

고장률의 불확실구간을 고려한 빈도구간과 결정론적 빈도의 설명력 연구

한만형¹ · 천영우² · 황용우^{3†}

Study of Explanatory Power of Deterministic Risk Assessment's Probability through Uncertainty Intervals in Probabilistic Risk Assessment

Man Hyeong Han¹ · Young Woo Chon² · Yong Woo Hwang^{3†}

[†]Corresponding Author

Yong Woo Hwang

Tel : +82-32-860-7501

E-mail : hwangyw@inha.ack.kr

Received : February 5, 2024

Revised : March 20, 2024

Accepted : April 23, 2024

Abstract : Accurately assessing and managing risks in any endeavor is crucial. Risk assessment in engineering translates the abstract concept of risk into actionable strategies for systematic risk management. However, risk validation is met with significant skepticism, particularly concerning the uncertainty of probability. This study aims to address the aforementioned uncertainty in a multitude of ways. Firstly, instead of relying on deterministic probability, it acknowledges uncertainty and presents a probabilistic interval. Secondly, considering the uncertainty interval highlighted in OREDA, it delineates the bounds of the probabilistic interval. Lastly, it investigates how much explanatory power deterministic probability has within the defined probabilistic interval. By utilizing fault tree analysis (FTA) and integrating confidence intervals, a probabilistic risk assessment was conducted to scrutinize the explanatory power of deterministic probability. In this context, explanatory power signifies the proportion of probability within the probabilistic risk assessment interval that lies below the deterministic probability. Research results reveal that at a 90% confidence interval, the explanatory power of deterministic probability decreases to 73%. Additionally, it was confirmed that explanatory power reached 100% only with a probability application 36.9 times higher.

Copyright©2024 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : probabilistic risk assessment, monte calro, uncertainty interval, deterministic risk assessment, probability

1. 서론

1.1 위험성평가

기술이 발전함에 따라 장치산업은 더욱 거대화, 복잡화 다양화 되고 있다. 이러한 물질 혹은 가치의 생산에는 Risk의 생산이 필연적으로 수반될 수 밖에 없다. 다만, 생산되는 Risk를 모두 제거하는 것은 현실적으로 불가능하며, 그렇기 때문에 산업현장에서는 사업장이

보유한 Risk를 정확하게 평가하고 이를 관리하는 것이 매우 중요하다. 이때 Risk를 평가하기 위한 수단이 위험성평가이다.

위험성평가는 Hazard and Operability Study(HAZOP), Layer of Protection Analysis(LOPA) 등 다양한 Frame이 만들어지고, Center for Chemical Process Safety(CCPS), International Electrotechnical Commission(IEC) 등 민간 및 국제적 차원에서 이러한 Frame을 표준화하고 보급

¹인하대학교 환경·안전융합전공 박사과정 (Program in Environment Technology & Safety Technology, Inha University)

²인하대학교 환경·안전융합전공 교수 (Program in Environment Technology & Safety Technology, Inha University)

³인하대학교 환경공학과 교수 (Department of Environmental Engineering, Inha University)

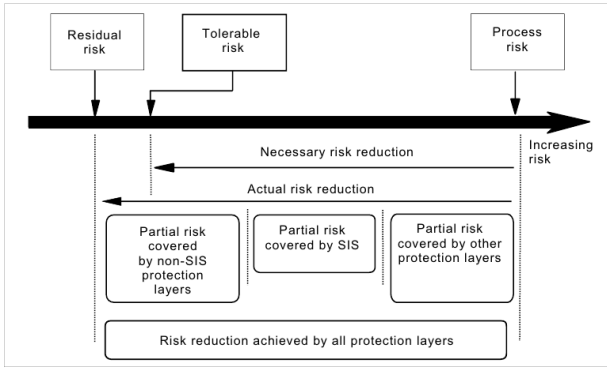


Fig. 1. Risk reduction : general concepts by IEC 61511-3.

하고 있다.

위험성평가는 강도(Consequence)와 빈도 혹은 확률(Probability)의 곱으로 ‘Risk’를 계산한다. API 580¹⁾에서는 확률(Probability)을 ‘정해진 기간 중 사건이 발생할 가능성이 있는 범위’, ‘0부터 1까지의 수 중 랜덤한게 발생하는 숫자’ 및 ‘사건이 발생할 신뢰성’라고 정의한다. 그러나 실질적 의미는 위험성평가의 목적에 따라 달라지게 된다. API 580/581 등 Risk Based Inspection을 위한 위험성평가는 설비의 risk를 기준으로 감사의 우선순위를 매기는 것을 목표로 하기 때문에 빈도의 의미는 설비가 고장날 확률을 의미한다. 그러나 LOPA의 경우 빈도는 개시사건이 발생한 후 독립방호계층이 실패할 확률을 의미한다.

IEC²⁾에서는 이러한 위험성평가를 수행하게 되면, Risk를 수용 가능한 위험기준(Tolerable risk), 잔류 위험(Residual risk) 수용 불가능한 위험(Process risk)로 구분하여 관리한다.

Zero risk는 존재할 수 없기 때문에, Tolerable risk 수준을 정하게 되고, Tolerable risk보다 낮은 위험을 Residual risk이라고 정의하며 사업장 내 잔류하게 된다. Tolerable risk 수준보다 높은 risk는 Risk reduction을 거쳐 Tolerable risk보다 낮은 수준으로 낮추게 된다.

1.2 결정론적 위험성평가와 확률론적 위험성평가

결정론적 위험성평가(Deterministic Risk Assessment, DRA)는 특정한 가정과 조건에서 일어날 수 있는 Risk를 분석한다. 그렇기 때문에 설비의 고장률 등을 고려할 때 고정된 하나의 값을 적용한다. 따라서 단순하고 직관적이지만 위험성평가의 결과의 불확실성 등이 무시된다는 특징을 가지고 있다.

