

국적일반화물선 초기안전성평가(High-level FSA) 연구(2)

이종갑† · 나성* · 김홍태** · 박재홍***

†, ** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, *, *** 한국선급 연구원

A Study on High-level FSA for Korean-flagged General Cargo Ships

Jong-Kap Lee† · Seong Na* · Hong-Tae Kim** · Jae-Hong Park***

†, ** Korea Ocean Research & Development Institute/KORDI, Daejeon, 305-343, Korea
*, *** R&D Center/KR, Daejeon, 305-343, Korea

요 약 : 본 논문은, 국적일반화물선 공식안전성평가(Formal Safety Assessment, 이하 FSA) 연구의 1, 2 단계에 해당하는 위험요소 식별(Hazard identification) 및 식별된 사고 시나리오에 대한 위험도 분석(Risk analysis) 결과를 소개한 “국적일반화물선 초기안전성평가 연구(1)”에 이어 FSA 연구의 3, 4 그리고 5단계를 수행한 내용으로, 국적일반화물선의 운용 중 발생 가능한 위험을 저감할 수 있는 위험도제어방안들(Risk Control Options)을 식별하는 단계(Step 3)와 식별된 위험도제어방안들 중 전문가 의견수렴을 통하여 선별된 위험도제어방안들을 대상으로 한 비용-효과 평가 단계(Step 4: Cost-Benefit Assessment) 그리고 비용-효과 평가의 결과를 정리하여 국적일반화물선의 안전성 제고를 위한 구체적인 방안을 제안하는 단계(Step 5: Recommendation for Decision Making)의 결과를 소개하였다.

핵심용어 : 공식안전성평가, 일반화물선, 위험도제어방안, 비용-효과 평가, 위험도 허용기준

Abstract : This study was carried out in order to verify the usefulness of FSA(Formal Safety Assessment) methods as a tool to conduct a safety assessment of general cargo ships flying the Korean flag, and to provide useful information on ‘the Safety of General Cargo Ships’ for IMO committee’s discussion on the matter at a future session. In the previous paper, “A Study on High-level FSA for Korean-flagged General Cargo Ships(1)”, the concepts of the FSA methodology and its five steps were described and the results of Hazard Identification(Step 1) and Risk Analysis(Step 2) from the FSA study for the Korean-flagged general cargo ships were discussed. Subsequent to the Steps 1 & 2, the identification of Risk Control Options(RCOs-Step 3) for eliminating or reducing either the frequency or the severity of the risks identified and their Cost-Benefit Assessment(CBA-Step 4) were undertaken. In this paper, the results of the Steps 3 & 4 are discussed, and some recommendations are made.

Key words : FSA, general cargo ship, Risk Control Options(RCOs), Cost-Benefit Assessment(CBA), risk acceptance criteria

1. 서 론

최근 IMO에서는, 산적화물선, 대형여객선 등의 선종에 대한 안전 문제에 이어 일반화물선의 안전(General Cargo Ship Safety)에 대한 논의의 필요성이 제기 되었으며, 일반화물선 안전에 대한 본격적인 논의를 위한 준비작업으로 국제선급협회(IACS: International Association of Classification Societies)를 통한 일반화물선 FSA 작업이 진행 중이다(IMO, 2006; IMO, 2009; IMO, 2010). FSA 방법론은 IMO에서 해상 관련 법규의 변경 및 개발에 대한 의사결정 수단으로 사용되고 있으며, 최근에는 GBS(Goal-Based Ship Construction Standards)의 개발을 포함한 위험도 기반 설계(Risk-Based Design)를 위한 수단으로서 검토되고 있다. 이에, FSA 방법론의 유용성을 확인하고, 향후 IMO에서 논의될 일반화물선

안전에 대한 기초 자료를 확보하기 위하여 국적일반화물선에 대한 FSA 작업을 수행하였다. 또한, 국적일반화물선 FSA 작업을 통하여 주로 우리나라의 연안 항해에 종사하는 국적일반화물선의 안전수준 평가 및 연안 항해 국적일반화물선의 안전성 제고를 위한 합리적인 방안을 마련하고, 선박 운항 안전성 제고를 위한 지속적인 연구의 필요성을 강조하고자 하였다.

FSA는, 대상 선박 또는 대상 시스템의 정의를 포함하는 안전성 평가 작업을 위한 준비단계를 시작으로, 위험요소 파악 단계, 위험도 분석 단계, 위험도제어방안 마련 단계, 비용-효과 평가 단계 그리고 의사결정을 위한 권고 단계의 5단계로 구성되어 있으며, “국적일반화물선 초기안전성평가 연구(1)”을 통하여 FSA 절차와 방법론 및 국적일반화물선 FSA 작업의 준비단계, 위험요소 식별(Step 1) 단계 그리고 위험도 분석(Step 2) 단계 작업의 결과를 이미 소개한 바 있다(이 등,

† 교신저자 : 연회원, jklee@moeri.re.kr 042)866-3411
* 대표저자 : 연회원, sna@krs.co.kr 042)869-9225
** 연회원, kht@moeri.re.kr 042)866-3643
*** 연회원, jaehpark@krs.co.kr 042)869-9210

2010). 본 논문에서는, 선행 연구의 주요 내용을 간략하게 소개하고, 선행 연구 결과를 토대로 수행된 위험도제어방안(RCOs: Risk Control Options)의 식별(step 3), 선별된 위험도 제어방안들을 대상으로 한 비용-효과 평가(step 4), 그리고 국적일반화물선의 안전성 제고를 위한 구체적인 방안 제안(step 5) 단계의 결과를 정리하였다.

2. 국적일반화물선의 위험도분석 및 평가 결과 (Step 0 ~ 2)

“국적일반화물선 초기안전성평가 연구(1)”에서는 FSA의 다섯 단계 중 준비단계(step 0), 위험요소 식별(step 1) 그리고 위험도 분석(step 2) 단계의 수행 내용을 기술하였으며, 주요 내용은 다음과 같다(이 등, 2010).

