

살물선의 화물창 덮개부 수밀 건전성에 대한 공식안전평가의 적용

이은창*, 이재옥**, 여인철***, 양영순****

An Application of FSA Methodology to Hatchway Watertight Integrity of Bulk Carriers

Eun-Chang Lee*, Jae-Ohk Lee**, In-Cheol Yeo***
and Young-Soon Yang****

요 약

본 논문은 IMO가 주관하는 공식안전평가 방법의 일부로서 살물선의 화물창 덮개부 수밀 시스템에 적용한 결과이다. 화물창 덮개부 수밀 시스템에 큰 위험을 주는 위해요소는 설계기준을 넘어선 선박의 운항으로 해치 코밍에 고장을 일으키는 것과 빈약한 유지보수와 검사로 인해 수밀 장치에 고장을 일으키는 사고인 것으로 나타났다. 위험해석(risk analysis)을 통해 현재의 경우 한 선박이 1년간 운항하였을 때 약 6만불의 위험이 있다고 계산되었다. 이러한 위험을 감소시키기 위해 제안된 위험통제방안 중 RCO 1(Advanced system directly related to hatchway security)을 적용함으로써 위험을 약 3만불 감소시킬 수 있었다. 또한 비용편익분석을 실시하여 위험통제방안이 비용편익 측면에서도 효과적임을 보였다.

Abstract

This study was a part of FSA study which was initiated by IMO and was applied to hatchway watertight integrity of bulk carriers. Hazards which were involved in high risk level were identified as follows: Ship Operation out of Design Criteria (Hatch Coaming Damage) and Poor Maintenance & Inspection (Securing Arrangement Damage). The potential risk was calculated by risk analysis and risk control option was made to reduce potential risk. The potential risk was about US\$ 60,000/ship-year and could be reduced to about US\$ 30,000/ship-year by applying RCO 1(Advanced system directly related to Hatchway Security). In addition, effectiveness of RCOs was shown by cost benefit assessment.

접수일자 : 2000년 3월 4일, 승인일자 : 2000년 6월 20일

*학생회원, 서울대학교 조선해양공학과, 석사과정(E-mail: shrabit@tam.snu.ac.kr)

**학생회원, 서울대학교 조선해양공학과, 박사과정(E-mail: ohk@insdel.snu.ac.kr)

***정회원, 한국선급, 수석연구원(E-mail: icyeo@venus.krs.co.kr)

****정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: ysyang@gong.snu.ac.kr)

1. 서 언

1. 연구배경

선박의 사고는 그 결과에 있어서 인명, 재화의 큰 손실과 심각한 환경오염을 야기한다. 특히 1980년대 이후의 빈번한 사고는 중요한 사회적 문제로 부각되었다[1]. 우리 나라에서는 한국해양연구소 선박해양공학분소 해양안전방제연구센터가 조직되어 해난사고에 신속히 대처하도록 노력하고 있다.

국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에서는 사고의 직간접적인 원인을 분석하고 사고의 예방에 대한 구체적인 대안을 제공하기 위해 공식 안전 평가(FSA: Formal Safety Assessment)에 대한 연구를 진행해 왔으며, 1997년 공식안전평가의 수행을 위한 과도 지침을 발표하였다[2]. 우리나라에서는 1997년에 국제해사기구의 이러한 연구동향이 소개되었으며 [3] 공식안전평가를 선박에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 국내에서의 공식안전평가 연구는 주로

한국선급(KR: Korean Register of Shipping)을 주축으로 이루어지고 있으며, 이주성[4], 공인영[5] 등의 연구가 있다.

살물선의 경우, 화물창 덮개에 의한 사고가 많을 것이라는 관점에서 No. 1 Hatch Cover의 설계하중을 기존의 규정보다 두 배 이상 더 높게 책정하기에 이르렀다[6]. 따라서 살물선의 화물창 덮개부 수밀 건전성에 대한 체계적인 분석과 위험에 대처할 수 있는 방안의 모색이 중요하다고 보아, 본 연구에서는 살물선의 화물창 덮개부 수밀 시스템에 대해 국제해사기구의 과도지침을 충실히 따라 공식안전평가를 수행하였다.