확률론적 위험성평가(Probabilistic Risk Assessment, PRA)는 사고가 발생할 확률을 중심으로 Risk를 분석한

다. 그렇기 때문에 설비의 고장확률분포 등을 고려하여야 하며, 결정론적 위험성평가보다 더 많은 데이터가 필요하다. 또한 확률적인 성격으로 인해 결과를 해석할 때 불확실성을 고려하여야 한다.

1.2.1 결정론적 위험성평가의 한계

결정론적 위험성평가는 상대적으로 적용이 단순하기 때문에 현재 산업계에서 많이 사용되고 있다. 그러나 검증(Validation)에서 많은 의심을 받는다. 특히 빈도의 불확실성에서 그러하다. ‘고장률’의 경우 사용자의 사용환경을 대표하는 데이터를 수집하는 것이 불가능하여 일반적으로 수집되는 정보를 이용하지만, 그렇기 때문에 그 수집된 데이터의 정확도에 대한 논란이 생기게 된다. 이러한 논란은 결정론적 위험성평가를 수행할 때 적용한 고장률은 1회/100년로 계산되지만 실제로 실제 100년에 1회 고장이 일어날 것이라고 믿지 못하게 하고, 안전관리 정책에 쉽사리 위험성평가 결과를 반영하지 못하게 한다.

1.3 위험성평가의 신뢰구간과 불확실구간

International Organization for Standardization(ISO)는 위험성평가를 진행함에 있어서 신뢰구간(C Confidence levels)을 고려해야 함을 명시하고 있다³⁾. 다만, 위험성평가의 신뢰구간이 무엇인지에 대한 접근은 이루어지지 않고 있는 상황이며, 이러한 접근에 기초가 되는 고장률의 신뢰구간까지 계산하여 공개하는 데이터북은 극히 드물다. Offshore Reliability Data(OREDA) 데이터북은 이와 유사한 정보로 불확실구간(Uncertainty interval)을 제공하고 있다. OREDA의 불확실구간은 신뢰구간과 다르게 데이터가 많아도 불확실구간이 좁아지지 않는다는 특징을 가지고 있지만, 관심수준에 따라 구간이 결정되고 고장률이 그 구간 내에 존재하다는 개념은 신뢰구간이 동일하다.

1.4 연구목적

본 연구는 빈도를 결정론적인 숫자로 특정하기 보다는 구간으로 제시할 수 있는 방안을 모색하였다. 이 후 중류탑 사고 시나리오를 구성하여 결정론적 빈도의 설명력을 확인하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구는 불확실구간을 고려한 확률론적 Fault Tree analysis(FTA)를 수행하고 정점사건(Top event)의 빈도 구간을 생성하여, 결정론적 FTA결과를 비교하였다.

2.1 FTA 구성

본 연구에 활용된 FTA의 정점사건은 증류탑의 Overfill이다. FTA는 BP Texas City사고의 CSB 사고조사 보고서⁴⁾, Barges의 저장탱크 터미널의 위험성평가⁵⁾, Health and Safety Executive(HSE)의 fuel storage site safety standard⁶⁾ 및 CCPS의 LOPA시나리오 예제⁷⁾를 참고하여 재구성하였다. FTA에 활용된 공정은 아래와 같다.

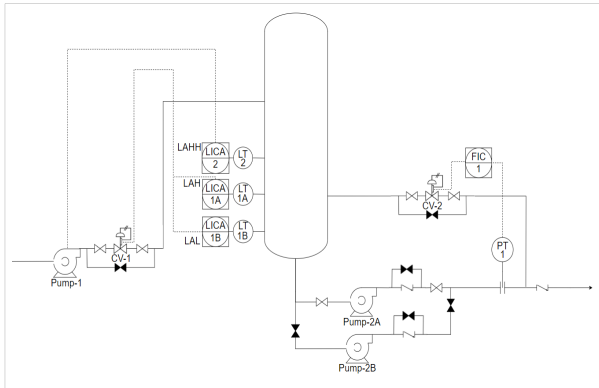


Fig. 2. Fault tree analysis drawing.

Pump-1은 증류탑에 물질을 인입시키는 역할을 하며, 후단에 유량을 조절하는 CV-1이 존재한다. CV-1은 증류탑에 설치된 BPCS 액위계(LT-1A/B)의 전기적 신호를 받아 작동한다. SIS 액위계(LT-2)는 펌프와 연결되어 비상정지가 필요한 경우 펌프를 trip시킨다. 증류탑의 하부엔 토출라인 펌프(Pump-2A/B)가 존재하며, 내부 물질을 환류 및 외부로 토출시키는 역할을 한다. 해당 펌프의 후단에는 압력계(PT-1)가 설치되어 있어 펌프의 토출압을 모니터링하며, 펌프 가동 중 토출압이 0이 되면 알람을 띄운다. CV-2는 모니터링 값을 전달받아 환류 및 토출량을 조절한다.

FTA의 장치설비 및 Failure mode는 Table 1과 같다. 장치설비별 Failure mode는 OREDA⁸⁾를 참고하였다. Mean, SD는 고장률의 평균과 표준편차이다. n/τ 는 정해진 시간 내(τ) 발생한 failure의 개수(n)를 의미한다. Logic solver는 고장이력이 조사되지 않아 본 분석에서 제외되었다.

FTA의 개시사건은 Pump-2A/B의 fail to start이다. Pump-2A/B가 가동하지 않은 상태에서 PT-1이 정상적으로 값을 전송하지 못해 증류탑의 액위가 올라가는 상태에서 BPCS 및 SIS의 기능이 상실되어 Overfill되었다. 이를 설명하는 FTA는 Fig. 3과 같다.

