

# 상선 운항 사고의 양적 위기평가기법 개발

임 정 빈\*

† 목포해양대학교 해상운송시스템학부 부교수

## Development of Quantitative Risk Assessment Methodology for the Maritime Transportation Accident of Merchant Ship

Jeong-Bin Yim\*

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

**요 약 :** 본 논문에서는 상선의 운항 사고에 관한 양적 위기평가에 관한 실험적인 접근방법들을 기술했다. 이 연구의 목적은 국제해사기구의 공식 안전성 평가(FSA)를 기반으로 운항 사고에 크게 기여하는 요소들을 분석하고, 양적 위기평가기법에 기반을 둔 운항 사고의 확률적인 위기수준을 평가한 후, 선박 안전을 저해할 수 있는 운항 사고 위기를 예측하는 것이다. 확률지수(PI)와 심각성지수(SI)로 구성된 위기지수(RI)에 대한 운항 사고의 확률적인 위기수준은 베이저안 이론을 적용한 베이저안 네트워크를 기반으로 본 연구에서 제안한 운항사고 위기 모델을 이용해서 예측했다. 그리고 355건의 핵심 손상 사고기록으로 구성된 시나리오 그룹을 이용하여 제안한 모델의 적용 가능성을 평가하였다. 평가결과, 예측한 PI의 정답률  $r_{Acc}$ 은 82.8%로 나타났고,  $s_p \gg 1.0$  과  $s_p \ll 1.0$  에 포함되는 PI 변수들의 민감도 초과비율은 10% 이내로 나타났다. 예측한 SI의 평균 오차  $\overline{d_{SI}}$ 는 0.0195로 나타났고, 예측한 RI의 정답률은 91.8%로 나타났다. 이러한 결과는 제안한 모델과 방법이 실제 해상운송 현장에 적용 가능함을 나타낸다.

**핵심용어 :** 운항사고, 사고 위기, 양적 위기평가, 베이저안 이론, 베이저안 네트워크, 위기지수, 확률지수, 심각성지수

**Abstract :** This paper describes empirical approach methodology for the quantitative risk assessment of maritime transportation accident (MTA) of a merchant ship. The principal aim of this project is to estimate the risk of MTA that could degrade the ship safety by analyzing the underlying factors contributing to MTA based on the IMO's Formal Safety Assessment techniques and, by assessing the probabilistic risk level of MTA based on the quantitative risk assessment methodology. The probabilistic risk level of MTA to Risk Index (RI) composed with Probability Index (PI) and Severity Index (SI) can be estimated from proposed Maritime Transportation Accident Model (MTAM) based on Bayesian Network with Bayesian theorem. Then the applicability of the proposed MTAM can be evaluated using the scenario group with 355 core damaged accident history. As evaluation results, the correction rate of estimated PI,  $r_{Acc}$ , is shown as 82.8%, the over ranged rate of PI variable sensitivity with  $s_p \gg 1.0$  and  $s_p \ll 1.0$  is shown within 10%, the averaged error of estimated SI,  $\overline{d_{SI}}$ , is shown as 0.0195 and, the correction rate of estimated RI,  $r_{Acc}$ (%), is shown as 91.8%. These results clearly shown that the proposed accident model and methodology can be use in the practical maritime transportation field.

**Key words :** maritime transportation accident, accident risk, quantitative risk assessment, Bayesian theorem, Bayesian Network, risk index, probability index, severity index

### 1. 서 론

선박은 운항 중에 충돌, 좌초, 접촉 등의 사고 위기(risk)에 항상 노출되어 있다. 이러한 사고는 막대한 경제적 손실을 야기할 뿐만 아니라 인명손실, 해양오염 등의 결과를 야기하기 때문에 예방해야한다. 본 연구는 상선의 해양사고 위기를 양적으로 평가하기 위한 기법 개발에 있다.

해상에서의 위기평가 필요성은 과거 100여 년부터 현재까지 지속되고 있는 대규모 해양사고에 기인한 것인데, 1870년 HMS CAPTAIN호의 500여명 희생자 발생 사고를 시작으로, 2007년 12월 샌프란시스코 만(San Francisco Bay)에서의

COSCO Busan호 해양오염사고까지 해양사고는 꾸준히 발생하고 있으며, 이를 예방하기 위한 국제적인 노력이 이어져왔다. 그 결과 2002년 IMO(국제해사기구)에서 공식안전성평가기법(Formal Safety Assessment, FSA)(IMO, 2002)이 제안되었고, 계속해서 FSA 적용에 관한 다양한 보고서가 제출되었으며, 2006년 10월 MSC-MEPC.2/Circ.6(IMO, 2006)에서는 인적 요소에 대한 연구가 미흡함을 지적한 바 있다.

한편, FSA가 2002년에 IMO에서 제안되기까지 FSA의 문제 해결방안과 다양한 분야에의 적용방법 등에 관해서 많은 선행 연구들이 다음과 같이 보고된 바 있다. Michael 등(1997)은 위기관리 기법에 일반적으로 사용되고 있는 확률적 위기 평가기

\* 교신저자 : 임정빈(중신회원), jbyim@mmu.ac.kr 061)240-71702

법(Probabilistic Risk Assessment, PRA)의 오류발생 문제에 관한 분석과 해결방안을 보고하였다. Curtis(1998)는 핵 발전시설의 위기평가기법을 개발하면서 조건부 핵심손상 확률(Conditional Core Damage Probabilities, CCDP)과 핵심손상 데이터(Core Damaged Data, CDD)의 개념을 도입하였는데, 본 연구에서도 CCD의 개념을 사고기록 데이터 모델(Historical Data Model, HDM)에 도입하였다. 2000년대 들어 해상 위기관리 연구는 급진전을 보이는데, 선급 ABS(2000)에서는 해양 시스템 및 해상 시설물에 대한 위기평가 절차와 방법에 대한 지침서를 간행하였고, Martha 등(2000)은 해상운송 시스템과 같이 변수가 많고 다양한 상황이 분산되어 있는 대규모의 시스템에 대한 위기관리 모델 개발과 실험결과를 보고한 바 있다. 이어서 Jason 등(2000)은 프린스 윌리엄 만(Prince William Sound)에서의 원유수송 위기평가에 조건부 확률 개념을 도입하여 평가하였다. Harvard 등(2001)은 선급 DNV에서 개발한 MARCS(Marine Accident Risk Calculation System)를 이용한 실험결과를 보고하였다. 그리고 DNV에서는 해상 부유생산 시스템의 안전성 평가에 QRA(Quantitative Risk Assessment)를 기반으로 FSA를 적용하여 위기수준을 결정하는 바 있다(DNV, 2002). 그리고 Marcus(2002)는 QRA 적용시 발생하는 다양한 불확실성(uncertainty)에 대한 평가를 시도하고, 이를 해결하기 위한 몇 가지 방안을 제시하였다. 영국 해상-연안경비대(MCA)에서는 테임즈 강(River Thames)에서 운항하는 여객선들의 위기평가에 FSA를 적용했으며(MCA, 2005), Christos (2005)는 FSA의 실제 현장 적용을 위한 다양한 기법과 실험적인 결과를 박사학위 논문으로 제출한 바 있다. 그리고 2007년 미 연안경비대에서는 수 천 쪽에 달하는 방대한 규모의 해상 위기관리 매뉴얼을 제공한 바 있다(USCG, 2007).

지금까지의 해상에서의 위기관련 연구는 대부분 특정 해역이나 특정 선박 및 특정 산업분야를 대상으로 연구를 진행한 것이기 때문에 본 연구와 같이 세계를 운항하는 상선의 위기 관리에 적용하기 위해서는 새로운 개념과 기법의 개발이 필요하다. 한편 국내에서는, 위기상황 가시화 시스템 구축(임 등, 2000), 해상안전용 위기관리 시스템 구축(구 등, 2001), 해양사고 수량화 D/B 구축과 분석(임, 2003a), 해양사고 예측모델 구현(임, 2003b), 3차원 통계 가시화 시스템 구축(임, 2003c), 선박운항 사고 예방을 위한 이론과 모델(임 등, 2007) 등이 보고된 바 있다.

## 2. 연구개발 접근 방법

### 2.1 선박운항 위기발생 메커니즘

Fig. 1은 선박운항 사고 원인부터 결과까지 일련의 인과관계를 나타낸 선박운항 위기발생 메커니즘이다. Fig. 1의 운항 사고 연계 고리(Maritime Accident Chain)를 보면, 통상적인 운항 상태(Normal States)로부터 선원의 지식결여, 관리부재 등 사고의 원인이 되는 '위험요소'(Hazard)가 생성되면, 환경,

인적오류 등과 상호작용 되어 '위기인자'(Peril)가 활성화되고, 그 결과 충돌, 좌초 등의 사고를 야기하는 '위기'(Risk)가 창출된다. 이러한 위기는 선체손상, 선원사망 등의 '결과'(Consequence)로 이어져서 최종적으로 수리비용이나 환경복원 등의 '영향'(Impact)으로 전이된다. 이러한 위기는 Fig. 1의 위기저감/예방(Risk Reduction/Prevention)에 나타난 수단이나 방법을 적용하여 연계 고리의 어느 하나를 절단할 수 있다면 사전에 위기를 저감하거나 예방할 수 있다.