2. 공식안전평가 일반

공식안전평가의 흐름은 Fig. 1과 같다. 우선 대상이 되는 문제에 대한 일반적인 모델을 정의하고 관련규정(relevant regulations)을 조사하여 문제를 정확히 파악한다.

Step 1은 위해요소(hazard)를 파악하는 단계이다. 과거의 사고자료가 충분한 경우에는 그것을

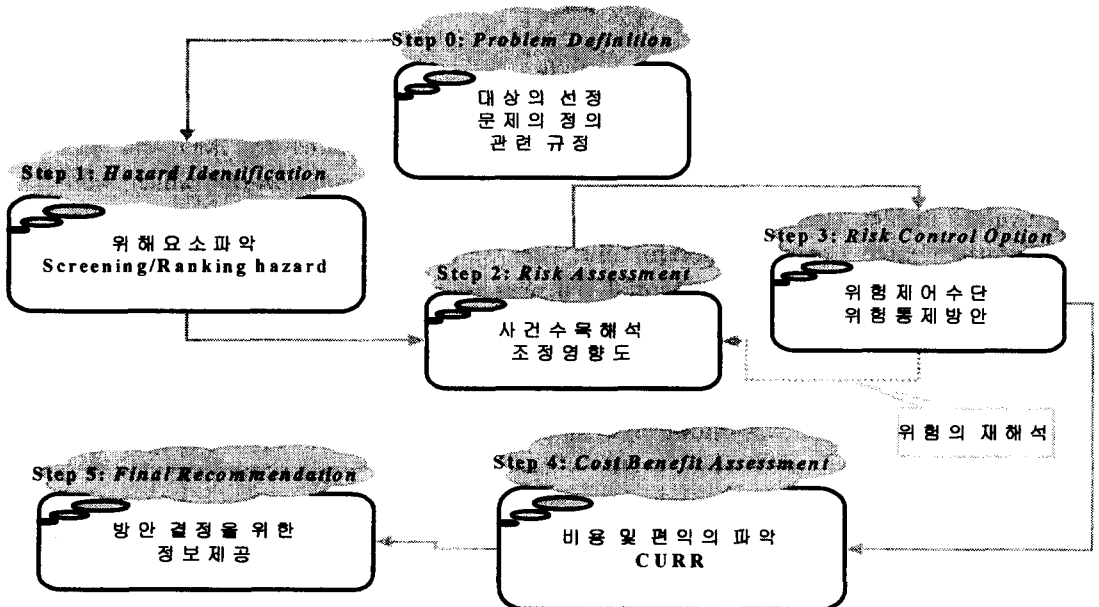


Fig. 1 Flowchart of formal safety assessment

이용하여 위해요소를 파악하고 결과의 심각성 (consequence)과 빈도(occurrence)를 구하게 된다. 그러나 과거의 사고자료가 충분하지 못한 경우에는 전문가 집단의 위해요소파악 회의 (HAZID meeting)를 통해서 파악해야 한다. 위해요소가 사고로 발전되는 것을 사고 시나리오 (accident scenario)라고 할 수 있으며, 이 사고 시나리오의 발현으로 인한 결과의 심각성과 빈도를 곱하여 사고 시나리오의 위험수준(risk level)을 결정하게 된다.

Step 2에서는 정성적인 위해요소를 정량적으로 계산하게 된다. 고장 이후의 사건 진행과 잠재위험 (potential risk)은 사건수목해석(ETA: Event Tree Analysis)을 통해 파악된다. 고장의 빈도를 계산하기 위해서 기존에는 고장수목해석(FTA: Fault Tree Analysis)을 이용하였으나, 공식안전평가에서는 일반적이고 종합적인 접근을 위해 조정영향도(RID: Regulatory Impact Diagram)의 사용을 권장하고 있다[7]. 조정영향도는 주관적인 면이 상대적으로 많은 단점이 있으나 사람, 기술, 외부와 관련된 요소를 체계적이고 통합적으로 다룰 수 있다는 점에서 효과적이라고 할 수 있다.