2.2 고장률 정보 수집

화학공정의 경우 OREDA databook, FRED book 등이

Table 1. Device equipment and Failure mode of fault tree analysis

No.	Facility Name	Class	Failure mode	Failure rate per 10 ⁶ hour		
				Mean	SD	n/τ
1	Pump-1	Pump	fail to stop on demand	0.38	0.58	0.35
2	Pump-1	Pump	spurious stop	22.56	24.44	20.89
3	Pump-2A	Pump	fail to start on demand	13.74	21.1	7.31
4	Pump-2B	Pump	fail to start on demand	13.74	21.1	7.31
5	LT-1A	BPCS	fail to function on demand	0.56	0.89	0.54
6	LT-1A	BPCS	erratic output	2.22	3.54	1.61
7	LT-1A	BPCS	low output	0.56	0.89	0.54
8	LT-1B	BPCS	fail to function on demand	0.56	0.89	0.54
9	LT-1B	BPCS	erratic output	2.22	3.54	1.61
10	LT-1B	BPCS	low output	0.56	0.89	0.54
11	CV-1	BPCS	fail to close on demand	2.23	2.72	4
12	LT-2	SIS	fail to function on demand	0.56	0.89	0.54
13	LT-2	SIS	erratic output	2.22	3.54	1.61
14	LT-2	SIS	low output	0.56	0.89	0.54
15	PT-1	BPCS	fail to function on demand	0.51	0.63	0.19

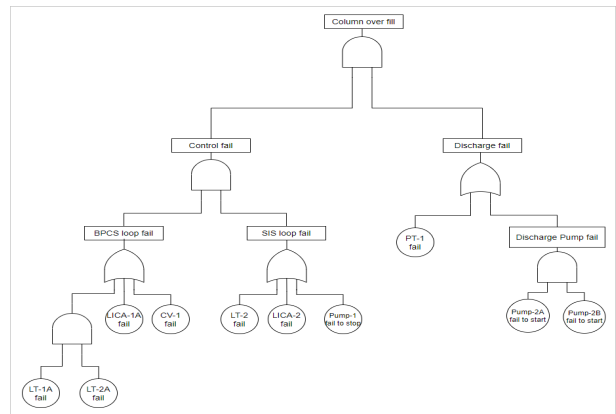


Fig. 3. Fault tree analysis structure.

Taxonomy no	Item	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)						No of demands			
		Calendar time *			Operational time †			Active rep. hrs		Manhours	
Failure mode	No of failures	Lower	Failure rate (per 10 ⁶ hours)		SD	n/τ	Mean	Max	Mean	Max	

Fig. 4. OREDA data table format.

위험성평가지 고장률을 참고하는 Databook으로 활용된다. 국내에서도 「고압가스제조사업의 양도·양수 및 지위 승계 관련 기준 적용에 관한 특례고시」⁹⁾의 [안전

진단, 안전성평가 및 안전관리체계 평가 방법 등에 관한 기준]에 사고발생빈도분석을 위해 OREDA의 자료 활용이 가능함이 명시하고 있다. OREDA의 Data table formats은 Fig. 4와 같다.

OREDA는 고장률 정보를 제공하면서 Lower, Upper를 제공하고 한다. Lower, Upper은 불확실구간 90%의 경계값을 의미한다.

만약 설비들이 동일한 운전 및 환경조건에서 운영된다면 이러한 설비들은 동종샘플(homogeneous sample)이라고 정의할 수 있는데, 이러한 동종샘플에서의 Lower, Upper는 식 (1)로 구하게 된다.

$$\left(\frac{1}{2\tau} z_{0.95,2n}, \frac{1}{2\tau} z_{0.05,2(n+1)}\right) \quad (1)$$

여기서 $z_{0.95,n}$, $z_{0.05,n}$ 는 자유도가 n인 카이제곱분포의 5%, 95% 값을 의미한다.

만약 $\tau = 10,000$ 시간, 고장갯수 = 6이라면 고장률은 6×10^{-4} 가 된다. 그리고 90% 불확실구간은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2\tau} z_{0.95,2n}, \frac{1}{2\tau} z_{0.05,2(n+1)}\right) &= \left(\frac{1}{20000} z_{0.95,12}, \frac{1}{20000} z_{0.05,14}\right) \quad (2) \\ &= (2.6 \times 10^{-4}, 11.8 \times 10^{-4}) \end{aligned}$$

다만, 데이터 수집과정에서 동일한 운전조건 등 동종샘플에 대한 정보를 수집하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이에 OREDA는 이러한 환경을 고려한 고장률 산출 모델을 만들었는데 이를 OREDA estimator라고 한다. OREDA에 수록되어져 있는 데이터는 이러한 OREDA estimator를 통해 도출된 결과들이다.

이렇게 수집된 결과들은 고장이 어떠한 결과를 일으켰는지에 따라 Critical Failure, Degraded Failure, Incipient Failure, Unknown으로 구분된다. Critical Failure은 고장 즉시 설비의 기능을 상실하는 고장을 의미한다. Degraded Failure은 중대하진 않으나, 설비의 성능(output)을 방해하는 고장을 의미하며, 시간이 지나면 Critical Failure로 발전할 수 있는 고장들을 의미한다. Incipient Failure은 즉시 설비의 성능저하를 유발하진 않지만 Degraded Failure 혹은 Critical Failure가 될 수 있는 고장을 의미한다. Unknown은 해당 고장으로 인해 피해가 발견되지 않거나, 해당 고장으로 인한 피해가 예상되지 않은 고장을 의미한다.

