



# 베이지안 네트워크를 이용한 지진 유발 화재·폭발 복합재해 확률론적 안전성 평가

이 세 혁<sup>1†</sup> · 석 의 찬<sup>2</sup> · 송 준 호<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, <sup>2</sup>서울대학교 건설환경공학부 박사과정, <sup>3</sup>서울대학교 건설환경공학부 교수

## Bayesian Network-based Probabilistic Safety Assessment for Multi-Hazard of Earthquake-Induced Fire and Explosion

Se-Hyeok Lee<sup>1†</sup>, Uichan Seok<sup>2</sup> and Junho Song<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

<sup>2</sup>Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

### Abstract

Recently, seismic Probabilistic Safety Assessment (PSA) methods have been developed for process plants, such as gas plants, oil refineries, and chemical plants. The framework originated from the PSA of nuclear power plants, which aims to assess the risk of reactor core damage. The original PSA method was modified to adopt the characteristics of a process plant whose purpose is continuous operation without shutdown. Therefore, a fault tree, whose top event is shut down, was constructed and transformed into a Bayesian Network (BN), a probabilistic graph model, for efficient risk-informed decision-making. In this research, the fault tree-based BN from the previous research is further developed to consider the multi-hazard of earthquake-induced fire and explosion (EQ-induced F&E). For this purpose, an event tree describing the occurrence of fire and explosion from a release is first constructed and transformed into a BN. And then, this BN is connected to the previous BN model developed for seismic PSA. A virtual plot plan of a gas plant is introduced as a basis for the construction of the specific EQ-induced F&E BN to test the proposed BN framework. The paper demonstrates the method through two examples of risk-informed decision-making. In particular, the second example verifies how the proposed method can establish a repair and retrofit strategy when a shutdown occurs in a process plant.

**Keywords** : probabilistic safety assessment, bayesian network, fault tree, event tree, decision-making, gas plant

### 1. 서 론

원자력 발전소 지진 PSA(Probabilistic Safety Assessment)의 목적은 PSHA(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)를 통해 구축된 지진 재해도 곡선과 사건수목 해석(Event Tree Analysis, ETA) 및 지진 취약도 곡선(Fragility Curve)을 포함하는 고장수목 해석(Fault Tree Analysis, FTA)을 이용하여 최종적으로 연간 노심 손상빈도(Core Damage)를 산정하는 것이다(EPRI, 1994; Oh and Kwag, 2018). PSHA는 원자력 발전소 부지의 불확실성을 고려하여 지진 발생가능성을 빈도 곡선으로 표현하는 과정이며(EPRI, 2003), ETA·FTA는 원자력 발전소

의 지진으로 인한 노심손상 과정을 수목으로 체계적으로 표현하고 재해도 곡선과 취약도 곡선을 이용하여 노심의 리스크를 분석할 수 있는 기법이다(Kwag *et al.*, 2021).

최근 원자력 발전소의 PSA 방법론에 착안하여 산업시설물의 일종인 가스플랜트에 대해 지진 PSA가 수행되었다(Lee *et al.*, 2023). 원자력 발전소의 경우 노심 손상이라는 최악의 사건을 기준으로 오랫동안 다양한 사고 시나리오가 조사되어 ETA 및 FTA가 구축 및 수행되어 왔다. 하지만, 산업 시설물의 경우 매우 다양한 공정이 존재하며, 각 공정들에서 발생하는 사고들은 모두 운영에 중요한 영향을 끼칠 수 있기 때문에 원자력 발전소와 같이 특정 설비 중심의 사고 시나리오로 분석

<sup>†</sup>Corresponding author:

Tel: +82-31-910-0546; E-mail: shlee08@kict.re.kr

Received May 21 2024; Revised June 2 2024;

Accepted June 3 2024

© 2024 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

및 체계화하는 것은 불가능하다. 따라서, 다양한 공정을 고려한 체계화된 산업시설물 PSA를 수행하기 위해서는 운영지속성에 초점을 맞춘 운영정지(Shut-Down)를 최악의 사건으로 정의하고 시설물 운영 지속에 중요한 영향을 끼치는 공정들의 사고 시나리오가 분석되어야 한다. 이와 같은 이유로 선행 연구에서는 가스 플랜트의 운영정지를 유발하는 공정의 영향을 분석하고, 이를 기반으로 하행법(Top-Down) 방식의 고장수목을 선 구축한 후 이를 베이지안 네트워크(Bayesian Network, BN)로 변환하여 운영정지 확률을 정량적으로 산정하는 방법론을 제안하였다(Lee *et al.*, 2023).

BN은 시각적 확률 방법론으로 주어진 시스템 문제의 확률 변수들을 노드로 표현하고 변수들 간의 관계를 링크로 연결하여 정의한다. 이때 링크는 조건부 확률 관계를 의미하며 이를 사전에 조건부확률표 CPT(Conditional Probability Table)로 구축하여 BN에 입력하면, 주어진 정보를 이용하여 모든 노드들에서 베이지안 업데이트(Bayesian Updating) 수행이 가능하다. BN은 효율적인 베이지안 업데이트가 가능하여 재난재해 분야에서 의사결정과정에서 많이 사용되고 있다(Byun *et al.*, 2017; Lee and Song, 2016). 가스플랜트에 대해 지진 PSA를 수행하기 위한 개발된 고장수목 기반 베이지안 네트워크는 지진이 발생하였을 때 각 하위시스템의 위험도 평가 및 운영정지 확률 산정뿐만 아니라, 역으로 지진으로 인해 운영정지 발생하였을 때 어떤 하위시스템 혹은 설비들이 가장 큰 영향을 미치는지 파악하는 중요도 분석 또한 가능하다.

