 재산보호를 포함하여 해상의 안전향상을 기하기 위한, 위험성과 비용-혜택 평가를 사용한 조직적이고 체계적인 안전평가 방법 (FSA is a structured and systematic methodology, aimed at enhancing maritime safety, including protection of life, health, the marine environment and property, by using risk and cost-benefit assessment)” 이라고 정의하고 있다[3]. 여기서 위험도이라 함은 사고 발생 빈도와 사고결과의 심각성과의 조합으로 나타내며, 따라서 위험도 해석이라는 것은 모든 형태의 선박에 대한 구조강도의 표준, 복원성, 조종성, 해상에서의 성능과 안전경영이 포함된 주요 안전목표의 근본을 형성하는 개념인 위험도를 정량화하는 것을 의미한다.

해상인명안전협약(SOLAS)과 해양오염방지협약

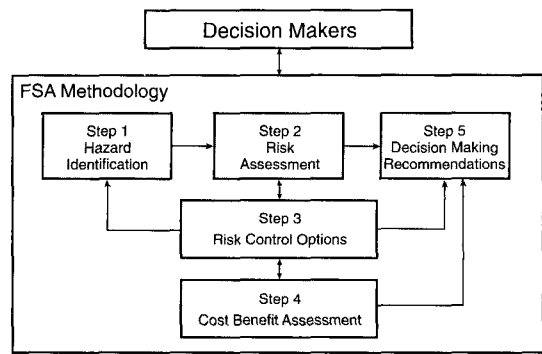


그림 5. IMO의 공식안전성 평가 모델 [3]

(MARPOL) 그리고 미국의 해양오염방지령(OPA 90) 및 국제안전관리규약(ISM Code) 등에서 보듯이 그동안의 해운안전 관련 규정, 규칙 등은 사고가 난 후 보완적 차원에서 강화되는 식으로 진행되어 왔으며 이러한 사후약방문 격의 규정으로는 사고를 예방하기는 힘들다는 비판과 함께 사고의 요소를 미리 과학적으로 분석하여 그 위험도에 상응하는 규정을 만들어야 한다는 목소리가 높아졌다. 이에 따라, 다른 분야에서 이미 오래 전부터 검증되어 사용되어 오고 있는 위험도 해석에 관한 지식을 해운, 조선 분야에도 적용시키고자하였고, FSA는 이러한 노력들의 결과이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 FSA는 위해요소 식별(Hazard Identification), 위험도 해석(Risk Assessment), 위험도 제어방안(Risk Control Options), 비용-혜택 평가(Cost-Benefit Assessment) 그리고 의사결정을 위한 권고(Recommendation for Decision Making) 등 5개의 단계로 이루어져 있다. 각 단계는 직렬적인 관계라기보다는 상호보완적 관계로서, 각 단계의 결과는 다음 단계의 입력 자료로 사용될 뿐만 아니라, 때에 따라 각종 조건이나 상황에 의해 이전 단계로 되돌아갈 수도 있고, 경우에 따라서는 일부 단계를 생략하고도 최종 결과의 유도가 가능하다.

FSA는 선박, 인명 안전확보를 위해 파급효과가 큰 국제규정, 협약 등에 우선적으로 적용하는데 그 목적을 두고 있다. 아울러 인적요소를 포함하는 다양한 기술적, 운영상 문제들 간의 균형, 그리고 안전과 비용 간의 균형을 유지하기 위한 관점에서 현존 규칙과 새로 제안되는 규칙들 간의 비교 평가를 돕는 도구로서 사용될 수 있으며, 현 IMO의 의사결정과정과의 일관성을 유지하면서, 합리적 결정을 내리기 위한 기반을 제공한다.

3. 해양시스템의 위험도 관리시스템

지금까지 선박을 포함한 해양시스템의 안전성 평가는 선급이나 IMO와 같은 국제기구에서 제정한 규칙(rule/regulation)을 기초로 하고 있다. 이러한 접근

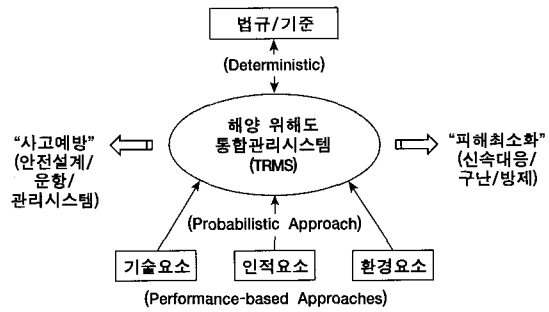


그림 6. 해양시스템 위험도 통합관리시스템 개념

(rule-based approach)은 Rule이 과거의 사고사례를 기반으로 하여 만들어진 것이므로 새로운 유형의 사고가 반영되지 않았고, 새로운 선형에 대하여는 적용의 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 직접 계산이나 실험 및 시뮬레이션 등이 수행(performance-based approach)되고 있으나 시스템 전체의 안전성을 평가하고 관리하는 수단으로서의 비용과 기술적인 측면에서 한계가 있다. 이에 따라 선박 등 해양시스템의 안전성을 종합적으로 평가하고 관리하기 위한 기술적/체계적 수단이 요구되고 있다.