모든 고장이 바로 사고로 이어지는 않기 때문에 광범위하게 수집된 모든 고장정보를 일괄적으로 적용하는 것은 Risk를 과대평가 하는 오류를 발생시킬 수

있다. 이에 본 연구는 고장 즉시 설비의 설치목적 달성을 실패하게 하는 Critical Failure만을 활용하였으며 해당 정보를 Table 1에 작성하였다.

2.3 Failure mode의 불확실구간과 빈도구간의 생성

Python은 범용프로그램언어로 다양한 공학 라이브러리(모듈)가 풍부하여 다양한 연구활동에 사용되고 있다. 이에 본 연구는 설비의 불확실구간을 확인하고 빈도구간을 생성하기 위하여 Python을 이용하였다.

IEC⁽¹⁰⁾, OREDA 등의 문헌에서 고장률의 빈도구간은 카이제곱 함수를 이용하여 계산될 수 있음을 명시하고 있다. 이에 본 연구는 Python 및 scipy로 카이제곱분포를 구현하고 이를 검증하였다. 자유도가 5인 카이제곱분포의 상위 0.5%의 카이제곱값(Upper)은 16.75, 상위 99.5%의 카이제곱값(Lower)은 0.41이다. Fig. 5는 자유도가 5인 카이제곱분포를 재현한 그래프이다. Upper의 카이제곱값은 16.7496, Lower의 카이제곱값은 0.4117로 카이제곱분포가 올바르게 구현되었음을 확인하였다.

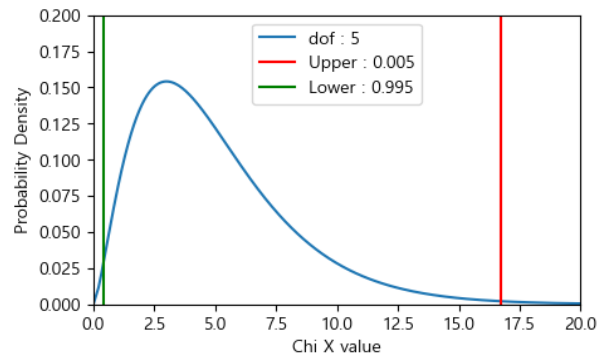


Fig. 5. The chi-squared distribution with 5 degrees of freedom and Lower, Upper.

카이제곱분포 생성모델이 정상적으로 작동함을 확인한 후 OREDA estimator를 재현하여 고장빈도구간을 생성하였다. 고장빈도구간 생성 절차는 Fig. 6과 같다.

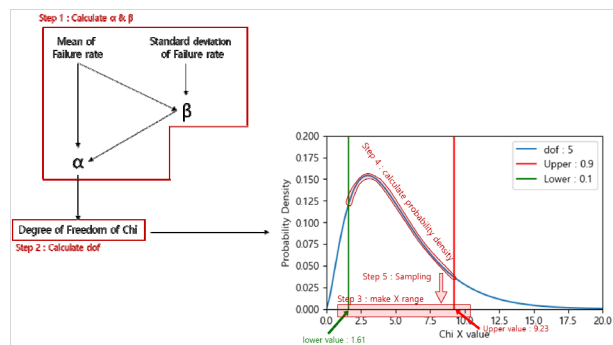


Fig. 6. Procedure for generating failure probability intervals.

Step1) OREDA handbook의 데이터를 토대로 Mean, SD 값을 확인하고 해당 값들을 이용하여 α , β 을 계산한다. Step2) α 를 이용하여 카이제곱분포의 자유도를 계산하여 해당 고장에 해당하는 카이제곱분포를 그린다. Step3) 카이제곱분포, α 및 β 를 이용하여 식 (3)을 따라 Lower 및 Upper에 해당하는 고장빈도값을 확인한다. 이후 Lower와 Upper을 경계로 하는 구간(X range)을 1,000,000등분한다.

$$Lower = \frac{1}{2\beta} z_{0.05,2\alpha} \quad (3)$$

$$Upper = \frac{1}{2\beta} z_{0.95,2\alpha}$$

Step4) 등분된 각 값들에 해당하는 확률밀도 값을 확인한다. Step5) 확률밀도 값을 이용하여 X range 값을 10,000개 샘플링한다. 위 절차를 거치게 되면 샘플 수가 10,000개인 고장빈도구간이 생성된다.

위 절차를 이용하여 Mean이 157.99×10^{-6} , SD가 162.94×10^{-6} 인 컴프레서의 고장빈도구간을 생성하고 이를 OREDA 데이터와 비교하여 Table 2 및 Fig. 7에 표현하였다. 빈도구간 생성 결과 평균 및 Upper값은 유사하게 산출되었지만 Lower값이 높게 산출되었다.

OREDA에서는 경계범위 값을 명시하고 있으나, 경계값의 포함여부가 명확하지 않다. 또한 카이제곱값을 확인함에 있어서 단위의 유효숫자도 명확하게 명시되어 있지 않다. 따라서 경계범위 값의 처리가 불분명하다. 예를들어 불확실구간이 90%(5~95)라고 한다면

Table 2. Failure probability intervals of the compressor

	OREDA	Sampling result
Mean	157.99×10^{-6}	158.91×10^{-6}
SD	162.94×10^{-6}	160.61×10^{-6}
Lower	5.7×10^{-6}	6.93×10^{-6}
Upper	4.77×10^{-4}	4.84×10^{-4}

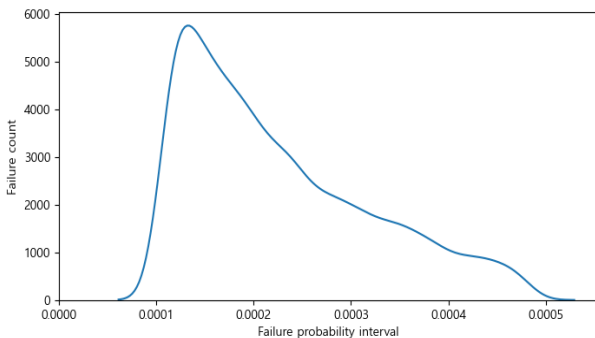


Fig. 7. Failure probability intervals graph of the compressor.