BN의 또 다른 장점으로는 구축된 네트워크에 확률 변수 추가가 용이하다는 점과, 다른 목적을 가지고 구축된 BN과의 연계가 가능하다는 점이다. 가스플랜트의 경우 지진 외에도 화재, 폭발, 유해물질 확산과 같은 재해가 발생 가능하며, 전통적으로 누출로 인한 화재·폭발은 주요 재해로 인식되어 왔다. 이때, 화재·폭발 위험도 분석은 ETA를 이용하여 정의된 최악의 사고의 빈도를 산출하고, 그에 대응하는 화재·폭발 해석(Consequence Analysis)을 수행하여 나온 값(온도, 폭발 등)을 곱하여 산정하게 된다(KICT, 2021). 본 연구에서는 ETA를 활용한 화재·폭발 발생 확률 산정에 주안을 두고 BN을 구축하고자 한다. 이에 따라 외부사건(예: 지진)으로 인해 특정 설비에서 누출이 발생하고 시간의 흐르면서 초기 점화 발생, 화재 및 폭발 탐지 여부, 지연된 점화 발생(초기 점화 비 발생 시) 순으로 정의된 화재·폭발 사고 시나리오를 기반으로 ETA를 구축하고, 이를 BN으로 변환한다. 이때 구축된 화재·폭발 BN은 외부사건, 즉 지진으로 인한 손상("Earthquake-induced")으로 인해 누출이 발생함을 가정하기 때문에 기존에 구축된 지진 BN과 연계될 수 있다. 최종적으로 해당 복합재해에 대한 가스플랜트의 PSA 수행 및 의사결정을 수행할 수 있는 방법론을 제안한다.

2절에서는 BN에 대해 간략히 소개하고 기존에 제안된 가스

플랜트 지진 PSA를 위한 고장수목 기반 베이지안 네트워크 구축 과정 및 사용된 정보를 요약하여 서술한다. 3절에서는 화재·폭발 사고 빈도 분석을 위한 사건수목을 정의하고 이를 BN으로 변환한다. 변환된 화재·폭발 BN은 기존에 구축된 지진 BN과 연계되어 최종적으로 지진 유발 화재·폭발 복합재해 BN으로 확장된다. 4절에서는 다양한 사고 시나리오들을 가정하고 구축된 복합재해 BN을 이용하여 확률추론을 수행하고 이를 이용한 여러 의사결정 과정들을 소개한다. 결론적으로 지진 유발 화재·폭발이라는 복합재해를 평가할 수 있는 방법론으로서 큰 의의가 있으며, 추후 연구를 통해 가정된 부분들을 보완함으로써 실질적인 사용가능성을 제안하고자 한다.

## 2. 가스플랜트 지진 베이지안 네트워크 구축

### 2.1 베이지안 네트워크

베이지안 네트워크(Bayesian Network, BN)는 시각적 확률 모델로서 DAG(Directed Acyclic Graph)와 베이지안 업데이트(Bayesian Updating)이 결합된 방법론이다(Barber, 2012; Byun *et al.*, 2017). 주어진 시스템 확률추론 문제에서 주요 인자들을 확률변수로 가정하고 가정된 변수들은 BN에서 노드로 표현된다. 그리고 노드들 간의 상관관계는 링크(Link)로 표시되며 이는 조건부확률을 의미한다. 이때, 조건부확률은 CPT(Conditional Probability Table)로 사전에 계산되어 BN에 입력되어야 하며, 최종적으로 구축된 BN과 자체 알고리즘을 통해 다양한 확률 추론이 가능하다. Fig. 1은 BN의 효율성을 설명하기 위해 가정한 간단한 BN 예를 나타낸다.

Fig. 1의 BN 예는 다섯 개의 노드(확률변수  $X_1 \sim X_5$ )들로 구성되어 있으며 링크로 그 관계가 정의되어 있다. 일반적으로 변수들 간의 관계가 정의되어 있지 않을 경우 결합확률분포함수(Joint Probability Distribution Function, JPDF)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(\mathbf{X}) = P(X_1|X_2, X_3, X_4, X_5) \times P(X_2|X_3, X_4, X_5) \times P(X_3|X_4, X_5) \times P(X_4|X_5) \times P(X_5) \quad (1)$$

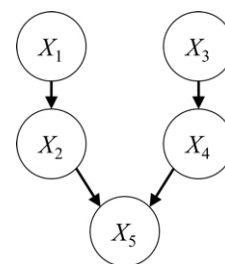


Fig. 1 Example BN

하지만 사전에 정의된 BN 관계를 고려할 경우 식 (1)은 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$P(\mathbf{X}) = P(X_5|X_2, X_4)P(X_2|X_1)P(X_1)P(X_4|X_3)P(X_3) \quad (2)$$

식(2)에서  $X_2, X_4$ 는  $X_5$ 의 부모 노드이고, 같은 방식으로  $X_1$ 과  $X_3$ 는 각각  $X_2$ 와  $X_4$ 의 부모 노드이며,  $P(X_5|X_2, X_4)$ ,  $P(X_2|X_1)$ ,  $P(X_4|X_3)$ 들은 각 관계들에 대응하는 CPT를 의미한다. 이러한 관계는 Fig. 1에서 사전에 설정된 링크들을 통해 정의되며, 네트워크가 복잡해질수록 다양한 확률추론을 위해 필요한 JPDP를 연산하는 과정의 효율성이 증대된다. BN은 부모 노드의 수가 많을수록 CPT의 사이즈가 기하급수적으로 증가하는 잘 알려진 문제를 갖고 있지만 이를 극복하기 위한 여러 연구가 진행된 바 있다(Bensi *et al.*, 2011; 2013; Byun *et al.*, 2017).

BN은 사건수목, 고장수목과 같이 시각적으로 정보를 표현하는 공통점이 있지만 관측 혹은 가정값이 주어졌을 때 이를 관련 노드에 바로 입력할 수 있고, 이때 모든 노드들의 확률분포 변화를 즉시 업데이트하고 이를 시각적으로 나타낼 수 있다는 장점을 갖고 있다. BN은 이러한 유연한 확률추론 덕분에 다양한 문제에서 확률 기반 의사결정의 도구로 활용되고 있다(Bensi *et al.*, 2011). 하지만 주어진 복잡한 시스템 문제를 바로 BN으로 구축할 경우 다양한 인과관계 오류 발생가능성이 있다. 따라서 시스템 계통 전문가들에 의해 구축된 사건수목 혹은 고장수목을 기반으로 BN으로 변환하게 되면 인과관계 오류 문제를 피할 수 있다(Lee *et al.*, 2023).

## 2.2 가스플랜트 지진 고장수목 구축

가스 플랜트의 일반적인 공정 흐름은 Fig. 2와 같으며 크게 하역(Unloading), 저장(Save), 기화(Vaporization), 공급(Supply) 순으로 이루어져 있다.