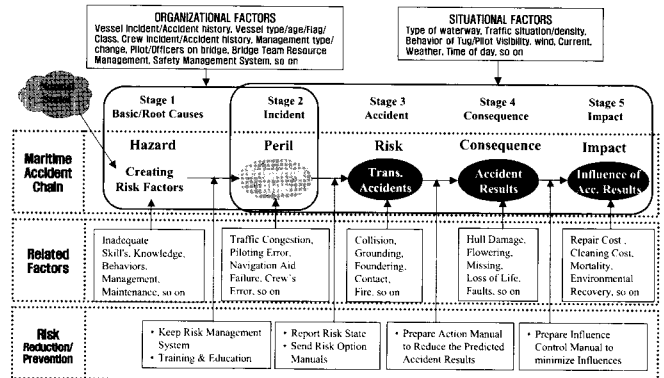


Fig. 1 Maritime accident chain with related factors and risk reduction/prevention

### 2.2 목표 시스템 개요 및 연구범위

Fig. 2는 향후 본 연구를 통하여 개발될 최종 목표 시스템의 흐름도이다. 위기관리 시스템이 작동하면, 온/오프 라인(On/Off-line)을 통해 선원정보, 선박정보, 기상정보 등이 입력된다. 그리고 사전에 입력 데이터에 대한 변수들의 조합으로 구축한 조건부 확률 테이블(Conditional Probability Table, CPT)과 조건부 비용 테이블(Conditional Cost Table, CCT)을 호출하여 각 선박마다의 위기수준 RI(Risk Index)를 구하게 되는데, CPT를 이용하여 해당 입력 데이터 변수들의 조합에 대한 확률적인 위기지수(Probability Index, PI)를 구하고, CCT를 이용하여 위기의 심각성을 나타내는 심각성지수(Severity Index, SI)를 구해서 RI를 계산한다. 그리고 각 선박에 대한 RI는 모니터에 가시화시켜 관리자에게 정보를 제공함과 동시에 RI가 기준 위기수준보다 크면 이러한 위기에 대응하기 위한 위기제어선택(Risk Control Option, RCO)을 결정한다. 선택된 RCO에 따라서 위기를 예방하거나 저감할 수 있는 매뉴얼 절차로 전이되고, 이 절차에 따라서 선택된 위기대응 지침이 선박에 통보된다. 본 연구의 개발범위는 Fig. 2의 좌측 점선으로 나타난 CPT와 CCT의 구성방법 및 이를 이용한 RI 계산 이론 개발과 운항사고 모델 개발 및 평가기법 개발 등에 있다. 그리고 Fig. 2의 좌측 점선 아래에 나타난 'RI >= 6'의 의미는, RI를 위기수준이 가장 낮은 1부터 위기수준이 가장 높은 10까지로 나타내는 경우, RI가 6보다 크거나 같은 경우에는 해당 위기를 저감하거나 억제하기 위해서 다음 단계로 이동함을 나타낸다. 이와 같이 위기수준을 확률로 나타내지 않고 숫자로 나

타내는 이유는 사용자가 쉽게 위기수준을 인지할 수 있도록 한 것이다.

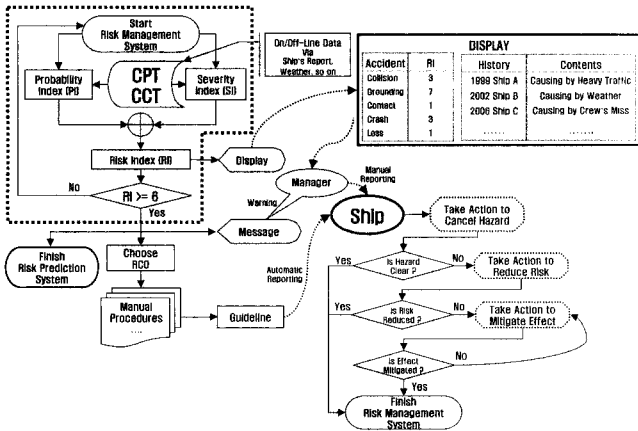


Fig. 2 Flow-chart of the final target system

### 2.3 연구개발 접근방법 검토

선박운항 위기평가에는 선박 사고기록이나 선박제원 및 현황, 선원자료, 운항지역 등 광범위한 데이터와 다양한 관련 요소의 식별 및 관련 변수들의 구성과 이를 통한 위기평가 등, 연구개발 범위가 광범위하다. 따라서 최적의 연구개발 접근방법의 검토가 우선 필요하다.

현재 해상 시설물이나 선박 등에 관한 위기평가기법으로 광범위하게 적용되고 있는 것이 IMO의 FSA인데, 이 기법은 5단계 연구개발 접근방법으로 구성되어 있다. 사전준비단계에서는 추구하는 목표와 시스템 등을 정의하고, 1단계에서는 위기요소들을 식별하며, 2단계에서는 위기를 분석하고, 3단계에서는 위기저감을 위한 다양한 위기제어방법을 제공한 후, 4단계에서 해당 위기 저감에 소요되는 비용과 이에 수반되는 편익을 평가하여 마지막 5단계에서 평가된 위기수준을 고려하여 의사를 결정한다(IMO, 2002).

이러한 FSA의 5단계 접근방법은 일반적인 연구절차에 관한 것이기 때문에 본 연구와 같이 세계를 운항하는 상선에 대해서는 새로운 접근방법의 검토가 필요하다.

#### 1) 사전준비

현재(이하  $t$ 로 표시)에 발생 가능한 위기는 과거(이하  $t-1$ 로 표시) 사건들의 다양한 증거로부터 예측하는데,  $t$ 에 대한 예측 결과에는  $t$ 에서 발생한 사건의 증거가 결여된 결과, 항상 불확실성이 개입된다. 해결방안은  $t$ 에서 발생하는 다양한 사건의 증거를 수시로 수집하여  $t-1$ 에 대한 증거를 수시로 갱신하는 것인데(Marcus, 2002; Eleye-datubo etc. 2006), 베이어스(Bayes)의 이론과 규칙에 의거한 베이저안 네트워크(Bayesian Network, BN) 및 동적 베이저안 네트워크(Dynamic Bayesian Network, DBN) 등이 주로 적용되고 있다(Kevin, 2002; Kevin, 2007; Isabelle, 2008).

본 연구에서도 BN의 이론과 DBN의 개념을 연구에 도입하였다. 그리고 선원의 인적요소에 의한 사고는 전체 사고의 80% 이상을 차지하는 중요한 요소로 알려져 있는데(Martha et. al, 2000), 현재 인적요소에 대한 연구가 진행 중이고, 그 내용이 방대하기 때문에 본 논문에서는 논외로 한다.

#### 2) 위기요소식별

위기요소식별(Hazard Identification, HAZID)은 선박운항 중 발생 가능한 위기요소를 발굴하고, 위기요소가 야기할 수 있는 위기 시나리오(Scenario)를 정의하는 것이다. HAZID를 위한 기법으로는, 충분히 설명 가능한 단어로 기술하여 위기요소를 분류하는 HAZOP(Hazard and Operability), 전문가들의 지식을 기반으로 의견토의를 거쳐 분류하는 SWIFT(Structured What-IF Checklist Technique), 전기나 기계 등의 고장상태를 분석하는 FMECA(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) 등이 있다(DNV, 2002; ABS, 2000; USCG, 2007). 본 연구에서는 주로 HAZOP을 적용하여 다양한 사고기록을 목록화하고, 전문가집단에 의한 SWIFT를 통해서 다양한 위기요소 사이의 영향관계와 사건을 파악한 후, 사고원인과 결과 사이의 관계를 표현하는 영향 다이어그램(Influence Diagram, ID)을 작성하여 위험요소의 인과관계를 명확히 하였다.

그리고 본 연구에 적용한 모든 자료는 STX 포스(주) 선박관리회사에서 제공한 것인데, 특히 과거 사고기록에는 핵심적인 사고만이 기록되어 있다. 이러한 핵심적 사고 데이터(Core Critical Data, CCD)는 현저한 사고를 야기한 시나리오 집단으로 고려할 수 있기 때문에(Michael, 1997), 본 연구에서는 과거 사고기록 자료를 하나의 시나리오 집단으로 고려하여 연구에 적용하였다. 일반적으로 상세한 실제 사고기록을 획득할 수 없는 경우 별도의 시나리오를 구축하여 평가한 위기의 적합 여부를 검토하게 된다.

