

퍼지구조모델을 이용한 선박충돌사고 원인의 구조분석

양 원 재*

* 목포해양대학교 해상운송시스템학부 강사

Structure Analysis of Ship's Collision Causes using Fuzzy Structural Modeling

Won-Jae Yang*

* Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 지금까지 IMO를 비롯한 해운산업분야에서는 해상의 인명·재산, 해양환경보호에 항상 큰 관심을 가지고 해양사고예방을 위한 많은 노력들이 견주되어 왔다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 크고 작은 해양사고가 지속적으로 발생하고 있는 것이 오늘날의 현실이다. 한편, 선박충돌사고는 수많은 원인이 서로 복잡하게 상호작용을 하고 있어서 사고예방대책마련에 어려움이 많다. 따라서, 선박충돌사고의 정량적인 분석을 위해서는 이들 상호작용요소간의 관계를 시스템적으로 파악하고 분석하는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 먼저, 지난 10년(1991-2000)간 국내에서 발생한 선박충돌사고에 대한 위험성을 분석하였고, 또한 사고발생에 가장 큰 영향을 미치는 위험요소(Hazard)인 인적요소(Human Factor)에 대해서 전문가집단의 의견을 수렴하여 FSM기법을 이용하여 인적 위험요소를 계층화한 후 각 요소 상호간의 관련성을 분석하였다. 그 결과로써 인적요소에 의한 선박충돌사고의 발생과정과 각 계층에 속한 요소가 사고에 미치는 영향력을 규명하고, 각 요소간 상호관계를 파악하여 사고예방대책마련을 위한 우선순위를 결정할 수 있는 선박충돌사고의 인적요소 구조그래프를 제시하였다.

핵심용어 : 해양사고, 선박충돌사고, 선박운항시스템, 발생빈도, 위험요소, 위험성, 인적요소, 퍼지구조모델, 임계값

Abstract : The prevention of marine accidents has been a important topic in marine society for long time, and various safety policies and countermeasures have been developed and applied to prevent those accidents. In spite of these efforts, however, significant marine accidents have taken place intermittently. Ship is being operated under a highly dynamic environments, and many factors are related with ship's collision, whose factors are interacting. So, the analysis on ship's collision causes are very important to prepare countermeasures which will ensure the safe navigation. This study analysed the ship's collision data over the past 10 years(1991-2000), which is compiled by Korea Marine Accidents Inquiry Agency. The analysis confirmed that 'ship's collision' is occurred most frequently and the cause is closely related with human factor. The main purpose of this study is to analyse human factor. For this, the structure of human factor is analysed by the questionnaire methodology. Marine experts were surveyed based on major elements that were extracted from the human factor affecting to ship's collision. FSM has been widely adopted in modeling a dynamic system which is composed of human factors. Then, the structure analysis on the causes of ship's collision using FSM are performed. This structure model could be used in understanding and ve.rifying the procedure of real ship's collision. Furthermore it could be used as the model to prevent ship's collision and reduce marine accidents.

Key words : Marine Accidents, Ship's Collision, Ship Operation System, Frequency, Hazard, Risk, Human Factor, Fuzzy Structural Modeling, Threshold Value

1. 서 론

지금까지 해운산업분야는 해상 물동량의 꾸준한 증가와 조선기술의 발달로 선박의 대형화, 고속화가 급속하게 이루어져 왔으나. 1912년에 발생한 “타이타닉(Titanic)”호 침몰사고, 1967년 영국 남서해안에서 발생한 “토리 캐니언(Torrey Canyon)”호 좌초사고, 그리고 1989년 미국 알래스카해안에서 발생한 “엑손 발데즈(Exxon Valdez)”호 좌초사고 등의 대형 해양사고는 수많은 인명과 재산상의 손실 그리고 치명적인 해양환경오염피해를 가져왔다.

지난 10년(1991~2000)간 국내에서 발생한 전체해양사고는 총 6,724건으로 관련선박척수로는 8,369척이었다. 이들 해양사고 중 높은 발생빈도를 보이고 있는 “선박충돌사고” 건수는 총 1,467건으로 관련된 선박척수만도 3,027척이었다. 또한, 선박충돌사고를 포함한 각종 해양사고로 인하여 발생하는 인명 피해는 연간 약 250명, 해양오염방제비용을 포함한 직접적인 재산상의 피해액은 연간 약 2,000억 원에 이르는 것으로 추정되고 있다(해양수산부, 2000; 중앙해양안전심판원, 1996, 2001). 이와 같은 국내 현실에 비추어볼 때, 해양사고의 예방과 각종 피해의 최소화, 그리고 선박운항시스템의 효율적인

* 정회원, wjyang@mail.mmu.ac.kr 061)240-7069

관리 등이 철저히 요구된다.

한편, P&I Club의 클레임 분석 및 각 기국정부의 해양사고 원인 조사, IMO에서 집계한 해양사고 등의 통계에 따르면, 해양사고 발생원인 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것은 인적요소(Human Factor)이다(BIMCO, 1993). 이러한 사실은 해양사고에 있어서 인적요소의 역할과 그 중요성을 크게 부각시키게 되었고, 그에 따라 체계적인 연구를 통하여 인적요소로 인한 해양사고를 방지하는 것이 오늘날 중요한 이슈로 되었다(IMO, 1995; D.T. Bryant, 1991).