2.1 문제 정의 (Step 0)

FSA 수행을 위한 대상 선박은 국토해양부에서 분류한 산적화물선을 포함하는 일반화물선으로, 컨테이너 전용선, 냉동화물선 등 특수목적 전용선을 제외한 선박으로 제한하였으며, 선급공통구조규칙(IACS CSR: Common Structural Rules)의 적용을 받는 선박(길이(L)¹⁾ 90m 이상) 이외의 국적일반화물선에 대한 안전성 향상을 위하여 우리나라 연안 항해에 종사하는 선박을 중심으로 안전성 평가 작업이 진행되었다. 이후 위험요소식별 등 후속작업의 효율성을 위한 대표선박(Generic model)으로는 연안을 항해하는 자체 크레인을 가진 산적화물선을 선정하였다. 그리고 본 연구에 사용되어진 사고 데이터는 한국해운조합에 등록된 총톤수 500톤 이상 25,000톤 이하의 일반화물선으로 분류되어진 선박에 대한 5년간(2004년 ~ 2008년)의 자료를 사용하였다.

2.2 위험요소 식별 (Step 1)

위험요소 식별 단계에서는, 각 분야별 전문가로 구성된 작업팀(HAZID Team)에 의한 브레인스토밍(Brainstorming) 작업을 통하여 대상선박 운항 중 발생 가능한 선원사상(Loss of life), 환경손상(Environmental loss), 선박 및 화물의 손실(Loss of property)에 관한 잠재된 위험요소(Hazard)들을 식별하고, 정성적인 평가를 수행하여 주요 사고시나리오를 식별하는 작업을 수행하였다. 위험요소의 식별을 위하여, ‘계류 중 적하역’, ‘항계 내 및 제한수역(통항밀집수역) 항해’, ‘연안 항해’, 그리고 ‘원양 항해’ 세션으로 구분하여 작업을 수행하였으며, 총 115개의 위험요소(Hazards)가 식별되었다. 식별된 위험요소들에 대한 정성적인 위험도 분석을 통하여 위험도 지수(Risk Index) 6.0을 초과하는 고 위험요소들을 식별하고 일반화물선의 대표적 사고 카테고리인 충돌, 접촉, 좌초와 화재/폭

발 사고를 정량적 분석의 대상으로 선정하였다.

2.3 위험도 분석 (Step 2)

위험도 분석 단계에서는, Step 1에서 정의된 각 사고 카테고리에 대한 ETA(Event Tree Analysis) 모델을 작성하고 이를 통해 각 사고 종류별 정량적 위험도를 분석하였다. 그리고 선원사상에 관한 위험도(PLL: Potential Loss of Life)에 대한 ETA 결과를 바탕으로 F-N 선도를 작성하고 현존선박의 안전수준을 평가하였으며, 그 결과 국적일반화물선의 안전수준이 ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 영역에 존재하며, 또한 국제항해 선박에 비해 상대적으로 위험수준이 높음²⁾을 확인하였다.

3. 위험도제어방안(Step 3)

위험도제어방안 마련 단계에서는 현존하는 위험들과 새로운 기술 또는 새로운 운영/관리 방법에 의해 생겨나는 위험들을 제어할 수 있는 방안을 식별하는 단계로, Step 1과 Step 2의 작업내용을 바탕으로, 이미 알려진 위험들(Historical risks)과 새로이 파악된 위험들(New risks)을 모두 고려하여 폭넓은 위험도제어방안들을 식별하여야 하며, 본 연구를 위한 위험도제어방안 식별 작업은 다음과 같은 단계로 진행되었다(IMO, 2007):

- 제어가 필요한 위험 영역 선별;
- 가능한 위험도제어방안들(RCOs)의 식별;
- 위험도 제어방안들에 대한 정성적 평가 실시;
- 비용-효과 평가 대상 위험도제어방안 선별.

3.1 제어가 필요한 위험영역 선별 방법

위험 영역 선별의 목적은 Step 1과 Step 2로부터 나온 결과들에 대하여 위험도 제어가 가장 필요한 곳에 위험도 저감을 위한 노력이 집중되도록 하기 위함이다. 위험 영역 선별을 위하여 일반적으로 고려하는 주요 관점들은 다음과 같다(IMO, 2007):

- 위험도 수준(Risk level);
- 위험 발생 가능성(Probability);
- 위험의 심각성(Severity);
- 위험도 모델의 신뢰성(Confidence).

본 연구에서는, 위험요소 식별작업(Step 1)을 통하여 파악된 위험도 지수 6.0을 초과하는 고 위험요소들과 ETA를 이용한 위험도 분석(Step 2) 작업을 통하여 파악된 빈도(Frequency)와 심각도(Consequences-선원, 선박, 화물, 환경에 대한)가 높

1) 길이 L은 하기 만재흘수선에 있어서 선수재 전단으로부터 타주가 있는 선박은 타주의 후단까지를 의미함(산적화물선 공통구조규칙 11편 1장 4절).

2) 국제항해 선박은 SAFEDOR에서 수행한 Container, RoPax, Crude Oil Tankers 선박에 대한 FSA 결과를 의미하며, 안전성 평가에 사용된 사고 데이터의 차이로(SAFEDOR FSA의 경우 LMIU(Lloyds Maritime Information Unit) 데이터 사용) 국적일반화물선의 위험도 평가 작업(데이터를 이용한 사고발생 빈도 계산 값) 결과와의 직접적인 비교는 어려움.

은 사고 시나리오들을 위험도제어방안 식별을 위한 위험영역으로 선별하였다.

3.2 위험도제어방안 식별 방법

위험도제어방안의 식별을 용이하게 하기 위하여, 일반적으로, 위험도제어방안이 어떻게 위험도를 제어하는지와 관련된 ‘위험도 속성(Risk attributes)’들과 초기사건에서 사망에 이르는 과정의 어디에 위험도제어방안이 도입되어야 하는지와 관련된 ‘인과 사슬(Causal chains)’들을 작성하는 방법이 사용되고 있다.

위험도 속성은 위험도제어방안이 어떻게 작용하며 어떻게 적용되고 운용될 것인가에 대한 구조화된 사고 과정을 용이하게 하기 위하여 사용되며, FSA 지침서에 의하면 3가지(Category A, B & C attributes) 위험도 속성으로 분류하고 있다(IMO, 2007).