앞서 언급한 바와 같이 원자력 발전소와 달리 산업시설의 경우 특정설비 고장에 대응되는 정점사건을 정의할 수 없기 때문에 운영정지(Shut-Down)를 정점사건으로 정의하는 것이 적

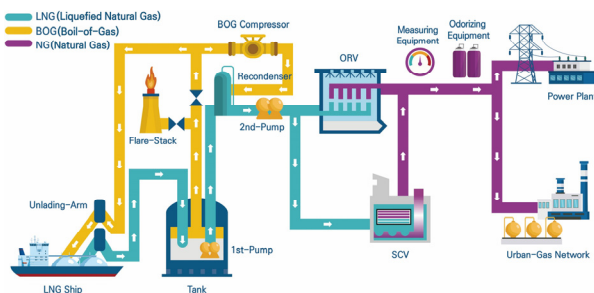


Fig. 2 General Flow of Gas-Plant's Process

절하다. Fig. 3은 이전 연구로부터 구축된 가스플랜트의 최종적인 고장수목을 나타내며 자세한 구축 과정은 Lee 등(2023)에 기술되어 있다.

원자력 발전소와 마찬가지로 국가 주요 기밀시설로 분류되는 가스플랜트의 실제 정보는 활용할 수 없기 때문에 공공데이터 포털에서 공개된 일부자료를 바탕으로 Fig. 4와 같이 가상의 Plot Plan을 구성하였다. 해당 Plan은 하역장치, 두 가지 형식의 저장탱크, 방산탑(Flare-Stack), SCV(Submerged Combustion Vaporizer), ORV(Open Rack Vaporizer), 그리고 변전소(Substation) 등 총 58개의 구성요소를 가지고 있다(Lee *et al.*, 2023).

산업시설물의 지진 PSA를 수행하기 위해서는 구축된 고장수목과 함께 가장 하위 사건, 즉 저장탱크, SMV, ORV, 변전소 등에는 식 (3)과 같이 지진 취약도 곡선이 필요하다(Oh and Kwag, 2018).

$$P(\text{failure}|\text{PGA} = a) = P_f(a) = \Phi\left[\frac{\ln(a) - \ln(A_m)}{\beta}\right] \quad (3)$$

취약도 곡선은 표준정규분포의 누적분포함수( $\Phi[\cdot]$ )로 표

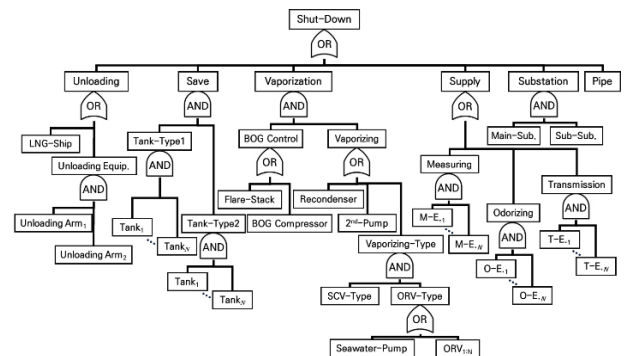


Fig. 3 Fault Tree for Gas Plant

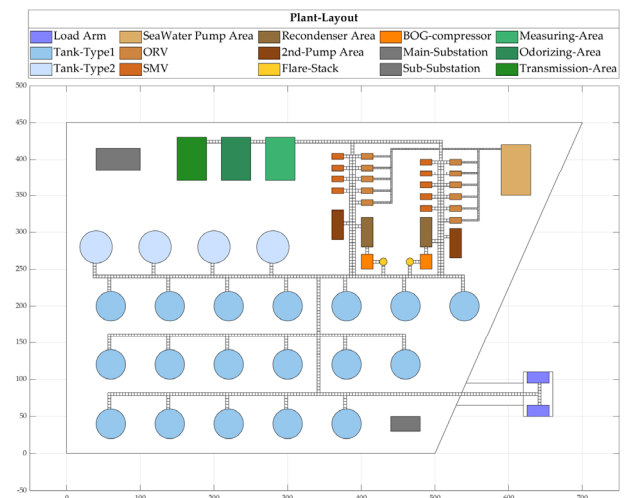


Fig. 4 Virtual Plot Plan for Gas-Plant

현되며, 주어진 PGA(Peak Ground Acceleration)에 대해 파괴될 확률을 의미한다. 식 (3)에서  $A_m$ 과  $\beta$ 는 해당 DS(Damage State)에 대응하는 지진동(즉, PGA) 내력 중앙값, 로그 표준편차이다. 최근 문헌 조사를 통해 누출과 관련된 DS를 정의하고 취약도 곡선을 산정한 연구들이 진행된 바 있으며(Abbiati *et al.*, 2021; Bursi *et al.*, 2018), 이는 운영정지와 관련된 지진 PSA를 수행하기에 적절하다. 또한, 해당 정의는 지진 유발 화재·폭발로 확장될 수 있다. 하지만 저장탱크 외에 SCV, ORV, BOG-Compressor 등 다른 주요 설비들에 대한 취약도 연구는 미미한 실정이다. 따라서 해당 설비들의 취약도 정보 부족을 보완하기 위해  $A_m$ 과  $\beta$ 를 노드로 포함하는 취약도 모듈 BN을 본 연구에서 구축한다.

2.3 지진 고장수목 기반 베이지안 네트워크 구축

앞서 구축된 고장수목을 BN으로 변환하기 위해서는 AND, OR 게이트를 CPT로 변환하는 과정이 필요하며, 이를 위한 여러 연구가 이미 진행된 바 있어 간단하게 변환할 수 있다(Kwag and Gupta, 2016; Zwirgmaier, 2016). Fig. 5는 구축된 고장수목 중 일부분인 하역 단계를 BN으로 표현한 것이다.

