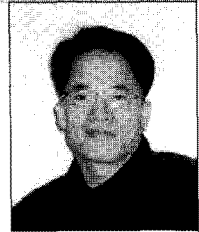


위험도기반 선박안전설계

Introduction to Risk-Based Design for Ship Safety



이종갑*

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 책임연구원

1. 서론

국제 교역 확대에 따른 선박의 고속화/대형화에 해양사고의 위험이 지속적으로 증가하고 있다. 또한 새로운 개념의 선박건조에 대한 요구가 계속적으로 증대되고 있어 새로운 선박의 설계/건조/운용에 따른 위험도 증가하고 있다. 지금까지 해양사고의 예방을 위한 노력은 국제해사기구(IMO)를 중심으로 해상 인명안전협약(SOLAS)과 해양오염방지협약(MARPOL) 등 관련 법규의 보완과 적용을 통하여 이루어져 왔다. 그러나 계속되는 법규의 제정과 강화에도 불구하고 해양사고는 지속적으로 발생하고 있으며, 그 피해도 대형화되고 있다. 이에 따라 해양사고에 대한 기존의 접근방법에 대한 한계의 지적과 함께, 보다 과학적이고 체계적이며, 통합적(life-cycle/integrated)이고 합리적(rational)인 접근이 요구되고 있으며, 특히 선박의 설계 및 건조과정에서 안전성 확보를 위한 노력이 시도되고 있다.

전통적으로 유럽은 선박안전 및 환경보호 관련 국제기준의 개발을 선도해 왔으며, 최근에는 기존의 'reactive' 개념에서 'proactive' 개념으로 안전 및 환경보호에 대한 패러다임의 변화를 통하여 기존의 해운산업의 주도권을 지속적으로 확보/유지하고, 극동의 조선산업 국가들과의 차별화를 위한 전

략적 수단으로 SAFEDOR 프로젝트¹⁾를 통하여 '위험도 기반 접근방법론'(risk-based approaches: 이하 RBA)을 기초로 한 안전설계 및 관련 법규체계의 개발 및 정착을 위한 노력을 시도되고 있다. 물론, 아직까지 조선 및 해운산업에서 'RBA'의 적용에는 많은 문제점들이 있으며, 구체적인 보완이 필요한 것은 사실이지만 안전 및 환경문제에 대한 보다 능동적(proactive)이고 합리적인 방법으로서 수용이 불가피할 것으로 판단된다. 특히, IMO를 중심으로 선박의 안전수준을 향상하고 설계 및 건조 단계에서 요구되는 안전성을 확보/보장하기 위한 새로운 개념의 법규체계로서 신개념 선박건조기준, 즉 GBS(Goal-Based New Ship Construction Standards)의 개념이 도입되고, 기존의 법규가 보장하지 못하는 새로운 개념의 선박이나 기술의 적용을 위한 '대체설계 및 배치(alternative design and arrangement)'의 적용이 확대됨에 따라 지금까지 해양구조물 등에 적용되던 '위험도 분석 및 평가'기법과 이를 설계에 적용하기 위한 '위험도 기반 설계'에 대한 검토 및 관련 핵심기술의 확보가 시급히 요구되고 있다.

본 기사에서는 설계 및 건조단계에서 선박의 안전성을 보장하기 위한 절차로서 '선박 안전설계(Design for Safety)'를 위한 수단으로서 검토되고 있는 '위험도기반의 접근방법론' 및 이를 기반으로 한 '위험도 안전설계'(risk-based design for

1) 보다 깨끗하고 안전한 해상운송수단의 확보와 관련 산업의 경쟁력 강화를 목적으로 EU FP6의 통합프로젝트의 일환으로 수행한 연구개발 프로젝트. 14개국 53개 기관이 참여하여 2005년 2월부터 4년간, 총 2000만 유로 투입되었다.

safety : 이하 RBD)의 기본개념과 접근방법에 대하여 소개하였다.