위험의 정량화 이후에 위해요소를 통제하기 위한 방안을 구성하는 Step 3을 진행한다. Step 3에서는 위해요소 및 고장 이후의 위험 감소를 위해 필요한 위험제어수단(RCM: Risk Control Measure)을 파악하고 유사한 위험제어수단들을 이용하여 위험통제방안(RCO: Risk Control Option)을 만들게 된다. 위험통제방안이 만들어진 후에 위험통제방안 적용 이후의 위험을 평가하기 위해 다시 Step 2로 돌아가게 된다.

위험의 재평가 이후에는 비용과 편익 측면에서 위험통제방안을 평가하기 위해 Step 4의 비용편익분석(CBA: Cost Benefit Assessment)을 하게 된다. 비용편익분석은 비용과 편익의 흐름을 순현재가치(NPV: Net Present Value)로 표현하여 단위 위험을 감소시키는데 필요한 비용 (CURR: Cost per Unit Risk Reduction)을 평가한다.

Step 5에서는 위험통제방안 선택에 필요한 정보와 유용한 데이터들을 제공하게 된다.

3. 살물선의 화물창 덮개부 수밀 건전성 에의 적용

(1) 문제정의(Problem Definition)

문제를 정의함에 있어서 우선 살물선에 대한 정의가 필요하다. 살물선은 고체화물(solid bulk cargo)을 운반하기 위해 설계, 건조되거나 사용중인 모든 선박으로 정의되고 있다[8]. 여기서 고체 화물이라는 것은 유체나 가스가 아닌, 용기에 담기지 않은 상태로 화물창에 적재할 수 있는 모든 화물을 의미한다[9].

화물창 덮개부는 살물선에서 화물을 싣거나 내리기 위한 수직 통로와 그에 관련된 구조이다. 또한 수밀 건전성이란 해수유입으로 인한 화물의 손상이나 부력상실을 막을 수 있는 것을 의미한다.

화물창 덮개부 수밀 시스템의 구조는 Fig. 2에서와 같이 크게 화물창 덮개와 코밍(hatch coaming), 수밀장치(security arrangement)로 이루어져 있다.

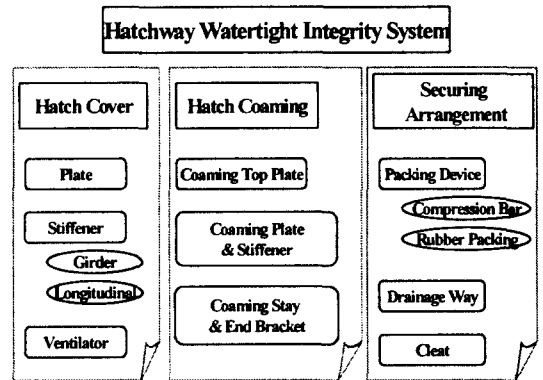


Fig. 2 Hatchway watertight integrity system

화물창 덮개부의 손상에 대한 통계를 살펴보면 패킹과 조인팅에서 50% 이상 손상이 발생하고

있으며 강판부에서도 약 30%의 손상이 생기는 것을 알 수 있었으며 구조 손상은 선수부에서, 수밀장치의 손상은 선박의 중앙부에서 많이 일어나는 것을 알 수 있었다.

(2) 위해요소 파악(Hazard Identification)

위해요소의 파악, 조정영향도와 사건수목의 정량화, 위험제어수단과 위험통제방안의 구성, 비용편익분석의 비용·편익 항목 등에서는 전문가들의 의견을 필요로 한다. 본 연구에서는 3차례의 회의를 통하여 선급, 학계, 현장에서 종사하고 있는 전문가들의 의견을 반영하여 작업을 수행하였다.

위해요소파악 회의에서 총 18개의 위해요소와 27개의 사고 시나리오가 파악되었다. 파악된 위해요소는 Table 1과 같은 형태의 위해요소파악 작업표로 정리되었다. 이 표에는 위해요소의 설명, 원인과 결과, 결과의 진행 부분, 위험의 정도를 나타내는 결과의 심각성과 발현빈도 등이 기록된다. 여기에서 빈도와 결과의 범위는 Table 2, Table 3과 같이 각각 4 단계로 나누었다.

