

# 자율운항선박의 화재 사고 시나리오 위험도 모델 개발

† 이동준 · 나성\* · 김선진\* · 정정호\*

\*,† 한국선급 기술본부 시스템안전연구팀

**요약** : 자율운항선박의 해상 운용은 인간의 개입 최소화 등 새로운 운용 방식의 적용과 첨단 디지털기술의 적용으로 기존 선박의 운용과 다른 형태의 다양한 새로운 위험요소들이 발생할 것으로 예상되며, 이러한 위험을 분석하기 위한 적절한 위험도평가 방법론의 적용이 요구될 것이다. 본 연구는 기존 선박과 달리 인간의 개입이 최소화된 상태로 운용되는 자율운항선박의 화재 사고 위험도를 실시간으로 분석하기 위한 실시간 위험도 모델의 개발을 목적으로 수행되었다. 자율운항선박 화재 위험도 모델 개발을 위하여, 먼저 자율운항선박의 화재 감지 및 제어, 비상대응 기능들을 분석하고, 기능분석 결과를 바탕으로 화재 감지 및 제어 시스템들에 대한 Fault Tree Analysis를 수행하였다. 자율운항선박의 화재 시나리오 표현을 위하여 기관구역 화재와 화물구역 화재로 분류하여 Event Tree Analysis를 수행하였다. 또한, 자율운항선박 운용 외부 조건에 따라 변화하는 변수들을 식별하여 각 변수들의 변화로 인하여 발생할 수 있는 자율운항선박 화재 위험도 변화량을 검토하였다.

**핵심용어** : 자율운항선박, 기능분석, 위험도분석, 화재사고, 위험도모델

## 서론

**자율운항선박 기술의 기대효과와 위험도 평가 필요성**

- 자율운항선박 기술의 등장**
  - 환경규제 대응 위한 최적 연비, 최소 에너지 사용 선박운항기술 적용
  - 고급해기사 인력 부족 해결 및 인력오류 최소화
  - 시스템 상태 감시 및 고장 예측 기술을 통한 선박시스템 신뢰도 확보
  - 최적항로 및 최적 유지보수 계획 제공을 통한 선박운용 효율성 증대
  - 해양사고 대응 시스템 강화
- 자율운항선박 (화재)위험도 평가**
  - 새로운 기술의 적용과 함께 새로운 방식으로 운용
  - 기존과 다른 형태의 다양한 새로운 위험요소발생 가능
  - 고도화된 기술/많은 정보데이터 고려한 새로운 형태의 위험도 평가 필요

## 자율운항선박 위험도평가 절차

**자율운항선박 위험도평가 절차**

## 서론

**자율운항선박 및 자율운항시스템 고려사항**

- 자율운항 개념이 적용되는 운용 모드 및 운용개념**
  - 항해모드, 정박모드, 적하역 모드, 시스템관리모드 등
- 자율운항선박 제어 시스템**
  - 지능항해 시스템: 자율항해, 항해상황인식, 항로의사결정, 물체인식, 등
  - 기관/장비 자동화 시스템: 성능 모니터링 및 고장예측진단, 등
  - 지능형 화물관리 시스템: 화물 적/하역, 화물관리 시스템, 등
  - 비상대응 시스템: 화재 인지/소화/제어, 충돌 인지/회피/제어시스템, 등
- 육상 제어 시스템**
  - 원격제어 시스템: 안전운항지원, 사고대응, 시스템관리, 선원관리, 정보지원 시스템, 등
  - 데이터통신 제어시스템: 데이터교환 및 통신, 사이버보안 시스템, 등

## 시스템 정의 및 기능분석: Step 0

**Target Ship: 1,800 TEU Class Container Carrier**

- 목적**
  - 기존 유인선박과 자율운항선박 운용 가능 비교 및 운용 개념 이해
  - 기능목록, 하위기능 및 관련 시스템 체계적 검토
  - (타)연계 시스템과의 상호작용 검토

◆ KASS(실증선) / IMO LCA-3에 자율운항선박에 대한 위험도 모델 개발

† 교신저자 : 정희원, djlee@krs.co.kr, 070-8799-8776  
\* 정희원, sna@krs.co.kr, bjh@krs.co.kr, chchoung@krs.co.kr