그리고 HAZID를 위한 모델로는, 다양한 산업분야에서 발생하는 인간의 오류나 기기의 고장확률 등을 준용하여 평가하는 확률모델(Probabilistic Model, PM)(Joseph, 1982)과, 사고기록에 나타난 상황을 기반으로 구축한 사고기록 데이터 모델(Historical Data Model, HDM)(Marcus, 2002) 등이 있다. 확률모델은 사고기록 데이터를 충분히 확보할 수 없는 경우 권고되는 것으로, 인적오류평가(Human Resource Assessment, HRA)를 추가하여 위기를 식별한다. 이러한 모델 중에서 HDM이 기준인데, 문제는 사고기록에 나타나지 않은 예측하지 못한 사건에 대해서는 위기요소식별이 불가능하다. 이러한 문제에 대해서 본 연구에서는 전문가 집단에 의한 브레인스토밍(brainstorming)을 통해서 발생 가능한 모든 위기를 식별하고, 또한 선박으로부터 수시로 실시간 정보를 획득하여 과거에 식별하지 못한 위기요소에 대응하는 시스템을 고려하였다.

3) 위기분석

위기분석은 사고의 원인과 결과 및 영향 등을 상세히 조사하는 단계이다. 현재까지 보고된 다양한 연구에서는 사고의 원인분석에 빈도(frequency)를 적용하고 있는데, 빈도  $F$ 는 선박의 생명주기  $Y_{ship-years}$ 에 대한 사고건수  $N_{accident-number}$ 의 비율로 다음 식(1)으로 나타내고(IMO, 2002),

$$F = \frac{N_{accident-number}}{Y_{ship-years}} \quad (1)$$

영향은 다음 식(2)과 같이 선박의 생명주기  $Y_{ship-years}$ 에 대한 사망자 수  $N_{fatalities}$ 로 나타낸 PLL (Potential Loss of Life)로 기술하고 있다.

$$PLL = \frac{N_{fatalities}}{Y_{ship-years}} \quad (2)$$

본 연구에서는 통계기법을 적용하기 위해서 확률  $P$  ( $0 \leq P \leq 1$ )로 사고 원인을 분석하고, 연구 대상이 여객선이 아닌 상선인 점을 고려하여 영향은 경제적인 요소를 고려한 손실비용으로 평가했다.

4) 위기평가

위기평가는 해당 위기수준을 양(quantitative)이나 질(qualitative)로 평가하는 단계이다. 이러한 위기평가의 경우 FSA에서는 위기분석 단계에 포함되어 있는데, 위기평가는 위기수준을 결정하는 중요한 단계이기 때문에 본 연구에서는 다음과 같이 별도로 고려한다.

위기평가 방법에는, 질적위기평가(Qualitative Risk Assessment, q-RA), 반-양적위기평가(Semi-Quantitative Risk Assessment, S-QRA), 양적위기평가(Quantitative Risk Assessment, QRA), 가치기준접근(Value-Based Approaches, VBA) 등 다양한 방법이 보고되어 있다(DNV, 2002; USCG, 2007). 여기서 q-RA와 QRA 모두 영문 머리문자로 약칭하면 QRA인데, 일반적으로 위기관리에서는 질적위기평가를 QRA로 칭한다.

현재까지 가장 널리 적용되는 q-RA의 핵심은 위기 매트릭스(Risk Matrix)의 적용이다. 이 방법은 지수로 나타낸 빈도(FI)와 지수로 나타낸 심각성(SI)을 조합하여 해당 위기를 위기지수(RI)로 평가하는데, ISO에서 국제표준 Draft 17776으로 제시한 위기 매트릭스는  $5 \times 5$ 의 구조를 갖고, FSA에서는  $4 \times 7$  매트릭스 구조를 제안하고 있다(Christos, 2005). S-QRA는 QRA에서 발전된 방법으로, 위기 매트릭스 보다 한 단계 깊이 분석할 수 있다. QRA는 가장 우수한 위기평가 방법 중 하나지만 확실한 장점이 확보된 경우에만 이 방법을 적용한다. 본 연구에서는 QRA를 기반으로 사고 확률 지수로 나타낸 PI와 사고의 심각성을 비용함수로 나타낸 SI를 개발하고, 사고 시나리오 기반의 통계결과로부터 별도의 위기수준 기준을 결정한 후,  $5 \times 5$  위기 매트릭스를 구성해서 위기지수 RI로 각 선박들의 위기를 평가했다.

5) 의사결정

의사결정은 위기평가 단계에서 계산한 RI에 대해서 가용한 대응방안을 모색하기 위한 절차이다. 중요한 것은 다양한 사고에 대한 RI의 순위결정과 위기 대응을 위한 의사결정 대안의 구성이다. 의사결정 단계는 목표 시스템 구축 후 결정할 사항이기 때문에 본 연구에서는 논외로 한다.

3. 선박운항 위기 평가기법 제안

3.1 운항사고 모델 검토

선박의 운항사고 모델을 구축하는 경우, 사고의 원인과 결과 사이의 인과관계를 명확하게 정의해야한다. 인과관계는 그 래프를 이용하여 시각화하는 방법, HDM 기반의 통계적 분석 방법 등이 있는데, 본 연구에서는 이들 양자 모두를 검토했다.

우선 QRA를 적용하기 위하여 가용한 모든 자료를 수집하고 분류 및 검토하여, 수치로 변환한 수량화 데이터 베이스(Numerical Data Base, N-D/B)를 구축했다(임, 2003a; 임 2003b; 임, 2003c; 임 등, 2007).

Fig. 3은 사고 위기에 대한 모델링 방법이다. 좌초, 접촉 등의 사고에 대한 확률은 어떠한 기회(Opportunity)에 대해서 발생한 사고원인(Incident)의 조건부 확률  $P(\text{Accident} | \text{Incident}, \text{Opportunity})$ 로 계산되는데, 이를 위해서는 어떠한 기회에 대한 확률  $P(\text{Opportunity})$ 와, 기회와 사고원인의 조건으로 발생하는 확률  $P(\text{Incident} | \text{Opportunity})$ 가 우선 구해져야 한다.  $P(\text{Opportunity})$ 는 HDM에 기록된 시스템 상태로부터 계산하고, 여기에 선박제원, 선원, 기상, 화물 등의 구조적인 요소(Organizational Factors)에 대한 변수 값이 입력되면 HDM에 기록된 선박의 기술적인 오류나 선원의 오류 등에 의한 사고 데이터로부터 사고원인이 발생할 확률  $P(\text{Incident} | \text{Opportunity})$ 을 계산한다. 그리고 항만 상태, 지역 정보 등의 상황적인 요소(Situational Factors)에 대한 변수 값이 입력되면, HDM에 기록된 항만의 상태나 지역 정보 등과 관련된 사고 데이터로부터  $P(\text{Accident} | \text{Incident}, \text{Opportunity})$ 를 구한다. 그리고 사고에 대한 조건부 심각성  $S(\text{Accident} | \text{Incident}, \text{Opportunity})$ 는 기회와 사고원인의 인과관계로 구한다.

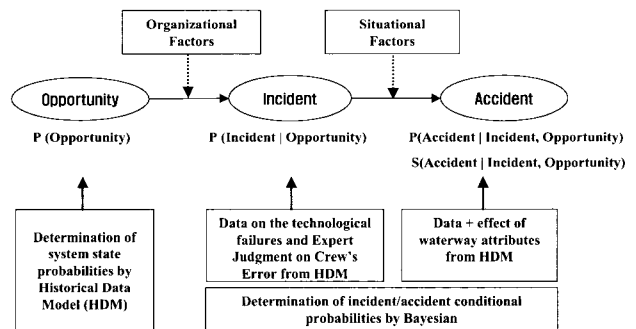


Fig. 3 Modeling methodologies to establish accident risk via incident and opportunity

그리고 Fig. 3의 조건부 확률과 조건부 심각성은 Fig. 4의 지수화 과정을 거쳐서 1단계부터 5단계까지의 위기수준으로 변환시키고, 이 둘을 합하여 2단계부터 10단계까지의 위기지수 RI를 구한다. 여기서 일반적으로 Risk=Probability×Severity로 표시되는데, 로그(logarithm) 개념을 도입하면 Risk Index = Probability Index + Severity Index와 같이 더하기 표현이 가능하여 위기수준을 숫자로 쉽게 가시화할 수 있다(Stanley Kaplan et al., 1981; IMO, 2002).

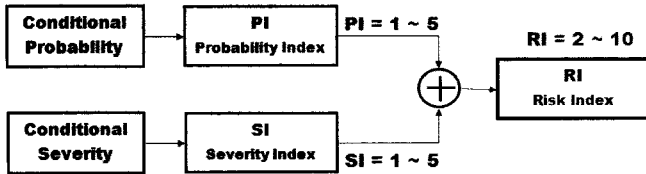


Fig. 4 Concepts of  $RI=PI+SI$

### 3.2 확률지수(PI) 계산 이론

#### 1) 베이저안 기법의 검토

선박운항 중 발생하는 사고는 원인과 결과 사이에 복잡한 인과관계를 형성한다. 이와 같이 실제계에서 발생하는 다양한 사건 사이의 확률적인 인과관계를 모델로 모두 표현하는 것은 불가능한데, 1763년 베이저스(Bayes)가 고안한 베이저안 기법을 적용하면, 직접적인 인과관계의 조건부 확률(conditional probability)을 정의한 후, 확률분포로서 효과적으로 표현할 수 있다(Judea Pearl, 2008).