5% 이상 95% 미만인지 5% 초과 95% 이하인지 명확하지 않으며, 5%를 초과한다면 6%부터 계산에 포함되어야 하는지 5.1%부터 포함되어야 하는지 명확하지 않다. 그리고 이러한 차이가 Lower의 차이를 만들어 낸 것으로 추정된다.

본 연구에서는 불확실구간을 50%, 70%, 90%로 구분하여 분석하였다.

2.4 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션법은 여러 공학 분야뿐 아니라 공학외 분야에서도 광범위하게 사용되고 있는 방법으로서 적용에 특별한 제한 조건이 없으며 복잡한 모델에 대해서도 적용할 수 있는 일반적인 해석 수단으로 널리 사용이 가능하다¹¹⁾. 이러한 특징으로 인해 몬테카를로 시뮬레이션은 불확실성을 해석하기 위해 많은 연구에 활용된다.

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 위험성평가는 불확실성의 전파(Propagation)를 확인하기 위해 사용될 수 있다^{12,13)}. 몬테카를로 시뮬레이션의 결과는 정점사건이 발생할 수 있는 빈도구간을 만들어 내는 것이다. 몬테카를로 시뮬레이션 절차는 아래와 같다.

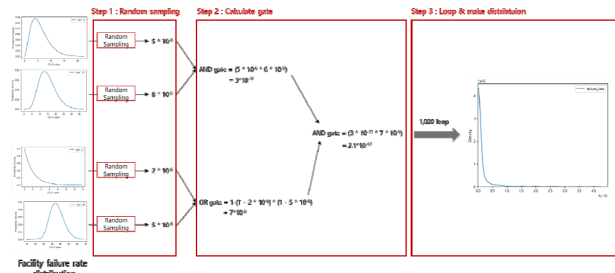


Fig. 8. Procedure for generating probability intervals using monte carlo simulation.

Step1) 장치별 고장빈도구간에서 확률분포에 따라 고장률을 랜덤샘플링 한다. Step2) 샘플링 된 고장률 값을 이용하여 FTA의 논리게이트를 계산한다. Step3) step1), 2) 절차를 1,000회 반복하여 1,000개의 빈도를 산출하고 이를 이용하여 정점사건이 발생할 수 있는 빈도구간을 생성한다.

2.5 결정론적 빈도의 설명력

서론에서 언급한 대로 위험성평가는 강도와 빈도의 곱으로 표현되는데, 빈도의 특성상 확률을 논할 수 밖에 없다. 이때 사고의 피해가 사망 등 비가역적인 피해를 일으키고 그 피해의 크기를 헤아릴 수 없는 상황이 발생할 수 있음을 고려할 때 빈도의 설명력은 보수적

으로 잡혀야 함이 타당하다. 본 연구는 결과를 해석함에 있어서 정점사건의 빈도 중 결정론적 빈도보다 낮은 빈도의 비율을 결정론적 빈도의 설명력이라고 정의하였다.

3. 연구결과

3.1 결정론적 방식 FTA 결과

Table 1 및 Fig. 3을 이용하여 결정론적 방식으로 FTA를 수행한 결과 정점사건이 발생할 빈도, 즉 결정론적 빈도는 1.4×10^{-17} 이다.

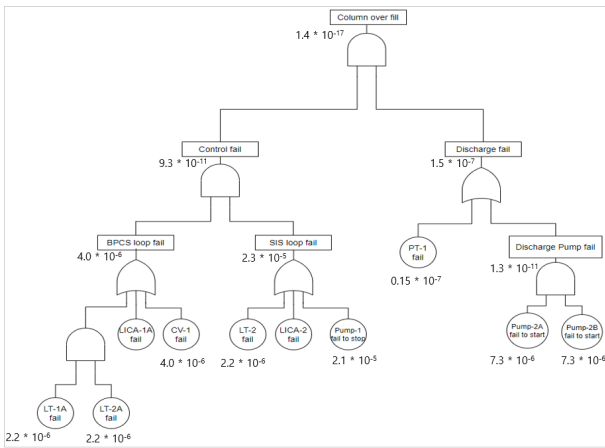


Fig. 9. Fault tree analysis result.

3.2 불확실구간에 따른 정점사건의 빈도구간

불확실구간을 90%로 두고 정점사건의 빈도구간을 확인하였으며, 빈도분포의 형상은 Fig. 10과 같다.

X축의 값은 정점사건이 발생할 빈도, 초록색 선은 정점사건이 발생할 빈도의 평균 그리고 붉은색 선은 결정론적 방식으로 확인된 정점사건이 발생할 빈도를 의미한다. 그래프의 왜도는 5.28으로 종모양이 왼쪽으로 치우친 형상이다. 그래프에 대한 기술통계를 Table 3에

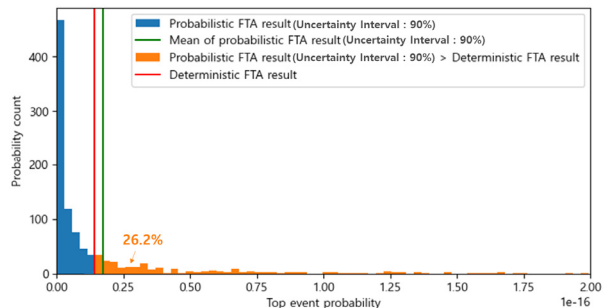


Fig. 10. Top event probability interval with a 90% uncertainty interval.