Fig. 5에서 OR 게이트에 해당하는 Unloading 노드와 AND 게이트에 해당하는 Unloading Equip. 노드의 CPT는 각각 Table 1, Table 2와 같다. OR 게이트에 대응되는 CPT인 Table 1의 경우 부모 노드들이 모두 ‘Safe’한 경우에만 자식 노드도 ‘Safe’

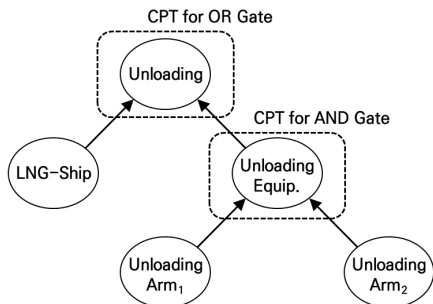


Fig. 5 Unloading-BN based on the Constructed Fault Tree

Table 1 CPT of Unloading Node corresponding OR Gate

| LNG-Ship         | Safe |      | Fail |      |
|------------------|------|------|------|------|
| Unloading Equip. | Safe | Fail | Safe | Fail |
| Safe             | 1    | 0    | 0    | 0    |
| Fail             | 0    | 1    | 1    | 1    |

Table 2 CPT of Unloading Equip. Node corresponding AND Gate

| Unloading Arm <sub>1</sub> | Safe |      | Fail |      |
|----------------------------|------|------|------|------|
| Unloading Arm <sub>2</sub> | Safe | Fail | Safe | Fail |
| Safe                       | 1    | 1    | 1    | 0    |
| Fail                       | 0    | 0    | 0    | 1    |

하고, 해당 경우에만 확률 1이 되며 그 외 경우는 모두 0으로 표시된다. AND 게이트를 의미하는 Table 2의 경우 부모 노드들이 모두 ‘Fail’한 경우에만 자식 노드도 ‘Fail’하는 쉬운 규칙으로 구성되며 해당 경우만 1로 표시된다.

다음으로 가장 하위 사건들에 해당하는 노드들의 CPT를 구성해야 하며, 2.2절에서 언급한 바와 같이 지진 취약도 연구가 미미한 설비들의 정보 부족을 보완하기 위해 Fig. 6과 같이 BN을 구성한다(Lee *et al.*, 2023).

Fig. 6은 지진취약도 모듈 BN으로, 저장탱크에 대해 설명한다. Frag. Param-1, 2는 각각 취약도 곡선에서 중앙값과 로그 표준편차를 의미한다. Earthquake 노드는 PGA를 결정하기 위해 도입되었으며, 해당 노드는 모든 설비들에 대응되는 노드들에 연결된다. Frag. Param-1, 2 노드들의 CPT의 이산화구간(Discretized Interval)은 각각 [1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8], [0.6, 0.7, 0.8]이며, 문헌들에서 제안된 취약도 곡선 값을 기준으로 임의로 가정하였다(Abbiati *et al.*, 2021; Bursi *et al.*, 2018). 그리고 두 노드의 각 인터벌에 해당하는 CPT 값은 등분포를 가정하여 [0.20, 0.20, 0.20, 0.20], [1/3, 1/3, 1/3]로 설정하였다. 지진 노드의 이산화 구간은 [0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9](단위: 중력가속도 g)이며, 각 구간에 대응하는 초기 CPT 값으로는 지진 재해도 곡선과 유사하게 [0.64, 0.23, 0.09, 0.03, 0.01]과 같이 임의로 가정하였다. 해당 값은 추후 제안한 방법론을 적용하는 지역의 정밀한 PSHA 수행을 통해 대체될 수 있다. 최종적으로 설명한 세 노드들을 부모 노드로 갖는 Tank-Type<sub>1-5</sub>의 CPT는 Table 3과 같이 구축된다(Lee *et al.*, 2023). 여기서  $P_f$ 는 취약도 함수를 의미한다.

수송관과 연결되어 있는 Unloading Arm, Tank, Flare-Stack, BOG-Compressor, 2<sup>nd</sup>-Pump, SCV, ORV, 및 공급에 해당하는 노드들에는 Table 3의 CPT를 사용하였다. 수송관과 상관없는 변전소도 동일한 CPT를 사용하지만, Frag. Param-1, 2 노드의 이산화 구간은 문헌조사를 통해 [0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9], [0.4, 0.55, 0.7]로 다르게 설정하였다(Kim *et al.*, 2009). LNG 선박

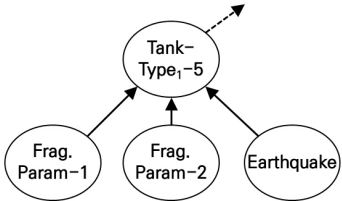


Fig. 6 Fragility-Module BN (Ex: Tank-Type1-5)

Table 3 CPT for Tank-Type1-5 Node

| Frag.Param-2 | 0.6        |     |            |            |     |            | ... |
|--------------|------------|-----|------------|------------|-----|------------|-----|
| Frag.Param-1 | 1.0        |     |            | 1.2        |     |            | ... |
| Earthquake   | 0.1        | ... | 0.9        | 0.1        | ... | 0.9        | ... |
| Safe         | $1 - P_f$  | ... | $1 - P_f$  | ...        | ... | $1 - P_f$  | ... |
| Fail         | $P_f(0.1)$ | ... | $P_f(0.9)$ | $P_f(0.1)$ | ... | $P_f(0.9)$ | ... |