변수  $X$ 의 확률  $P(X)$ 은 이산 확률과 연속 확률로 구분할 수 있는데, 이산 확률은  $X \in \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 의 변수 값으로 구성되고,  $x_i$  상태에 대한 한정된 확률 값을 갖고 있으며,  $P(x) + P(\bar{x}) = 1$ 의 이진특성과  $P(x_i) \geq 0$  및  $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$ 의 특징을 갖는다. 연속확률은  $X \in \{0,1\}$ 의 연속 변수 값에 대한 확률로서,  $P(x) \geq 0$ ,  $\int_0^1 P(x)dx = 1$ 의 특징을 갖는다.

이산 확률로 베이저안을 전개하는 경우, 이산 확률의 변수 값이 없거나 오류가 발생하는 경우 베이저안의 특성상 불확실성이 개입된다. 본 연구에서는 불확실성 문제의 해결방안으로 BN과 BN을 확장한 DBN을 적용하였다. BN은 Fig. 5에 나타난 것과 같은 그래프를 이용하여 베이저안을 전개함으로써 변수들 사이의 연관성을 질적으로 나타낼 수 있고, 변수들 사이의 결합 확률 분포(Joint Probability Distribution, JPD)를 양적으로 나타낼 수 있는데, JPD를 이용하면 변수들 사이의 확률적인 독립성을 효과적으로 기술할 수 있다(A. G. Eleye-datubo et al., 2006; Jason, et al., 2006). 그리고 BN은 어떤 사건의 상태나 결과를 나타내는 노드(node)와, 노드 사이의 인과관계를 나타내는 아크(arc)를 이용하여 모델의 그래프 구조를 설명하고, 각 노드는 노드와 직접 관련된 선행 조건으로 계산한 확률분포로 기술되며, 각 노드들과 연관된 확률 값

들은 조건부 확률 테이블(Conditional Probability Table, CPT)에 저장하여 사용한다.

본 연구에서는 HDM을 기반으로 베이저안을 전개했는데, 다음을 고려하였다.

(1) 베이저안은 HDM과 비교하여 확률 모델(Probability Model, PM)에 최적의 방법으로 알려져 있으나, PM은 충분한 사고기록을 확보하지 못하는 경우 HDM의 대안으로 적용하는 것으로, 충분한 신뢰 모델이 구축되지 않은 상태라면 불확실성 문제가 항상 개입된다. 이 때문에 PM의 경우 다른 산업분야에서의 변수 값을 준용하거나 인적요소를 반영하여 불확실성 문제를 해결하고 있다. 따라서 PM이든 HDM이든 항상 불확실성 문제는 발생할 수 있다. 본 연구와 같이 HDM을 적용하는 경우, 충분한 사고기록의 확보 여부가 관건인데, 본 연구에 적용한 HDM은 실제 해상에서 운항 중인 선박에서 과거 16년간 발생한 사고기록을 기반으로 구축한 것이기 때문에 충분한 사고기록으로 고려할 수 있다. 단, 일부 미흡한 데이터는 전문가집단에 의한 브레인스토밍 과정을 통하여 획득하고, 향후 다양한 평가를 통해 HDM과 PM을 복합적으로 고려할 예정이다.

(2) 베이저안에 이산 확률을 적용하는 경우의 불확실성 문제는, 목표 시스템이 선박으로부터 위치, 기항지, 항만상황, 화물 등의 새로운 데이터를 실시간으로 확보함으로써 변수를 수시 갱신할 수 있도록 하였다.

(3) HAZID 과정에서 식별하지 못한 요소들에 대해서는 전문 관리자를 지정하여 관리자가 수시로 모델을 변경할 수 있도록 하였다. 이것은 진부한 방법이지만, 최적의 모델이라 하더라도 새로운 시간변화에 따른 새로운 환경에 대해서는 수시로 모델을 수정해야하기 때문인데, PM을 적용하는 경우에도 이러한 문제는 동일하게 발생한다.

(4) 기존 해상에서의 베이저안 연구들은 변수의 값을 Yes(또는 1)와 No(또는 0) 등의 이진 값으로 표현하고 있는데, 선박운항 위기평가에서는 이진 값만으로 변수를 표현하는 데는 한계가 있다(Timothy, et al., 1997; Louis, 2005). 본 연구에서는 BN에 적용되는 d-분리(d-separated)와 조건부 독립성을 적용한 새로운 계산방법을 개발하였다.

#### 2) 베이저안의 전개

우선, 베이저안 추정을 위해서는 특정 사건들로부터 사전확률(prior probability)을 구한다. 그리고 특정 사건들에 관한 데이터나 증거 등의 정보를 추가로 획득하여 사전확률을 갱신함으로써 사후확률(posterior probability)을 구한다.

사건  $B$ 가 주어질 때 사건  $A$ 의 조건부 발생 확률은 베이저스의 이론을 적용하면 다음 식(3)으로 전개된다.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \tag{3}$$

여기서  $P(A)$ 는 사건  $B$ 가 발생하기 전에 계산한 사전 확률로서, 사건  $A$ 의 주변 확률이다.  $P(A|B)$ 는 사건  $B$ 가 주어질 경우 사건  $A$ 의 사후 확률로서, 사건  $B$ 의 특정 값들에 의

해서 계산된다. 사건  $B$ 의 특정 값에 대한  $P(B|A)$ 는 사건  $B$ 가 주어졌을 때 사건  $A$ 에 관한 우도함수(likelihood function)로서  $L(A|B)$ 로 나타낸다.  $P(B)$ 는 사건  $B$ 에 대한 사전 확률 또는 주변 확률로서, 사건  $A$ 의 확률을 갱신하는 하나의 증거로 적용한다.

그리고 변수들의 집합  $X \in \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ 으로 구성된 확률 모델을 고려하는 경우, 식(4)과 같이 곱하기 형태를 갖는  $X$ 에 관한 결합 확률 분포(Joint Probability Distribution, JPD)는 각각의 부모 노드(parent node)에 대한 조건부 독립성을 적용하여 전개할 수 있다(Andrew Gelman etc, 2004).

$$\begin{aligned} P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) &= P[x_1 | \text{parent}(X_1)] \times P[x_2 | \text{parent}(X_2)] \times \dots \times P[x_n | \text{parent}(X_n)] \\ &= \prod_{i=1}^n P[x_i | \text{parent}(X_i)] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 는 JPD로서, 조건부 확률 분포(Conditional Probability Distribution, CPD)와 같이 변수의 값으로 구성된 조건부 확률 테이블(CPT)로 고려할 수 있다(Timothy, et al., 2000). CPT를 이용하면 하나의 입력에 대해서 각 변수들이 서로 연계되어 취할 수 있는 값들의 조합을 만들고, 이로부터 사후확률을 간단하게 계산할 수 있다.

JPD 계산에서의 문제점은 고려한 변수의 수에 지수 함수적으로 비례하여 계산시간이 증가하는 것인데, 다음 식(5)와 같은 JPD의 인수분해 특징을 적용하면 변수의 수를 효율적으로 줄일 수 있다.  $X$ 에 대한 JPD는 확률의 체인규칙(Chain Rules)을 적용하여 다음 식(5)와 같이 순차적으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} nP(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) &= P(X_1 | X_2, \dots, X_n) P(X_2, \dots, X_n) \\ &= P(X_1 | X_2, \dots, X_n) P(X_2 | X_3, \dots, X_n) P(X_3, \dots, X_n) \\ &= P(X_1 | X_2, \dots, X_n) P(X_2 | X_3, \dots, X_n) \dots P(X_{n-1} | X_n) P(X_n) \end{aligned} \quad (5)$$

이러한 확률의 체인규칙은 인수분해에서 변수들의 순서가 바뀌더라도 허용할 수 있는데, 세 가지 사건  $A, B, C$ 을 고려하는 경우, 이에 대한 JPD는 다음과 같이 순서를 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(A, B, C) &= P(A | B, C) P(B | C) P(C) \\ &= P(A | B, C) P(B, C) \\ &= P(B | A, C) P(A | C) P(C) \\ &= P(B | A, C) P(A, C) \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 사건  $B$ 와 사건  $C$ 가 동시에 발생하는  $B \rightarrow A \leftarrow C$ 의 조건이 주어지는 경우  $A$ 의 조건부 확률은 다음 식(7)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$P(A | B, C) = \frac{P(B | A, C) P(A | C)}{P(B | C)} \quad (7)$$

### 3) 새로운 증거에 대한 변수 갱신

선박에서  $t$ 에 송신한 실시간 데이터는 과거 사건에 대한 변수 값들을 갱신하는 새로운 증거가 되는데, 이 증거는 BN의

네트워크를 통해 전파되고 반복적인 계산으로  $t$  및  $t+1$ 에서 다른 사건들의 사후확률 계산에 적용된다. 따라서 BN에 시간개념의 도입이 필요한데, BN에 시간개념을 도입한 것이 DBN이다. Fig. 5는 일반적인 DBN의 구성 개념을 나타낸다(Kelvin, 2002).  $t$ 에서 수집한 다양한 증거에 대한 입력  $E^t$ 와  $E^t$ 에 대응하는 변수 집합  $X^t$  및, 출력  $Y^t$ 을 정의하면 상태방정식은  $Z^t = (E^t, X^t, Y^t)$ 로 나타낼 수 있다.  $t-1$ 에서 상태방정식  $Z^{t-1}$ 을 통하여 사전 확률을 구하고,  $t$ 에서 증거가 입력되면 갱신된  $X^t$ 을 이용하여 사후확률을 계산하는데, 이 사후확률은 다시  $t+1$ 에서는 사전확률로서 사후확률 계산에 적용되는 등의 순환적인 형태를 갖는다. 즉, 증거에 대한 입력  $E^t$ 을 이용하여  $X^{t-1} \rightarrow X^t$ 로 변수를 갱신한 후,  $t$ 에서의 상태방정식  $Z^t$ 에 대한 사후확률  $P(Z^t | Z^{t-1})$ 을 구하고,  $t+1$ 에서 발생 가능한 사건의 증거를 선박으로부터 추가 획득하여  $P(Z^{t+1} | Z^t)$ 을 구한다. 따라서  $X^{t-1} \rightarrow X^t \rightarrow X^{t+1}$ 로 전이되는 변수 갱신이 중요하다.

