https://doi.org/10.21289/KSIC.2023.26.2.315

동적 위험 분석을 위한 사고확률 추정 방법에 관한 연구

Estimation of Accident Probability for Dynamic Risk Assessment

박병철[1], 임채옥[1], 남인혁[1], 신성철[1*]

Byeong-Cheol Park[1], Chae-Og Lim[1], In-Hyuk Nam[1], Sung-Chul Shin[1*]

〈Abstract〉

Recently, various dynamic risk analysis methods have been suggested for estimating the risk index by predicting the possibility of accidents and damage. It is necessary to maintain and support the safety system for responding to accidents by continuously updating the probability of accidents and the results of accidents, which are quantitative standards of ship risk. In this study, when a LNG leakage that may occur in the LNG Fuel Gas Supply System (FGSS) room during LNG bunkering operation, a reliability physical model was prepared by the change in monitoring data as physical parameters to estimate the accident probability. The scenario in which LNG leakage occur were configured with FT (Fault Tree), and the coefficient of the covariate model and Weibull distribution was estimated based on the monitoring data. The possibility of an LNG leakage, which is the top event of FT, was confirmed by changes in time and monitoring data. A method for estimating the LNG leakage based on the reliability physical analysis is proposed, which supports fast decision-making by identifying the potential LNG leakage at the accident.

Keywords : Lng Bunkering, Fault Tree, Reliability Physical Model, Probability of Lng Leakage, Hole Diameter, Support For Decision-Making

1* 교신저자, 부산대학교 조선해양공학과, 교수
E-mail: scshin@pusan.ac.kr
1 부산대학교 조선해양공학과

1* Corresponding Author, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University
1 Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

1. 서 론

1.1 연구배경

해양사고는 육상사고와 달리 외부 지원을 신속하게 받을 수 없으므로, 피해를 최소화하거나 방지하기 위한 사고 위험을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이렇게 초기에 위험을 예방하거나 사고를 파악하는 것에 실패하게 될 경우 2차, 3차 피해로 이어진다. 또한, 신속한 상황 보고의 실패로 효과적인 사고 대응을 위한 의사결정을 지원할 수 없거나 늦어지게 되면, 엄청난 인명 및 재산 손실을 유발할 수 있다.

사고에 대한 위험을 해석하기 위한 방안으로 정량적 위험 해석 기법은 위험 식별, 위험 추정 및 위험 평가의 세 가지 주요 단계로 구성된다. 이렇게 추정된 위험을 통해서 안전 조치와 위험을 허용 가능한 수준으로 낮추는 역할을 하는데, 이 방법론은 설계 단계에서 적용된다. 프로세스 산업에서 정량적 위험 평가(Quantitative Risk Assessment, QRA), 확률론적 안전성 분석(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 및 신뢰성 있는 사고 분석[1]과 같이 예상되는 사고 시나리오의 위험을 파악하기 위해 많이 사용된다. 기존의 위험 평가 방법은 프로세스 시설의 주요 위험을 식별하고 안전을 유지하는 데 중요한 역할을 했지만, 정적이고 일반적인 고장 데이터를 사용한다는 단점이 있다[2][3]. 앞서 말한 방법의 정적 구조는 프로세스의 동작 시간 동안 발생하는 변화를 반영하지 못한다. 또한, 일반적인 데이터를 사용하는 분석은 특정 및 다양한 시나리오에 적용되지 못하고 결과에 불확실성을 가져온다. 한편 동적 위험 평가 방법은 새로운 정보를 고려할 수 있어야 하며, 프로세스 시스템 위험 및 안전성 분석은 지배적인 동적 환경에 맞게 조정할 수 있어야 한다. 위험 평가 방법은 프로세스 시스템의 설계 단계뿐만 아니라 의사결정 지원 및 리스크 관리 도구로서 시스템의 수명시간 동안 지속적으로 고려되어야 한다[4].

LNG 벙커링 특성상 저온의 LNG를 적·하역시 배관 및 밸브로 구성되어 있는 장비는 초저온 상태를 장시간 견뎌내야 하는 특징이 있다. 거기에 배관에서 가스 누출 시 배관 내부의 흐름을 차단하는 ESD 밸브를 설치하게 되는데, 이 밸브의 경우 높은 SIL2 이상의 높은 신뢰성을 요구한다. 가스 누출 시 누출 정도에 따라 점화원을 만나게 되면, 화재 및 폭발이 발생하므로, 심각한 재산 및 인명 피해를 발생시킬 수 있다. 현장에서의 데이터를 토대로 배관 및 밸브에서의 가스 누출 가능성을 지속적으로 확인할 수 있는 방안이 필요하다[5][6].

선박에서의 사고 상황은 급박하게 이루어지게 될 가능성이 크기 때문에 사고 심각성 정도를 우선적으로 파악하게 되면 의사결정을 수행하는 데에 도움이 된다. 예를 들어, 공정 작업을 진행 중인 상황에서 1mm의 누출이 배관에서 발생했다고 가정한다면, 1mm의 위험은 그렇게 위험한 상황이 아니기 때문에 충분히 대응할 수 있는 상황임에도 불구하고, 공정 가동이 중지되거나 작업자의 당황으로 인해 2차 사고의 위험 및 공정 중지에 대한 비용 등 큰 손해를 보게 된다. 그렇기 때문에 사고 위험도를 우선적으로 알게 된다면, 해당 작업자 및 선장의 의사결정을 빠르게 지원할 수 있으며, 상황에 맞는 대응이 가능할 것이다.