인과사슬은 파악된 원인 요소로부터 장비 및 기능 고장, 위험요소 발생 시 환경, 위험원인으로 인한 사고 및 결과에 이르기까지의 일련의 과정들 즉, 사고 시나리오들을 작성함으로써 어디에 어떠한 위험도제어방안이 도입되어야 하는지의 파악을 용이하게 한다. 예를 들어, Setp 1의 위험요소 식별작업 결과를 통하여 위험도 지수(RI)가 가장 높게 나타난 위험요소인 ‘연안항해 시 기관실내 화재/폭발(Failure Mode ID: III-4.3)’을 살펴보면, 연료유 누출, Crank case 폭발, 보일러 화재, 케이블 과열, 인간의 작업 과실 등을 원인으로 기관실내 화재/폭발이 발생하며, 이로 인하여 선체 손상(침수로 발전 가능), 선원 상해/사상, 추진력 상실, 환경오염 등이 발생함을 알 수 있다. 또한, Step 2의 ETA 작업을 통하여, 연안항해 시 기관실 화재/폭발사고 발생 후 초기 화재 감지 확률, 화재 진압 성공 확률 및 진압 실패 시 선원 대피 가능성과 각 시나리오들에 의한 선원, 선박/화물 및 환경의 피해 정도 등을 알 수 있다. 따라서 Step 1과 Step 2에서 행해진 작업 내용, 즉 각 위험요소의 원인과 결과의 인과사슬을 검토함으로써, 사고 발생 확률 및 사고 발생으로 인한 피해를 줄이기 위하여 어떠한 곳에 어떠한 위험도제어방안이 도입되어야 할지를 생각해 볼 수 있다.

본 연구에서는, 위험요소 식별(Step 1)과 위험도 평가(Step 2) 작업에서 파악된 고 위험도 사고 시나리오들을 대상으로 사고발생 확률을 줄일 수 있거나 사고발생으로 인한 결과의 심각성을 감소시킬 수 있는 위험도제어방안들을 전문가들의 브레인스토밍을 통하여 식별하였다. 또한, 식별된 위험도제어방안들에 대한 정량적 비용-효과 평가 대상 선별 작업 시 참조하기 위하여 카테고리 A 속성³⁾에 의한 분류를 부여하였다.

3) 카테고리 A 속성은 RCO가 사건의 발생확률을 감소시키는 예방적 위험도 제어(Preventive risk control)인지, RCO가 사건 또는 연속되는 사건들에 의한 결과의 심각성을 감소시키는 경감적 위험도 제어(Mitigating risk control)인지로 구분한다. 카테고리 B와 C 속성에 대한 내용은 FSA 지침서(MAC 83/INF.2)의 Appendix 6 “ATTRIBUTES OF RISK CONTROL MEASURES” 참조.

3.3 위험도제어방안 식별

Table 1 Initial list of RCOs

구분	No.	RCOs
인명안전 (A)	A1	VTS 비상통항관리 시스템 구축(악천후, 제한시계)
	A2	선속제한규정 마련(통항량 과다 해역, 제한시계 시)
	A3	법정 최소승무정원 증원
	A4	점등식 비상탈출 유도표시 설치
	A5	흡연/음주 관리 규정 마련
	A6	항해사 피로도 관리 규정 마련
	A7	선원 예비원을 확대 시행(현행 10%)
	A8	해사노동협약(MLC) 도입
	A9	선원 교육/훈련 체계 보완
	A10	선종별 매트릭스 제도 도입(선원의 경력 참조하여 배승)
	A11	노후된 계류색 관리 지침/규정 마련
	A12	장비 Instruction, 교육 자료 등의 시각화(시청각 자료)
환경관련 (B)	B1	비상 알람 시스템 마련(연료유 공급/이송 작업)
	B2	선상에서 발생하는 오염물질 처리절차 선내 비치/게시
	B3	선상 오염물질 유상 수거/처리 시설 마련/강화
	B4	혼승선(다국적 선원) 직무 회회 책자 마련
선박관련 (C)	C1	PMS(기관예방정비제도) 추가 도입(주요 장비에 대하여)
	C2	Bridge resource 최대 사용을 위한 교육(BRM 교육)
	C3	ECDIS 또는 ARPA 탑재
	C4	예비(redundant) 자이로 콤팩스, GPS 장비 탑재
	C5	전방 음파탐지장치(Forward Looking Sonar) 설치
	C6	AIS와 RADAR 통합시스템 구축
	C7	항로유지장치(이로 시 경보) 설치(Track control system)
	C8	선교 디자인 개선
	C9	버너 등 주방조리기구 자동 소화장치 설치
	C10	기관실 유지관리 지침/규정 마련
	C11	기상정보/예보 시스템 마련
	C12	화물창 등 벌지 경보장치(Bilge alarm) 설치
	C13	벌지 배출 시스템 개선(추가 벌지펌프 설치 등)
	C14	자동 계류색 장력조절장치 설치
	C15	선내 안전관리 체계 마련(안전관리위원회, 안전관리자)
	C16	안전운행 관리체계 마련
	C17	상선과 어선의 VHF System 통일
화물관련 (D)	D1	화물 고박장비/고박상태 관리감독 절차 마련
	D2	화물에 대한 정보제공 시스템 마련(특히, 위험화물)
	D3	해양경찰과의 직계통신라인(Hot line) 구축

위험도 저감을 위한 제어방안 식별을 위하여 위험도 분석 단계에서 파악된 높은 위험도를 잠재하고 있는 사고 시나리오와 위험요소식별 단계에서 파악된 고 위험요소 목록을 바탕으로 전문가들의 브레인스토밍 작업을 수행하였다. 전문가 회의를 통하여 식별된 총 36개의 위험도제어방안들은 위험요소 식별(Step 1) 작업에서 사용된 위험 유형별 분류에 따라 인명, 환경, 선박 및 화물관련 사항으로 분류하였으며, Table 1은 분류된 위험도제어방안의 목록을 보여주고 있다.

Table 1에 나열된 위험도제어방안들을 적용하였을 경우 위험 감소 효과가 기대되어지는 해양사고 종류들과, 위험도제어

방안이 사고 예방을 목적으로 하는지 또는 사고 발생으로 인한 피해 저감을 목적으로 하는지(카테고리 A 속성), 그리고 식별된 위험도제어방안이 어떠한 형식(장비-Equipment, 운용-Operation, 디자인-Design, 시스템-System)으로 적용되어지는지에 대하여 분류하여 Table 2와 같이 작성하였다.