2. 위험도 기반 방법론(Risk-based approaches in the maritime industry)

안전(safety)이란 원하지 않은 사고(accidents)의 위험으로부터 자유로운 상태(freedom from danger)로 정의된다. 해양 사고란 선박, 항만, 해양구조물 등 해양시스템과 관련하여 인명, 재산, 환경 등에 부정적인 영향을 초래하는 일련의 사건(event)을 말한다.

해양사고는 일반적으로 예기치 못하는 상황에서 인간의 오류, 장비의 고장 혹은 외부 사건에 의해 일어난다. 이러한 사고는 인간의 오류나 장비의 고장을 일으키게 하는 근본 원인이 내재되어 있는 경우가 많으며, 사고 전 미리 발견할 수 있는 관련 징후들이 나타나고, 따라서 대부분 완전히 없앨 수는 없어도 관리하는 것은 가능하다.

Fig. 1은 사고의 이러한 특징을 잘 보여주고 있다. 이러한 사고를 예방하기 위해서는 겉으로 나타난 현상만 해결할 것이 아니라 근본적으로 내재되어 있는 문제를 해결해야 한다. 기존에도 이러한 사고의 발생을 줄이기 위해서 정부차원에서나 기업차원에서 많은 노력들이 이루어져 왔다. 하지만 정부차원의 노력은 주로 수면위로 드러난 부분에만 초점을 맞추고 있고 기업차원에서도 수면위로 비춰지는 부분에만 초점을 맞추었기 때문에 더 깊은 곳에 잠재된 근본 원인을 해결하기 위해서는 미흡한 실정이다. 정부차원 및 기업차원에서 행해진 노력들에 의해 빙산의 윗부분이 제거되었다고 해도 부력의 법칙에 의해 수면 아래 부분이 제거되지 않는 한 빙산은 부력의 법칙에 의해 떠오르게 되며 따라

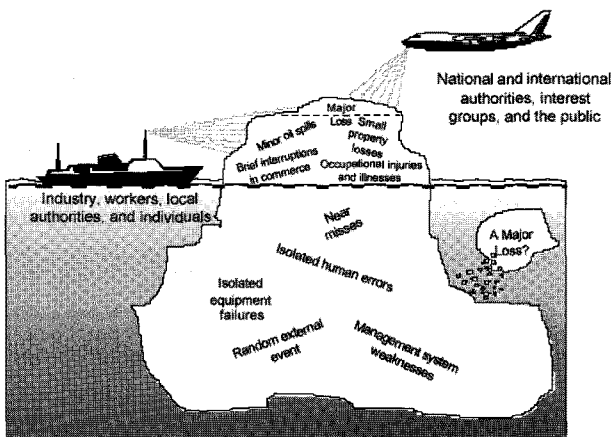


Fig. 1 Loss Prevention Iceberg [USCG, 2002]

서 사고는 항상 나타날 수밖에 없다. 확률론적 위험평가기법(Probabilistic Risk Assessment)은 이러한 수면 아래 부분을 파악하고 제거하기 위한 수단으로서 기존의 규칙기반(Rule-based) 접근방법의 한계를 극복하고 실험/해석/시뮬레이션 등 성능기반(performance-based) 접근방법과 결합한 새로운 방법으로 제품개발이나 시스템기술 분야뿐만 아니라 정부나 기업의 경영, 자연 재해나 테러 등 인위적인 재해의 예방을 위한 새로운 접근방법론으로서 광범위하게 검토되어 적용되고 있다.

2.1 위험도 분석(risk assessment)

위험도 기반 방법론은 그 동안 원자력 플랜트, 석유화학 산업분야에서 안전성 평가 및 관리를 위한 수단으로 사용되어온 방법론으로 최근에는 정부 혹은 기업 활동의 다양한 분야에서 사용되고 있다. 여기서 위험도(risk)란 원치 않은 사건의 발생가능성(frequency)과 결과의 심각성(consequence or severity)의 곱으로 표현되는 지표로서 안전성 평가를 위한 기본적인 요소이다.