그러나, 우리나라의 경우 해양사고 발생의 주된 원인이라 할 수 있는 인적요소에 대한 과학적인 연구가 부족한 실정이다. 해상에서 발생하는 해양사고 중에서 선박충돌사고는 인명·선박손실, 해양환경오염을 유발하는 심각한 사고로서 그 피해정도가 크고, 사고의 발생원인이 매우 다양하고 복잡하게 상호관련 되어 있기 때문에 원인규명이 쉽지 않아 사고예방대책 수립에 어려움이 많다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 해양사고 통계 데이터를 근거로 선박충돌사고의 발생빈도, 사고결과, 위험성에 대한 현황을 분석하였다. 또한, 선박충돌사고의 주원인인 인적요소의 계층구조와 각 요소간의 상호관계를 정량적으로 분석하기 위해서 인적요소의 세부적인 파라미터를 추출하여 해양관련 전문가 집단을 대상으로 양케이트 조사를 실시하였다. 회수한 데이터를 분석하여 시스템구조화 수법으로 이미 그 유효성이 검증된 퍼지구조모델(Fuzzy Structural Modeling; FSM)기법을 이용하여 선박충돌사고에 대한 인적요소의 구조분석을 실시하였다. 그 결과 선박충돌사고 원인에 대한 사고발생과정과 각 요소간 상호관계를 파악하여 사고예방대책마련 우선순위를 마련할 수 있는 선박충돌사고발생요인의 구조화 모델을 제시하고자 한다.

2. 선박운항시스템의 분석수법

2.1 선박운항시스템

선박운항시스템은 선박의 안전항해를 확보하여, 인명을 보호하고, 선박피해 및 해양환경오염피해를 최소화하는데 그 목적이 있다. Fig.1은 입력 및 처리, 출력, 피드백, 제어요소의 기능적 구성과 이 시스템에 영향을 미치는 외부환경과의 관계를 도시한 것이다. 이 시스템은 항해관련 전문지식, 기술, 직무, 절차 등과 같은 내부구성요소와, 항행교통밀도, 항행원조 시스템, 교통관제시스템, 자연조건 등 선박 이외의 외부적 항행환경이 유기적으로 연결되어 지속적으로 상호작용 하는 시스템구조로서, 시스템의 제어부에 해당되는 인적·물리적 요인의 역할이 운항시스템의 안전과 밀접하게 관련되어 있다.

Table1은 선박운항시스템의 제어부에 대한 세부적인 내용을 정리한 것으로 물리적인 요인은 선박의 조종성능, 복원성, 각종 항해장비 등이며, 인적요인은 승무원의 자질 및 자격, 항법관련 전문지식, 피로, 부주의, 안전문화, 승무원의 교육 및

훈련 등으로 구성되어 있다.

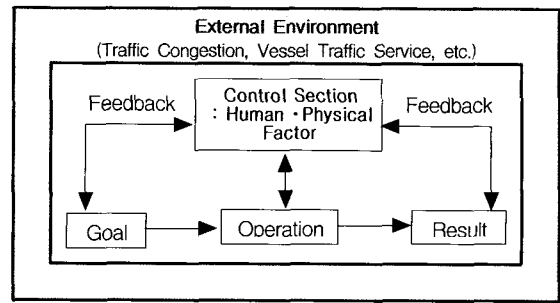


Fig. 1 Ship Operation System

Table 1 Components of Control Section

Control Section of Ship's Operation System	
Human Factor	Physical Factor
- Certification	- manoeuvrability of Ship
- Competency	- Stability
- Knowledge	- Navigational Equipments
- Health, Fatigue	- Accommodation
- Lapse, Negligence	- Ship's Design
- Safety Culture	- Ship's Structure etc.
- Communication	
- Education & Training etc.	

2.2 FSA 시스템

FSA(Formal Safety Assessment)시스템은 인명, 재산, 환경에 대한 위험을 수반하는 사건사고를 다루고, 현재의 위험성과 위험성 제어에 대해서 일반적인 개요를 수립하기 위하여 규칙제정을 목적으로 하는 분야와 선박, 설비, 운영 등의 특정한 활동에 대한 사례연구 분야에 적용되고 있다(MSC, 1996).

이 시스템은 타 산업분야에서 사용하고 있는 안전에 대한 시스템적인 위험기반접근법이며 특히, 선박운항의 모든 측면에 대한 주요안전목표를 설정하고 개개의 선박에 대하여 Safety case를 적용할 것을 강조하고 있다. 주요 안전목표는 정량적 위험평가(Quantified Risk Assessment: QRA), 비용-편익평가 그리고 어느 수준의 위험까지 수용가능한지에 대한 국제적 동의에 근거를 두어야 한다(IMO, 1997). 이 시스템에서 사용되는 용어인 사고(Accident)는 사망, 부상, 선박의 손실/손상, 재산의 손실/손상, 또는 환경 손상을 포함하는 예상치 못한 사건을 말하며, 사고범주(Accident Category)는 화재, 충돌, 좌초 등 그 성격에 따라 통계표에 보고되는 사고의 명칭을 말한다. 또한, 결과(Consequence)는 사고의 결과를, 빈도(Frequency)는 단위 시간당(예: 1년)사고 발생 횟수, 그리고 위해요소(Hazard)는 인명, 건강, 재산, 환경 등을 위협하는 잠재성을 나타내는 것이다. 한편 사고범주의 위험성(Risk)은 사고의 빈도와 결과의 심각성과의 조합으로 정의되며, 위험성 제어수단(Risk Control Measure)은 위험성의 단일 요소를 제어하는 수단 등으로 정의된다(한국선급연구소, 1999). FSA시스템은 당면한 문제를 정의하여 그에 따른 위해요소를 조사