Table 1에서도 볼 수 있는 것처럼 위해요소의 결과의 심각성과 빈도에 따라 위험수준이 결정되고 이를 바탕으로 Table 4와 같은 위험행렬(risk matrix)이 구성되었다.

진하게 표시된 부분이 위험수준 5, 6, 7로서 "받아 들일 수 없는 위험영역(unacceptable risk region)"이고 음영이 없는 부분이 위험수준 1, 2로서 "대체적으로 받아 들일만한 위험영역(broadly acceptable risk region)"이며 중간 부분이 "ALARP(as low as reasonably practicable) 영역"이다.

Table 2 Rating scale of occurrence (O)

Description	Definition	
Frequent	F	likely to happen yearly or more frequently
Reasonably Probable	RP	likely to happen during the life of a bulk carrier
Remote	R	unlikely, but not unknown, to happen during the life of a bulk carrier
Extremely Remote	ER	only likely to happen in exceptional circumstances

Table 3 Rating scale for severity (S)

Description	Definition	
Catastrophic	Cat	- total loss of the ship (actual loss & constructive total loss) - 10 or more equivalent deaths*
Major	Maj	- major damage/degradation of the ship strength - less than 10 equivalent deaths
Minor	Min	- minor damage/degradation of the ship strength (local damage to the structure) - less than 1 equivalent death
Insignificant	Ins	- no significant harm to people, property & environment - less than 10 minor injuries

* 1 equivalent death = 10 major injuries = 100 minor injuries

Table 4 Risk matrix

Frequent	4.1							
Reasonably Probable	1.3.1	1.3.2	1.5	1.7				
	1.6	4.2	2.2.1	2.2.2				
Remote	1.2.1	1.2.2	3.5	3.6	1.1.1	1.1.2	2.1.1	
	4.3				2.1.2	3.2.1	3.2.2	
Extremely Remote	3.4.1	3.4.2			1.4.1	1.4.2		
FREQ \ SEVERITY	Insignificant	Minor	Major		Catastrophic			

Table 1 An example of HAZID worksheet

HAZID Worksheet									
Hazard Category		1. Internal / Technical / Engineering							
ID	Hazard Description	Cause	Effect	Accident	O	S	Risk Level	Remark	
1.1.1	Application of inadequate design criteria	Design error	Vulnerability to severe potential structural damage	cover	O	R	Maj	4	Crucial damages are usually detected by the end of the first voyage
				coaming					
				securing					

본 연구에서는 대부분 ALARP 영역에 많은 위험요소들이 분포하고 있으며 Unacceptable Risk Region (Level 5 to Level 7)에 있는 사고 시나리오는 3.1 Ship Operation out of Design Criteria(Hatch Coaming Damage), 3.2.3 Poor Maintenance & Inspection Securing(Arrangement Damage)의 두 가지로 파악되었다.

(3) 위험의 정량화(Risk Assessment)

위험을 정량화하기 위하여 사건수목해석과 조정 영향도 지수(RID Index)를 구하는 과정을 수행한다. 사건수목의 초기 확률은 과거의 데이터를 바탕으로 1 Ship-Year당 0.052회로 결정되었다 [10].