그림 6은 해양시스템안전연구소(KRISO)에서 추진하고 있는 ‘해양위험도 통합관리시스템(Total Risk Management System, 이하 TRMS)’의 기본개념이다. 그림에서 보는 바와 같이 TRMS는 확률론적 위험도 평가기법(PRA)을 기반으로 해양사고의 원인요소(기술요소, 인적요소, 환경요소)의 통합, 해양사고의 수명주기요소(사고예방, 사고확대 방지, 사고처리)의 통합, 그리고 접근방법(rule-based, performance-based, probabilistic approach)의 통합을 통하여 해양사고와 관련한 위험도의 통합적인 평가와 관리를 통하여 해양시스템의 실시간 안전성을 종합 평가하고 관리하기 위한 수단이다.

이러한 TRMS 개념의 구현하기 위해서는 해양시스템과 관련한 사고 시나리오 및 위험도 모델(risk model)과 이들을 종합적으로 평가하고 관리하기 위한 시스템 요소들의 기능과 이들 간의 관계를 정의한 통합위험도 모델(Integrated Risk Model)과 이를 구현하기 위

해양시스템의 위험도평가 및 관리

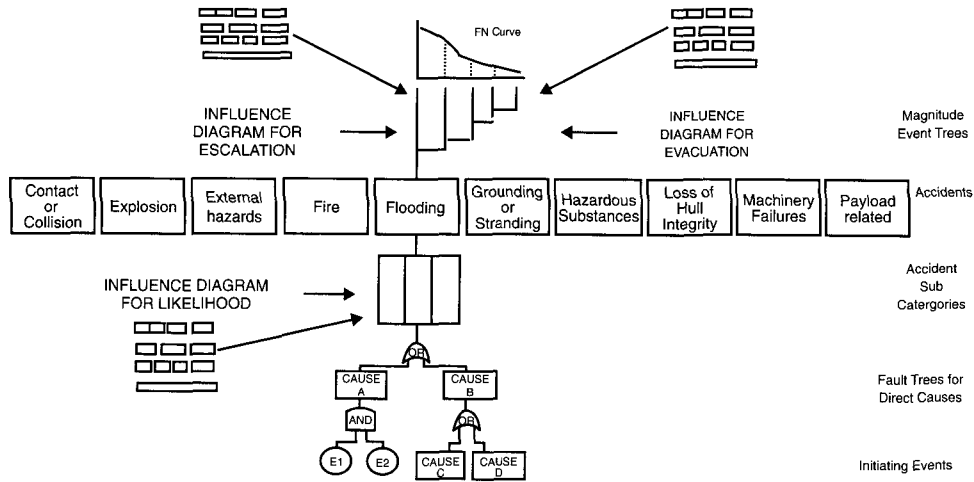


그림 7. 해양시스템의 통합 위험도 모델링 (Integrated Risk Modeling)

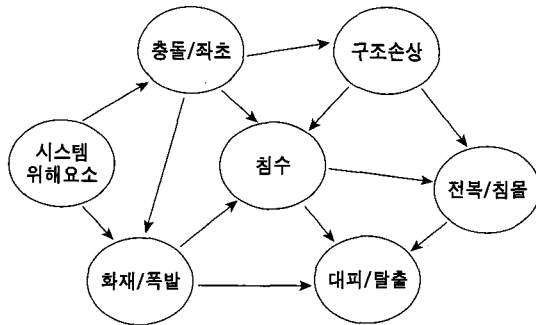


그림 8. 해양시스템의 사고 시나리오

한 도구로서 프레임워크를 필요로 한다.

각 사고 시나리오별 위험요소 식별 및 분석을 통한 위험도 모델링은 FTA/ETA를 사용하고, 전체 시스템에 관한 통합위험도는 그림 7과 같이 RCT (risk contribution tree)을 기반으로 한 Influence Diagram을 통하여 정의가 가능할 것으로 판단된다. 참고로 그림 8은 해양시스템과 관련한 대표적인 사고 및 이들 간의 관계를 보이고 있다.