Table 2 Related accidents and attributes of RCOs

구분	RCO No.	Related accidents					Type		Category
		충돌	접촉	좌초	화재/폭발	기타	예방(P)	저감(M)	
인명안전 (A)	A1	✓	✓	✓			✓		Operation
	A2	✓	✓				✓		Operation
	A3	✓	✓	✓		✓	✓		Operation
	A4				✓			✓	Equip.
	A5					✓	✓		Operation
	A6	✓	✓	✓		✓	✓		Operation
	A7					✓	✓		Operation
	A8					✓	✓		Operation
	A9	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Operation
	A10	✓	✓	✓		✓	✓		Operation
	A11					✓	✓		Operation
	A12	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Equip.
환경관련 (B)	B1					✓		✓	Equip.
	B2					✓	✓		Operation
	B3					✓	✓		Operation
	B4					✓	✓		Operation
선박관련 (C)	C1					✓	✓		Operation
	C2	✓	✓	✓			✓		Operation
	C3	✓		✓			✓		Equip.
	C4	✓		✓			✓		Equip.
	C5		✓				✓		Equip.
	C6	✓					✓		Equip.
	C7	✓		✓			✓		Equip.
	C8	✓	✓	✓			✓		Design
	C9				✓		✓		Equip.
	C10				✓		✓		Operation
	C11	✓		✓			✓		System
	C12					✓		✓	Equip.
	C13					✓	✓		Equip.
	C14					✓	✓		Equip.
	C15	✓	✓	✓		✓	✓		Operation
	C16					✓	✓		Operation
	C17	✓							System
화물관련 (D)	D1					✓	✓		Operation
	D2					✓	✓		System
	D3					✓		✓	System

3.4 상세 비용-효과 평가를 위한 위험도제어방안 선별

IMO FSA 지침서(2007)에 의하면 모든 위험도제어방안들에 대한 비용-효과 평가를 수행하도록 권고하고 있으나, 식별된 모든 위험도제어방안들에 대한 비용-효과 평가가 어려울 경우, 일반적으로, 정성적 평가를 통하여 상세 비용-효과 평가를 위한 대상 위험도제어방안들을 선별하는 작업을 수행하고 있다. 이러한 상세분석 대상 선별을 위한 정성적 평가에는 여러 가지 방법들이 사용되어지고 있다. 예를 들어, SAFEDOR (Design, Operation and Regulation for Ship Safety)에서 수행한 컨테이너 선박 FSA의 경우, 식별된 모든 위험도제어방

안들에 대하여 ‘인명사상 위험도(PLL)의 저감 정도’, ‘위험도 제어방안 시행으로 인한 추정 이득들’, ‘위험도제어방안 시행을 위한 소요 비용의 근사값’, ‘기대되는 위험도 저감의 최대치’ 및 ‘위험도제어방안 시행의 소요 비용 산출을 위한 정보의 가용성’ 등을 고려하여 각 위험도제어방안에 대하여 *Low, Medium, High*로 등급 매김을 수행하였다(SAFEDOR, 2007). 상세분석 대상 선별을 위한 또 다른 방법으로는, 미국 여객선 협회(PVA: Passenger Vessel Association)의 여객선 안전 향상 지침서(A Guide to Improving the Safety of Passenger Vessel Operations by Addressing Risk)에서 제시한 비용-효과 평가 방법처럼 소요 비용 지수(Cost Index)와 효과 지수(Benefit Index)를 사용한 간략화 된 정성적(준 정량적) 평가 방법을 사용할 수 있다. 미국 여객선 협회의 여객선 안전 향상 지침서에서 제시한 비용-효과 평가 방법론은 위험도제어방안 적용으로 인한 소요비용을 1 ~ 5등급의 비용지수와 위험도제어방안 적용으로 인한 효과를 1 ~ 5등급의 효과지수로 정의하고 각 위험도제어방안에 대한 등급 매김 작업을 한 후 효과지수를 비용지수로 나누어 그 값으로 위험도제어방안의 비용-효과를 평가하는 방법이다(PVA, 1997).

본 연구에서는, 상세 비용-효과 평가 대상 위험도제어방안 선별을 위해 SAFEDOR 컨테이너 선박 FSA 작업에서 사용한 방법에 따라, 각 위험도제어방안들의 적용 시 기대되어지는 ‘위험도 감소량’, ‘적용 시 소요 비용’, ‘소요 비용에 대한 정보 획득의 용이성’ 및 ‘예방 목적인지 또는 저감 목적인지(예방 목적일 경우 가산점 부여)’ 등을 고려하여 식별된 모든 위험도제어방안들을 전문가 회의를 통하여 *High, Medium, Low*로 분류하였다. Table 3은 분류된 위험도제어방안들을 보여주고 있다.

Table 3 RCO priority

	<i>High</i>	<i>Medium</i>	<i>Low</i>
인명안전(A)	A1, A3	A2, A5, A6, A8, A9, A10	A4, A7, A11, A12
환경관련(B)		B1, B4	B2, B3
선박관련(C)	C6	C2, C3, C7, C12, C15, C17	C1, C4, C5, C8, C9, C10, C11, C13, C14, C16
화물관련(D)		D2, D3	D1

추가 분석을 위한 대상으로는 ‘*High*’ 영역에 위치한 ‘A1 - VTS 비상통항관리 시스템 구축’, ‘A3 - 법정 최소승무원 증원’과 ‘C6 - AIS와 RADAR 통합 시스템 구축’이 선정되었으며, 선택된 각 위험도제어방안에 대한 구체적인 비용-효과 평가를 위하여, A1은 ‘VTS와 연동한 선박항행위험경보 시스템 구축’, A3은 ‘추가 항해당직자 배치(항해사 1인, 당직부원 1인 추가)’, C6은 ‘AIS와 RADAR(ARPA/ATA) 통합 시스템 구축’ 형식의 좀 더 현실적인 내용으로 바꾸어 상세 분석을 수행하는 것으로 의견을 모았다. 또한 위험도제어방안들은 연안항해에 종사하는

국적일반화물선에의 적용을 주 목적으로 하였기 때문에 원양 항해에 종사하는 일부 선박들에는 이미 적용되고 있더라도, 대부분의 연안항해 국적일반화물선에 적용되고 있지 않는 경우에는 새로운 위험도제어방안으로 간주하였다.

A1. VTS와 연동한 선박항행위험 경보시스템 구축: 선박 충돌 등 위험상황 발생 시 VTS에서 관련선박에 관련 위험을 통보할 수 있는 알람시스템을 구축하는 것으로, 예를 들어, VHF에 선박 고유번호를 등록하고, VTS에서 충돌 등 위험상황 발견 시 관련선박의 고유번호를 입력하면 관련선박의 VHF에 알람이 가동하는 시스템으로, 대상 선박을 개방된 VHF 채널을 통하여 호출하던 기존방식에 비하여 대상선박의 VHF에 알람이 가동되게 함으로서 대상선박과 직접 일대일 통화를 할 수 있게 하여 위험대상 선박과 VTS 간 연락두절 가능성을 줄이기 위한 시스템이다.