분기가지와 분기확률, 각 사건(event)에서의

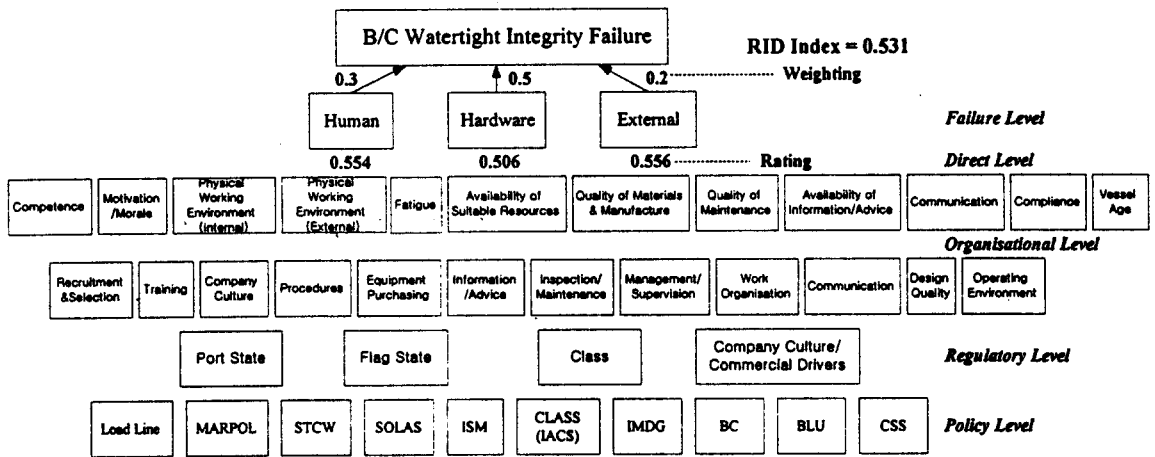


Fig. 3 Regulatory impact diagram

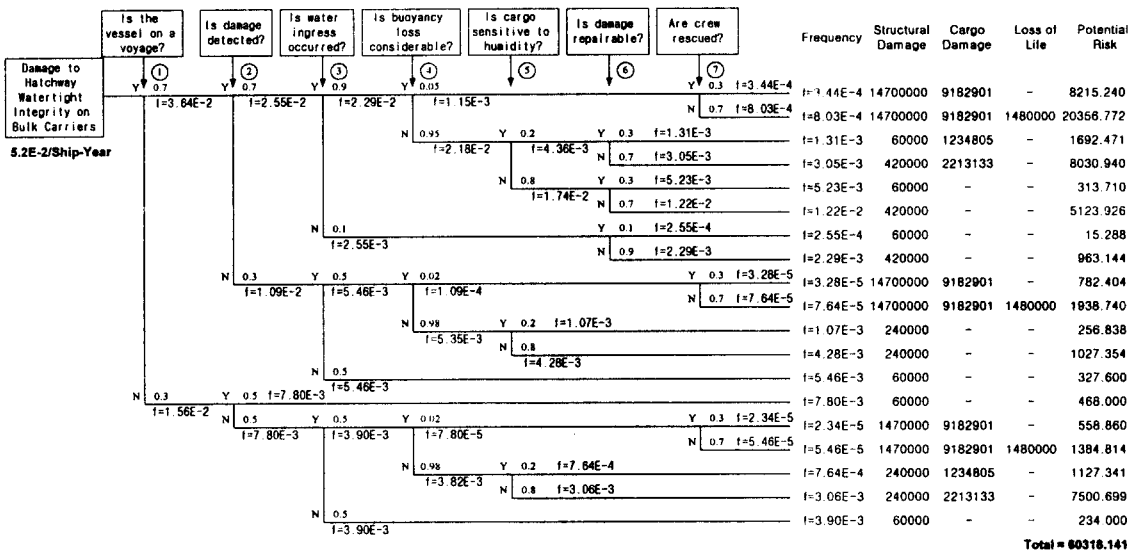


Fig. 4 Event-tree analysis (Base case)

잠재위험들은 전문가들의 판단을 근거로 작성되었다. 잠재위험은 구조손상과 화물손상 그리고 인명손실의 3가지 항목으로 나타내었고 이들을 공통적으로 평가하기 위하여 가격을 기준으로 표시하였다. 본 연구에서의 모든 비용은 미국 달러를 이용하였다. Fig. 3에서 살펴보면 기존의 경우에는 1 Ship-Year당 잠재위험이 약 60,318 달러인 것을 알 수 있다.