및 평가라고 사고 유형과 연관된 위험성을 정량화 한다. 그리고 이 사고 위험성을 제어할 수 있는 방안을 강구하여 각 제어방안을 실행하기 위한 총비용과 편익을 평가하는 것으로 다음의 5단계로 구성되어 있다

- 1) 위해요소의 파악(Identification of Hazards)
- 2) 위험성 평가(Risk Assessment)
- 3) 위험성 제어방안(Risk Control Option)
- 4) 비용-편익평가(Cost-Benefit Assessment)
- 5) 의사결정을 위한 권고(Recommendation for Decision Making)

3. 국내 선박충돌사고 위험성 분석

3.1 사고현황 분석

지난 10년(1991~2000)간 전체해양사고 총 6,724건 중에서 선박충돌사고는 1,467건으로 전체 해양사고건수의 약 22%이며 발생빈도 면에서 기관손상에 이어 두 번째를 차지하고 있다. 하지만 선박용도별/사고종류별 사고발생 척수에서는 기관손상사고가 1,871척 이었고, 선박충돌사고는 3,027척으로 전체 해양사고의 약 36.2%를 차지하고 있다. Table 2는 국내 선박충돌사고를 분석하여 발생빈도순으로 정리한 것이다. 선박간의 충돌은 화물선과 어선의 충돌사고가 약 35.8%로 높게 나타나고 있다. 또한, 선박 충돌시 시정상태는 무중항해와 기상악화로 인한 항천시 항해보다는 맑은 날씨에서 약 53.2%정도 발생하였고, 충돌시 상대선박 초인거리는 1마일 미만과 상대선미발견 상황에서 약 50.4%정도 발생하였다. 그리고 선박충돌사고 원인분석에 의하면 경계소홀, 항해일반원칙 미준수 등 약 80% 이상이 운항과실이었다. 인명피해발생률은 전체해양사고의 약 28.9%, 선박피해발생률은 전체해양사고의 약 21.6% 정도로 파악되었다. 이 같은 사실은 선박충돌사고의 위험성과 그에 대한 사고예방대책이 절실히 필요함을 반영하고 있다.

Table 2 Analysis of Ship's Collision(1991-2000)

구 분	발생빈도순위
충돌선박	비어선과 어선 > 어선간 > 비어선간
시정상태	맑은 날씨 > 무중 > 기상악화(태풍)
충돌시 속도	5kt이상~10kt미만 > 5kt미만 > 10kt이상
상대선 초인거리	1마일 미만 > 미발견 > 2~5마일
충돌원인	운항과실: 항해일반원칙·항법 미준수(인적요소)
시간별	04~08시 > 12~16시 > 08~12시 > 16~20시 > 00~04시
사고종류별·선박용도별(척)	충돌>기관손상>침몰>좌초>화재·폭발>조난>전복>접촉
인명피해(명)	충돌>침몰>전복>화재·폭발>접촉·좌초>기관손상
선박피해(건)	기관손상>충돌>침몰>좌초>화재·폭발>조난>전복>접촉

3.2 위험성 평가

1) 위해요소 파악

해상에서 발생하는 해양사고 중에서 선박충돌사고와 관련

된 수많은 요소를 Table 3과 같이 하드웨어적인 고장(Hardware Failures) 및 인적요소(Human Factor), 외부적 사건(External Events)으로 분류할 수 있다.

Table 3 Identification of Hazards Related to Ship's Collision

구 분	내 용
하드웨어적 고장	선박의 구조, 설계, 추진력, 조종성능, 각종 항해장비, 전기적인 요소, 통신장비, 안전시스템 등 선박 자체적인 원인 등
인적요소	승무원의 자격, 능력, 각종 항법 및 안전관련 절차준수, 긴장, 의사소통, 안전문화, 언어능력, 교육, 훈련, 지휘통제능력(리더십), 직무에 대한 의욕 및 사기 등
외부적사건	해역, 마담, 해상상태, 조류, 해류, 시정, 혼수제한, 속도제한, 항로, 통항분리대, 예인선 운용 등

한편, 선박운항에 있어서 선박충돌사고를 유발시키는 인적요소의 주요 범주를 미국 연안경비대 Quality Action Team의 "Prevention Through People" 보고서에서 Table 4와 같이 관리적요소, 운영자요소, 작업환경요소, 지식요소, 의사결정요소로 분류하고 있다(USCG, 1995).

Table 4 Categories of Human Factor(USCG)

구 분	내 용
관리적요소	선내관리, 수로관리 및 회사의 정책과 지침에 관한 것으로 잘못된 기준, 규정, 정책, 실무지침 등의 요소
운영자요소	운항자의 피로, 부주의, 시야협소, 작업부하 등의 요소로 부주의 또는 경각심 부족, 피로 문제를 실수의 일반적인 요인으로 봄
작업환경요소	위험한 자연적 환경과 열악한 인적요소, 관련장비유지관리, 해상 또는 육상의 항로표지와 정보 등의 요소
지식요소	운항자, 도선사의 지식과 경험에 관한 것으로 정확하지 않는 기술지식, 조종선박에 관한 지식의 부족, 직무/역할에 대한 책임의식의 부족 등의 요소
의사결정요소	현재 상황에 대한 잘못된 이해, 적절하지 못한 정보를 기초로 한 의사결정과 건전하지 못한 선원의 자제 등에 관한 요소