본 연구에서는 지속적으로 위험을 분석할 수 있는 방안 중의 하나인 동적 위험 분석을 수행하기 위해 물리적 신뢰성 모델을 사용하여 사고확률을 추정하는 방안을 제안하였다.

1.2 관련 연구 현황

실시간 사고 분석 및 위험 식별 기법에 관한

기존의 연구는 동적 위험도 해석 방법 등에 대한 다양한 방법에 대해 연구되고 있다.

전통적인 위험도 해석 방법은 경미한 사건이나 아차 사고를 무시하고 주요 사건/사고 만을 고려하여 정적으로 사용되었다. Bucci et al.(2008)[7]은 최근에 Markov 모델링을 사용하여 동적 ET/FT(Event Tree/Fault Tree)를 구성하고 기존 ET/FT 방법론과 관련된 문제를 해결하는 접근 방식을 제안했다. Meel과 Seider(2006)[4]은 시스템의 동적 위험 평가를 얻기 위해 아차 사고 및 사고 데이터를 사용하여 사고 단계의 동적 확률을 추정하는 동적 고장 확률 평가 방식을 개발하였다. Choe(2016)[8]은 가스 밸브의 고장으로 가스 누출사고가 빈번하게 발생하는 상황에서, 안전관리와 유지관리에 대한 시스템이 미비하고 안전밸브를 제외한 산업용 밸브의 유지관리 의무화가 되는 법규가 없어 권장사항과 유지관리 업체의 재량에 맡기고 있는 실정이기 때문에, 철저한 유지관리로 위험요인을 제거하고 누출사고 발생 시 피해의 최소화를 위한 초동대처방안이 있어야 한다고 하였다.

본 연구에서는 동적 위험 해석 중에 누출사고 발생 시 사고의 빈도인 사고확률을 지속적으로 추정하는 연구를 진행하였다. LNG 벙커링 중 FGSS (Fuel Gas Supply System) room에서 일어날 수 있는 누출사고의 빈도, 사고확률을 추정하기 위하여 신뢰성 물리학 분석 (Reliability Physical Analysis, RPA)를 사용하여 사고확률을 추정하였다. 실시간으로 LNG 벙커링 중의 누출사고의 확률을 확인하여 사고 발생 가능성을 확인하여 사고 대응 의사결정을 지원할 수 있는 초기 연구를 진행하였다.

2. 연구방법

본 논문에서는 신뢰성 물리학 분석을 통하여 LNG 벙커링 시 누출사고가 일어났을 때 변화되는 모니터링 데이터를 이용하여 공변량 모델(Covariate model)을 모델링을 하였다. 와이불(Weibull) 분포를 이용한 공변량 모델을 통해 최소제곱법(Least Square Method, LSM)으로 모수를 추정하였고, 다중회귀분석을 통해 데이터를 표현하는 계수를 추정하였다. 추정된 모수 및 계수를 이용하여 모니터링 데이터 및 시간에 따른 사고확률을 추정하였고, LNG 벙커링에서 누출이 일어날 수 있는 시나리오를 고장수목분석(Fault Tree Analysis, FTA)으로 구현하여, 시간에 따른 LNG 벙커링 누출사고 확률을 추정하였다.

2.1 신뢰성 물리학 분석

신뢰성 물리학 분석은 물리적인 조건(물리, 화학, 재료 등)을 수단으로 사용하여 모델링 및 시뮬레이션을 하고 신뢰성을 예측하는 분석 방법이다. 즉, 신뢰성을 예측하고 싶은 대상의 가상모델을 만드는데, 보통은 고신뢰성이 요구되는 전자제품에 많이 적용하고 있다. 구성요소의 물리적인 재질과 구조적 특성에 기초하여 시뮬레이션을 수행하여 신뢰성을 평가하는 방법이다.

전자 부품 및 시스템의 고장은 적용되는 전압 또는 장비의 작동 온도 등 여러 환경에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, 프리캐스트 콘크리트 지지 빔의 강도와 같이 물과 혼합물에 사용되는 경우, 재료에서 발견되는 불순물에 따라 빔의 강도가 달라질 수 있다. 일반적으로 대상의 구성요소의 고유한 특성이나 외부 작동 조건을 포함하게 되면 더 정확한 신뢰성 모형을 구현할 수 있다[9].