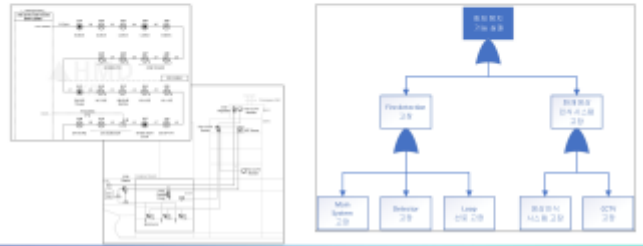
## 시스템 정의 및 기능분석: Step 0



## 고장수목 분석(FTA) : Step 2

### ● 화재 탐지 및 경보

- ☑ Case 1 - 화재탐지 (HFO Engine) - 화재탐지 센서
- ☑ Case 2 - 화재탐지 (연료전지 시스템) - 화재 탐지(가스, 열감지)
- ☑ Case 3 - 화재탐지 (화물구역 컨테이너) - 영상 인식 시스템



## 위험요소 식별: Step 1

### ● 기능분류 - 위험요소식별 (HAZID)

#### ☑ 수행목적

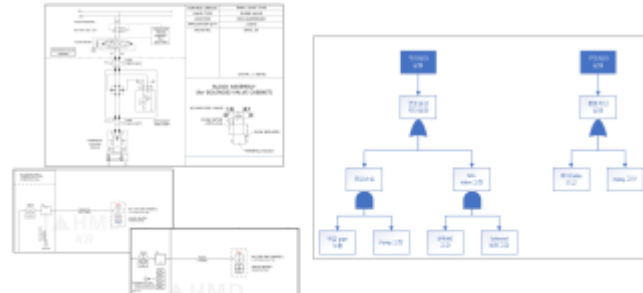
- 자율운항 선박의 잠재적 위험요소 체계적 식별
- 위험요소를 야기하는 해당 원인들의 체계적 도출
- 사고 결과가 연명/환경/재산에 미칠 수 있는 영향 추정
- 추가 안전 조치 및 권고안 식별

위험요소	원인	영향	추진사항
자율운항 선박의 잠재적 위험요소 체계적 식별	자율운항 선박의 잠재적 위험요소 체계적 식별	자율운항 선박의 잠재적 위험요소 체계적 식별	자율운항 선박의 잠재적 위험요소 체계적 식별
위험요소를 야기하는 해당 원인들의 체계적 도출	위험요소를 야기하는 해당 원인들의 체계적 도출	위험요소를 야기하는 해당 원인들의 체계적 도출	위험요소를 야기하는 해당 원인들의 체계적 도출
사고 결과가 연명/환경/재산에 미칠 수 있는 영향 추정	사고 결과가 연명/환경/재산에 미칠 수 있는 영향 추정	사고 결과가 연명/환경/재산에 미칠 수 있는 영향 추정	사고 결과가 연명/환경/재산에 미칠 수 있는 영향 추정
추가 안전 조치 및 권고안 식별	추가 안전 조치 및 권고안 식별	추가 안전 조치 및 권고안 식별	추가 안전 조치 및 권고안 식별

## 고장수목 분석(FTA) : Step 2

### ● 화재 구역 차단

- ☑ Case 1 - 가연성 연료 차단
- ☑ Case 2 - 산소 공급 차단



## 고장수목 분석(FTA) : Step 2

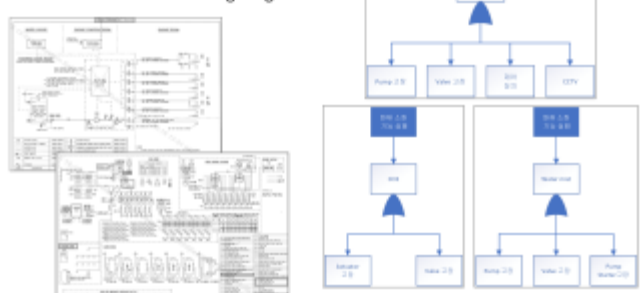
### ● 초기 사건 발생확률: 화재발생

- ☑ Case 1 - 화재발생 (HFO Engine)
  - HFO pipe line 누출에 의한 (고압) 연료유 비산
  - Hot surface 접촉에 의한 화재 발생
  - 문헌조사를 통해 발생 빈도 추산
- ☑ Case 2 - 화재발생 (연료전지 시스템)
  - 연료 Gas Pipe line 누출에 의한 화재 발생
  - 관련 시뮬레이션 프로그램 활용 (DNV Leak)
- ☑ Case 3 - 화재발생 (화물구역 컨테이너)
  - 최근 EMSA 에서 유사한 연구를 진행, 사고 데이터를 활용하여, 발생 빈도 추산