Fig. 2는 ISO/IEC Guide51에서 정의하고 있는 시스템의 개발 및 운용 과정에서 위험도를 분석/평가하고 관리하는 과정을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 위험도관리는 정의된 시스템에 내재된 위험요소(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, 위험도 분석(risk analysis)이란 대상 시스템을 선정하여 위험요인을 찾아내고 그 위험도 값을 계산하기까지의 일련의 과정을 가리키

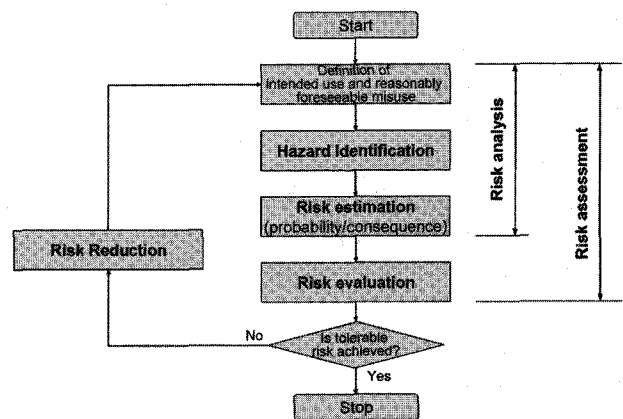


Fig. 2 Risk assessment and reduction process

는 용어로서 위험도 분석 결과 얻어낸 위험도 값과 사고 시나리오는 위험도를 낮추기 위한 기초 자료로 사용된다. 위험도 평가(risk assessment)란 위험도 분석 활동을 포함하여 위험도를 줄이기 위한 방안을 만들어 내기 위해서 이루어지는 활동들을 포함한 용어이다. 이는 위험도 분석의 결과로 얻어진 값들을 사용하여 위험도를 줄이는 방안을 제안할 수 있도록 조합하는 과정을 포함하고 있다.

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 사용된다.

2.2 IMO FSA (Formal Safety Assessment)

FSA란 국제해사기구(IMO)에서 개발한 안전성평가 방법론으로 “인명, 해상환경 및 재산보호를 포함하여 해상의 안전향상을 기하기 위한, 위험도와 비용-이익평가를 사용한 조직적이고 체계적인 안전평가 방법”이다. 여기서 위험도이라 함은 앞서 언급한 바와 같이 사고 발생 빈도(frequency)와 사고 결과의 심각도(severity of consequence)의 조합으로 정의하며, 따라서 위험도 해석이라는 것은 모든 형태의 선박에 대한 구조강도의 표준, 복원성, 조종성, 해상에서의 성능과 안전경영이 포함된 주요 안전 목표의 근본을 형성하는 개념인 위험도를 정량화하는 것을 의미한다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 FSA는 위험요소 파악(Hazard Identification), 위험도 해석(Risk Assessment), 위험도의 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 되돌아 갈 수도 있고, 경우에 따라서는 일부 단계를 생략하고도 최종 결과의 유도가 가능하다.

FSA는 선박 및 인명의 안전 확보를 위해 파급효과가 큰 국제규정, 협약 등에 우선적으로 적용하는데 그 목적을 두고 있다. 아울러 인적요소를 포함하는 다양한 기술적, 운영상 문제들 간의 균형, 그리고 안전과 비용간의 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. 또한 선박을 중심으로 한 해양시스템의 안전설계를 위한 방법론으로 활용가능하다.

2.3 GBS(Goal-Based New ship construction Standards)

IMO GBS란 선박이 수명주기 동안 확보해야 할 안전 목표(safety goals) 및 기능요건(functional requirements)을 설정하고 이를 만족하기 위한 설계 및 건조 품질 검사 관련 세부 기준을 정의함으로써 선박의 안전성을 획기적으로 향상하기 위한 새로운 개념의 IMO 법규체제로서, 지금까지 선급협회 및 조선소에 맡겨져 왔던 선박건조기준과 건조과정을 국제협약의 틀에 수용하고, 안전 및 환경오염 관련 설계와 건조 규정 및 품질을 직접 통제함으로써, 선박 사고 및 이로 인한 해양환경의 피해를 최소화하고자 하는 IMO의 장기 전략과제이다.