A3. 추가 항해당직자 배치(항해사-1인, 당직부원-1인): 대표선박 승선인원을 10인으로 가정 하였으므로⁴⁾, 이 경우 선장도 항해당직에 임해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 항해 당직자 1인과 당직부원 1인을 추가 승선시킴으로서 선장을 항해당직에서 제외시키고, 통항선박이 많은 해역 항해 등 위험발생 가능 상황 시 선장이 선교 항해당직을 지휘할 수 있도록 한다(이 경우 항해당직자는 항해사 3인, 타수 3인 가능 - 선장, 기관 4인, 주방 1인: 총 12인).

C6. AIS와 RADAR(ARPA/ATA) 통합시스템 구축: 선명, 선박 목적지 등 AIS 선박정보가 ARPA 또는 ATA 스크린에 표시될 수 있도록 함으로서 충돌 등 위험상황 시 상대선박 호출 등이 용이하고, 상대선박의 항로 예측이 용이하도록 하는 시스템이다.

4. 비용-효과 평가(Step 4)

비용-효과 평가 단계는 Step 3에서 식별된 각 위험도제어방안의 실행과 관련된 비용과 이득을 파악하고 비교하는 단계로, Step 2 단계에서 빈도와 결과의 관점에서 평가된 위험들을 검토하여 위험도제어방안 적용의 결과로 발생하는 비용과 이득을 추정하고, 순수 소요비용을 위험도의 저감 정도로 나누어서 얻어지는 ‘단위 위험도 감소당 소요되는 비용’ 형태를 사용함으로써 각 위험도제어방안에 대한 비용효과정도를 예측하고 비교하는 작업이다(IMO, 2007). 이러한 결과로 얻어진 위험도제어방안의 비용-효과 정도의 순위는 Step 5 단계의 의사결정을 위한 권고를 용이하게 한다.

4.1 비용-효과 평가 방법론

위험도제어방안의 적용에 따른 소요비용과 효과는, 일반적으로, GCAF(Gross Cost of Averting a Fatality)와 NCAF

(Net Cost of Averting a Fatality) 형식을 이용하여 평가되어진다. 또한, GCAF와 NCAF를 계산하기 위하여 사용되어지는 위험도제어방안 적용으로 인한 선박생애 동안의 소요비용(ΔC) 도출을 위하여 ‘순 현재 가치(NPV: Net Present Value)’가 주로 사용되어진다(SAFEDOR, 2007).

GCAF는 인명에 대한 위험도 감소를 위한 관점에서 위험도제어방안을 한계(부가적) 비용의 비율로 나타냄으로서 비용효과정도를 측정하는 수단이며, NCAF는 인명에 대한 위험도 감소를 위한 관점에서 위험도제어방안을 경제적 이득을 고려한 한계(부가적) 비용의 비율로 나타냄으로서 비용효과정도를 측정하는 수단이다. GCAF와 NCAF는 다음과 같이 표현되어진다:

$$GCAF = \frac{\Delta C}{\Delta R} \quad (1)$$

$$NCAF = \frac{\Delta C - \Delta B}{\Delta R} \quad (2)$$

ΔC 는 위험도제어방안을 적용함으로써 소요되는 선박생애 동안의 비용;

ΔB 는 위험도제어방안 적용의 결과로 얻게 되는 선박생애 동안의 경제적 이득;

ΔR 은 위험도제어방안을 적용함으로써 얻게 되는 인명사상의 감소 관점에서의 위험도 저감(선박생애 동안)량을 나타낸다.

각 위험도제어방안을 적용함으로써 소요되는 비용은 초기 설치비용과 선박생애 기간을 기준으로 연간 소요되는 유지 및 보수비용의 두 부분으로 나누어 책정하였으며, 최초 설치시기부터 선박생애가 끝나는 시기까지의 연도별 소요비용의 흐름을 현재가치로 환산하여 그 합을 구하기 위하여 다음 수식으로 표현되어지는 NPV를 사용하였다(SAFEDOR, 2007):

$$NPV = A + \frac{X_1}{(1+r)} + \frac{X_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{X_T}{(1+r)^T} \quad (3)$$

$$= A + \sum_{t=1}^T \frac{X_t}{(1+r)^t}$$

X_t 는 위험도제어방안 적용에 따른 시간 t(소요비용의 흐름 시간)에서의 소요비용 또는 이득;

A는 위험도제어방안 적용을 위하여 소요되는 초기비용;

r은 감가 상각률;

T는 선박 생애 기간을 나타낸다.

위험도제어방안 적용의 결과로 얻게 되는 선박생애 동안의 위험도 감소(감소된 사상자 수)는 다음 식에 의하여 계산되어졌다:

$$\Delta R = T^* \Delta PLL \quad (4)$$

ΔPLL 은 선박년간 인명사상 관련 위험도 감소량을 나타낸다.

4) 본 연구의 대상 선박은 한국해운조합에 등록된 국적일반화물선으로 톤수별 분포를 살펴보면(2008년도) 499톤 이하 선박 26%, 500톤 이상 9,999톤 이하 선박 67%, 10,000톤 이상 선박이 7%를 차지하고 있다(이 등, 2010).

본 연구에서는 다음과 같은 단계에 따라 비용-효과 평가가 이루어 졌다:

- 사고 데이터(한국해운조합)를 바탕으로 전문가 회의를 통하여, 위험도제어방안 적용 시 기대되어지는 각 사고 발생빈도의 감소량 결정;
- 각 사고 발생빈도 감소량을 위험도분석 단계에서 사용된 각 사고 Event Tree에 적용하여 위험도 저감량(ΔR)⁵⁾ 계산;
- 전문가 의견(주로 선박회사 소속 전문가)을 수렴하여 위험도제어방안 적용 시 소요 비용(ΔC) 추정;
- 각 위험도제어방안에 대한 GCAF 계산;
- 각 위험도제어방안 적용 시 기대되는 위험도 저감량과 GCAF 비교.