Table 3. Descriptive statistics of top event probability interval with a 90% uncertainty Interval

	Total probabilistic Pr	Probabilistic Pr > Deterministic Pr
count	1,000	262
mean	1.73×10^{-17}	5.75×10^{-17}
std	4.00×10^{-17}	6.24×10^{-17}
min	1.07×10^{-21}	1.41×10^{-17}
25%	7.02×10^{-19}	2.05×10^{-17}
50%	3.52×10^{-18}	3.36×10^{-17}
75%	1.50×10^{-17}	6.77×10^{-17}
max	5.18×10^{-16}	5.18×10^{-16}

작성하였다. 확률론적 방식으로 도출된 빈도의 평균은 약 1.73×10^{-17} 이며 빈도구간은 $1.07 \times 10^{-21} \sim 5.18 \times 10^{-16}$ 이다. 빈도구간의 평균은 결정론적 빈도보다 약 1.23배 ($1.73 \times 10^{-17} / 1.4 \times 10^{-17}$)인 값을 가지는 것으로 확인되었다. 결정론적 빈도보다 높은 값을 가지는 확률론적 빈도는 1,000개 중 262개로 26.2%의 빈도를 과소평가 하는 것으로 확인되었다. 과소평가된 빈도의 평균은 5.75×10^{-17} 로 결정론적 빈도의 약 4.1배만큼 높은 빈도이며, 과소평가된 빈도 중 가장 큰 값은 5.18×10^{-16} 으로 이는 결정론적 빈도의 약 36.9배에 해당하는 값이다.

불확실구간을 70%로 두고 정점사건의 빈도구간을 확인하였으며, 빈도분포의 형상은 Fig. 11과 같다.

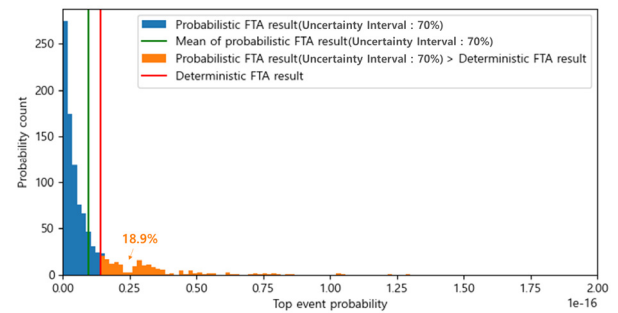


Fig. 11. Top event probability interval with a 70% uncertainty interval.

그래프의 왜도는 3.46으로 불확실구간 90%와 마찬가지로 종모양이 왼쪽으로 치우친 형상이다. 그래프에 대한 기술통계를 Table 4에 작성하였다. 확률론적 방식으로 도출된 빈도의 평균은 약 0.96×10^{-17} 이며 빈도구간은 $3.46 \times 10^{-20} \sim 1.3 \times 10^{-16}$ 이다. 빈도구간의 평균은 결정론적 빈도보다 약 0.68배 ($0.96 \times 10^{-17} / 1.4 \times 10^{-17}$)인 값을 가지는 것으로 확인되었다. 결정론적 빈도보다 높은 값을 가지는 확률론적 빈도는 1,000개 중 189개로 18.9%의 빈도를 과소평가 하는 것으로 확인되었다.

Table 4. Descriptive statistics of top event probability interval with a 70% uncertainty Interval

	Total probabilistic Pr	Probabilistic Pr > Deterministic Pr
count	1,000	189
mean	0.96×10^{-17}	3.36×10^{-17}
std	1.51×10^{-17}	2.12×10^{-17}
min	3.46×10^{-20}	1.41×10^{-17}
25%	1.59×10^{-18}	1.91×10^{-17}
50%	4.18×10^{-18}	2.82×10^{-17}
75%	1.03×10^{-17}	3.70×10^{-17}
max	1.30×10^{-16}	1.30×10^{-16}

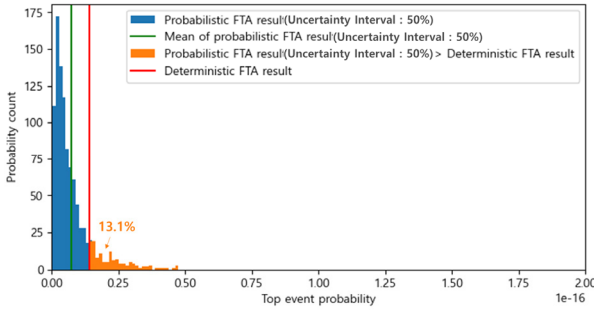


Fig. 12. Top event probability interval with a 50% uncertainty interval.

과소평가된 빈도의 평균은 3.36×10^{-17} 로 결정론적 빈도의 약 2.24배만큼 높은 빈도이며, 과소평가된 빈도 증가가 가장 큰 값은 1.30×10^{-16} 으로 이는 결정론적 빈도의 약 9.26배에 해당하는 값이다.

불확실구간을 50%로 두고 정점사건의 빈도구간을 확인하였으며, 빈도분포는 Fig. 12와 같다.

그래프의 왜도는 2.32으로 불확실구간 90%, 70%와 마찬가지로 종모양이 왼쪽으로 치우친 형상이다. 그래프에 대한 기술통계를 Table 5에 작성하였다. 확률론적 방식으로 도출된 빈도의 평균은 약 0.72×10^{-17} 이며 빈도구간은 $2.56 \times 10^{-19} \sim 4.75 \times 10^{-17}$ 이다. 빈도구간의 평균은 결정론적 빈도보다 약 0.51배 ($0.72 \times 10^{-17} / 1.40 \times 10^{-17}$)인 값을 가지는 것으로 확인되었다. 결정론적 빈도보다 높은 값을 가지는 확률론적 빈도는 1,000개 중 131개로 13.1%의 빈도를 과소평가 하는 것으로 확인되었다. 과소평가된 빈도의 평균은 2.28×10^{-17} 로 결정론적 빈도의 약 1.63배만큼 높은 빈도이며, 과소평가된 빈도 중 가장 큰 값은 4.75×10^{-17} 으로 이는 결정론적 빈도의 약 3.38배에 해당하는 값이다.