MSC 77차 회의(2003년 5월)에서부터 본격적인 논의가 시작되었으며, 2010년 5월 산적화물선 및 유조선의 구조(structure)를 대상으로 한 소위 ‘확정론적(Deterministic) GB S’²⁾가 IMO MSC 87차회의에서 채택되었다. 향후에는 전 선종/전 분야로 확대를 위한 ‘포괄적(Generic) GBS’³⁾의 개발에 대한 논의가 계속될 예정이며, Generic GBS의 개발을 위한 방법론의 비교, 검토, 현재의 규칙/규정의 안전수준 정의, 관련 IMO 규정 및 선급규칙의 제·개정 등 GBS 지침서의 보완 및 통합 GBS 개발을 위한 작업 식별 및 수행될 예정이다.

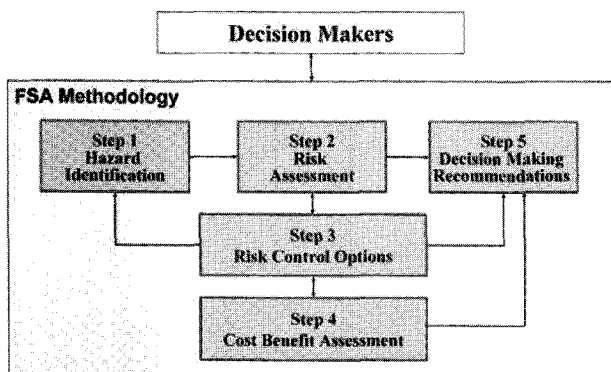


Fig. 3 FSA process (IMO 2002)

2) 경험을 기반으로 한 신조선박의 건조기준으로 그리스, 바하마 등 주요 선주국가들에 의해 주도되고 있다.

3) 산적화물선 및 유조선의 구조문제에 대한 ‘확정론적 GBS’와 병행하여, 전 선종/전분야에 확대를 위하여 위험도(risk)를 기초로 통합적(holistic)인 접근을 위한 한 ‘SLA(Safety Level Approach) 기반 GBS’에 대한 개발이 추진되어 왔으나 두 가지 방법론에 의한 GBS의 통합에 따른 문제를 예방하기 위하여 덴마크의 제안(MSC 83/5/5)을 기초로 포괄적 GBS에 대한 논의가 시작되었으며, MSC88차 회의에서부터 본격적으로 논의될 전망이다.

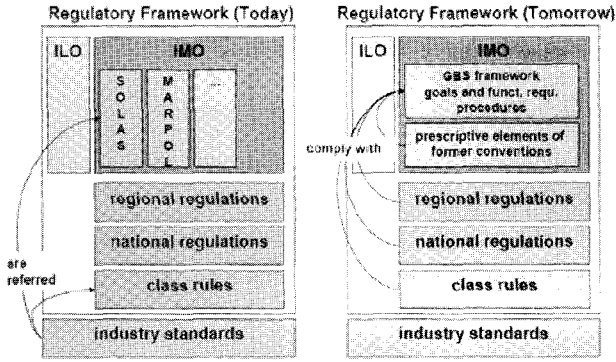


Fig. 4 Long-term vision of IMO regulatory framework

Fig. 4는 GBS를 중심으로 한 IMO 법규체계(regulatory framework)의 발전방향을 보여주고 있다.

3. 위험도 기반 안전설계 (Risk-based Design for Safety)

3.1 안전설계 (Design for Safety)

안전설계란 설계 초기단계에서부터 안전에 관한 요구(safety issue)를 합리적으로 설계과정에 반영하기 위한 방법론 즉, 안전성(safety)과 기술적 성능(technical performance) 및 경제성(cost-effectiveness)에 대한 최적 해를 찾기 위한 반복적인 프로세스이다(Fig. 5 참조).