일반적으로  $P(Z^t | Z^{t-1})$ 는 다음과 같이 BN에서의 직접 비순환 그래프(Directed Acyclic Graph, DAG)를 변형하여 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다(Kelvin, 2007).

$$P(Z^t | Z^{t-1}) = \sum_{n=1}^N P(Z_n^t | pa(Z_n^t), ch(Z_n^t)) \quad (8)$$

여기서  $Z_n^t$ 는  $t$ 에서의  $n$ 번째 노드이고,  $pa(Z_n^t)$ 는  $Z_n^t$ 의 부모(parent)를 의미하며,  $ch(Z_n^t)$ 는 자식(child)을 의미한다.

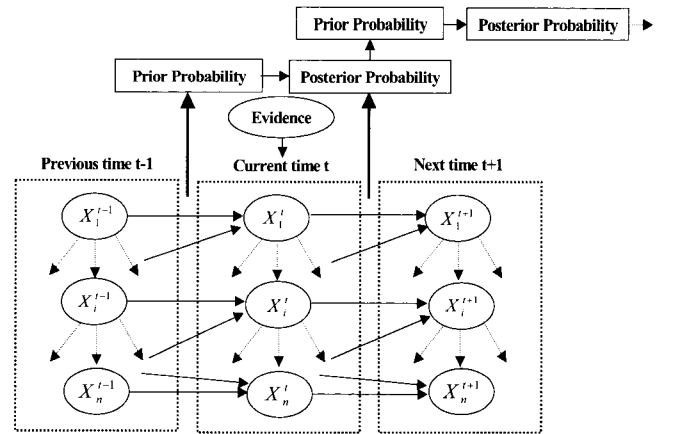


Fig. 5 General concepts to Dynamic Bayesian Network (DBN)

그리고 Fig. 3의 사고모델에 나타난 사고 원인과 결과에 대해서 위의 식(8)을 적용하면 다음과 같다. 우선, 사고(Accident)에 대한 변수를  $Acc$ , 사고의 원인(Incident)에 대한 변수를  $Inc$ , 기회(Opportunity)에 대한 변수를  $Opp$  등으로 간단히 표현한다. 그리고 세 가지 변수 중에서  $Opp$ 을 질문 변수로 두었을 때  $t$ 에서  $Opp$ 에 대한 증거로서  $E^t(Opp)$ 가 입력

되는 경우를 가정하면, 입력된 증거에 대한 BN 네트워크에서의 전과절차는 조건부 확률  $P(Opp_i = opp_i | E^t = x)$ , 또는  $P(opp_i | x)$ 을 계산하여 진행할 수 있다(Eleye-datubo et al., 2006). 그리고 위의 식(8)에 나타낸 개념을 적용하면  $E^t$ 는  $E^{t pa}_i$ 와  $E^{t ch}_i$ 으로 재구성할 수 있는데,  $E^{t pa}_i$ 는  $E^t$ 의 부분 집합으로  $Opp_i$ 의 부모이고,  $E^{t ch}_i$  역시  $E^t$ 의 부분 집합으로  $Opp_i$ 의 자식이다. 만약 부모로부터  $x = x^{pa}_i$ 가 주어지고, 자식으로부터  $x = x^{ch}_i$ 가 주어진 경우,  $Opp_i = opp_i$ 의 확률은 위의 식(8)에 위의 식(7)의 개념을 도입하여 다음 식(9)로 간단히 나타낼 수 있다.

$$P(opp_i | x) = P(opp_i | x^{pa}_i, x^{ch}_i) \quad (9)$$

$$= \frac{P(x^{ch}_i | opp_i, x^{pa}_i) P(opp_i | x^{pa}_i)}{P(x^{ch}_i | x^{pa}_i)}$$

따라서 입력  $E^t(Opp)$ 에 대한 사후확률  $P(Z^t | Z^{t-1})$ 는 다음 식(10)과 같이 부모와 자식으로 분리하여 계산됨과 동시에  $E^t(Opp)$ 는 각 부모와 자식 노드들의 정보를 갖고 있는 CPT에 대해서 갱신한다. 즉  $t-1 \leftarrow t \rightarrow t+1$ 에 대한 갱신이 가능함을 의미한다.

$$P(Z^t | Z^{t-1}) = P(Opp | E^t) = \sum_{i=1}^N P(opp_i | x) \quad (10)$$

#### 4) 선박운항 위기 평가에의 적용

실제 사고종류 변수  $Acc_i$ , 사고원인 변수  $Inc_j$  기회 변수  $Opp_{k, l(k)}$ , 선박행동 변수  $Act_m$  등을 정의하고, 이들로 구성된  $X \in \{Acc_i, Inc_j, Opp_{k, l(k)}, Act_m\}$ 을 정의하면, 위의 식(5)에 나타낸  $X$ 에 관한 JPD는 다음 식(11)로 나타난다.

$$P(Acc_i, Inc_j, Opp_{k, l(k)}, Act_m) \quad (11)$$

$$= P(Acc_i | Inc_j, Opp_{k, l(k)}, Act_m) P(Inc_j | Opp_{k, l(k)}, Act)$$

$$\times P(Opp_{k, l(k)} | Act_m) P(Act_m)$$

여기서  $Acc_i$ 는  $i$  ( $i=1,2,3,\dots,I$ )개의 사고종류 변수 값을 갖는  $Acc_i \in \{acc_1, acc_2, acc_3, \dots, acc_I\}$ ,  $Inc_j$ 는  $j$  ( $j=1,2,3,\dots,J$ )개의 사고원인 변수 값을 갖는  $Inc_j \in \{inc_1, inc_2, inc_3, \dots, inc_J\}$ ,  $Opp_{k, l(k)}$ 는  $k$  ( $k=1,2,3,\dots,K$ )개의 기회 변수에 대해서  $l$  ( $l=1,2,3,\dots,L(k)$ )개의 종속 변수 값을 갖는  $Opp_{k, l(k)} \in \{opp_{k, 1}, opp_{k, 2}, \dots, opp_{k, L(k)-1}, opp_{k, L(k)}\}$ ,  $Act_m$ 는  $m$  ( $m=1,2,3,\dots,M$ )개의 선박행동 변수 값을 갖는  $Act_m \in \{act_1, act_2, act_3, \dots, act_M\}$  등이다.

실험적으로 위에서 기술한 모든 변수를 고려하여 JPD를 계

산한 결과,  $I \times J \times K \times L(k=1) \times L(k=2) \times \dots \times L(k=K) \times M > 10^{20}$ 으로 계산양이 방대해지는 문제점이 발생했다. 그래서  $k$ 개로 각각 분리한  $Opp_{l(k)}$ 에 대한  $JPD_k$ 을 구한 후,  $k$ 개의 조건부 확률  $P_k$ 을 식(12)로 구한 후, 식(13)과 같이 평균을 취하는 방법을 적용하였다. 이와 같이  $k$ 개로 분리하여 계산한 결과 최소 3,780회부터 최대 63,000회로 계산양이 대폭 축소되었다.

$k$ 개의 기회 변수로 구분한  $Acc_i$ 에 대한 조건부 확률  $P_k$ 은 다음 식(12)로 간략화 되고,

$$P_k(Acc_i | Inc_j, Opp_{l(k)}, Act_m) \quad (12)$$

$$= \frac{P_k(Inc_j | Acc_i, Opp_{l(k)}, Act_m) P_k(Acc_i | Opp_{l(k)}, Act_m) P_k(Opp_{l(k)} | Act_m)}{P_k(Inc_j | Opp_{l(k)}, Act_m) P_k(Opp_{l(k)} | Act_m)}$$

입력  $E_k^t(Opp_{l(k)})$ 에 대한 사후확률  $P(Z^t | Z^{t-1})$ 은 다음 식(13)과 같이 평균한다.

$$P(Z^t | Z^{t-1}) = \frac{\sum_{k=1}^{K^*} P_k}{K^*} \quad (13)$$

여기서  $K^*$ 는 계산에 적용한 기회 변수의 수인데, 고정된 값이 아니고 상황에 따라 변한다. 이러한 변동  $K^*$ 를 고려하는 이유는 선박마다 송신하는 데이터의 종류가 기상이나 시간지연 등에 따라 다르기 때문에 시스템에 입력된 데이터에 대한 변수만을 고려하기 위함이다.