## 고장수목 분석(FTA) : Step 2

### ● 화재 구역 차단

- ☑ Case 1,2 - Water Mist, Co2
- ☑ Case 3 - Local Fire Fighting



## 신뢰도 조사 (기존/신규)

### 기존 신뢰도 데이터 조사

- 신뢰도 계산을 위해서는, 실질적인 장비 신뢰도 데이터가 필요
  - 오랜 시간 동안 사용해 온 장비의 경우, 신뢰성 있는 신뢰도 데이터 존재
  - 조사를 통해 신뢰도 데이터를 획득하여, 정리

### 기존 신뢰도 DB

- 출처
  - OREDA
  - Manufacturer's equipment spec. data
  - Papers about Reliability analysis
- 단위: FPMH(Failure per million hour) 통일
- 신뢰도 획득 어려운 장비: TBD로 표기

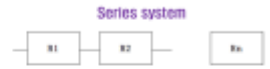


## 신뢰성 DB 보완 방안

### 정량적 신뢰도 계산 방법

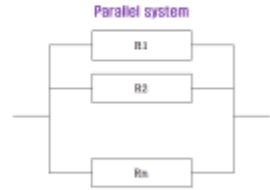
#### Series system

- $R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$
- $R_i(t) = \exp\left[-\int_0^t z_i(u) du\right]$ 
  - $z_i(u)$ : Failure rate function



#### Parallel system

- $R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$



#### 두 Parallel component의 신뢰도가 $\lambda_1, \lambda_2$ 일 경우

- $R_S(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \exp(-\lambda_2 t) - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]$

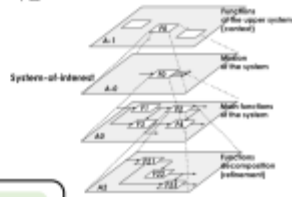
## 신뢰성 DB 보완 방안

### DB 획득이 어려운 장비의 신뢰도 추정 방안

- 장비의 수행 기능 확인
- 해당 기능을 수행할 수 있게 하는, 세부요소의 조합 구성
  - 시스템에 대한 세부요소의 구성도 확립

### 신뢰도 계산

- 세부요소 각각의 신뢰도 획득
- 구성도에 따라 신뢰도 조합, 계산



#### 신뢰도 계산 방법

- 정성적 신뢰도 계산
- 정량적 신뢰도 계산

## 결론

### 자율운항선박 Risk Model 작성 결과와 향후 연구계획

#### ① 자율운항선박 정량적 Risk Model: 화재사고

- 자율운항선박 운용 관점에서의 기능 요구사항 검토
  - KASS-자율운항선박에 추가되어야 할 기능 확인
  - 기존 유인선박 운용 대비 KASS-자율운항선박에 추가된 기능 확인
- 자율운항선박 충돌 시나리오 Risk Model (Fault Tree/Event Tree) 작성
  - 충돌 시나리오 표현 및 안전시스템 적용 가능성 검토
- 실시간 위험도표현 방안 검토
  - 실시간 Risk graph 및 Fuzzy logic 활용한 Risk 표현 검토

#### ② 향후 연구계획

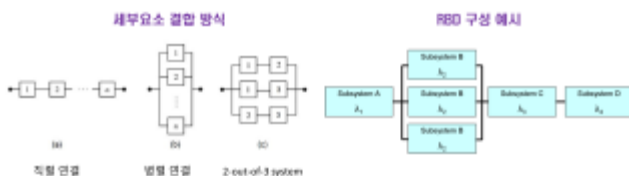
- 자율운항선박 운용에 대한 정량적 위험도 모델 보완
- 자율운항선박 정량적 위험도평가 (Formal Safety Assessment) 수행

## 신뢰성 DB 보완 방안

### 신뢰도 계산 이론

#### RBD(Reliability Block Diagram)

- 시스템의 기능을 묘사하는 Success-oriented network
- 각 세부요소의 기능이 논리적으로 연결되어, 시스템의 전체 기능을 구성
- 세부요소가 연결 형태에 따라, 직렬/병렬의 조합으로 결합됨



## 후 기

이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20200615, 자율운항선박 기술개발).