4.2 대상 위험도제어방안들의 비용-효과 평가

비용-효과 평가를 위하여 NCAF를 사용할 경우 경제적 편익의 금전적 계량화(전선 시 선박의 가치 및 화물 가치, 사고 발생으로 인한 소득 손실(Loss of income)과 선원 고용 비용(Costs for crew)을 포함한 수리비용(Costs for repair))가 다소 모호하고 복잡한 관계로, 본 연구에서는, GCAF만을 사용하여 각 위험도제어방안을 비교 하였다. GCAF에 의한 비교 방법을 사용하기 위해서는 수식 (1)에서 보인바와 같이 위험도제어방안을 적용함으로써 소요되는 비용 ΔC 와 위험도제어방안 적용으로 얻게 되는 인명사상의 관점에서 위험도 저감량 ΔR 을 구하여야 하며, ΔR 은 수식 (4)의 식에 의하여 구할 수 있다. 각 위험도제어방안을 적용함으로써 소요되는 비용 ΔC 는 수식 (3)으로 나타내어지는 NPV를 사용하였으며, 국적일반화물선의 비용-효과 평가를 위한 가정은 다음과 같다:

- 승선인원 - 10명;
- 선박생애 기간 - 20년;
- 감가 상각률 - 5%.

Table 4는 대상 위험도제어방안들의 초기 설치비용⁶⁾과 연간 소요되는 유지/보수비용(USD)을 나타내고 있다.

5) 선원사상에 관한 위험도(PLL)만을 고려함: 위험도분석 단계에서 ETA(Event Tree Analysis)의 결과로는 선박년간(per ship year) 선원사상, 연료유 누출(환경오염), 선체손상 및 화물손실에 대한 결과가 얻어지나, 본 연구에서는, GCAF만을 사용하여 비용-효과 평가를 수행하기로 의견이 모아져(NCAF 사용할 경우 ΔB 를 구하기 위하여 환경, 화물, 선체손상에 대한 ETA 결과도 필요) 선원사상에 대한 ETA 결과만을 사용함.
 6) *RCO A1: VTS와 연동한 VHF 경보시스템의 시스템 개발비용은 고려대상에서 제외하고, 경보시스템이 포함된 새로운 VHF 설치비용을 초기비용으로 산정함. *RCO A3: 추가 항해당직자 배치의 경우 추가 항해당직자가 2인(항해사 1인, 당직부원 1인)이나, 대상(연안항해) 선박의 선실 설치공간을 고려하여 선실 1개만 추가 설치하는 것으로 초기설치비용을 산정함. *RCO C6: AIS와 RADAR 통합시스템 구축의 경우, 최근 장비들은 AIS와 연결이 용이하게 생산되기 때문에 새로운 RADAR(ARPA/ATA) 장비 설치비용의 정보를 바탕으로 초기비용을 산정함.

Table 4 Lifetime costs for implementing RCOs

	RCO A1	RCO A3	RCO C6
초기설치비용(A)	9000 \$	30000 \$	35000 \$
연간 유지/보수비용(X_t)	2500 \$	53000 \$	2600 \$

① RCO A1. VTS와 연동한 선박항행 위험경보 시스템 구축:

전문가 회의를 통하여, RCO A1을 적용하였을 경우 충돌사고는 항해 내(Low speed) 항해 시와 선박 통항량이 많은 연/근해(Restricted) 항해 시에 사고 발생 빈도가 각각 25% 감소한다고 가정하였고, 접촉 사고는 항해 내와 연/근해 항해 시 각각 5% 감소한다고 가정하였다. 좌초 사고의 경우 위험도 분석 단계에서(ETA 작업 시) 선박의 추진력이 있는 경우(Powered grounding)와 추진력이 없이 떠밀려서(Drift grounding) 좌초된 경우로 분류하였고, RCO A1을 적용 할 경우 추진력이 있는 경우인 Powered grounding 시에만 좌초사고 발생 빈도가 10% 감소한다고 가정하였다. Table 5는 RCO A1을 적용할 경우 기대되어지는 각 사고종류에 따른 위험도 감소량을 나타내고 있다.

Table 5 Risk reduction for RCO A1

RCO-A1		initial F	PLL	% reduction	F reduction	PLL final	N.Lives Sav.
충돌	Low speed	1.7x10 ⁻²	3.4x10 ⁻⁴	25%	4.2x10 ⁻³	2.5x10 ⁻⁴	8.4x10 ⁻⁵
	Restricted	2.8x10 ⁻²	3.9x10 ⁻³	25%	7.0x10 ⁻³	2.9x10 ⁻³	9.8x10 ⁻⁴
	Full speed	1.1x10 ⁻²	1.0x10 ⁻²	0	0	1.0x10 ⁻²	0
접촉	Low speed	2.6x10 ⁻²	0	5%	1.3x10 ⁻³	0	0
	Restricted	6.2x10 ⁻³	1.6x10 ⁻³	5%	3.1x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻³	7.8x10 ⁻⁵
	Full speed	3.3x10 ⁻⁴	4.1x10 ⁻⁵	0	0	4.1x10 ⁻⁵	0
좌초	Powered	8.6x10 ⁻³	2.6x10 ⁻³	10%	8.6x10 ⁻⁴	2.4x10 ⁻³	2.6x10 ⁻⁴
Total		9.7x10 ⁻²	1.9x10 ⁻²		1.4x10 ⁻²	1.7x10 ⁻²	1.4x10 ⁻³

② RCO A3. 추가 항해당직자 배치(항해사-1인, 당직부원-1인):

추가 항해당직자를 배치할 경우 충돌사고 발생의 감소 비율은 전문가의 의견을 수렴하여 20%로 가정하였다. 접촉사고의 경우 사고 데이터(한국해운조합)에 의하면, 접/이한 작업 및 입/출항 시 부두 또는 방파제 등에 접촉하는 사고가 전체 접촉사고의 40%정도를 차지하는 것을 알 수 있으며, 선교와 기관실의 통신문제 등으로 인한 기관오작동이 몇 건 발생하였다. 그리고 연안항해의 경우 어구와의 접촉사고가 많은 부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 이러한 사항을 고려하여 추가 항해당직자를 배치 할 경우 항해 내에서 항해 시 15%의 접촉 사고 감소, 근해/연안 항해 시 5%의 접촉사고 감소를 가정하였다. 또한, 좌초 사고는 Powered grounding 시에만 좌초사고 발생 빈도가 15% 감소한다고 가정하였다. Table 6은 RCO A3 적용 시 기대되어지는 위험도 감소량을 나타내고 있다.