3.3 결정론적 빈도의 설명력

Fig. 11은 3개의 불확실구간 빈도를 누적하여 그린 그래프이다. 결정론적 빈도의 설명력은 불확실구간이

Table 5. Descriptive statistics of top event probability interval with a 50% uncertainty Interval

	Total probabilistic Pr	Probabilistic Pr > Deterministic Pr
count	1,000	131
mean	0.72×10^{-17}	2.28×10^{-17}
std	0.73×10^{-17}	8.18×10^{-18}
min	2.56×10^{-19}	1.40×10^{-17}
25%	2.61×10^{-18}	1.62×10^{-17}
50%	4.85×10^{-18}	2.11×10^{-17}
75%	8.95×10^{-18}	2.73×10^{-17}
max	4.75×10^{-17}	4.75×10^{-17}

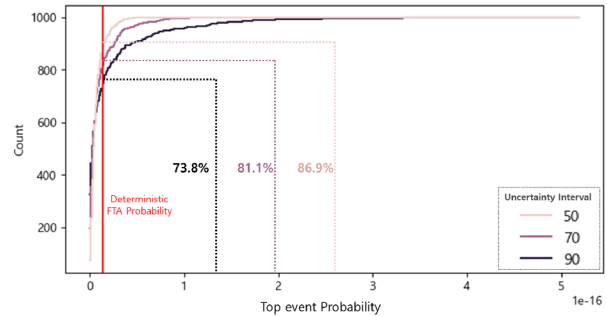


Fig. 13. Cumulative distribution of probability by uncertainty interval.

Table 6. The probability required to achieve a explanatory power of 100% for each uncertainty interval

Uncertainty Interval	Times for explain 100% probability
50	3.38
70	9.26
90	36.90

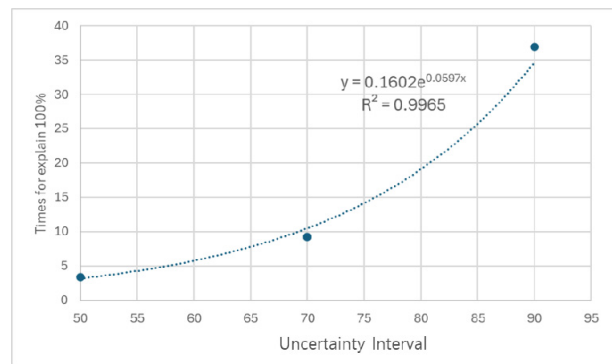


Fig. 14. The probability required to achieve a explanatory power of 100% for each uncertainty interval.

넓어질수록 감소한다. 이는 불확실구간이 넓어질수록 고장률의 빈도 범위가 넓어지니 당연한 현상이라고 할 수 있다. 불확실구간이 50%에서 70%로 넓어질 때 설명력은 5.8%p (86.9% - 81.1%) 감소하였고, 70%에서

90%로 넓어질 때 7.3%p(81.1% - 73.8%) 감소하였다. 이는 단순히 시간 내(τ) 발생한 failure의 개수(n)보다 더욱 높은 빈도가 적용되어야 하며, 이때 불확실구간을 고려해야 함을 의미한다. 불확실구간 별로 설명력 100%를 가지기 위한 빈도값을 확인하였다(Table 6).

불확실구간에 따른 설명력 100%를 위한 빈도는 지수의 형태로 증가하는 것을 확인하였다. 불확실구간이 50% 일때는 결정론적 빈도의 3.38배만큼 높은 빈도를 적용하여야 하며, 90%일 때는 36.9배만큼 높은 빈도를 적용하여야 한다.

4. 결론

본 연구는 결정론적 빈도의 설명력을 확인하기 위해 종류탑 사고 시나리오를 구성하였다. 이후 OREDA의 불확실구간 및 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 빈도를 확률적인 구간으로 제시하였다. 마지막으로 결정론적 빈도의 설명력을 확인하고 부족한 설명력을 해결하기 위한 방안을 확인하였다.

불확실구간이 90%인 경우 결정론적 빈도의 설명력이 73%인 것을 확인하였으며, 36.9배만큼 보수적으로 적용하여야만 설명력이 100%에 도달하는 것을 확인하였다. 또한 설명력 100%를 위한 빈도적용의 보수성은 불확실구간 대비 지수 형태로 증가하는 것을 확인하였다.

CCPS는 리스크 분석이 희박한 데이터와 근사모델에 의존하는 경우 불확실성 분석이 리스크 분석의 일부로 수행되어야 한다고 함과 동시에 전체 불확실성의 기여하는 설비 등을 식별하는 것이 중요함을 언급하였다¹⁴⁾. 빈도 정보는 상수로 제공되는 경우들이 대부분이다. 그리고 상수는 수집된 데이터들의 대푯값으로서 OREDA의 경우는 정해진시간 내 발생한 고장의 수 즉 n/τ 을, IEC에서는 Maximum likelihood estimate를 명시하고 있다. 다만 이러한 대푯값만을 제공하게 되는 경우, 빈도의 분포 등 소실되는 정보로 인해 위험성평가의 불확실성 분석 등 추가적인 분석단계의 진입이 불가능하다. 따라서 빈도 데이터를 수집하는 단계에서 빈도의 분포 등 소실되는 정보에 대한 고민이 반드시 필요함을 확인하였다.