사건수목해석과 함께 조정영향도 지수를 구해야 하는데, 이 지수(index)는 위험의 정량화 단계에 사용되지는 않으나, 위험통제방안의 위험감소효과를 측정하기 위한 척도로서 사용된다. 지수의 값은 0부터 1사이의 값을 가지며 높을수록 사고가 발생할 확률이 작다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용된 조정영향도는 Fig. 4와 같다. 조정영향도를 구성하는 요소들의 상태(rating) 값과 하위 단계 요소들이 상위 단계 요소들에 미치는 영향(weighting) 값을 이용하여 지수를 계산하게 된다. 동일한 사고에 대해서 조정영향도는 같은 형태를 가지며, 요소들의 상태(rating) 값이 위험통제방안의 적용으로 변화될 수 있다.

(4) 위험통제방안(Risk Control Option)

위험통제방안을 생성하기 위해서는 우선 높은 위험수준을 갖는 위해요소와 사건수목, 조정영향도 등을 고려하여 위험을 제어할 수 있는 위험제어수단을 파악해야 한다. 전문가의 의견을 반영하여 총 32가지의 위험제어수단을 파악하였으며 이

러한 위험제어수단의 설명과 효과, 속성, 영향을 받게 되는 이해관계자 등을 표현하여 위험제어수단 목록을 작성하였다. 위험제어수단 목록의 예는 Table 5와 같다. 위험제어수단의 속성은 크게 3가지로 분류될 수 있으며 가장 중요한 속성 A는 사고를 방지 또는 사고 결과의 심각성을 감소시키는 것을 의미한다. 또한 위험제어수단을 적용할 경우에 제어할 수 있는 위해요소나 사건수목의 분기가지에 대한 항목도 포함되었다.

유사한 위험제어수단을 통합하여 위험통제방안을 만들게 된다. 본 연구에서는 모두 6개의 위험통제방안이 만들어졌으며 다음과 같다.

- RCO 1 - Advanced System Directly Related to Hatchway Security
- RCO 2 - Structural Monitoring and Protection System
- RCO 3 - Improvement of Design and Construction
- RCO 4 - Improvement of Inspection and Maintenance
- RCO 5 - Improvement of Operation
- RCO 6 - Additional Serviceable Information

이 중에서 높은 위험수준을 제어하거나 사고의 감소에 중요한 영향을 미치는 3가지 위험통제방안을 선택하여 위험의 재정량화와 다음 단계의 비용편익분석을 수행하였다. 선택된 위험통제방안은 RCO 1, RCO 4, RCO 5이다. RCO 1은 화물

Table 5 An example of risk control measure

ID	Node	Description	Benefit	Attribute		Stakeholders Affected	Remark
1	1	Designers to have appropriate qualification	To ensure that appropriately trained & qualified engineers are involved in design process	A-Preventative	To regulate level of design	Designers & Makers	Relevant hazard ID - 1.1.1, 1.1.2, 1.2.1, 1.2.2
				B-Procedural	Procedure for registration required		
				C-Redundant	Capability not wholly dependent on qualifications		
				Passive	No action by crew		
				Independent	Not affect other RCMs		
				Involved IIF	Human involved at registration		
				Auditable	Qualifications can be checked		
				Qualitative	Risk not quantified		
				Established	Many designers already qualified		
				Developed	Appropriate qualifications exist		

창 덮개 수밀 시스템의 기계장치와 관련된 방안이고, RCO 4는 검사와 유지보수에 관련된 사람들의 교육에 관련된 방안이며, RCO 5는 운항과 관련된 사람의 교육, 운항성에 도움을 줄 수 있는 시스템의 도입과 관련된 방안이다.

선택된 위험통제방안에 대하여 위험통제방안을 적용하였을 때의 조정영향도 지수를 구한 후에 새로운 지수값으로부터 사고 빈도를 재계산하게 된다. RCO 4의 경우에는 사고방지의 속성만이 있기 때문에 곧바로 잠재위험의 계산이 가능하게 된다. 그러나 RCO 1과 RCO 5의 경우에는 위험통제방안의 속성이 사고를 방지할 뿐만 아니라 결과의 심각성을 감소시키는 영향도 포함하고 있기 때문에 사건수목을 재해석할 필요가 있다. 사건수목의 재해석 후 속성별 위험감소와 최종잠재위험은 Table 6과 같이 된다.