선박의 안전설계를 위한 접근방법론으로는 크게 규칙기반(rule-based / deterministic approach), 위험도 위반(risk-based / probabilistic approach), 그리고 수치적 해석이나 실험 등을 통한 성능기반(performance-based / simulation based approach)으로 구분할 수 있다. 기존의 해양시스템의 설계 과정에서 가장 많이 사용되었던 규칙 기반의 확정론적 방법론은 통계적 데이터와 실제적인 경험을 바탕으로 하고 있어 안전성 평가를 위한 효율적인 수단을 제공하고는 있으나, 기존의 법규 및 기준을 만족시키는 수준의 소극적인 방법이므로 새로운 유형의 사고나 새로운 형식의 선박에 대하여 적용하는 데에는 한계가 있다. 성능기반 접근방법론은 수치적/물리적 모델 테스트 혹은 컴퓨터 시뮬레이션 등을 통하여 정의된 시나리오 및 환경조건에 반응하는 선박 고유 특성에 근거한 안전 성능을 평가하는 방법으로 기술적인 한계 때문에 부분적인 성능의 평가에 제한적으로 이용되고 있다.

이러한 한계들을 극복하고 안전에 대한 과학적이고 체계적인 접근을 위한 수단으로서 위험도 기반 방법론(risk-based approach)을 선박설계 과정에 적용하기 위한 새로운 노력이 시도되고 있다.

3.2 위험도 기반 안전설계 (Risk-Based Design for Safety)

위험도기반 안전설계(Risk-Based Design for Safety, 이하 RBD)란 기존의 절제절차에 위험도 기반 방법론을 결합한 새로운 설계 접근방법론이다. 즉, 예상되는 사고 및 그 원인 요소들을 사전에 식별하여 발생가능성과 결과를 예측하고, 이를 토대로 사고의 발생을 예방하거나 사고 발생 시 피해를 최소화하기 위한 수단들을 합리적인 방법으로 평가하여 설계에 반영하기 위한 절차와 방법론(common platform)이다.

Fig. 6은 위험도기반 안전설계 프레임워크의 예를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 RBD는 위험도분석/평가방법론을 기초로 설계 활동과 시뮬레이션 등 관련 기술적인 도구를 결합한 절차와 방법론 및 관련 기법들을 통칭한다. 여기서 안전성 평가 과정은 관련 기술정보들을 수집/정리하여 안전과 관련한 요소들의 우선순위를 정하고, 실현가능하고 경제적인 안전장치(safeguard)들을 식별하며, 설계 프로세스를 위한 요구사항 및 제한조건을 정의한다.

안전설계 프로세스에서 입력은 설계의 결과이며, 정보모델링 기법이 사용된다. 그리고 설계 개념에 대한 위험도 분석(risk analysis)을 수행하고 각 사고 시나리오에 대한 정량화된 위험도(risk level)를 계산하고, 허용기준(risk acceptance criteria)에 대하여 평가한다. 이 기준을 만족하지 못하는 경우, 위험도를 감소하기 위한 수단(risk reduction measure)이 검토된다. 그리고 이들 수단에 대한 비용 대 편익 분석(cost-benefit analysis)가 수행된다. 그리고 이들 수단들이 선박의 제 성능(운동 및 조종, 화물적재량, 운항 효율, 등), 에 미치는 영향을 분석하고 우선순위에 따라 설계의 대안으로 고려한다. 이 과정에서 기존의 사고사례나 관련 데이터들이 필요하다. 그러나 과거의 사고사례들은 안전설계를 위한 충

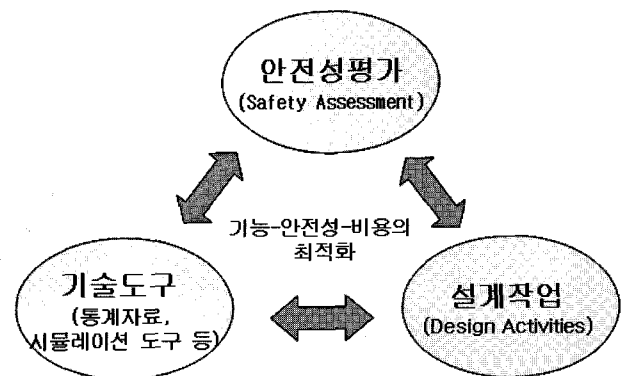


Fig. 5 Concept of Design for Safety

분한 데이터를 제공하지 못하며, 따라서 사고의 확률 및 결과를 예측하기 위한 수단으로 각종 계산이나 실험, 그리고 컴퓨터 시뮬레이션 등의 도구가 필요하다.