#### 5) 확률지수 계산

상기 식(13)으로 구한  $P(Z^t | Z^{t-1})$ 는 이러한 확률 값의 위기수준이 어느 정도인지 사용자가 쉽게 알 수 있도록 1부터 5까지의 위기지수로 나타냈다.

이러한 위기지수를 구하기 위해서는 기준이 되는 확률 값을 우선 결정해야하는데 다음과 같은 절차를 따랐다. 먼저 355건의 사고기록에 대한 N-D/B를 시나리오 집단으로 고려하여, 사고기록에 나타난 변수  $Opp_{k, l(k)}$ 와  $Inc_j$ 에 대해서  $Act_m$ 와  $Acc_i$ 의 조합으로 계산될 수 있는 조건부 확률  $P_{H_n}(Act_m, Acc_i | Inc_j, Opp_{k, l(k)})$ 을 구했다. 여기서  $H_n$ 는 사고 시나리오 번호로서,  $n=1,2,3,\dots,N_H$  ( $N_H=355$ ). 따라서  $P_{H_n}$ 에 포함된 확률 데이터의 수는  $355(N_H) \times 7(M) \times 15(I) = 37,275$ 개가 되고,  $P_{H_n} \in \{P_{1,1,1}, P_{1,1,2}, \dots, P_{H_n, M, I-1}, P_{H_n, M, I}\}$ 로 나타낼 수 있다. 이 중에서 영(0)의 확률 값을 제외한 5,541개의 확률 데이터를 가장 확률 값이 작은 순서부터 큰 순서로 재 정렬하여  $P_{D_n} \in \{P_{D_1}, P_{D_2}, \dots, P_{D_{N_D-1}}, P_{D_{N_D}}\}$  ( $N_D=5,541$ )로 두고,  $P_{D_n}$ 의 최소 값  $P_{C_n} = \min(P_{D_n})$ 와 최대 값  $P_{C_n} = \max(P_{D_n})$  사이의 일정 범위에 해당하는 확률 데이터 수를 계산하여  $D_{C_n} \in \{D_{C_1}, D_{C_2}, \dots, D_{C_{N_C-1}}, D_{C_{N_C}}\}$ 으로 둔다. 그리고 각 범위에 해당하는 누적 확률 데이터의 수  $CN_{C_n}$ 을 구했다. 따라서  $CN_{C_1} \leq CN_{C_2} \leq CN_{C_3} \leq \dots \leq CN_{C_{N_C}}$ 의 관계가 되며, Table 1에 상기 계산과정을 나타냈다.

Fig. 6은 Table 1의 방법으로 계산한 누적 확률 데이터 수  $CN_{C_i}$ 의 분포도를 나타낸다. x-축은 확률을 나타내고, y-축은  $CN_{C_i}$ 이다.  $CN_{C_i}$ 가 2.5%, 25%, 50%, 75%, 97.5%인 위치의 확률 값이 확률 지수 변환에 대한 기준 값이 된다. 이러한 5단계 퍼센트(%)를 이용한 계급구분 방법은 표준 누적분포 함수를 적용하는 경우 계급간 유의수준 고려방법을 준용한 것이다 (Stanley et al., 1981; Ronald et al., 1989).

Table 1 Calculation procedure for the cumulative number of probability data set

Probability Range	Number of Probability Data	Cumulative Number of Probability Data
$P_{C_1} \leq P_{D_i} < P_{C_2}$	$D_{C_1}$	$CN_1 = D_{C_1}$
$P_{C_2} \leq P_{D_i} < P_{C_3}$	$D_{C_2}$	$CN_2 = D_{C_2} + CN_1$
$P_{C_3} \leq P_{D_i} < P_{C_4}$	$D_{C_3}$	$CN_3 = D_{C_3} + CN_2$
...	...	...
$P_{C_{x-1}} \leq P_{D_i} < P_{C_x}$	$D_{C_{x-1}}$	$CN_{C_{x-1}} = D_{C_{x-1}} + CN_{C_{x-2}}$
$P_{C_x} \leq P_{D_i}$	$D_{C_x}$	$CN_{C_x} = D_{C_x} + CN_{C_{x-1}}$

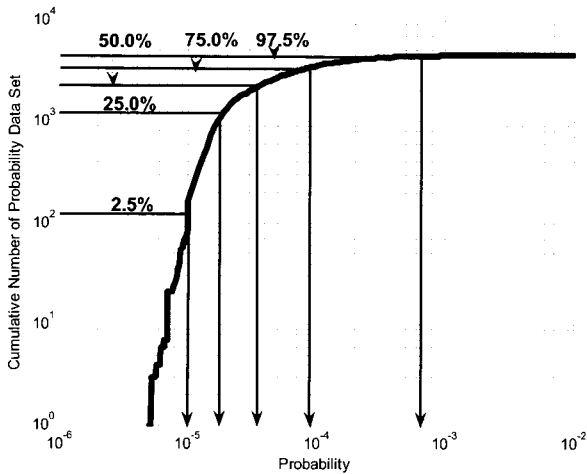


Fig. 6 Distribution of the cumulative number of probability data set

Table 2는 Fig. 6에서 구한 각 단계별  $CN_{C_i}$ 와 확률 값으로, 본 연구에서는 위기지수를 정하기 위한 확률 기준 테이블 (Probability Criteria Table, PCT)로 사용했다. 그리고 제안한 방법의 평가를 위해서 355개의 시나리오 전체에 대해서 계산한  $PI_{H_i}$ 에 Table 2의 기준을 이용해서 위기지수  $PI_{H_i}$ 을 구했다.

Table 2 Probability Criteria Table (PCT) with five scales to project the probability values into probability index

PI	Percentile (%)	Cumulative Number of Probability Data, $CN_{C_i}$	Probability Criteria
5	97.5	4,441	$6.6 \times 10^{-4}$
4	75.0	3,416	$8.9 \times 10^{-5}$
3	50.0	2,277	$3.6 \times 10^{-5}$
2	25.0	1,138	$1.8 \times 10^{-5}$
1	2.5	113	$9.9 \times 10^{-6}$

### 3.3 심각성 지수 계산

심각성지수(SI)는 과거 사고기록에 나타난 사고마다의 손실 비용(운항손실비용+수리비용+기타비용)에 대한 비용함수  $C$ 을 도입해서 전개하였다(Maxine et al., 1996). 우선, 위에서 기술한  $Acc_i, Inc_j, Opp_{k,l(k)}$  및  $Act_m$  등의 조합으로 구성 가능한  $I \times J \times K \times L(k) \times M$ 의 조건부 비용 테이블(CCT)을 구성했다. 그리고  $PI$  계산 방법과 유사한 방법을 적용하여  $Inc_j$ 와  $Opp_{k,l(k)}$  조건에 대한  $C_k(Act_m, Acc_i | Inc_j, Opp_{k,l(k)})$ 을 계산하여 각 값을 CCT에 저장했다. 그 다음에는 전문가 집단의 브레인스토밍을 통해서 심각성 지수를 정하기 위한 손실비용 기준 테이블(Severity Criteria Table, SCT)을 Table 3과 같이 구축했다. 미화(USD)로 나타낸 5단계의 손실비용 기준은 과거 사고기록에 나타난 손실비용 통계결과를 STX 포스(주) 선박 관리회사의 전문가들이 분석하여 결정할 것이다.

Table 3 Severity Criteria Table (SCT) with five scales to project the loss costs into severity index

SI	5	4	3	2	1
Cost (USD $\times 10^3$ )	200 >	200~100	100~50	50~10	< 10

그리고 입력  $E_k^t(Opp_{l(k)})$ 에 대한 변수 값을 CCT에서 호출한 후 Table 3의 기준을 적용해서  $k$ 개의 심각성지수로 구성된  $SI_k(Act_m, Acc_i | Inc_j, Opp_{k,l(k)})$ 을 구하고, 사후 심각성지수  $SI(Z^t | Z^{t-1})$ 을 다음 식(14)로 계산했다.

$$SI(Z^t | Z^{t-1}) = \frac{\sum_{k=1}^{K^*} SI_k}{K^*} \quad (14)$$

또한, 제안한 방법의 평가를 위해서 355개의 시나리오 전체에 대해서 위의 식(14)를 적용하여  $SI_{H_i}(Z^t | Z^{t-1})$ 을 구했다.

### 3.4 위기지수 계산과 의사결정

위기지수는  $RI = PI + SI$ 로 계산된다.  $RI$ 는 위기 제어 선택(RCO) 단계에서 최적의 위기대응 수단을 위한 지표로 사용되며, 각 선박마다 계산하여 해당 선박의 위기수준을 평가한다. RCO에 관해서는 추후 목표 시스템 개발 후 논의할 사항임으로 본 연구에서는 논외로 한다.