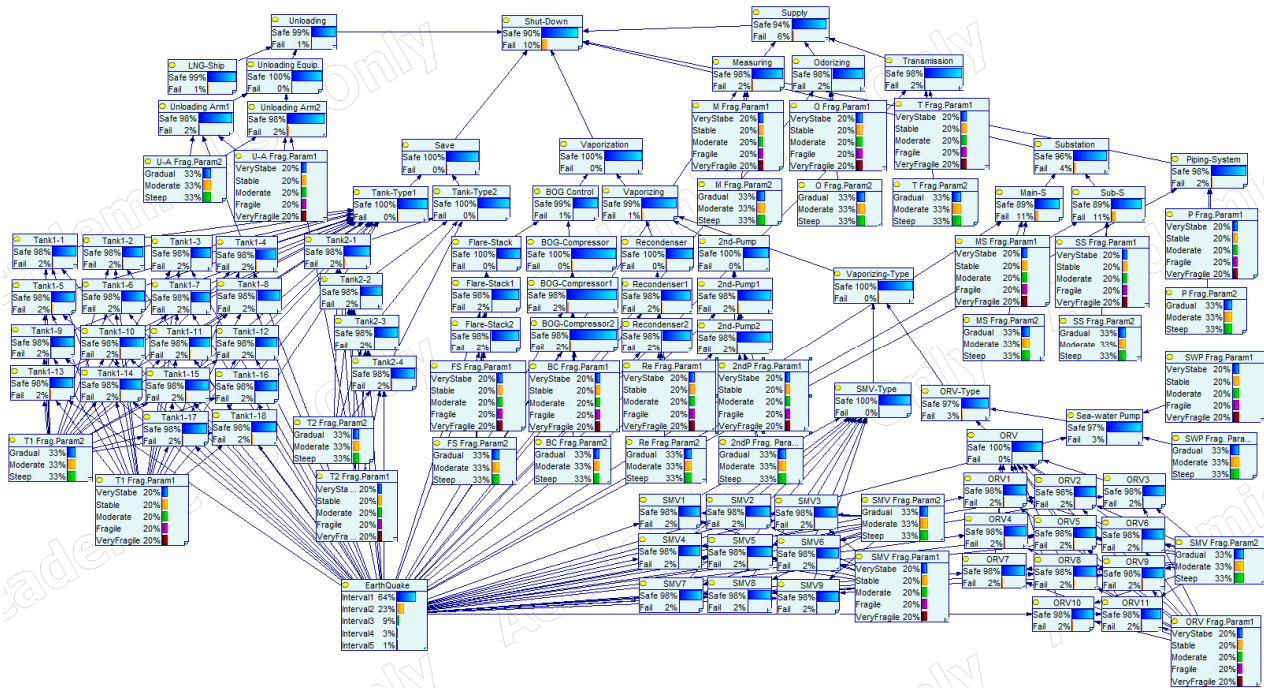


Fig. 7 Fault Tree-based BN for Earthquake-PSA: Gas-Plant

노드의 경우 Vanem 등(2008)에서 제시한 정보를 기반으로 Safe 혹은 Fail을 나타내는 Binary 노드로 표현하고 CPT 값으로는 0.9922와 0.0078을 사용하였다. 본 연구에서는 연구목적으로 무료로 제공되는 GeNie(Bayes Fusion, LLC, 2023)를 활용하여 Fig. 7과 같이 BN을 구축하였다.

### 3. 지진 유발 화재·폭발 베이지안 네트워크 구축

#### 3.1 화재·폭발 사건수목 기반 베이지안 네트워크

지진 PSA를 수행하기 위해 구축된 고장수목(Fig. 3)은 운영 정지를 유발할 수 있는 사고 시나리오를 하행법 방식으로 표현 하였으며, 정점사건-하위 시스템-기초 사건으로 이루어져 있다. 즉, 기초사건들에서 발생한 고장들의 조합으로 정점사건의 확률을 산정하는 것을 목표로 한다. 반면에 화재·폭발 리스크 평가는 지진 리스크 평가에서 기초사건으로부터 정점사건의 발생확률을 산정하는 것과 달리, 특정 설비에서 발생한 누출로부터 시간의 흐름에 따라 화재, 폭발, 혹은 확산으로 분화하는 사건들의 빈도를 산정하는 것을 목표로 한다. 따라서 시간의 흐름에 따른 사건의 진화 과정을 서술하기에는 고장수목보다 사건수목 적용이 적절하다. Fig. 8은 누출로부터 6가지의 화재, 폭발, 확산 형태로 분화하는 사건수목을 나타낸다(KICT, 2021). Fig. 8에서 상단은 각 사건(Event)들을 의미하며, 누출(Release), 즉시 점화(Immediate Ignition, II), 화재·연기 감지(Fire & Gas Detection), 지연된 점화(Delayed Ignition, DI), 최

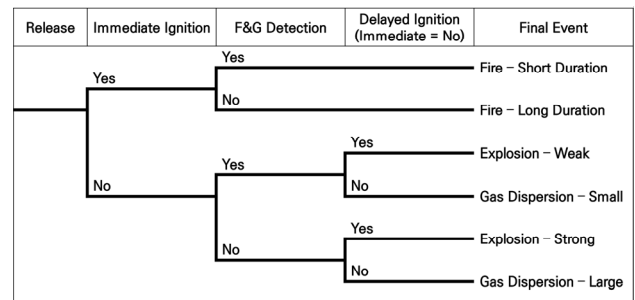


Fig. 8 Example of Event Tree for Fire &amp; Explosion

종 사건(Final Event)의 순으로 발생과정을 설명하고 있다. 만약 대상 시스템에 대해 사고 발생 경위가 상세히 분석된 경우 제시된 사건수목과 다른 사건들을 정의하여 수목을 구축할 수 있다(KOSHA, 2021).

다음으로 구축된 화재·폭발 사건수목을 BN으로 변환하는 과정이 필요하다. 앞서 언급한 바와 같이 사건수목 및 고장수목을 BN으로 변환하는 많은 연구가 이루어졌다(Barber, 2012; Kwag and Gupta, 2016; Zwirgmaier, 2016). 앞서 2절에서 고장수목을 BN으로 변환하였을 경우에는 그 형태가 완벽히 일치하였으며, 단지 AND, OR 게이트에 대응하는 CPT만을 산정하여 입력하면 되었다. 하지만 사건수목을 BN으로 변환할 경우에는 고장수목을 BN으로 변환하는 과정과 달리 네트워크 구조가 불일치하며, 사건 간 조건부확률을 일일이 확인하여 링크 연결 여부를 판단하여야 한다. Fig. 9는 조건부확률을 확인하지 않았을 경우 모든 링크들을 연결한 초기 BN이다.

Fig. 9는 누출(Release)사건에서 최종사건(Final Event)으로 진행됨에 따라 이전 사건들은 그 이후 모든 사건들과 링크로 연결됨을 나타낸다. 이때, 각 링크들은 최종 사건의 조건부확률을 기반으로 삭제될 수 있다. 다음 수식들은 Fig. 8에서의 마지막 최종 사건에 해당하는 세부 가지들을 조건부확률로 나열한 것이다.

$$P(FE = F_{SD} | R = \text{Yes}, II = \text{Yes}, F\&G = \text{Yes}, DI = \text{No}) \quad (4)$$

$$P(FE = F_{LD} | R = \text{Yes}, II = \text{Yes}, F\&G = \text{No}, DI = \text{No}) \quad (5)$$

$$P(FE = E_W | R = \text{Yes}, II = \text{No}, F\&G = \text{Yes}, DI = \text{Yes}) \quad (6)$$

$$P(FE = G_S | R = \text{Yes}, II = \text{No}, F\&G = \text{Yes}, DI = \text{No}) \quad (7)$$

$$P(FE = E_S | R = \text{Yes}, II = \text{No}, F\&G = \text{No}, DI = \text{Yes}) \quad (8)$$

$$P(FE = G_L | R = \text{Yes}, II = \text{No}, F\&G = \text{No}, DI = \text{No}) \quad (9)$$