Fig. 5는 GBS 체제하에서 위험도 기반 설계 및 이를 위한 도구로서 FSA방법론의 적용에 관한 개념이다. 그림에서 보는 바와 같이 특히 신개념, 신기술의 적용이 요구되는 고부가가치 선박의 경우 설계 단계에서 안전성을 보장하기 위한 수단으로 위험도기반 설계 및 승인 체계가 요구되며, 설계 목표(Safety goal) 및 기능요건(functional requirements)의 정의 및 검증을 위한 도구로서 위험도 기반 방법론을 기초로 한 FSA방법론을 적용할 수 있을 것이다.

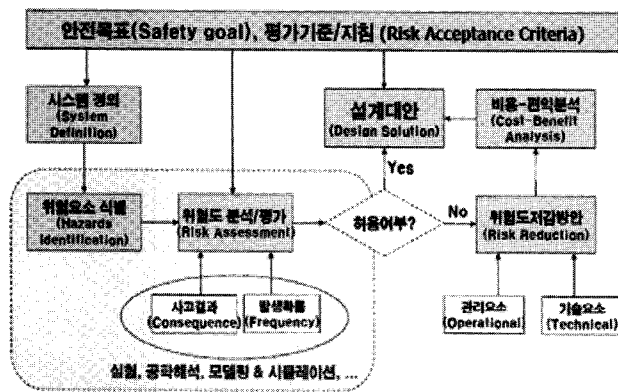


Fig. 6 A Framework of Risk-Based Design

4. 결론

안전기술은 해상에서의 인명, 재산, 환경보호를 위한 선진국형 공공복지기술이며, 선박 및 해양구조물의 고부가가치화를 위한 핵심요소기술이며 관련 국제기준 및 산업표준의 개발을 위한 필수 요소로서, 관련 산업의 국제경쟁력 향상 및 국제 사회에서의 영향력 강화를 위한 수단이다. 특히, 안전설계기술은 유럽 등 선진국에 주도되고 있는 안전기술에 대한 기술격차해소는 물론, 중국 등 후발경쟁국과의 차별화를 통하여 해운, 조선 등 관련 산업의 지속가능한 경쟁력 확보/유지를 위한 한 전략적 수단이 될 것이다.

지금까지 우리나라 조선업계는 안전 및 환경 관련 기술에 있어서 유럽 등 선진국에 의존해 왔으며, 설계의 제약조건(constraint)으로서 IMO 등 관련 국제법규나 선급의 규칙을 만족하는 소위 '규칙기반설계(rule-based design)에 익숙해져 있다. 최근 안전 및 환경 관련 국제기준의 강화, 해양플랜트 분야의 안전성평가에 대한 요구의 증대로 국내 조선업계에서도 안전설계(Design for Safety), 특히 위험도기반의 안전설계에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 여전히 선진 선급의 지원에 의존하면서 특히 GBS를 중심으로 한 새로운 법규체계의 개발에도 소극적이다. 이러한 현상은 안전 및 환경과 관련한 패러다임의 변화, 특히 유럽의 선주 및 선급 중심으로 GBS(Generic GBS) 및 이를 기반으로 한 설계/승인체계가 정착될 경우, 관련 기술의 종속은