Table 6 risk reduction for each risk control option selected in this study

	Basic Risk	Risk Reduction		Final Potential Risk
		Preventative	Mitigating	
RCO 1	60,318	-18,492 (61.4%)	-11,647 (38.6%)	30,179
RCO 4	US\$/Ship-	-15,190 (100%)	0 (0%)	45,128
RCO 5	Year	-17,320 (99.2%)	-141 (0.8%)	42,857

(5) 비용편익분석(Cost Benefit Assessment)

비용편익분석의 목적은 (4)에서 선택된 위험통제방안에 대하여 비용과 편익 관점에서의 효율성을 평가하는 데 있다. 위험통제방안을 적용하기 위해 필요한 시스템이나 교육 등은 비용으로 표현된다.

위험통제방안에 대하여 비용과 편익을 추정한다. 비용과 편익의 추정은 위험통제방안에 포함되는 위험제어수단들을 5,206척의 선박에 향후 20년 동안 적용하기 위한 초기비용과 연간비용, 초기편익과 연간편익으로 구분하여 수행하였다. 비용 항목에는 시스템의 설치, 관련된 사람들의 교육 등이 포함되었으며 편익 항목에는 사고의 감소

로 인한 운항일의 증가와 기존 시스템을 새로운 시스템으로 교체하여 생기는 편익이 포함되었다. 연단위를 기준으로 모든 비용을 1998년 말의 가격으로 표현하였다.

Table 7은 위의 비용편익분석의 결과를 나타낸 것이다. Table 7은 세 가지의 위험통제방안을 적용하였을 경우, 각각의 이해관계자들이 지불해야 하는 비용과 편익 및 CURR을 통한 위험통제방안의 효과를 나타낸다. 이 표에서 CURR은 잠재위험 1불을 줄이기 위해 투입되는 비용을 의미한다. CURR을 살펴볼 경우, 모든 위험통제방안은 비용편익 측면에서 효과적으로 나타났고 특히 RCO 1의 경우에 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

Table 7 Summary of cost benefit model output

Stakeholders	RCOs			RCO 1		RCO 4		RCO 5	
	U*	C**	B***	C	B	C	B		
Ship Owner & Operators	USK	397,971	186,160	2,763	12,428	246,903	14,166		
Classification Societies	USK	2,604	0	143,078	0	120,232	0		
Designers & Makers	USK	302	0	6,907	0	0	0		
International Regulators	USK	0	0	94,451	0	0	0		
Cargo Owner	USK	0	0	2,763	0	0	0		
Crew Provider & Trainer	USK	0	0	0	0	58,963	0		
Terminal	USK	0	0	0	0	94,451	0		
TOTALS	USK	400,879	186,160	280,269	12,428	412,361	14,166		
Net RCO Cost	USK	214,718		267,840		398,195			
Net RCO Cost /Vessel Year	USK	2.06		2.57		3.82			
Potential Risk Benefit	USK	30.14		15.19		17.46			
CURR (Discounted at 6%)		0.068		0.169		0.219			

*Units, ** Costs, *** Benefits

(6) Final Recommendation

의사결정자는 어떠한 위험통제방안을 적용하여 위험을 줄여야할 지를 결정해야 한다. CURR만이 의사결정의 기준이 될 경우에는 RCO 1을 선택해야 할 것이다. 그러나, RCO 1은 RCO 4에 비하여 비용이 많이 드는 단점이 있다. 투자자들의 입장에서 생각한다면 위험을 줄이기 위해 많은 비용

을 투입한다는 것은 바람직하지 않은 일이 될 수 있다.

따라서 의사결정자들에게 CURR 외의 다른 정보가 제공되어야 한다. 즉 방안 결정에는 Table 7 이외에 Fig. 5가 제공되는 것이 바람직하다.