식 (4)~(9)에서 R, II, F&G, DI는 각각 누출, 즉시 점화, 화재·연기 감지, 지연 점화를 의미하며,  $F_{SD}$ ,  $F_{LD}$ ,  $E_W$ ,  $G_S$ ,  $E_S$ ,  $G_L$ 은 Fig. 8 사건수목 최종 사건(FE)의 세부 항목들을 나타낸다. 위 수식들에서 모든 사건들은 누출이 발생할 경우를 기본 가정으로 하고 있으며, FE는 이전 모든 사건들의 영향을 받으므로 Fig. 9의 R4, I3, F2, DI 링크들은 삭제되지 않는다. 첫 번째로 수식들에서 R의 조건에 따라 II F&G, DI 조건 변화에 영향을 끼치지 않으므로 Fig. 9의 검은색 링크 R1, R2, R3은 삭제될 수 있다. 두 번째로 II의 조건에 따라 F&G는 영향을 받지 않지만, 식 (4), (5)에서 II = Yes일 경우 DI는 무조건 No인 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 9의 빨간색 링크 II만 삭제된다. 마지막으로 F&G 조건은 DI 조건의 영향을 주지 않으므로, 파란색 링크 F1은 삭제된다. 최종적으로 Fig. 10은 삭제된 링크들을 제외한 화재·폭발 사건수목 기반 BN을 나타낸다.

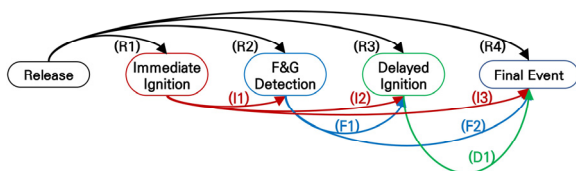


Fig. 9 Initial BN for Event Tree of Fire & Explosion

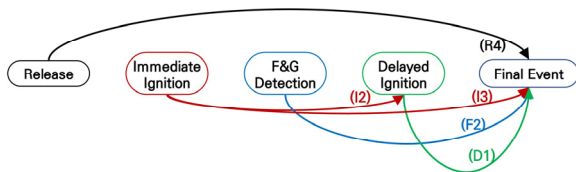


Fig. 10 Final BN for Event Tree of Fire & Explosion

Fig. 10의 화재·폭발 BN의 각 노드들의 CPT는 추후 문헌을 통해 보완될 필요성이 있으며, 그중에서 특히 Release 노드의 경우 어떠한 공정 및 설비에서 발생함에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 가스플랜트의 각 설비들의 중요도에 따라 누출 확률을 임의로 가정하여 사용하였고, 이는 다음 수치예제에서 설명하기로 한다. 다음으로 Immediate Ignition 노드의 CPT는 [Yes = 0.001, No = 0.999]로, F&G Detection 노드의 경우 [Yes = 0.9, No = 0.1]로 가정하였다. Delayed Ignition 노드의 CPT는 Immediate Ignition 노드의 영향을 받기 때문에, Table 4와 같이 설정하였다.

마지막으로, Final Event 노드의 CPT는 Table 5와 같으며 편의상 식 (4)~(9)의 축약어를 사용하였다. 다음 3.2절에서는 앞서 설명한 지진 BN(Fig. 7)과 본 연구에서 제시된 화재·폭발 BN을 연계한다.

### 3.2 지진 및 화재·폭발 베이지안 네트워크 연계

Fig. 7의 지진 PSA를 수행하기 위해 구축된 고장수목 기반 BN에서, 지진으로 유발된 구조손상으로 인해 누출이 발생하여 화재·폭발 사건이 발생할 수 있는 설비들은 수송관과 연결되어 있는 LNG-Ship, Unloading Arm, Tank, Flare-Stack, BOG-Compressor, 2nd-Pump, SMV, ORV 및 공급과 관련된 하위시스템 일체가 있다. 따라서 위 언급된 설비들에는 3.1절에서 제안된 화재·폭발 BN을 모듈로서 연계하고 하역, 저장, 기화, 공급 단계 순으로 설명하도록 한다.

Fig. 11은 하역 단계의 지진 유발 화재·폭발 BN을 나타낸다. 해당 그림 및 이후 그림들에서 빨간색 굵은 테두리로 표시된 노드들은 화재·폭발 BN 모듈을 의미한다. 본 연구에서 제시된 Plot Plan은 하역장비를 2대 가지고 있으며, EarthQuake 노드의 영향을 받는다. Release: Unloading-Arm 노드의 State는 두

Table 4 CPT of Delayed Ignition

| Immediate Ignition | Yes | No     |
|--------------------|-----|--------|
| Yes                | 0   | 0.0001 |
| No                 | 1   | 0.9999 |

Table 5 CPT of Final Event

| R               | Yes |    |     |    |     |    |     |    | No |
|-----------------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|----|
| II              | Yes |    |     |    | No  |    |     |    |    |
| F&G             | Yes |    | No  |    | Yes |    | No  |    |    |
| DI              | Yes | No | Yes | No | Yes | No | Yes | No |    |
| F <sub>SD</sub> | 0   | 1  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  |
| F <sub>LD</sub> | 0   | 0  | 0   | 1  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  |
| E <sub>W</sub>  | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0  | 0  |
| G <sub>S</sub>  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1  | 0   | 0  | 0  |
| E <sub>S</sub>  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  | 1   | 0  | 0  |
| G <sub>L</sub>  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1  | 0  |
| None            | 1   | 0  | 1   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  | 1  |

개의 부모 노드들(Unloading Arm1, 2)의 누출과 누출이 발생하지 않는 상황을 가정하여 ReleaseArm1, ReleaseArm2, No Release로 설정하였다. EQ: Unloading 노드와 F&E: Unloading 노드는 각각 하역 단계의 지진, 화재·폭발로 인한 하위시스템의 고장 확률을 산정하며, 이는 최종적으로 전체 시스템의 운영 정지 확률을 산정하는 노드들인 EQ: Shut-Down, F&E: Shut-Down로 연결된다. Fig. 12는 저장 단계를 나타내는 BN이며, 앞서 설명한 것과 마찬가지로 붉은 테두리는 화재·폭발 관련 노드들이며, EQ, F&E로 시작되는 노드들은 각 재해로 인한 하위시스템 고장 및 운영정지 확률을 산정한다.