본 연구에서는 선박충돌사고에 영향을 미치는 인적요소에 대한 우선 순위를 파악하기 위한 앙케이트 조사를 실시하였으며, 조사 대상은 해양안전심판원, 해양계 대학 및 관련분야의 전문가, 승선실무자로 하였다. 총 85부의 조사지를 발송하여 총 66부를 회수하였다. 이 회답 결과 데이터를 근거로 Table 5와 같이 전체 응답자, 해양안전심판원, 전문가, 승선실무자로 분류하여 정리하였다. 앙케이트 조사결과, 해양안전심판원, 관련분야 전문가, 승선실무자의 모든 분야 응답자는 운영자요소가 다른 요소에 비하여 충돌사고에 가장 직접적인 영향을 미치고 있다고 응답하였다. 그러나 운영자요소를 제외한 관리적, 작업환경, 지식, 의사결정요소와 같은 나머지 요소들의 우선 순위에서는 응답자의 관련분야별로 약간의 다른 특성을 보이고 있는 것을 파악하였다. 해양안전심판원에서는 두 번째 우선 순위 요소로 작업환경요소가 충돌사고에 영향을 미치는 인적요소로 응답하고 있으며, 전문가집단은 지식요소를, 그리고 승선실무자는 의사결정요소를 두 번째 우선 순위 요소로 응답하고 있음을 알 수 있다. 또한 가장 마지막 우선 순위로 해양안전심판원과 승선실무자는 관리적 요소로 응답하였고 전문가집단은 작업환경요소로 응답하였다.

Table 5 Questionnaire Results of Human Factors Category

조사 대상	응답자(명)	우선 순위
해양안전심판원 (심판관 및 조사관)	20	②-③-④-⑤-①
관련분야 전문가 (학계, 검사관 등)	27	②-④-⑤-①-③
승선실무자 (선장, 일항사 등)	19	②-⑤-③-④-①
전체 응답자	66	②-④-⑤-③-①
①관리적요소 ②운영사요소 ③직업환경요소 ④지식요소 ⑤의사결정요소		

2) 선박충돌사고 위험성

FSA에서는 위험성(Risk)을 사고발생빈도와 결과의 심각성의 조합으로 정의하고 있다. Table 6은 국내에서 발생한 해양사고통계자료를 선박충돌사고를 중심으로 정리한 것이다.

Table 6 Statistics of Ship's Collision(1991-2000)

연도	전체 선박건수	전체 사고		충돌사고						인명사상			중대인명피해			중대선박피해		
		건수	건수	건수	항내	연해	원양	척수	건수	사망	행상	부상	전손	중손	경손			
1991	108,644	678	555	222	102	15	64	16	10	10	9	20	2	26	12	26		
1992	99,085	606	476	230	108	22	54	11	3	3	16	26	27	19	33	50		
1993	92,464	678	529	250	117	21	59	23	12	10	10	32	34	29	51	37		
1994	82,356	898	699	317	156	30	71	18	5	5	9	46	20	18	29	48		
1995	81,769	911	709	375	183	23	84	20	8	8	11	69	35	44	60	77		
1996	80,354	844	661	347	170	44	104	32	15	15	12	40	16	15	34	99		
1997	86,134	1,027	840	365	181	44	72	28	6	6	8	36	41	29	28	68		
1998	95,903	936	772	295	147	28	102	11	8	8	3	24	18	12	7	59		
1999	101,307	1041	849	356	173	22	80	29	14	13	14	59	65	15	28	70		
2000	102,384	780	634	270	130	32	62	26	19	19	16	17	13	9	15	47		
합계	930,400	8,369	6,724	3,027	1,467	281	752	214	100	97	108	369	291	216	297	581		
평균	93,040	837	672	303	147	28	75	21	10	10	11	37	29	22	30	58		

Table 7은 선박충돌사고 발생빈도와 사고의 주 원인인 인적요소에 의한 충돌사고 발생빈도 그리고 해역별 충돌사고 발생빈도를 분석한 것이다. 인적요소에 기인한 충돌사고의 발생빈도는 약 85%로 거의 대부분을 차지하고 있다. 또한 충돌사고 발생해역은 연해구역 약 60%, 항내 약 23%, 원양구역 약 17%의 순으로 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 7 Frequency of Ship's Collision

구분	발생빈도	
	건수	발생빈도
연간 척당 사고 (1991~2000년)	척당 전체 해양사고	0.0090
	척당 충돌사고	0.0033
	전체 해양사고대비 충돌사고	0.3620
	척당 인명사상사고	0.0010
인적요소에 의한 사고 (1988~2000년, 건수)	전체 해양사고에서 인적요소 (3773건/5690건)	0.6630
	충돌사고에서 인적요소 (2073건/2438건)	0.8500
해역별 충돌사고 (해양안전심판원 재결분) (1991년~2000년, 건수)	항내	0.2250
	연해구역(평수구역포함)	0.6030
	원양구역(근해포함)	0.1720

Table 8은 해양사고통계에 근거한 선박충돌사고 위험성을 사고발생 해역분포, 사고로 인하여 초래되는 인명피해 결과, 전체 선박 척당 잠재적 인명손실치(Potential Loss of Life, PLL)를 나타낸 것이다. 전체 해양사고에서 선박충돌사고의

발생빈도는 3.25E-03으로 천 척당 약 3척의 충돌사고, 전체 충돌사고선박에서 약 6척당 1명이 선박충돌사고에 의한 잠재적 인명손실피해를 당하고 있음을 알 수 있다. 또한, 선박충돌사고의 해역에 대한 위험성 하위범주(Risk Sub-categories)에 속하는 연해구역의 사고발생빈도는 1.96E-03으로 사고가 가장 많이 발생하고 있었다. 그리고 이 해역에서 인적요소에 의한 발생빈도는 1.67E-03이었다. 따라서 연해구역에 대한 선박충돌사고를 예방하기 위한 적극적인 대책을 마련하여 사고를 감소시키는 것이 필요함을 알 수 있다.