Table 6 Risk reduction for RCO A3

RCO-A3	initial F	PLL	% reduction	F reduction	PLL final	N.Lives Sav.	
충돌	5.6×10^{-2}	1.4×10^{-2}	20%	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	2.9×10^{-3}	
접촉	Low speed	2.6×10^{-2}	0	3.9×10^{-3}	0	0	
	Restricted	6.2×10^{-3}	1.6×10^{-3}	5%	3.1×10^{-4}	1.5×10^{-3}	7.8×10^{-5}
	Full speed	3.3×10^{-4}	4.1×10^{-5}	0	0	4.1×10^{-5}	0
좌초	Powered	8.6×10^{-3}	2.6×10^{-3}	15%	1.3×10^{-3}	2.2×10^{-3}	3.9×10^{-4}
Total	9.7×10^{-2}	1.9×10^{-2}		1.7×10^{-2}	1.5×10^{-2}	3.3×10^{-3}	

③ RCO C6. AIS와 RADAR(ARPA/ATA) 통합시스템 구축:
RCO C6을 적용할 경우 충돌사고의 발생빈도만 감소한다고 가정하였으며, 감소량은 초기 발생빈도의 15%로 가정하였다. Table 7은 RCO C6 적용 시 기대되어지는 충돌사고 관련 위험도 감소량을 나타내고 있다.

Table 7 Risk reduction for RCO C6

RCO-C6	initial F	PLL	% reduction	F reduction	PLL final	N.Lives Sav.
충돌	5.6×10^{-2}	1.4×10^{-2}	15%	8.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}	2.2×10^{-3}
Total	5.6×10^{-2}	1.4×10^{-2}		8.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}	2.2×10^{-3}

Table 8은 상기 내용을 바탕으로 계산되어진 각 위험도제어방안에 대한 비용-효과 평가(CBA: Cost-Benefit Assessment)의 결과를 나타내고 있다. 국적일반화물선에 적용하였을 경우 기대되어지는 위험도 감소량(ΔR)이 가장 높게 나타난 위험도 제어방안 A3을 예를 들어 살펴보면 다음과 같다. 위험도제어방안 A3을 적용함으로써 기대되어지는 사고 발생빈도 감소량(% reduction)을 위험도분석 단계(Step 2)에서 작성된 각 사고 Event Tree에 적용할 경우 선박연간 인명사상 발생 위험 감소량(ΔPLL)은 3.3×10^{-3} 이며, 수식 (4)에 의하여 선박생애 기간(20년) 동안 위험도 감소량 ΔR 은 6.7×10^{-2} 이 된다. RCO A3을 적용함으로써 소요되는 비용 ΔC (NPV)는 초기 설치비용(A) 30,000 USD, 연간 유지/보수비용(X) 53,000 USD, 감가 상각률 5%를 수식 (3)에 대입하여 690,497 USD가 계산되었으며, 상기 내용을 수식 (1)에 대입함으로써 RCO A3의 적용에 따른 GCAF는 10,338,951 USD로 나타났다. RCO A1과 RCO C6의 적용에 따른 GCAF 값 또한 같은 방법으로 계산되어졌다.

Table 8 Detailed results of the CBA

RCO ID	ΔPLL	ΔR	ΔC (USD)	GCAF (USD)
A1	1.4×10^{-3}	2.8×10^{-2}	40,156	1,429,480
A3	3.3×10^{-3}	6.7×10^{-2}	690,497	10,338,951
C6	2.2×10^{-3}	4.3×10^{-2}	67,402	1,566,863

사회적 위험도(Societal Risk)를 사고의 빈도와 사상자 수 사이의 관계 형식으로 보여주는 F-N 선도를 통하여, 위험도 제어방안 A3을 적용하였을 경우 변화하는 위험도 저감 정도를 비교하기 위해 위험도분석 단계(Step 2)에서 이미 작도된 국적일반화물선의 F-N 선도에 위험도제어방안 A3 적용 후 변화한 국적일반화물선의 F-N 선도를 추가 작도하여 Fig. 1에 나타내었다. 그 결과 그림에서 보는바와 같이 국적일반화물선의 전체 위험도가 약간 감소된 것을 알 수 있다.

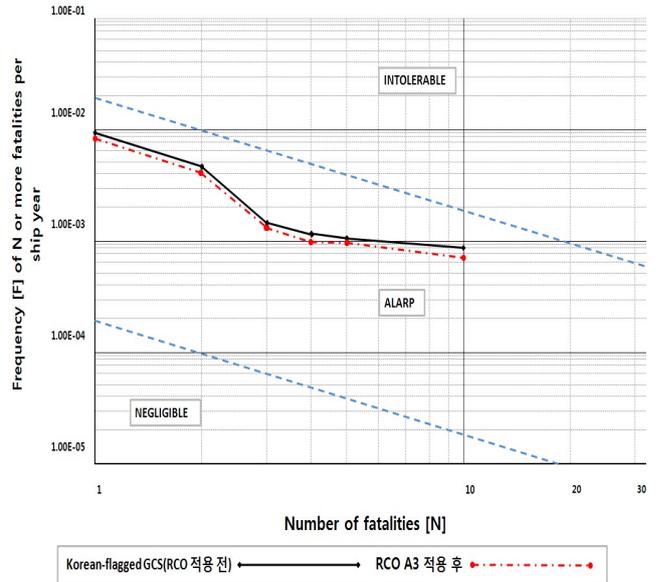


Fig. 1 Societal Risk Level after the introduction of RCO A3

4.3 비용-효과 평가 결과

비용-효과평가의 최종 결과(Table 8)에 의하면, 국적일반화물선에 적용할 경우 가장 많은 위험도 감소량(ΔR)이 기대되어지는 위험도제어방안은 “A3. 추가 항해당직자 배치(항해사-1인, 당직부원-1인)”이며, 다음으로 RCO C6, RCO A1 순으로 나타나고 있다. 또한, GCAF 관점에서 볼 때 “A1. VTS와 연동한 선박항행 위험경보 시스템 구축”과 “C6. AIS와 RADAR(ARPA/ATA) 통합 시스템 구축”이 각각 1.4 million USD와 1.6 million USD로 가장 효과적인 위험도제어방안으로 나타났으며, RCO A3의 경우 기대되어지는 위험도 감소량은 가장 높게 나타났으나 위험도 감소량에 따른 소요 비용(GCAF)이 약 10 million USD로 높게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는, 주로 연안항해에 종사하는 승선인원 10인 정도의 국적일반화물선(자체 크레인을 가진 산적화물선)에 대한 초기안전성평가(High-level FSA)를 수행하였다. “국적일반화물선 초기안전성평가(High-level FSA) 연구(1)”에 기술하였듯이 위험요소 식별(Step 1) 단계에서는 선원사상, 환경