또한, 제안한 방법의 평가를 위해서 355개 시나리오 전체에 대해서 계산한  $PI_{H_i}$ 와  $SI_{H_i}$ 을 이용하여  $RI_{H_i} = PI_{H_i} + SI_{H_i}$ 을 구했다.

### 3.5 운항사고 위기 모델

지금까지 기술한 다양한 이론과 방법을 적용하여 다음 Fig. 7과 같은 운항사고 위기 모델(Maritime Transportation



Accident Model, MTAM)을 개발하였다. MTAM은 모두 6단계로 전개된다. Step 1에서는 사고 기록과 선박관련 자료를 이용하여 N-D/B를 구축한다. Step 2에서는 관련된 노드들과 아크를 결정한다. Step 3에서는 사고 원인과 결과 사이의 사전확률을 구하여 각 노드들의 조건부 확률 테이블(CPT)과 조건부 비용 테이블(CCT)을 구축한다. Step 4에서는 CPT에서 사전확률을 호출하여 규준화한 후, 베이저안 추론을 통해서 우도함수  $L(A|B)$ 을 계산한다. Step 5에서는 입력  $E^t$ 에 대한 증거를 전파하여 사후 확률  $P(A|B)$ 을 구한 후, 위기의 확률지수  $PI$ 를 구하고, 조건부 비용함수  $C(A|B)$ 을 구하여 위기의 심각성지수  $SI$ 를 구한다. 그리고 위기지수  $RI=PI+SI$ 를 구한다. 여기서  $PI$ 의 결정에는 Table 2에 나타난 확률 기준 테이블(PCT)을 참고하여 결정하고,  $SI$  결정에는 Table 3에 나타난 심각성 기준 테이블(SCT)을 참고하여 결정한다. Step 6에서는 유틸리티 노드를 생성하여 유틸리티 함수  $U$ 을 계산해서 최적의 의사결정 대안 MEU(Maximum Expected Utility)를 결정한 후  $Y^t$ 을 출력한다. Step 6은 추후 목표 시스템 개발 후 적용할 부분이다.

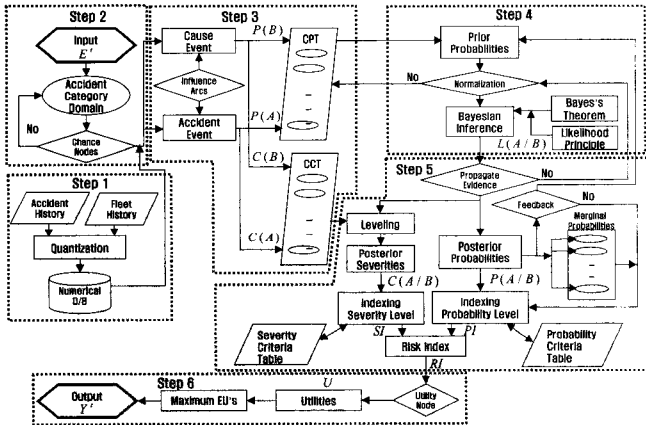


Fig. 7 Flow-chart of the Maritime Transportation Accident Model (MTAM) based on the Bayesian network

## 4. 실험 및 평가

### 4.1 실험 및 평가방법

현재 목표 시스템을 개발하고 있기 때문에 실제 선박으로부터 수신한 데이터는 없다. 그래서 본 연구에서는 위에서 기술한 바와 같이 355건의 과거 사고기록을 시나리오 집단으로 간주하여 각 시나리오마다 계산한  $PI_{H_n}$ 와  $SI_{H_n}$  및  $RI_{H_n}$ 로부터 해당사고를 예측한 후 예측된 결과를 이용하여 평가했다.

우선,  $PI_{H_n}$ 에 대해서는 다음 식(15)과 같이  $N_H$ 개의 시나리오에 나타난 실제 사고종류  $Acc_{H_n}$ 와,  $PI_{H_n}$ 로부터 예측한 사고종류  $\widehat{Acc}_{H_n}$ 의 정답률  $r_{Acc}$ 로 평가하였다.

$$r_{Acc} = \frac{N_{Acc}}{N_H} \times 100(\%) \quad (15)$$

여기서

$$N_{Acc} = \sum_{n=1}^N I_n, \quad (I=1 \text{ if } Acc_{H_n} = \widehat{Acc}_{H_n}) \quad (16)$$

$PI_{H_n}$ 로부터 사고종류  $\widehat{Acc}_{H_n}$ 을 예측하는 방법은  $N_H$ 개의 시나리오 각각에 대해서 구한  $i$ 개의 사고종류의 확률  $PI_{H_n}(Acc_i)$  중에서 가장 확률 값이 큰 사고종류를 다음 식(17)으로 구하여  $\widehat{Acc}_{H_n}$ 로 정한다.

$$\widehat{Acc}_{H_n} = \max_i [PI_{H_n}(Acc_i)] \quad (17)$$

그리고 변수들의 민감도(sensitivity)를 평가했는데, 다음 식(18)과 같이 각각의 시나리오에 나타난 변수들에 대해서 계산한 실제 사고종류의 확률  $P(Acc)$ 와 예측한 사고종류에 대한 확률  $P(\widehat{Acc})$ 와의 비율  $s_p$ 을 검토했다.

$$s_p = \frac{P(Acc)}{P(\widehat{Acc})} \quad (18)$$

그리고 심각성지수에 대해서는 다음 식(19)을 적용하여, 각각의 시나리오에 나타난 손실비용의 심각성지수  $SI_{H_n}$ 와 시나리오에 나타난 변수들을 이용하여 예측한 심각성지수  $\widehat{SI}_{H_n}$  사이의 평균 차  $\overline{d_{SI}}$ 로 평가했다.

$$\overline{d_{SI}} = \frac{\sum_{n=1}^{N_H} (SI_{H_n} - \widehat{SI}_{H_n})}{N_H} \quad (19)$$

### 4.2 평가결과

위의 식(15)을 적용하여 평가한 정답률  $r_{Acc}$ 는 82.8%로 나타났다. 이 값으로부터 일단 제안한 모델과 방법이 타당함을 알 수 있다. 그러나 운항사고 모델이 실제 사고 데이터를 기반으로 구축한 HDM을 기반으로 구축한 것이고, 시나리오 역시 사고기록을 이용한 것이기 때문에 우연히 발생한 사건 또는 예측하지 못한 사건이 없어서 82.8%의 결과가 획득된 것으로 보인다. 이러한 평가방법은 추후 목표 시스템이 구축된 다음에 실제 선박으로부터 데이터를 수신하여 재평가할 예정이다.

민감도  $s_p$ 에 대한 평가결과와 샘플을 Table 5에 나타냈다. 만약  $s_p \gg 1.0$  또는  $s_p \ll 1.0$  이라면 제안한 모델과 방법에 오류가 개입된 결과 민감도가 증가했거나 감소되었음을 나타낸다. Table 4는  $s_p$  값이 큰 것부터 작은 값 순서로 나열한 샘플인데, 최대  $s_p$ 는 11.28501로 나타났다. 전체 시나리오에 대해서 계산한 결과,  $s_p \gg 1.0$  또는  $s_p \ll 1.0$  인 경우는 10% 이내로 나타났다. 일반적으로  $s_p$ 가 100보다 크거나 0.01보다 작은 경우 가중치를 부여하여 민감도를 저하시키거나 증가시키는 부가적인 작업을 행한다(Michael, et al., 1997; Timothy, et

al., 2000). 본 연구 결과를 보면 민감도를 조정할 필요가 없는 것으로 고려된다.

심각성지수에 대한 평균 차  $\overline{d_{SI}}$ 는 0.0195로 나타났다. 즉,  $SI_{H_n}$ 과  $\widehat{SI}_{H_n}$  사이의 평균 차 값이 1.0 이하라는 의미임으로 예측한 심각성지수의 예측 정밀도가 우수함을 알 수 있다.

위기지수 평가는,  $PI$  평가에 적용한 위의 식(15)을 이용하여  $RI=PI+SI$ 에 대한  $r_{Acc}$ 을 구하여 평가했다. 결과는 91.8%로 나타났는데,  $PI$ 와  $SI$ 가 더해진 결과  $PI$ 만을 이용한 평가 결과 보다 높은 정답률을 나타냈다.