Table 8 Analysis of Ship's Collision Risk

분류	발생빈도(Frequency)	결과(Consequence)	위험성(Risk)
Collision	0.00325	0.167 (506/3,027)	0.00544 (506/93,040)
Harbours	0.00073	0.0376	0.00122
Coastal Areas	0.00196	0.1010	0.00328
Open Sea	0.00056	0.0287	0.00094

4. 인적요소 구조분석

4.1 FSM기법

복잡한 시스템을 정량적으로 표현하고 구조화하는데 유용한 수법인 FSM기법(田崎 榮一郎, 1988; 天笠美知夫, 1986)에서는 대상시스템을 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 으로 하고, 문맥상의 관계에 대응하여 추출된 요소간의 퍼지종속관계를 나타내는 퍼지종속행렬 $A = [a_{ij}]$ 로 표시한다. 여기서 A 는 $n \times n$ 정방행렬이며, A 의 요소 $a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 는 식 (1)의 퍼지 2항관계에 의해 주어진다.

한편, a_{ij} 는 요소 S_i 가 S_j 에 종속한 정도(Grade)를 나타내는 것이다.

$$a_{ij} = f_r(S_i, S_j), 0 \leq a_{ij} \leq 1 (f_r : S \times S \rightarrow [0, 1]) \quad (1)$$

구조모델을 구성하기 위한 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

Step 1. 퍼지종속행렬의 결정

퍼지비반사율(非反射律), 퍼지비대칭율(非對稱律)을 만족한 퍼지종속행렬 $A = [a_{ij}]$ 를 설정하고, 퍼지반추이율(半推移律)을 만족하는 A 로 수정한다. 퍼지비반사율, 비대칭율, 반추이율을 다음과 같이 정의된다. 단, 여기서 임계값(Threshold Value) P 는 미리 주어진 반개구간 $(0, 1]$ 의 실수로 한다.

1) $\forall (S_i, S_j) \in S \times S$ 에 대하여 $f_r(S_i, S_j) \leq P$ 가 만족하면 퍼지비반사율 성립한다.

2) $\forall (S_i, S_j) \in S \times S (i \neq j)$ 에 대하여 $f_r(S_i, S_j) < P$, 또는 $f_r(S_j, S_i) < P$ 가 성립하면 퍼지비대칭율이 성립한다.

3) $\forall (S_i, S_j), (S_j, S_k), (S_i, S_k) \in S \times S, (i \neq j, j \neq k, i \neq k)$ 에 대

해서 $M = \bigvee_{j=1}^n (f_r(S_i, S_j) \wedge f_r(S_j, S_k)) \geq P$ 일 때, $f_r(S_i, S_k)$

$\geq M$ 가 만족하게되면 퍼지반추이율이 성립한다.

Step 2. 레벨집합 및 블록집합의 구성

추출된 요소가 어느 계층에 속하는지, 그리고 계층과 계층 간의 결합관계를 부여하는 “최상층레벨집합 $L_t(s)$ ”, “중간레벨집합 $L_i(s)$ ”, “최하층레벨집합 $L_b(s)$ ”, 및 “독립레벨집합 $L_{is}(s)$ ”은 각각 다음 식 (2), (3), (4), (5)와 같은 정의에 의해서 결정된다.

$$L_t(s) = \left\{ S_k \mid \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P \leq \bigvee_{i=1}^n a_{ik} \right\} \quad (2)$$

$$L_i(s) = \left\{ S_k \mid P \leq \bigvee_{i=1}^n a_{ik}, P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj} \right\} \quad (3)$$

$$L_b(s) = \left\{ S_k \mid \bigvee_{i=1}^n a_{ik} < P \leq \bigvee_{j=1}^n a_{kj} \right\} \quad (4)$$

$$L_{is}(s) = \left\{ S_k \mid \bigvee_{i=1}^n a_{ik} < P, \bigvee_{j=1}^n a_{kj} < P \right\} \quad (5)$$

각 레벨집합정의의 “ $\vee a_{ij}$ ”는 $\max(a_{ij})$ 를 의미하고, 레벨집합 $L_b(s)$ 에 속한 요소 S_i 가 종속한 $L_i(s)$ 의 요소집합 $B(s_i)$ 에서 블록(Block) 집합이 정의된다. 즉, 단일계층(Single Hierarchy)집합의 최상층레벨집합은 블록집합이라고 말하고 Q_j 로 표시하고 관계 $Q_j \subseteq L_t(s)$ 가 성립한다. 동일 블록 Q_j 에 속한 요소에 관해서 요소간의 종속관계를 표시한 행렬을 퍼지종속행렬에서 구성한다. 이때 각 블록에 대응하여 구성된 소행렬을 단일계층행렬 $A^{(j)}$ 이라 정의한다.