2.1.1 공변량 모델

공변량 모델은 대상을 설명할 수 있는 데이터

의 분포에서, 하나 이상의 분포 모수를 공변량의 함수로 치환함으로써, 대상이 동작함에 필요한 물리적인 동작 조건들을 요인화 하여 추가적으로 고장 분포에 통합한다. 여기서, 전압, 전류, 온도, 습도 또는 스트레스나 환경의 다른 측정값일 수 있다. 공변량과 모수 값 사이에는 분명한 상관관계가 있어야 하지만 반드시 특성요인 관계는 아니다. 신뢰성 물리학 분석에서 $f(x)$의 기능적 형태는 공변량과 모수에 관련된 물리적 과정에 의해 결정될 수 있다.

$$\lambda(t,X)=\lambda_0(t)g(X,A) \tag{1}$$

여기서, $\lambda(t,X)$는 시간 및 공변량의 함수로서의 고장률이다. $\lambda_0(t)$는 시간의 함수로 기존의 고장률이다. $g(X,A)$는 고장률에 공변량의 영향을 포함하는 시간과 독립적인 양의 함수이다. $X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$는 공변량 벡터이고, $A=(a_1,a_2,\ldots,a_n)$는 a_i가 x_i의 계수인 미지의 변수들의 벡터이다. a_i의 값은 최소제곱법 또는 최대우도추정(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 사용하여 추정할 수 있다[10].

와이불분포의 고장률을 공변량에 의존하게 하기 위해 스케일 계수 α를 공변량의 함수로 가정하는 것이 일반적이다. 예를 들어, $\alpha(X)=\mathrm{Exp}(\sum_{i=0}^{n}a_ix_i)$와 같다. 와이불 분포의 시간 의존적 고장률은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda(t)=\beta t^{\beta-1}\alpha^{-\beta} \tag{2}$$

여기서 β는 형상계수이다. 위의 식에 $\alpha(X)$을 대입하면 다음과 같다.

$$\lambda(t,X)=\beta t^{\beta-1}\left\{\mathrm{Exp}\left(\sum_{i=0}^{n}a_ix_i\right)\right\}^{-\beta} \tag{3}$$

일반적으로, $x_0=1$ 이다. 따라서 고장 확률인 F(t)에 대한 공변량 모델의 모형은 다음과 같다[9].

$$F(t)=1-\mathrm{Exp}\left\{-\left(\frac{t}{\mathrm{Exp}\left(\sum_{i=0}^{n}a_ix_i\right)}\right)^{\beta}\right\} \tag{4}$$

위의 식으로부터 공변량 x_i와 시간 t의 변화에 따라 고장확률 $F(t)$가 변한다[5].

2.1.2 최소제곱법

수명 $t_1,\ldots,t_n$ 표본과 각 수명과 관련된 공변량 x_{ij} 집합(x_{ij}는 j번째 수명과 관련된 i번째 변수의 값)이 주어진 경우, 최소제곱법과 같은 방법을 분포의 알 수 없는 모수를 추정하는 데 적용할 수 있다. 와이불 분포의 확률 밀도 함수는 다음과 같다[10].

$$F(t)=1-\exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right) \tag{5}$$

최소 제곱법의 일반적인 절차에 따라 $y=ax+b$ 형태의 회귀 방정식을 찾으며, 식 (6)은 식 (5)에 자연 로그를 두 번 취하여 도출된다.

$$Ln\left(Ln\frac{1}{1-F(t)}\right)=\beta\mathrm{Ln}t_j-\beta\sum_{i=0}^{k}a_ix_{ij} \tag{6}$$

단, k는 총 고장 수, t_j는 j번째 고장 발생 시간, a_i는 i번째 공변량의 계수, x_{ij}는 j번째 고장의 i번째 공변량 이다. y_j를 다음과 같이 가정한다면, $y_j=Ln\left(Ln\frac{1}{1-F(t)}\right)$, 식 (6)은 다음 식 (7)과 같다[10][11].

$$y_j=\beta\mathrm{Ln}t_j-\beta a_o-\beta a_1x_{1j}-\beta a_2x_{2j}-\beta a_3x_{3j} \tag{7}$$

2.1.3 다중회귀분석

다중 회귀분석이란 2개 이상의 독립변수와 하나의 종속변수와의 관계를 분석하는 통계적인 기법이다. 종속변수에 독립변수가 미치는 영향정도를 통계적으로 나타내고, 이를 선형관계로 나타내는 회귀 함수식을 도출하여 결과값이 예측 가능한 모델을 제시하는데 주로 활용된다. 일반적으로 자주 활용되는 회귀분석은 두 변수 사이의 관계식을 파악하여 한 변수 값으로부터 다른 변수의 값에 대한 예측을 하고 이 두 변수 사이의 함수 관계에 대한 추정하는 통계적 기법이다[12].

$$Y = \beta + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \epsilon \qquad (8)$$

식 (8)은 $X_1, X_2, \cdots X_k$는 독립변수, Y는 종속변수 β_0, β_1, $\cdots$, β_k는 회귀 계수로서 미지의 상수이며, 오차항 ϵ는 $N(0, \sigma^2)$분포에서 추출한 독립변수로 가정하였다. 본 연구에서는 신뢰성 물리 모델에서의 계수를 추정하는데 사용하였다.