Fig. 13은 기화 단계의 BN이다. 기화 단계는 Flare-Stack, BOG-Compressor, Recondenser, 2<sup>nd</sup>-Pump, SCV, ORV, Sea-water Pump, 총 7가지의 설비로 이루어져 있다. 7가지 설비들은 모두 화재·폭발 모듈과 연결되며, Flare-Stack과 BOG-Compressor 노드들은 BOG Control이라는 세부 시스템을 표현하는 노드로 묶인다. Recondenser, 2<sup>nd</sup>-Pump 관련 노드들과 Vaporizing-Type 노드는 Vaporizing이라는 세부 노드로 묶이며, Vaporizing-Type은 다시 SCV-Type과 ORV-Type으로 세분화된다. SCV-Type

은 9기의 SCV 노드들로 구성되며, ORV-Type은 11기의 ORV 노드들과 1기의 Sea-water Pump 노드로 구성된다. 이와 같이 세분화하여 네트워크를 구성하는 이유는 많은 부모노드들로 인해 자식노드의 CPT 사이즈가 기하급수적으로 증가하는 것을 피하기 위함이다. 최종적으로 지진과 관련된 세부 노드들은 하위시스템을 표현하는 EQ: Vaporizing 노드로 묶이며, 각 설비에 대응하는 F&E Event 노드들은 F&E: Vaporization 노드로 수렴한다.

Fig. 14는 공급 단계와 파이프라인을 의미하는 Piping-System, 변전소와 관련된 노드들을 편의상 같이 표현하였다. 이전 단계에서 설명한 것과 동일한 규칙으로 구성되어 있으며, 지진과 관련된 EQ: Supply, EQ: Piping-System, EQ: Substation은 EQ: Shut-Down으로 연결되며, F&E Event: Supply, F&E Event: Piping-System은 F&E: Supply and Piping-System으로 묶인 후, 다른 하위시스템들의 F&E 노드들과 함께 F&E: Shut-Down 노드로 수렴한다. Fig. 15는 최종적인 지진 유발 화재폭발 BN을

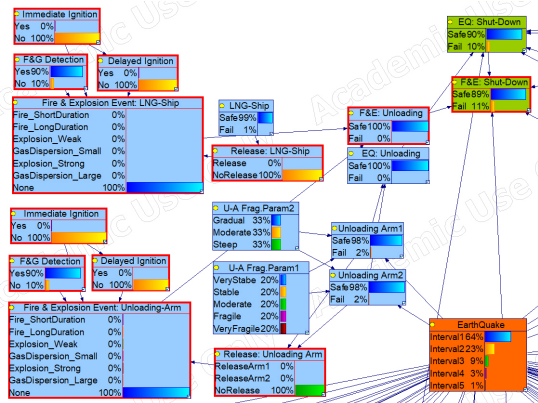


Fig. 11 Earthquake-induced Fire & Explosion BN: Unloading Part

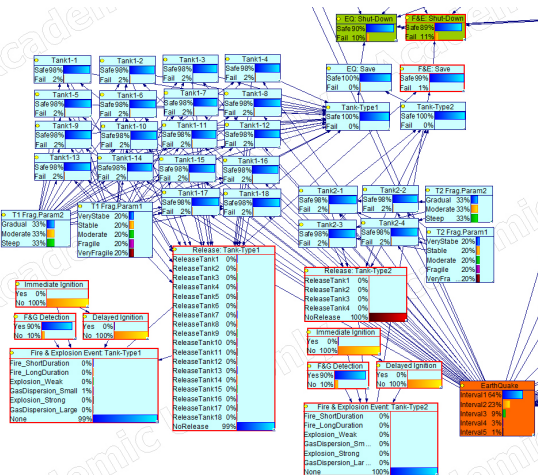


Fig. 12 Earthquake-induced Fire & Explosion BN: Save Part

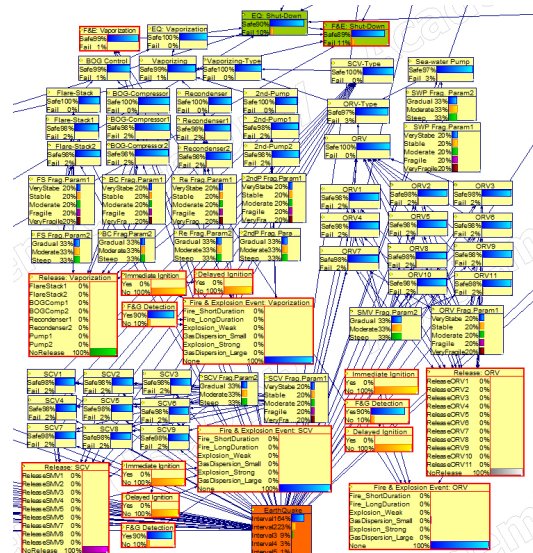


Fig. 13 Earthquake-induced Fire & Explosion BN: Vaporization Part

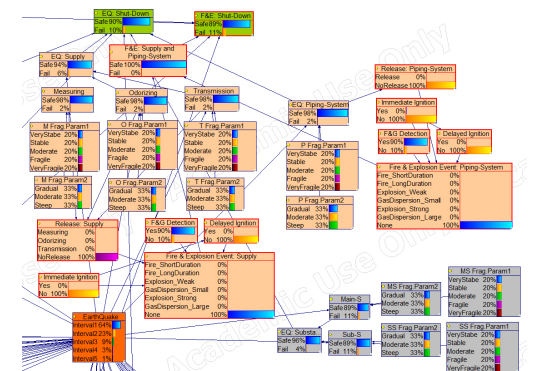


Fig. 14 Earthquake-induced Fire & Explosion BN: Supply Part with Substation and Piping-System