그림 9는 이러한 위험도 모델을 토대로 TRMS를 구현하기 위한 시스템 요소들을 통합하기 위한 프레임워크의 예로서 선박의 안전성 평가시스템의 구성을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 TRMS는 사고사례 데이터베이스 및 각종 경험적/실험적 데이터

를 기반으로 사고시나리오의 생성, 위험도 분석 및 평가, 비용-편익 분석을 통한 종합적인 안전성 평가를 지원하기 위한 시스템으로 구성되며, 3차원 CAD모델 및 각종 성능해석프로그램을 포함한 performance-based 시스템들과의 연계를 고려하고 있다.

4. 결론

국제 교역 확대에 따른 해상 물동량의 증가와 수송수단의 고속화/대형화에 따른 해양사고의 위험이 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 해양사고로부터 인명, 재산 및 환경의 보호를 위한 국제법규 및 기준이 강화되는 추세에 있다. 이에 따라 해양사고 예방을 위한 선박 및 해양구조물, 관련 장비 및 시스템의 수명주기 안전성을 확보하고 사고 발생시 사고확대 및 피해 최소화를 위한 체계적/객관적 수단이 요구되고 있다.

본 논문에서는 해양시스템의 안전성 평가/관리를 위한 수단으로 확률론적 위험도 분석 및 평가기법들을 검토하고, 이를 기반으로 해양사고와 관련한 기술요소, 인적요소 및 환경요소를 종합적으로 평가/관리하기 위한 체계적/기술적 수단으로서 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 추진하고 있는 '해양위험도 통합관리시스템'의 개념과 이의 구현을 위한 프레임

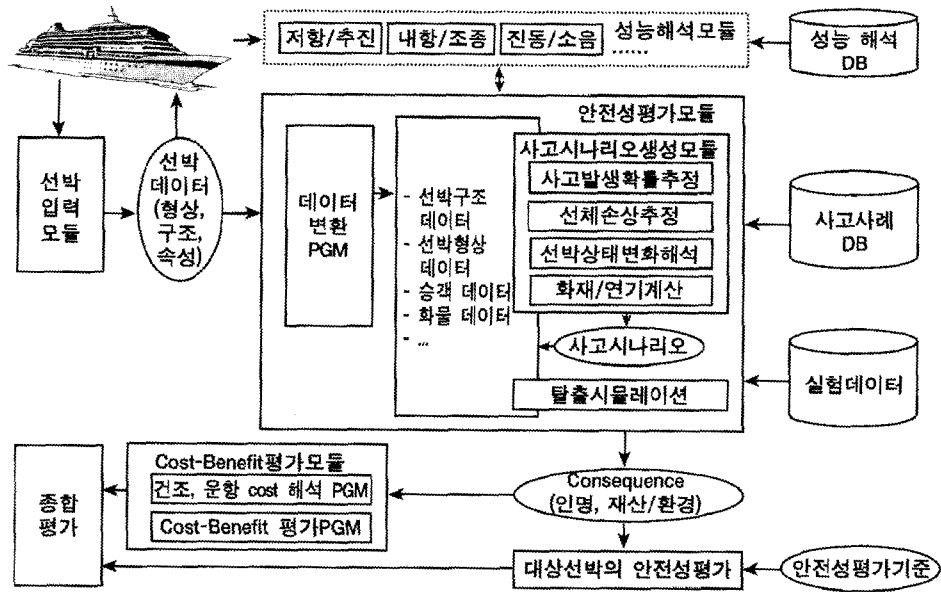


그림 9. 위험도 기반 선박 안전성 평가시스템 구성도

략을 소개하였다.

이와 같은 접근은 해양시스템의 안전관리체계의 선진화와 이를 기반으로 한 IMO 등 국제 활동에의 능동적인 대응을 위한 수단은 물론 호화여객선, 합정 등과 같은 고부가가치 선박이나 해양구조물의 안전설계를 위한 핵심 기반기술로서 활용될 것이다.

참고문헌

[1] 'Risk-based Decision Making Guidelines' (USCG), 2000.
 [2] "Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards", ISO/IEC Guide 51, 1999
 [3] 'Guidelines for FSA for use in the IMO rule-making

process' (MSC/Circ.1023, Apr. 2002)

[4] Brandsater B., "Risk Assessment in the Offshore Industry", Safety Science 40, 2002.
 [6] 'Risk Management Guide for DoD Acquisition(3rd edition)', DSMC, 2000.
 [7] Kuo C., "Managing Ship Safety", LLP Reference Publishing, 1998.
 [8] Marijin Bakker, Hotze Boonstra, Wim Engelhard, Bart Daman, "Towards Safety Based Design Procedures for Ships", IMDC 2003
 [9] Dracos Vassalos et. al., "A Risk-based Framework on Ship Design for Safety", IMDC2003
 [10] '선박의 확률론적 안전평가방법에 관한 보고서 (일본)', 일본조선연구협회, 1997. ⚓