손상, 선박 및 화물 손실에 관한 115개의 위험요소들(위험도 지수 6.0을 초과하는 고 위험도 위험요소 47개)을 브레인스토밍 작업을 통하여 식별하였으며, 위험도 분석(Step 2) 단계에서는 Step 1에서 파악된 위험요소들을 바탕으로 정의된 각 사고 카테고리에 대한 ETA 작업을 통한 정량적 위험도 분석 및 F-N 선도를 작성하여 현존선박의 안전수준을 평가하였다. 그 결과 국적일반화물선의 위험도 수준은 ALARP 영역에 존재함을 알 수 있었으며, 위험도 수준이 ALARP 영역에 위치한다는 것은, 경제적인 부담을 고려하여 합리적이고 실용적인 최소수준으로 위험도 수준은 감소되어야 한다는 것을 의미한다.

본 논문에서는, 위험요소 식별 및 위험도 평가 작업의 결과를 바탕으로 국적일반화물선의 운용으로 발생하는 위험들을 저감할 수 있는 가능한 모든 위험도제어방안들을 도출하였으며, 정성적 평가를 통하여 상세분석 대상 위험도제어방안들을 선별하고, 대상 위험도제어방안들에 대한 비용-효과 평가를 시행하였다.

비용-효과 평가 결과 위험도제어방안 A3 “추가 항해당직자 배치(항해사-1인, 당직부원-1인)”가 국적일반화물선의 위험도 저감 측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났으나, 추가 당직자 2인에 대한 연간 고용비용 즉, 위험도제어방안 적용으로 인한 선박생애 동안의 소요비용이 상대적으로 높게 나타났다. 위험도 감소량에 따른 소요비용(GCAF) 측면에서 볼 때, 위험도제어방안 A1 “VTS와 연동한 선박항행 위험경보 시스템 구축”과 C6 “AIS와 RADAR(ARPA/ATA) 통합시스템 구축”은 IMO FSA 지침서(IMO, 2007)에 제안된 GCAF 기준(GCAF Criteria: 3 million USD)보다 낮아, 위험도 감소량은 위험도제어방안 A3보다 낮지만 비용대비 효과 측면에서 비교적 효과적인 것으로 나타났다.

상기 설명한 위험도제어방안들을 연안항해에 종사하는 국적일반화물선에 직접 적용하기 위해서는 - 본 연구는 국적일반화물선의 초기안전성평가(High-level FSA)를 수행함으로써 국적일반화물선의 전체 위험도 수준의 평가를 목적으로 하였기 때문에 - 각 위험도제어방안과 관련된 시스템 및 위험도제어방안 적용으로 인한 새로운 위험의 발생 여부 등 구체적인 상세 연구(Detailed/Low-level FSA 등)를 통한 추가 검토가 필요하다.

국적일반화물선에 대한 초기안전성평가 연구 수행을 통하여, 안전성 평가 결과의 신뢰성 제고를 위해 해결되어야 할 몇 가지 문제점 또한 파악되었다. 첫째, 해양사고 데이터베이스 개선을 위한 노력의 필요성이다. 특히, 위험도 분석 단계 및 비용-효과 평가 단계의 정량적 평가를 위하여 사용되는 평가 대상범위 선박들에 대한 데이터의 수준은 평가 결과의 신뢰성 수준과 직결된다고 할 수 있다. 둘째, 안전성 제고를 위한 위험도 평가의 지속적인 수행을 위한 노력이 필요하다. 평가 대상 선종의 안전성 제고를 위해서는 전체적인 안전성 수준 파악을 위한 초기안전성평가(High-level)와 함께, 식별된 위험요소들에 대한 상세 평가(Low-level)가 수반되어야 하며, 공식

안전성평가(FSA)의 가장 큰 장점중 하나인 대상 선박의 사고 예방(Proactive) 목적을 달성하기 위하여 특히, 위험요소 식별 및 위험도제어방안 마련 단계에 충분한 시간과 노력을 기울여야 할 것이다.

국적일반화물선의 안전수준 평가를 위한 수단으로서 IMO FSA 방법론 적용 시, 상기 기술한, 정량적 평가를 위한 데이터의 부족, 평가를 위한 충분한 작업 시간 및 인력의 확보와 관련된 문제점들과 평가 결과의 신뢰성 제고를 위한 노력이 수반될 경우, 국적일반화물선의 안전성 제고를 위한 평가 방법론으로서 IMO FSA 방법론은 유용한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 국토해양부에서 지원하는 ‘IMO GBS에 대한 기초기술 확보 및 대응기술개발연구’ 중 ‘위해도 평가 적용 방법론 연구’ 및 지식경제부의 ‘위험도기반 선박안전설계 핵심기술 개발’ 과제 결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이종갑, 나성, 김홍태, 김경미(2010), “국적일반화물선 초기 안전성평가(High-level FSA) 연구(1)”, 한국항해항만학회지, 34권, 3호, pp.213-220.
- [2] IMO(2006), Work Programme-General cargo ships safety, Submitted by the Russian Federation, MSC 82/21/19.
- [3] IMO(2007), Consolidated text of the Guidelines for Formal Safety Assessment(FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ.1023-.MEPC/Circ.392), MSC 83/INF.2.
- [4] IMO(2009), General Cargo Ship Safety, IACS FSA study - Step 1(Evaluation of Historical Data), MSC 86/INF.4.
- [5] IMO(2010), General Cargo Ship Safety, IACS FSA study - Step 2(Risk Analysis), MSC 87/20/Y.
- [6] Passenger Vessel Association(PVA)(1997), PVA Risk Guide-A Guide to Improving the Safety of Passenger Vessel Operations by Addressing Risk, Available at: http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/pvarisk_guide.pdf
- [7] SAFEDOR(2007), FSA-container vessels Details of the Formal Safety Assessment, MSC 83/INF. 8.

원고접수일 : 2010년 11월 16일
 심사완료일 : 2010년 12월 20일
 원고채택일 : 2010년 12월 23일