3. 사고확률 추정

3.1 연구대상 및 사고 시나리오 선정

LNG 벙커링이란 LNG 추진선박에 LNG를 연료로 공급하는 것인데, 이 LNG를 이용한 LNG연료 추진 선박에 대한 연구 및 수요가 증가 하고 있다. 본 연구의 대상은 LNG bunker Ship에서 LNG 추진선박에 LNG를 급유하는 FGSS이다. Fig. 1은 LNG 벙커링 시스템의 P&ID 이며, 급유절차는 LNG가 저장탱크에서 급유라인을 따라 LNG 추진선박의 연료탱크로 저장되고, 이때 양 탱크의 압력을 맞춰주기 위해 Vapor return 가스가 회수라인을 따라 LNG 저장탱크에 회수되는 절차로 진행된다. 시

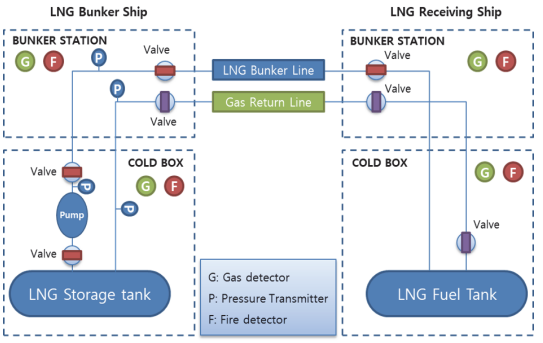

Fig. 1 LNG bunkering P&ID[13]

스템 내의 센서로는 화재감지기, 가스감지기, 압력전송기, 모니터링 시스템이 있으며, 차단밸브로는 볼밸브, 게이트밸브가 사용되었는데, LNG 제어용으로는 볼밸브가 LNG 급유라인에, 가스제어용으로는 게이트밸브가 가스회수라인에 배치되었다[13].

LNG 벙커링 작업에서 사고에 대한 해석을 수행할 때 해석결과에 주요하게 작용하는 요인들은 배관 내부의 물질, 파공크기, 누출이 지속된 시간, 누출량 등이 있다. 여기서, 파공크기를 파악할 수 있는 요인 LNG 벙커링 시 모니터링으로 얻을 수 있는 데이터인 LNG Massflow, LNG Velocity, LNG Loss pressure 가 있다.

LNG FGSS의 경우, LNG 급유를 시행할 때 펌프나 배관의 피팅 류 등 압력으로 인해 약해지는 부분이 발생하여 파공이 발생할 수 있다. 배관의 파공 시 누출되는 물질은 LNG 로서 메탄 0.8, 에탄 0.1, 프로판, 부탄이 각각 0.05인 비율로 구성되어 있고, 벙커링 작업 압력은 10bar로 인해 가스 누출 시 화재 발생 위험이 높다. 그리하여, LNG 벙커링 시 LNG 누출에 대한 위험을 알고 대처하는 방안이 필요하다.

3.2 공변량 데이터 구성

고장이 일어나는 시나리오에서의 물리적인 매개

변수를 확보하기 위해서 ANSYS CFX 해석 프로그램을 사용하여 배관의 모델링과 해석을 수행하여 데이터를 생성하였다. 모델은 LNG 저장탱크에서 FGSS을 거쳐 급유되는 라인으로 가는 한 배관라인을 가정하였고, 배관의 직경은 150A 이고, 길이는 5m로 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 배관 라인 사이의 펌프에서 파공으로 인한 누출이 발생하여, 배관의 시작점과 끝점에서의 LNG Massflow, Velocity, Loss pressure 의 차이 값을 확인하는 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과 값을 통해 고장시간 t를 확보할 수 있는 5mm ~ 110mm 누출 데이터 116개를 확보하였다[13]. 확보된 누출 데이터를 통해 Lee(2015)의 Leak category and frequency[5]를 참고하여, Table 1의 공변량 데이터로 데이터화 하였다.

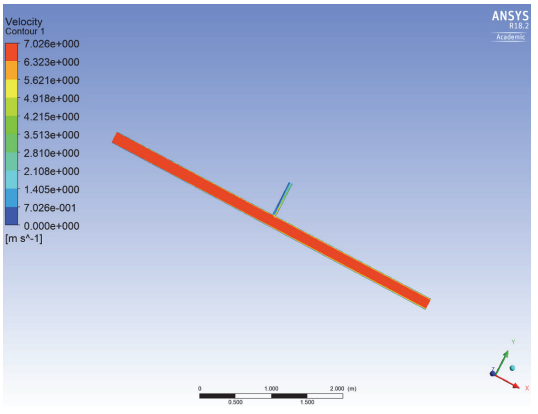

Fig. 2 Result of analysis in pipe modeling

Table 1. Covariate data

No.	Failure time t (year)	Massfl -ow (kg/s)	Velocity (m/s)	Loss pressure (bar)
1	3.52E-02	58.994	6.505	0.10E-03
2	3.71E-03	58.922	6.497	9.09E-05
3	1.53E-03	58.682	6.470	7.23E-06
		⋮		
115	8.71E-04	58.321	6.430	9.71E-05
116	4.83E-03	57.879	6.382	9.62E-05

Table 1의 데이터 값을 이용하여 실제 누출사고와 비슷한 조건의 데이터를 생성하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 불확실한 사건의 가능한 결과를 추정하는데 사용되는 수학적 기법이다. 몬테카를로 시뮬레이션은 고정 입력 값 세트에 비해 추정된 값 범위를 기반으로 결과 세트를 예측한다. 내재된 불확실성을 지닌 임의의 변수에 대해 균등 또는 정규 분포 등의 확률분포를 활용하여 가능한 결과의 모델을 구축한다. 이는 최소값과 최대값 사이의 상이한 난수 세트를 사용하여 매번 반복해서 결과를 다시 계산한다. 이러한 수행이 수천 번 반복됨으로써 다수의 가능한 결과를 생성할 수 있다.