Step 3. 수정행렬 A' 구성

각 요소간의 종속관계를 구조분석하기 위하여 Step 2.에서 구해진 $L_i(s)$ 의 행과 $L_b(s)$ 의 열, $L_{is}(s)$ 의 행과 열을 제거하고 남은 행과 열로 A' 를 다시 구성한다.

Step 4. 단일계층행렬의 구성

Step 3.에 의해서 재구성된 A' 로부터 블록집합 Q_j 에 따라 단일계층행렬 $A^{(j)}$ 를 만든다.

Step 5. 구조화그래프의 작성

퍼지 구조파라미터 λ 를 정하여 단일계층행렬 $A^{(j)}$ 에 관한 구조그래프를 구성한다. 여기서 S_j 에 대한 정착행을 S_{ik} (단, $k = 1, 2, \dots, n$)라 할 때 S_{ik} 는 식 (6)의 연산에 의해 $a \cdot j$ 는 $a \cdot j^*$ 로서 치환되어 소거되고, S_j 에 직접 종속한 요소가 결정되어 구조그래프를 구할 수 있게 된다. 여기서, []은 열벡터를 표시한다.

$$[a \cdot j] = [a \cdot j] \wedge [\overline{a \cdot i_1}] \wedge \dots \wedge [\overline{a \cdot i_n}] \quad (6)$$

4.2 자료분석

본 앙케이트 조사를 위한 인적요소의 세부항목 추출과 선정은 3-내의 해양안전심판원재결서의 충돌사고 원인 분류 자

료를 토대로 브레인 스토밍법을 이용하였다. Table 9는 앙케이트 조사를 위해 선정된 총 9개 항목의 구성요소이며, 앙케이트 조사대상은 해양안전심판원 심판관 및 조사관, 승선근무 중인 선장 및 항해사, 해양계 대학 실습선 선장과 항해사, 해양수산부 항만국통제 감사원과 항만교통정보서비스요원, 해양계 대학 관련전문가, 한국해양수산연수원 연수자중 선장과 일항사로 하였다.

Table 9 Components of Questionnaire

요소	요소의 내용	요소	요소의 내용
S ₁	견 시 불 충 분	S ₆	등화·형상물 불표시
S ₂	항 법 미 준 수	S ₇	출 음
S ₃	신호(무중·주의환기신호) 불이행	S ₈	보 고·인 계 부적절
S ₄	속 력 선 경 부적절	S ₉	기 타(본 인 기 제)
S ₅	부 무에 관한 지휘감독 부적절		

앙케이트 회답방법은 Table 9의 총 9개 질문항목 S_i ($i = 1, 2, \dots, 9$)에 대하여, “임의의 요소 S_i 는 나머지 타요소 S_j 에 어느 정도 영향을 미치는가”하는 상대적인 영향도를 직관적으로 비교하여 그 정도(Grade)를 앙케이트 조사지에 예시한 영향도를 참고하여 주관적인 값으로 회답란의 요소 a_{ij} 에 [0,1]의 값으로 기입하도록 하였다. 단, a_{ij} 는 소수점이하 1자리, 또는 2자리 값으로 응답하도록 하였으며, “기타(S_9)”항목은 이미 정해진 항목이외에 응답자가 생각하는 요소를 직접 기입하도록 한 후 총 9개 항목으로 조사를 실시하였으나, 이 항목에 대한 전체 응답자의 회답상황이 미미하여 하나의 항목으로 간주하고 분석할 수 없었다.

앙케이트 조사지의 배포 및 수집현황은 총 85부를 배포하여 66부를 회수하였는데, 실제 분석이 가능하다고 판단되는(퍼지비반사율, 퍼지반추이율을 만족하는 응답지) 유효한 응답지 25부를 선별하여 인적요소에 관한 구조분석을 실시하였다.

4.3 구조모델링

요소간의 종속관계와 계층의 세분화를 결정하는 임계값 P 와 각 계층의 요소간 일의적인 종속관계를 결정하여 구조그래프를 구하는데 필요한 파라미터값 λ 는 매우 중요하다. P 값은 그 값이 작아짐에 따라 각 레벨 수를 많이 갖는 계층구조를 형성하게 되고 또한, P 값이 작아지면 퍼지 비대칭률이 성립하지 않을 가능성이 커진다. 따라서 적당한 P 값을 할당하여 순차적으로 P 를 변화시켜가면서 가장 타당한 값을 발견하여야 한다(山下利之, 1996; 椎塚久雄, 1992). 따라서, 본 구조분석에서는 가장 적합한 임계값을 구하기 위해서 응답자의 앙케이트 회답 결과값을 근거로 하여 P 값을 “0.60, 0.55, 0.50”인 경우로 각각 나누어서 순차적으로 전체응답자에 대한 구조 모델링을 실시하였다.