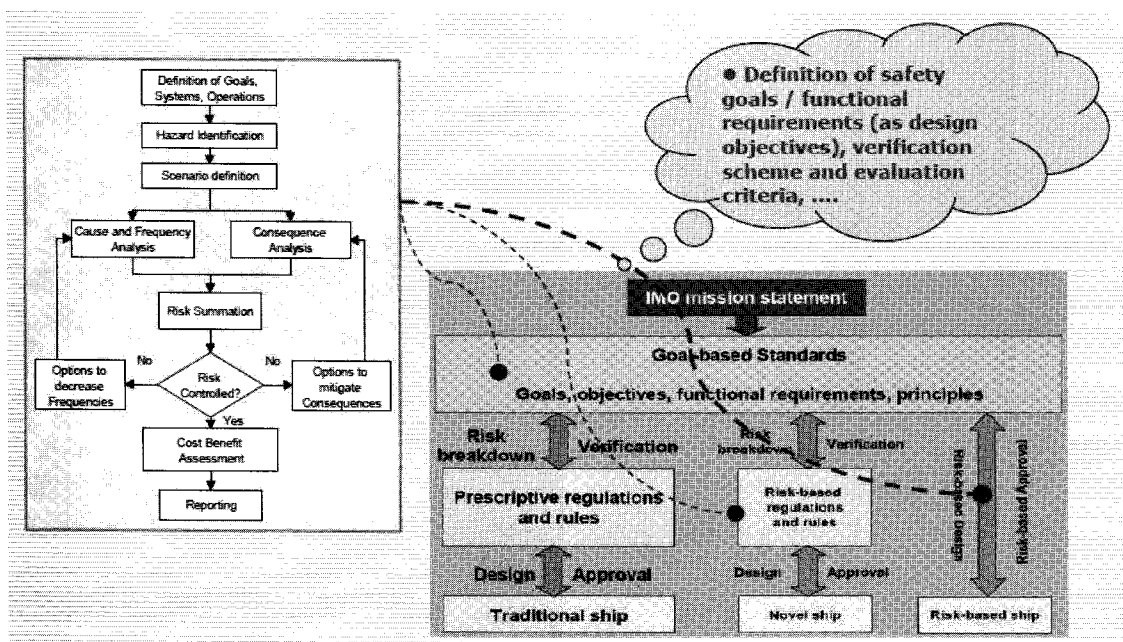


Fig. 7 Use of the FSA methodology for RBD in GBS regime

더욱더 심화될 것이다. 한편, 기존의 확정론적 법규체계 (deterministic / prescriptive rules/regulations)는 안전 및 환경과 관련한 설계에 있어 후발 경쟁 국가들과의 기술수준의 평준화를 가속화시킬 것이며, 이들과 차별화를 위한 수단이 요구된다.

아직까지 조선 및 해운산업에서 'RBA의 적용에는 많은 문제점들이 있으며, 구체적인 보완이 필요한 것은 사실이지만, 안전 및 환경문제에 대한 보다 능동적(proactive)이고 합리적(rational)인 방법으로 인식되고 있다. 특히, 신개념/고부가가치 선박의 안전성을 확보하기 위한 수단으로서 위험도기반 법규체계와 안전설계 개념은 GBS 체제하에서 선박 및 해양구조물의 설계/엔지니어링 분야의 새로운 시장을 형성하고 이를 선점하기 위한 전략적 수단이 될 것이다.

결론적으로 우리나라 조선업계의 입장에서는 유럽 등 선진국에 주도되고 있는 안전기술에 대한 기술적 종속을 탈피하고, 후발경쟁국과의 차별화와 조선해양산업 선도국(global leader)으로서의 위상확보를 통해 우리나라 조선해양산업의 지속가능한 경쟁력 확보/유지를 위한 전략적 수단으로서 안전 및 환경보호기술, 특히 '위험도 기반 안전설계기술'의 자립화가 필수적이다.

참 고 문 헌

1. Dracos V., et. al., 2003, "A Risk-based Framework on Ship Design for Safety", IMDC proceedings
2. IMO, 2002, Guidelines for FSA for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ.1023)
3. ISO/IEC Guide51, 1999, Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards
4. Marijin Bakker, Hotze Boonstra, Wim Engelhard, Bart Daman, 2003, "Towards Safety Based Design Procedures for Ships", IMDC proceedings
5. IMO MSC 86/5/3, 2009, Guidelines on the approval for the Risk-based Design
6. A. D. Papanikolaou (Ed.), 2009, "Risk based Ship Design - Methods, Tools and Applications", Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-89041-6. 