Table 1은 고장이 일어나는 시나리오를 공변량 데이터화 하였다. LNG Massflow, LNG Velocity, LNG Loss pressure 등 FGSS room에서 누출 사고가 발생하였을 때의 모니터링 데이터이고, 그에 따른 고장시간 t를 표현하였다. 고장시간 t는 고장률 λ의 역수를 통해서 고장시간을 구하였고, 구해진 고장률 λ를 모수로 하는 지수분포를 통해, 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 나온 결과값을 각 공변량 데이터에 대입하였다.

3.3 고장수목분석 모델링

FTA 기법은 고장확률을 시나리오화 하며, 정성적으로 위험을 표현하는 방법으로써 유해위험요인의 실패 및 고장 확률을 설명할 수 있는 방법이다. 중요 사건의 가능성을 식별하는 고장수목(Fault Tree)은 1차 사건(Primary Event)의 상위 사건을 중간사건(Intermediate event) 이라고 하며, 최상위 사건인 사고가 발생하게 되는 사건을 정점 사건(Top event) 이라고 한다.

본 연구에서는 LNG 벙커링 작업에서 일어날 수 있는 누출 사고의 사고확률을 추정하기 위하여 원인을 파악하고, 누출 사고 시나리오를 통해 고장수목을 구성하였다. Fig. 3과 같이 PE1 ~ PE10까지 고장수목의 1차 사건을 지속적으로 업데이트하여 정량적 분석을 수행할 수 있다. 고장수목에서는 정점 사건의 발생 확률을 최소 컷 세트의 결합으로 계산할 수 있다. 최소 컷 세트는 상위 이벤트를 발생시키는 데 필요한 최소 PE 수의 교차점으로 정의된다.

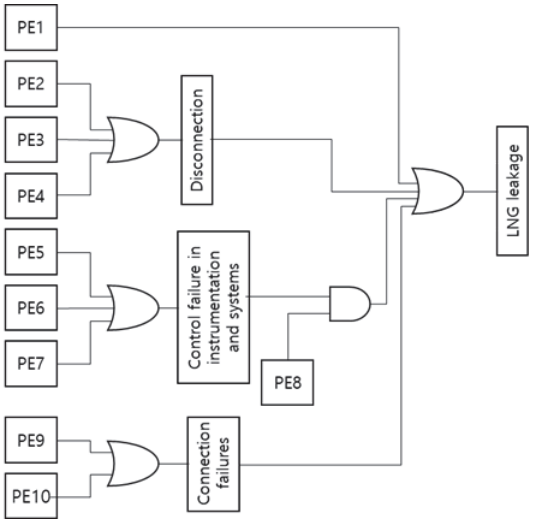

Fig. 3 FTA - LNG leakage

Table 2. Initial Failure rate

Index	Components	Failure rate
PE1	Damaged/Rupture	Physical model
PE2	SIMOPS Offshore	2.30E-08
PE3	SIMOPS Onshore	1.40E-05
PE4	Drift off	6.70E-08
PE5	LCV failure	3.47E-05
PE6	PLC failure	5.96E-06
PE7	Sensor failure	1.00E-05
PE8	Operator Error (Monitoring)	4.96E-05
PE9	Equipment failure	6.88E-05
PE10	Operator Error (Connection)	6.10E-07

본 연구에서는 LNG 벙커링 작업 시 일어날 수 있는 사고 원인을 파악하여 LNG 누출이 발생하는 시나리오를 대입하였다. 다음 Fig. 3은 LNG 누출 시 일어날 수 있는 사고를 FT로 표현하였다. LNG 누출 사고는 배관 파열 및 선박의 데미지에 의한 사고, 불완전한 호스 연결로 인한 사고로 크게 2가지로 나눌 수 있다. 세부적인 사고로, 배관 파열/선박의 데미지에 의한 사고에는 선박끼리의 충돌, 계류 실패로 인한 사고, 배관에 낙하물이 떨어져 일어나는 사고, 고압으로 인한 저장용량 팽창 등이 있고, 불완전한 호스 연결 시에는 조인트 미체결로 인한 Pool이 형성되는 것이 있다[14].

본 연구에서 나머지 1차 사건의 사전 확률은 사고 데이터 통계 자료인 LNG bunkering operations[15]의 기록을 참고하였다. Table 2는 1차 사건의 이전 고장률인 초기 고장률이다. 공변량의 초기 값은 LNG Massflow = 59.2kg/s, LNG Velocity = 6.5 m/s, LNG Loss pressure = 0.0001 bar 이다.