만일 10,000 불의 잠재위험 감소가 목적일 경우는 RCO 4를 선택하고 최대의 잠재위험 감소가 목적일 경우에는 RCO 1을 선택해야 할 것이다. 또한 CURR이 1.0을 초과하는 범위에서는 위험 통제방안을 선택하지 않는 것이 바람직할 것이다. 이러한 정보를 Fig. 5로부터 얻을 수 있다.

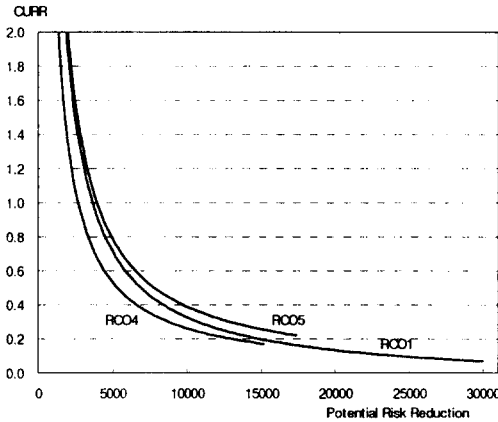


Fig. 5 CURR on a range of potential risk reduction for each RCO

4. 결론

본 연구에서는 체계적이고 통합적인 방법으로 선박의 안전을 다루는 공식안전평가의 모든 부분에 대해 살펴보았으며, 공식안전평가를 살물선의 화물창 덮개부 수밀 시스템에 적용하였다. 본 연구는 국제해사기구의 과도지침에 따른 공식안전평가의 전 단계를 수행했으며 화물창 덮개부 수밀 시스템의 고장으로 인한 사고를 줄일 수 있는 구체적인 방안을 제시했다는 점에서 의미가 있다.

후 기

본 연구는 1999년도 한국선급의 후원으로 수

행되었습니다. 차제에 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 위해요소파악 회의에 참가한 전문가 여러분의 도움에 대해서도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Kuo, C., *Managing Ship Safety*, LLP Reference Publishing, 1998.
- [2] IMO, *FSA - Interim Guidelines for the Application of FSA to the IMO Rule-Making Process*, MSC/Circ.829 & MEPC/Circ.335, 17 November, 1997.
- [3] 여인철, "공식안전평가(FSA)에 대하여", *대한조선학회 추계연구발표회*, 1997.
- [4] Lee, J. S., *Application of FSA Methodology to Development of Structural Safety Assessment System (I) - Flooding Accident in No.1 Cargo Hold of Bulk Carriers*, The Final Report of Group Research between Ulsan Univ. and Korean Register of Shipping, 1998.
- [5] Gong, I. Y., *An Application of FSA Technique to the Safety Assessment of Ship Navigation(I,II)*, KRISO/KORDI Report No. UCE99920, 1999.
- [6] IACS Unified Requirement S21, 1997.
- [7] IMO, *Experience Gained from the Trial Application Undertaken by the United Kingdom*, MSC 69/Inf.14, 12 February, 1998.
- [8] IMO, *Bulk Carrier Safety - Proposal for a Formal Safety Assessment on Bulk Carriers*, MSC 70/4/Add.1, Sept. 1998.
- [9] SOLAS/Conf.4/25, Chapter XII Regulation Definitions.
- [10] Buxton, I. L., *Cargo Access Equipment for Merchant Ships*, E. & F. N. Spon Ltd., London, 1978.
- [11] Research Institute of Marine Systems Engineering, *An Application of FSA methodology to Hatchway Watertight Integrity of Bulk Carriers*, Cooperative

Research Between Korean Register of Shipping & Seoul National University, 1999.

- [12] Lloyd's List Casualty Reports, *Bulk Carrier Casualty Statistics Deadweight Greater Than 20,000 Tonnes Where Structure Failure May Have Been a Factor*, 1995.

- [13] IMO, *Trial Application to high speed passenger catamaran vessels*, Final Report, submitted by the UK, DE 41/Inf.7, 12 December, 1997.

- [14] IMO, *Report of Illustrative Case Study Undertaken for the Special Presentation on Formal Safety Assessment Held at the International Maritime Organization*, London on 1 November, 1998.