Table 4 Evaluation results on variable sensitivities between true and estimated probabilities to the scenarios with 355 cases (samples)

$H_n$	$P(Acc)$	$P(\widehat{Acc})$	$s_p$
166	0.000266	0.002999	11.28501
89	0.000236	0.001957	8.282962
...	...	...	...
292	0.013046	0.013404	1.027471
18	0.00023	0.000231	1.005348
...	...	...	...
34	0.00361	0.00127	0.35

Table 5 Evaluation results on the estimated severity indexes to the scenarios with 355 cases (samples)

$H_n$	$SI_{H_n}$	$\widehat{SI}_{H_n}$	$SI_{H_n} \sim \widehat{SI}_{H_n}$
1	2.0	2.513861	-0.51386
2	1.0	2.16931	-1.16931
3	2.0	2.528017	-0.52802
...	...	...	...
354	2.0	2.324253	-0.32425
355	3.0	2.194116	0.805884

### 5. 결 론

본 연구에서는 상선 운항 중 발생 가능한 충돌, 좌초, 접촉, 화재 등과 같은 사고의 위기를 확률적인 양으로 계산하고 위기 수준을 평가할 수 있는 양적위기평가기법을 개발하였다. 베이저안(Bayesian) 규칙에 기반을 둔 베이저안 네트워크(BN) 적용 이론과 동적 베이저안 네트워크(DBN)의 개념 등을 준용하여 많은 변수를 효율적으로 처리할 수 있는 새로운 연구개발 접근 방법과 관련 이론 및 운항사고 모델 등을 제안하였다.

제안한 모델을 이용하여 355건의 핵심 손상 사고 기록으로 구성된 시나리오에 대해서 발생 가능한 사고들의  $PI$ 와  $SI$  및  $RI$ 를 각각 예측한 결과, 예측한  $PI$ 의 정답률  $r_{Acc}$ 은 82.8%로 나타났고,  $s_p \gg 1.0$  과  $s_p \ll 1.0$ 을 벗어나는  $PI$ 의 변수들에 대한 민감도 초과비율은 10% 이내로 나타났으며, 예측한  $SI$ 의 평균

오차  $\overline{d_{SI}}$ 는 0.0195로 나타났고, 예측한  $RI$ 의 정답률은 91.8%로 나타났다.

이러한 결과로부터 제안한 양적위기평가기법의 이론과 절차 및 제안한 모델이 실제 해상운송 현장에 적용 가능함을 알았다. 현재 본 연구를 기반으로 선박운항 위기관리 시스템을 개발하고 있다. 향후 선박으로부터 송신된 실시간 데이터가 입수 되면 본 연구에서 제안한 기법들의 실제 현장 적용 가능성에 대해서 재검토할 예정이다. 그리고 선원의 인적오류에 의한 영향을 본 연구에서 제안한 모델에 추가하기 위한 연구와 사고 기록 데이터 모델(HDM)의 문제점을 극복하기 위한 확률 모델(PM)의 추가 적용에 관해서도 연구 중이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 구자영, 임정빈(2001), "해상안전용 위기관리 시스템 구축을 위한 기초 연구," 2001년 춘계해양관련학회 공동 학술 발표회 논문집, 한국항해학회, pp.80-86.
- [2] 임정빈, 구자영(2000), "해양경찰청의 위기상황 가시화 시스템 구축," 한국항해학회 추계학술발표회 논문집, pp.45-49.
- [3] 임정빈(2003a), "해양사고 예보 시스템 개발(1) : 해양사고 수량화 D/B 구축과 분석," 한국항해항만학회지, 제27권 4호, pp.359-364.
- [4] 임정빈(2003b), "해양사고 예보 시스템 개발(II) : 해양사고 예측모델 구현," 한국항해항만학회지, 제27권 5호, pp.487-492.
- [5] 임정빈(2003c), "해양사고 예보 시스템 개발(III) : 3차원 통계 가시화 시스템 구축," 한국항해항만학회지, 제28권 1호, pp.17-29.
- [6] 임정빈, 김대회, 장진민(2007), "선박관리회사의 운항사고 예측 시스템 기초설계," 2007년도 한국항해항만학회 춘계 학술대회(제1권), 제31권 제1호, pp.301-308.
- [7] ABS(2000), "Guidance Notes on Risk Assessment Application for the Marine and Offshore Oil and Gas Industries", American Bureau of Shipping, pp.1-144.
- [8] Eleye-Datubo, A. G., Wall, A., Saajedi, A., and Wang, J. (2006), "Enabling a Powerful Marine and Offshore Decision-Support Solution Through Bayesian Network Technique," Risk Analysis, Vol. 26, No. 3, pp.223-237.
- [9] Andrew, G., John, B. C., Hal, S. S., and Donald, B. R.(2004), "Bayesian Data Analysis, Second Edition", Chapman & Hall/CRC, pp.1-137.
- [10] Christos, A. K.(2005), "Formal Safety Assessment: a critical review and Future Role", Diploma Thesis, National Technical University of Athens, pp.1-138.
- [11] Curtis, L. S.(1998), "Calculating Conditional Core Damage Probabilities for Nuclear Power Plant

- Operation," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 59, pp.299-307.
- [12] DNV(2002), "Marine Risk Assessment", Offshore Technology Report 2001/063, Det Norske Veritas, pp.1-72.
- [13] Harvard, J. T., Eirik, S., and Tim, F.(2001), "A Method for Assessing the Risk of Sea Transportation : Numerical Examples for the Oslofjord", Det Norske Veritas, pp.1-8.
- [14] IMO(2002), "Guidelines for Formal Safety Assessment(FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process", MSC/Circ. 1023, MEPC/Circ. 392.
- [15] IMO(2006), "Amendments to the Guidance on the Use of Human Element Analysing Process (HEAP) and Formal Safety Assessment (FSA) in the Rule-Making Process of IMO (MSC/Cir.1022-MEPC/Circ.391)", MSC-MEPC.2/ Circ.6.
- [16] Isabelle, A., Emmanuel, G., Jean-Baptiste, D., and Judith, R.(2008), "Quantitative Risk Assessment from Farm to Folk and Beyond: A Global Bayesian Approach Concerning Food-Borne Diseases," Risk Analysis, Vol. 28, No. 2, pp.557-571.
- [17] Jason, R. W., Merrick, J. Rene, V. D., Jack, H., Thomas, M., John, E. S., and Martha, G.(2000), "A Systems Approach to Managing Oil Transportation Risk in Prince William Sound," System Engineering, 3:3, pp.128-142.
- [18] Jason, R. W. M., and Rene, V. D.(2006), "Speaking the Truth in Maritime Risk Assessment," Risk Analysis, Vol. 26, No. 1, pp.223-237.
- [19] Joseph, F., and Donald, B. R.(1982), "Probabilistic Models for Risk Assessment," Risk Analysis, Vol. 2, No. 1, pp.1-8.
- [20] Judea, P.(2008), "CAUSALITY: Models, Reasoning, and Inference", 8th Printing, Cambridge University Press, pp.9-24.
- [21] Kevin, P. M.(2002), "Dynamic Bayesian Networks: Representation, Inference and Learning", Ph. D. Thesis, Computer Science in the Graduate Division of the University of California, Berkeley, pp.1-212.
- [22] Kelvin, P. M.(2007), "Bayes Net Toolbox for Matlab", <http://www.cs.ubc.ca>.
- [23] Louis, A. C., Jr. Djangir, B., and William, H.(2005), "Some Limitation of Qualitative Risk Rating Systems," Risk Analysis, Vol. 25, No. 3, pp.651-662.
- [24] Marcus, A.(2002), "Uncertainty in Quantitative Risk Analysis - Characterisation and Methods of Treatment", Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Report 1024.
- [25] Martha, G., Jason, M., John, R. H., Tom, M., and Rene, V. D.(2000), "Risk Modeling in Distributed, Large-Scale Systems," Revised for IEEE Systems, Man & Cybernetics: A, pp.1-37.
- [26] Maxine, E. D., John, E. T., M, J. S., and Kevin, P. B.(1996), "Risk-Based Environmental Remediation: Bayesian Monte Carlo Analysis and the Expected Value of Sample Information," Risk Analysis, Vol. 16, No. 1, pp.67-79.
- [27] MCA(2005), "Formal Safety Assessment & Research Projects on Domestic Passenger Vessel Standards - A Synopsis", Maritime and Coastguard Agency, U.K., pp.1-48.
- [28] Michael, D. A., Alan, B., and Michael, G.(1997), "A Probabilistic Analysis Of Tanker Groundings," 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, pp.1-19.
- [29] Stanley, K., and Garrick, B. J.(1981), "On The Quantitative Definition of Risk," Risk Analysis, Vol.1, No.1, pp.11-27.
- [30] Timothy, A. W., Kishore, G., and Stephen, B.(1997), "Development of Risk-Based Ranking Measures of Effectiveness for the United States Coast Guard's Vessel Inspection Program," Risk Analysis, Vol. 17, No. 3, pp.333-340.
- [31] Timothy, G. F. and Eirik, S.(2000), "Modeling Ship Transportation Risk," Risk Analysis, Vol. 20, No. 2, pp.225-244.
- [32] USCG(2007), "Risk-Based Decision-Making Guidelines", <http://www.uscg.mil>.
- [33] Yuanhua, Q.(2006), "Quantitative Transportation Risk Analysis Based on Available Data/Data Base: Decision Support Tools for Hazardous materials Transportation", Ph. D. Thesis, Graduate Studies of Texas A&M University, pp.1-174.

---

원고접수일 : 2008년 9월 11일  
 심사완료일 : 2009년 2월 13일  
 원고채택일 : 2009년 2월 18일