업데이트 절차를 보여주기 위해, 공변량 모델의 형태로 설명되는 배관에서 데미지를 입거나 파열되는 상황인 PE1을 제외하고는 모든 1차 사건을 시간 의존적인 지수 분포를 따른다고 가정하였다.

3.4 사고 확률 추정 결과

표 1에서 나열된 것과 같은 수명 및 관련 공변량의 표본을 사용하면 위의 설명했던 식 (7)을 다중회귀모델 식(8)을 이용하여 식 (9)로 변경할 수 있다. 식 (9)는 다음과 같다.

$$y = b_1 + b_2 Lnt + b_3 x_1 + b_4 x_2 + b_5 x_3 \qquad (9)$$

식 (9)로 이용하면 다중회귀모델에서의 계수를 $b_1 = -\beta a_0$, $b_2 = \beta$, $b_3 = -\beta a_1$, $b_4 = -\beta a_2$, $b_5 = -\beta a_3$ 으로 결정할 수 있다.

PE1을 와이불 분포에서 스케일 모수에 해당되는 α에 공변량 모델에 적용하였다. 공변량 모델은 회귀 계수를 설정하기 위해 장비 작동 중에 얻은 물리적인 조건의 데이터가 필요하다. LNG 벙커링의 누출에 대한 물리적인 조건을 LNG Massflow (M), LNG Velocity (V), LNG Loss pressure (P)로 하여, 식(10)과 같이 표현하였다.

$$y = \beta \mathrm{Ln} t_j - \beta a_o - \beta a_1 M - \beta a_2 V - \beta a_3 P \qquad (10)$$

$M: LNG Mass\ flow\ (kg/s)$
$V: LNG\ Velocity\ (m/s)$
$P: LNG\ Pressure\ (g)$

본 연구에서는 식 (10)의 공변량 모델에서 계수에 해당되는 a_x를 Table 1의 데이터를 사용하여 PE1의 고장 분포 매개변수를 다중회귀 분석을 적용하여 계수를 구하였다. 추정된 계수는 a_0 = 6.0008, a_1 = -0.0302, a_2 = 0.26132, a_3 = -0.0468, β = 1.50389 이다.

추정된 회귀계수를 통해 $\alpha(X)$ 값을 구하여 위의 a_x의 추정값을 식 (4)에 적용하여 PE1의 고장확률을 추정하였다.

PE1의 추정된 값과 PE2 ~ PE10 까지 계산하게 되면, 초기 사건의 수정된 확률을 통해 상위 사건에서의 확률에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. PE1의 공변량 함수에 따른 사고확률 변화와 나머지 사고 시나리오들의 지수 분포로 인한 사고확률 변화에 따라 상위 사건의 확률이 변하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 3과 같은 고장수목분석을 통하여 점정 사건에 대한 고장확률을 구할 수 있다. 예를 들어, 정점 사건인 Connection failures의 확률은 식 (11)에 PE9와 PE10의 확률을 대입하여 계산할 수 있다.

$$Connection\ failures, \qquad (11)$$
$$TE = P_{PE9} + P_{PE10} - (P_{PE9} \times P_{PE10})$$

그리고 정점 사건인 System failures의 확률을 계산하면 다음 식 (12)와 같다.

$$System\ failures, \qquad (12)$$
$$TE = P_{PE8} \times P_{PE5,6,7}$$

공변량 데이터의 변화에 따라 고장확률이 변하는 것을 확인하기 위한 가장 실용적인 시나리오는 운영상의 한계와 경제적 고려사항에 기초하여 선택되어야 한다. 따라서 시나리오는 본 연구의 데이터인 Table 1에서의 10mm ~ 110mm의 값인 LNG Massflow = 58.99 ~ 56.28kg/s, LNG Velocity = 6.5 ~ 6.2m/s, LNG Loss pressure = 0.0001 ~ 9.79e-05 bar 의 값을 가지는 파공크기에 따른 10개의 시나리오를 선정하였다. Table 3은 10개의 시나리오를 나타낸다.

Fig. 4 ~ 6은 10개의 시나리오를 통해 실제적인 환경에서의 시간은 5년으로 고정하고, 공변량

Table 3. Scenarios as covariate data

No.	Hole diameter [mm]	LNG Massflow [kg/s]	LNG Velocity [m/s]	LNG Loss pressure [bar]
1	10	58.994	6.505	1.01E-04
2	20	58.836	6.487	9.56E-05
3	30	58.501	6.450	7.56E-06
4	40	58.088	6.405	9.61E-05
5	50	57.576	6.348	7.54E-06
6	60	57.312	6.319	7.57E-06
7	70	57.006	6.285	9.72E-05
8	80	56.673	6.249	7.43E-06
9	90	56.560	6.236	1.00E-04
10	100	56.282	6.205	9.79E-05