또한 불확실성 분석은 많은 데이터와 몬테카를로 시뮬레이션 등 모델링 기법이 수반되어야 하기 때문에 산업계에서 이러한 방식의 위험성평가를 수행하는 것을 기대하기는 어렵다. 따라서 기존의 결정론적 빈도에 보정계수 적용하는 방식이 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

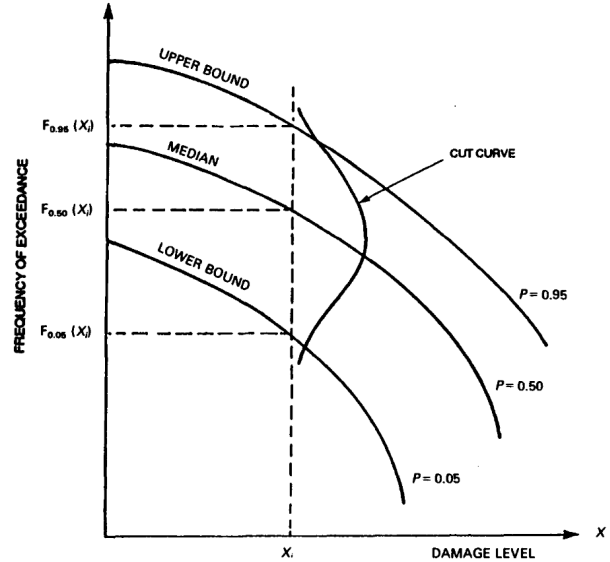


Fig. 15. Uncertainty in risk estimates by CCPS¹⁴⁾.

F-N Curve의 X축은 사망자수이며 Y축은 해당 사고가 발생할 수 있는 확률을 의미하는 그래프이다. 사고로 인한 사망자수와 사고 발생 확률을 의미하는 사회적 위험성을 일반적으로 F-N Curve형태로 표현한다¹⁵⁾. Fig. 15처럼 빈도구간을 고려한 F-N Curve를 그리는 것은 현재로서는 도출해내기 어려운 결과물이다. 그러나 의사결정시 고려할 수 있는 신뢰성 있는 Risk를 식별하기 위해선 이러한 결과물이 필요할 것이다.

4.1 한계

ISO는 위험성평가를 진행함에 있어서 신뢰구간을 고려해야 함을 명시하고 있지만 본 연구는 OREDA 데이터의 불확실구간을 사용하였다. 이는 관심수준에 따른 빈도구간이 결정되고 고장률이 그 구간 내에 존재하다는 개념이 신뢰구간이 동일하였으며, 신뢰구간을 언급하고 있는 데이터북이 없었기 때문이다. 다만 OREDA의 불확실구간은 다르게 데이터가 많아도 구간이 좁아지지 않는다는 특징을 가지고 있다. 또한 OREDA estimator 특성상 자유도가 낮다. 그렇기 때문에 고장률 빈도구간의 확률분포가 지수형태로 나온다는 특징을 가지고 있다. 이는 결정론적 빈도의 설명력이 과대평가되어 있어 있을 수 있음을 의미한다. 따라서 보편적 자료로 생성이 가능한 고장률의 신뢰구간 생성모델에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement: This research was conducted with the support of the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) funded by the Ministry of Trade,

Industry and Energy (P0012787, 2024 Industrial Innovation Talent Growth Support Project) 이 논문은 2024년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (P0012787, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

References

- 1) American Petroleum Institute, API 580 Risk based Inspection, p. 7, 2016.
- 2) International Electrotechnical Commission, IEC 61511 part 3 : Guidance for the Determination of the Required Safety Integrity Levels, p. 15, 2016.
- 3) International Organization for Standardization, ISO 31000 Risk management - Guidelines, p. 12, 2018.
- 4) Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Investigation Report – BP Texas City Refinery Explosion and Fire, p. 34, 2007.
- 5) J. L. Fuentes-Bargues, C. González-Cruz, C. G. Gaya and P. B. Pérez, “Risk Analysis of a Fuel Storage Terminal Using HAZOP and FTA”, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 14, p. 705, 2017.
- 6) Health and Safety Executive, Safety and Environmental Standards for Fuel Storage Sites, p. 112, 2009.
- 7) Center for Chemical Process Safety, Layer of Protection Analysis Simplified Process Risk Assessment, p. 28, 2001.
- 8) Offshore Reliability Data, Offshore Reliability Data Handbook, 2002.
- 9) Ministry of Trade, Industry and Energy, Special Notice on the Application of Standards for Transfer and Succession of High-Pressure Gas Manufacturing Business, 2018.
- 10) International Electrotechnical Commission, IEC 61511 part 2 : Guidelines for the application of IEC 61511-1, p. 60, 2016.
- 11) J. S. Lee and B. Y. Kee, “Evaluation of Creep Crack Growth Failure Probability for High Temperature Pressurized Components Using Monte Carlo Simulation”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 21, No. 1, p. 28, 2006.
- 12) International Electrotechnical Commission, IEC 31010 Risk Management - Risk Assessment Techniques, p. 82, 2019.
- 13) Korea Occupational Safety and Health Agency, Guidelines on Probabilistic Risk Assessment Procedures, 2014.
- 14) Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk analysis Second edition, p. 445, 2000.
- 15) A. Gelman and S. Greenland, “Are Confidence Intervals better Termed “Uncertainty Intervals?””, the British Medical Journal, 2019.
- 16) Y. H. Kim, S. I. Um and J. W. Ko, “A Comparative Study on the Risk(Individual and Societal) Assessment for Surrounding Areas of Chemical Process”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 10, No. 1, p. 56, 1995.