퍼지종속행렬 $A^k = [a_{ij}^k]_{8 \times 8}$ ($k = 1, 2, \dots, 25$)는 25개의 앙케이트 회답데이터를 식 (7)을 이용하여 구하고 소수3째 자리에서 반올림했다. 그 결과는 식 (8)과 같다.

$$A = [a_{ij}]_{8 \times 8} = \sum_{k=1}^{25} [a_{ij}^k / 25]_{8 \times 8} \quad (7)$$

$$A = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 & S_7 & S_8 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.00 & 0.45 & 0.31 & 0.35 & 0.39 & 0.32 & 0.15 & 0.25 \\ 0.55 & 0.00 & 0.38 & 0.32 & 0.37 & 0.27 & 0.19 & 0.17 \\ 0.68 & 0.62 & 0.00 & 0.52 & 0.35 & 0.59 & 0.33 & 0.26 \\ 0.43 & 0.65 & 0.34 & 0.00 & 0.22 & 0.17 & 0.34 & 0.41 \\ 0.71 & 0.63 & 0.65 & 0.60 & 0.00 & 0.62 & 0.56 & 0.24 \\ 0.45 & 0.71 & 0.41 & 0.37 & 0.48 & 0.00 & 0.48 & 0.30 \\ 0.81 & 0.71 & 0.60 & 0.69 & 0.32 & 0.55 & 0.00 & 0.46 \\ 0.65 & 0.73 & 0.62 & 0.58 & 0.46 & 0.60 & 0.38 & 0.00 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

단, 대각요소 $a_{ij} (i=j)$ 은 편의상 0의 수치를 기입하고 있다. 이하는, 식 (8)을 근거로 하여 FSM기법의 알고리즘에 의해 구조분석을 실시하였다.

4.4 구조그래프화

전체응답자에 대한 구조분석은 국내 선박충돌사고에 대한 인적요소의 계층구조와 각 요소상호간의 관계를 분석하기에 가장 타당한 임계값을 선정하기 위하여 먼저 기술한 세 가지 경우로 P값을 나누어 순차적으로 실시하였다. 그리고 각 경우의 구조그래프결과를 국내 중앙해양안전심판원 제결서 (1988~2000년)의 선박충돌사고 원인현황 분석자료(중앙해양안전심판원, 1996, 2001)와 비교, 검토하여 임계값 "0.55"의 경우가 가장 타당함을 확인하였다. 따라서, 이 임계값을 기준으로 전체 응답자, 전문가집단, 해양안전심판원, 승선실무자 집단의 전문가 분야별로 각각 구조분석을 수행하였다. Fig. 2는 국내 선박충돌사고 원인에 대한 전체응답자의 구조분석결과 임계값 P=0.55, 파라미터값 $\lambda = 0.50$ 에 대한 최종구조그래프로서 각 요소와 관련된 수치는 상호요소간의 영향정도를 나타낸 것이다.

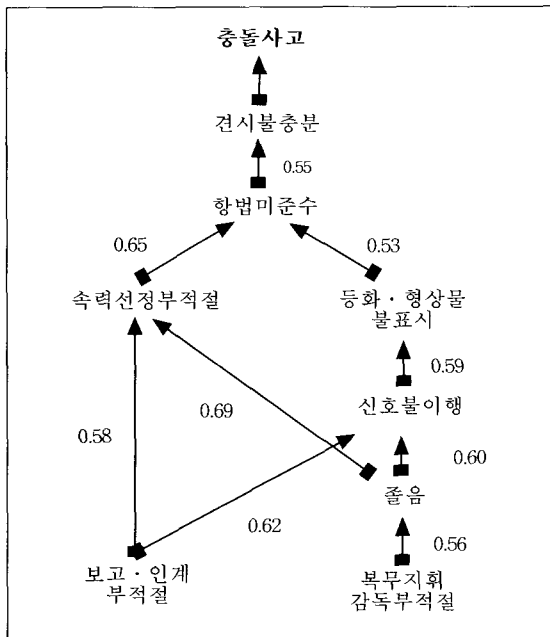


Fig. 2 Result Graph (P=0.55 $\lambda=0.50$)

1) 전체응답자 분석결과

- ① 선박을 운항하는 승무원의 “견시불충분”요소가 선박충돌 사고에 가장 직접적인 영향을 미치는 최상층레벨에 해당하는 항목임을 파악하였다.
- ② 최하층레벨의 요소 “복무에 관한 지휘감독 부적절”과 “보고·인계의 부적절”은 중간층레벨의 요소인 “속력선정 부적절”과 “신호불이행”에만 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 중간층레벨의 요소 “신호불이행”은 동일계층의 요소인 “등화·형상물 불표시”에 영향을 주고, “속력선정 부적절”은 “항법미준수”에 영향을 미치게 된다. 그리하여 이러한 영향관계를 갖는 “항법미준수”항목은 최상층의 “견시불충분”에 직접적인 영향을 미쳐 최종적으로 선박충돌사고가 발생하는 과정을 파악하였다.

2) 전문가 집단별 분석결과

Table 10은 전체 앙케이트 조사대상을 전문가집단, 해양안전심판원, 승선실무자로 세분화하여 임계값 P=0.55, 파라미터값 $\lambda=0.50$ 으로 구조 분석한 결과를 각 계층에 속한 요소별로 분류한 것이다. 각각의 분석결과에서 선박충돌사고원인에 대한 인적요소의 각 계층과 요소간 상호관계가 분야별로 약간 상이한 점은 있으나 전반적으로 FSM분석결과가 타당함을 확인할 수 있었다.