함수의 변화에 따라 정점 사건의 확률이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 Massflow의 변화에 따른 사고확률을 나타낸다. 시나리오에 따라 파공크기가 클수록 Massflow가 줄어들고 사고확률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 파공크기가 클수록 사고확률은 낮아지기 때문에, Massflow는 사고확률에 미치는 영향이 적다고 할 수 있다. Fig. 5는 Velocity의 변화에 따른 사고확률을 나타낸다. 파공크기가 클수록 LNG를 이송하는 Velocity가 줄어들고 사고확률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Velocity는 LNG 누출에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. Fig. 6은 Loss

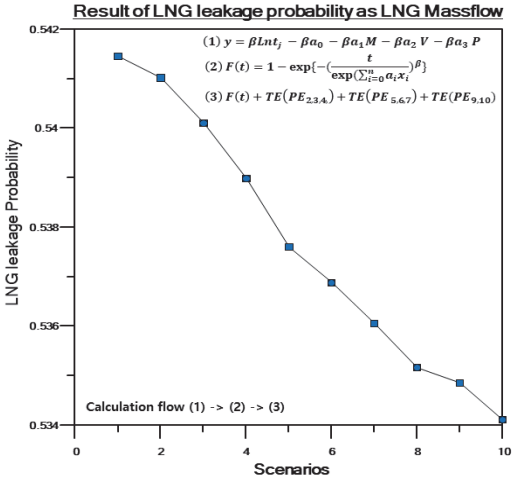

Fig. 4 Result of LNG leakage probability as LNG Massflow

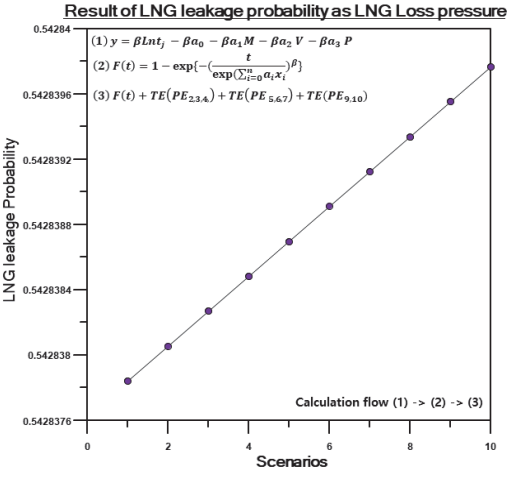

Fig. 6 Result of LNG leakage probability as LNG Pressure

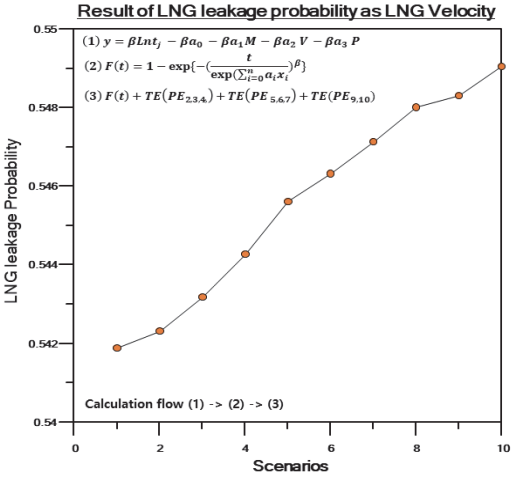

Fig. 5 Result of LNG leakage probability as LNG Velocity

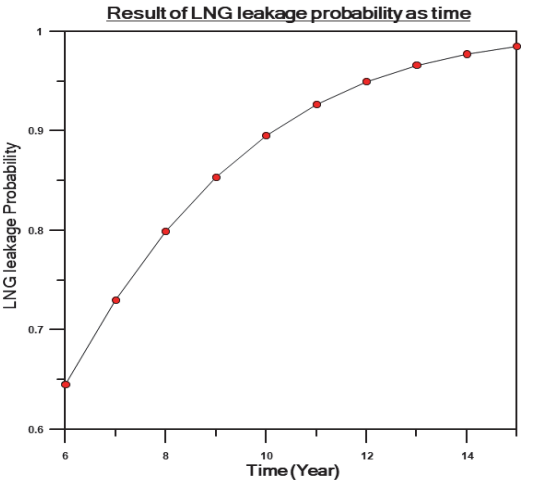

Fig. 7 Result of LNG leakage probability as time

pressure의 변화에 따른 사고확률이며, 그래프는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났지만, 시나리오 1과 10의 결과의 차이가 0.4E-3으로 차이가 미미하므로, Loss pressure가 LNG 누출에 미치는 영향은 거의 없다고 볼 수 있다. 이 부분은 배관의 중간에서 파공으로 인해 빠져나가는 Loss pressure의 양이 생각보다 적은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 시간 변화에 따른 사고확률을 추정하였다. LNG 벙커링의 경우 고 신뢰성인 SIL2에 해당하는 ESD system을 갖추고 있기 때문에 작동시간 6년부터 15년까지의 사고확률을 추정하였고, 결과는 위 Fig. 7과 같다. 운용 시작 5년 이후부터 사고확률은 64%의 확률을 가지고 있으며, 15년이 지난 후에는 98%의 사고확률을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 동적 위험 분석에서 고장수목을 이용하여 사고확률이 변화되는 방안을 제시하였다. 상위 사건 확률에 대한 물리적 매개변수의 실시간 변동의 영향을 조사하기 위해 공변량을 이용한 물리적 신뢰성 모델을 사용하였다. 이러한 물리적 모델은 고장에 영향력 있는 물리적 매개변수를 고장 분포 함수에 통합함으로써 프로세스의 위험을 판단할 수 있다.

설계 단계에서 고장수목의 1차 사건에 대한 물리적 신뢰성 모델이 개발되면 프로세스 운영 시간 동안 새로운 물리적 매개변수가 모니터링 되고 관찰됨에 따라 상위 사건 확률과 그에 따라 초기에 추정된 위험을 수정할 수 있다.

물리적 모델은 실험 및 현장 데이터의 확립이 요구되지만, 본 연구는 지속적인 확률 추정을 하여 의사결정을 지원할 수 있는 방법을 제공할 수 있으며, 유지보수 기간을 산정하는 데에도 도움을 줄 수 있을 것이다. 또한 동적으로 변화되는 위험 추정치를 얻기 위해 장비의 지속적인 모니터링으로 물리적 매개변수 또는 초기 추정치의 변화를 고려하는 방법을 제안하였다.

본 논문은 추후 동적 위험 분석에서의 사고확률을 추정하는 초기 연구 단계이다. 현재 실시간으로 사고의 위험을 추정할 수 있는 방안은 제시되어 있지만, 사고확률을 실시간으로 추정하기 위해서는 더 많은 데이터와 연구가 필요하다. 본 연구의 결과를 바탕으로 동적 위험 분석의 사고확률을 보다 정확하고 빠르게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE), 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구 과제(No. 20224000000090)와 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 연구과제(20220210, AI기반 스마트 어업관리시스템 개발)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

[1] Egypt – Helwan South Power Project: Quantitative risk assessment-Abo Homos-Nubaria Natural Gas Pipeline. Report no. E2842 v7. (2011).
[2] Kalantarnia, M.; Khan, F.; Hawboldt, K.: Dynamic Risk Assessment Using Failure Assessment and Bayesian Theory. J. Loss Prev. Process Ind. 22, 600-606. (2009).
[3] Shalev, D.M.; Tiran, J.: Condition-Based Fault Tree Analysis (CBFTA). A New Method for

Improved Fault Tree Analysis (FTA), Reliability and Safety Calculations. Reliab. Eng. Syst. Saf. 92, 1231–1241. (2007).

[4] Meel, A.; O'Neill, L.M.; Levin, J.H.; Seider, W.D.; Oktem, U.; Keren, N. Operational Risk Assessment of Chemical Industries by Exploiting Accident Databases. J. Loss Prev. Process Ind. 20, 113–127. (2007).

[5] J.I. Lee.: The Plan for Korean Ship Fire Suppression. Proceedings of the Korean Safety Management & Science Spring Conference, pp. 315–327. (2015).

[6] Ministry of Oceans and Fisheries.: Ministry of Oceans and Fisheries Notice No. 2020-218: Ship Fire-Fighting Equipment Standard, (2020).

[7] Bucci, P.; Kirschenbaum, J.; Mangan, L.A.; Aldemir, T.; Smith, C.; Wood, T.: Construction of Event-Tree/Fault-Tree Models from a Markov Approach to Dynamic System Reliability. Reliab. Eng. Syst. Saf. 93, 1616–1627. (2008).

[8] B.G. Choe, M.C. Cha, J.J.: Kim, Study on the Current Safety Management Status andSafety Improvement of Gas Valve. Journal of the Korean Institute of Gas. 20(5), pp. 57-63, (2016).

[9] Charles, E. Ebeling.: An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering Third Edition. Waveland Press, ISBN 13: 978-1-4786-3734-9. (2019).

[10] Nima Khakzad, Faisal Khan, Paul Amyotte.: Dynamic risk analysis using bow-tie approach. Reliability Engineering and System Safety. 104. pp 36-44, (2012).

[11] J.H. Cha, K.D. Park, K.W. Lee, B.H. Bak.: A Study on Design for Reliability for the PBA of Warshipbased on Reliability Physics Analysis. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 20(12), pp 535-545, (2019).

[12] G.Y. Kim, IJ. Ban, B.C. Park, S.J. Oh, C.o. Lim, S.c. Shin.: Estimation of Lightweight in the Initial Design of Ships Using Deep Neural Networks, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 29(6), pp 416-423, (2019).

[13] B.C. Park, C.o. Lim, S.j. Oh, J.E. Lee, M.J. Jung, S.c. Shin.: Development of Fire Consequence Prediction Model in Fuel Gas Supply System Room with Changes in Operating Conditions during Liquefied Natural Gas Bunkering. Applied Sciences, 12(16), (2022).

[14] Swedish Marine Technology Forum: LNG Ship to Ship Bunkering Procedure, (2010).

[15] Nora Marie Lundevall Arnet: LNG Bunkering Operations. Master's thesis. Norwegian University of Science and Technology, (2014).

접수: 2023.02.23. 수정: 2023.03.17. 게재확정: 2023.03.23.