Table 10 Results of FSM

계층 분야	최상층	중간층	최하층
전체응답자	- 견시불충분	- 항법미준수 - 신호불이행 - 속력선정 부적절 - 등화·형상물 불표시 - 졸음	- 복무에 관한 지휘 감독 부적절 - 보고·인계 부적절
전문가집단	- 견시불충분	- 항법미준수 - 신호불이행 - 속력선정 부적절 - 등화·형상물 불표시	- 복무에 관한 지휘 감독 부적절 - 졸음 - 보고·인계 부적절
해양안전심판원	- 견시불충분 - 항법미준수	- 신호불이행 - 속력선정 부적절 - 등화·불표시 - 졸음	- 복무에 관한 지휘 감독 부적절 - 보고·인계 부적절
승선실무자	- 견시불충분 - 항법미준수	- 신호불이행 - 속력선정 부적절 - 등화·형상물 불표시 - 졸음	- 복무에 관한 지휘 감독 부적절 - 보고·인계 부적절

5. 결론

본 연구에서는 지난 10년간 국내 해양사고 통계자료를 분석하여 사고발생빈도와 사고로 인한 각종 피해현황을 파악하여 선박충돌사고의 심각성을 검토하였다. 이 같은 선박충돌사고에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 밝혀진 인적요인의 과실범주에 대한 우선 순위를 파악하기 위한 설문조사를 해양관련전문가 집단을 대상으로 실시하여 그 결과를 분석하였다. 또한, 선박충돌사고의 주원인인 인적요소에 대한 분석을 하기 위해, 인간의 주관적인 요소를 고려한 시스템구조 모델링에

유효한 수법인 FSM기법을 이용하여 선박충돌사고에 영향을 미치는 인적요소의 계층구조와 각 계층요소간의 상호관계를 분석하였다. 그 결과, 국내 선박충돌사고를 유발하는데 가장 많은 영향을 미치는 인적요소의 각 계층구조를 파악하고, 각 계층에 속한 요소의 상호관계를 파악할 수 있는 구조모델을 제시하였다.

본 연구의 선박충돌사고원인에 대한 인적요소의 구조분석에서는 각 요소의 종속관계를 결정하는 최적의 임계값을 선정하기 위해서 임계값(P)를 각각의 경우로 나누어 분석하였고 국내 선박충돌사고 발생에 대한 원인현황분석자료와 비교하여 가장 타당성 있는 구조모델을 선정하였다.

이상의 본 연구결과에서, 선박충돌사고발생에 가장 밀접하고 직접적인 영향력으로 작용하는 사고유발요소와, 이 요소에 간접적으로 영향력을 미쳐서 사고를 유발시키는 하위 요소들과의 상호관계를 파악하였다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

첫 번째, 선박승무원의 “건시불충분”요소가 선박충돌사고에 가장 직접적인 영향을 미치고 결국 사고를 유발하는 최상층레벨의 요소로 파악되었다.

두 번째, 최하층레벨의 요소 “복무에 관한 지휘감독 부적절”과 “보고·인계의 부적절”은 중간층레벨의 요소인 “속력선정 부적절”과 “신호불이행”에만 영향은 미치는 것으로 파악되었다.

세 번째, 중간층레벨의 “신호불이행”은 동일계층의 요소인 “등화·형상물 불표시”에 영향을 주고, “속력선정 부적절”은 “항법미준수”에 밀접하게 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

네 번째, 중간층레벨의 요소 “항법미준수”항목은 최상층의 “건시불충분”에 가장 직접적인 영향을 미쳐 최종적으로 선박충돌사고가 발생하는 것으로 파악되었다.

이 분석결과는 선박충돌사고 발생과정과 각 계층에 속한 요소가 사고에 미치는 영향력을 이해하고, 각 요소간 상호관계를 규명하여 사고를 미연에 방지하는 효과적인 제어수단을 제공할 수 있으며, 또한 사고예방대책마련의 우선순위를 제공하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 중앙해양안전심판원, 1996, 2001, “해양안전심판사례집”.
- [2] 한국선급기술연구소, 1999, “FSA 적용지침 개발”.
- [3] 해양수산부, 2000, “해양수산통계연보”.
- [4] 田崎 榮一 郎, 1998. “ファジィ理論に依る社會システム構造化”, 別冊[教理科學] ファジィ理論への道, サイエンス社, pp.140-153.
- [5] 天笠美知夫, 1986, “システム構成論-ファジィ理論を基礎として-”, 森山書店.
- [6] 山下 利之, 1996, “ファジィ構造モデルにより職業選擇動機および 職業生活設計の分析”, 日本ファジィ學會誌, vol.8, No.5, pp.861-870.
- [7] 椎塚久雄, 伊藤節子, 1992, “ファジィ構造モデル : Case Study- 學生採用意の意識構造-”, 經營の科學.
- [8] BIMCO Bulletin 5/93, 1993, Oct, p.12.
- [9] D. T. Bryant, 1991, “The Human Element in Shipping Casualties”, DOT, UK, pp. 12-13.
- [10] E. Tazaki and M. Amagasa, 1979, “Structural Modeling in a Class of Systems Using Fuzzy Sets Theory”, Fuzzy Sets Systems. Vol.2 No.1, pp. 1-17.
- [11] IMO, MSC/65/15/1, 1995, “Role of Human Element in Maritime Casualties”, 10 Feb.
- [12] IMO, MSC/Circ.829, MEPC/Circ.335, 1997, “Interim Guidelines for the Applications of FSA to IMO Rule-Making Process”.
- [13] Marine Safety Agency, UK, 1996, “A Methodology for Formal Safety Assessment of Shipping”, MSC 66 Informal Paper, 16 May.
- [14] Quality Action Team, USCG, 1995, “Prevention Through People”, 15 July.

원고접수일 : 2003년 3월 31일

원고채택일 : 2003년 5월 26일