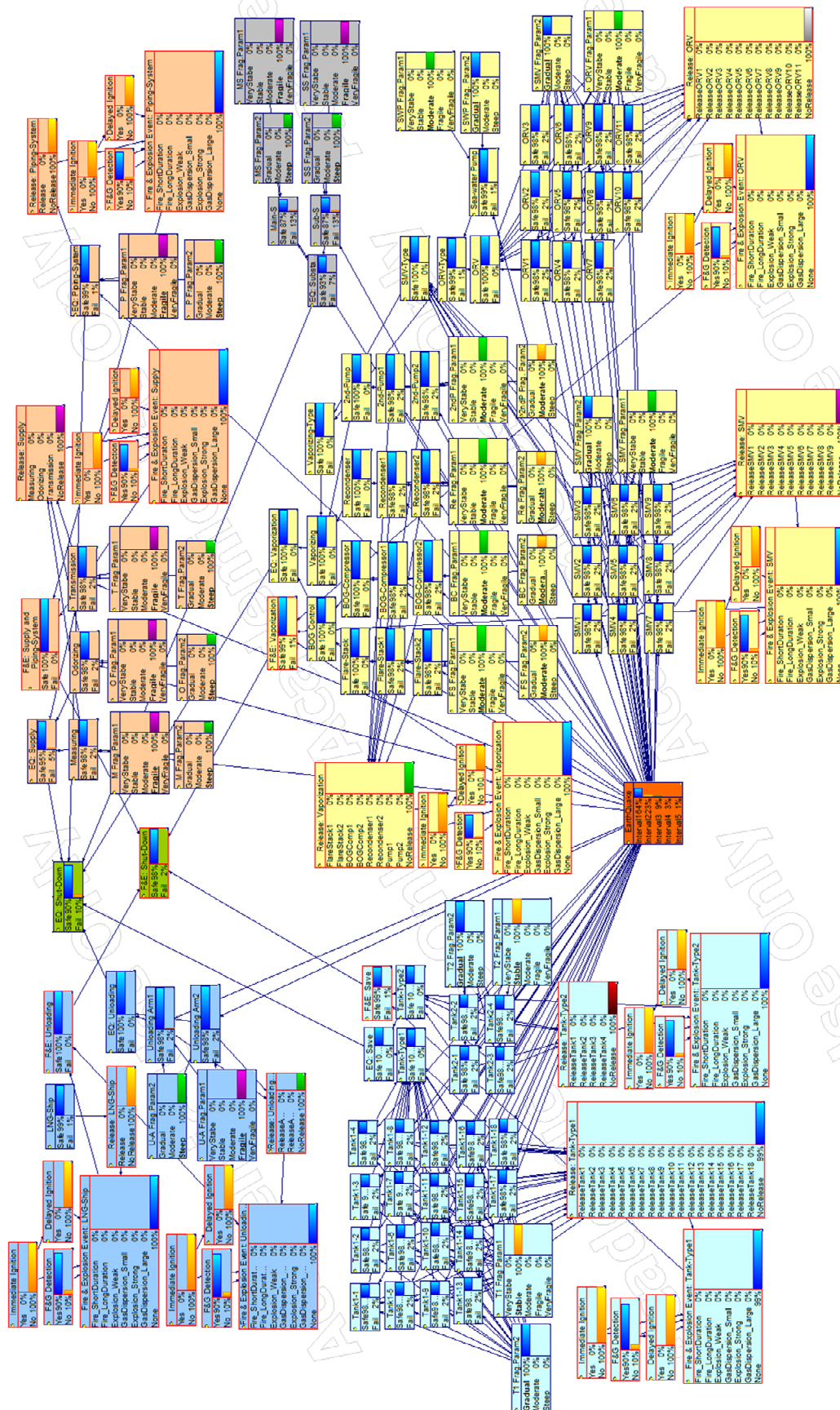


Fig. 15 Final BN for Earthquake-induced Fire and Explosion PSA: Gas-Plant

나타낸다. Fig. 11~14에서 설명된 각 하위시스템들의 EQ: Unloading, EQ: Save, EQ: Vaporization, EQ: Supply, EQ: Piping-System, EQ: Substation 노드들은 EQ: Shut-Down 노드로 연결되며, 화재·폭발과 관련된 F&E: Unloading, F&E: Save, F&E: Vaporization, F&E: Supply and Piping-System 노드들은 F&E: Shut-Down 노드로 수렴한다. 각 Shut-Down 노드들은 전체시스템에 대한 지진과 지진 유발의 화재·폭발로 인한 운영정지 확률을 산정하게 된다.

#### 4. 수치 예제: 가스플랜트 Plot Plan

앞서 구축된 BN(Fig. 15)은 총 161개의 확률 노드들과 369개의 링크들로 이루어져 있다. 저장 단계에서 탱크노드들의 부모 노드들인 Tank-Type1과 Release: Tank-Type1의 CPT 사이즈는 각각  $2 \times 2^{18}$ ,  $19 \times 2^{18}$ 이지만 일반PC(CPU: AMD Ryzen 3.5GHz) 기준으로 5초 이내 확률 업데이트가 가능하다(GeNie 자체 Clustering 알고리즘 사용). 지진 리스크 평가의 경우 Fig. 5에서 소개된 지진 취약도 모듈 BN이 사용되었으며, 각 설비의 취약도 세부 파라미터를 위한 정보는 Table 6과 같다. 그리고 화재·폭발 리스크 평가를 위한 누출 확률은 전 설비에서  $1.661 \times 10^{-2}$ 로 가정하였다. 이는 추후 IOGP(International Association of Oil & Gas Producers) 보고서에서 제안된 확률 경험식을 토대로, 적용 대상 플랜트 공정 및 해당 설비에 맞는 확률을 산정하여 사용할 경우 더욱 정확한 추론이 가능할 것이다.

##### 4.1 의사결정 과정(1): 지진 규모에 따른 시스템 평가

지진은 플랜트 설비 및 구조물의 손상을 유발할 수 있으며, 구조손상으로 인해 2차 재해인 화재·폭발을 유발할 수 있다. Fig. 15의 구축된 최종 BN에서 다섯 개의 구간으로 이산화된 Earthquake 노드의 state인 Interval1, Interval2, ..., Interval5는 PGA 0.1, 0.3, ..., 0.9(단위: 중력가속도 g)를 의미한다. 외부 정보가 주어졌을 때 BN을 이용한 확률추론 과정은 다음과 같다.

Table 6 Assumed Information for Fragility-Module BN

|                                                                      | Frag.Pram1 ( $A_m$ ) | Frag.Pram2 ( $\beta$ ) |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Unloading Arm                                                        | 1.2                  | 0.6                    |
| Tank-Type <sub>1,2</sub>                                             | 1.6                  | 0.8                    |
| Flare-Stack,<br>BOG-Compressor,<br>Recondenser, 2 <sup>nd</sup> Pump | 1.4                  | 0.7                    |
| SCV, ORV,<br>Sea-water Pump                                          | 1.4                  | 0.8                    |
| Measuring, Odorizing,<br>Transmission,<br>Piping-System              | 1.2                  | 0.6                    |
| Main- and Sub-Substation                                             | 0.75                 | 0.7                    |

해당 플랜트에 0.9g에 해당하는 지진이 발생하였을 때, 해당 정보는 EarthQuake 노드의 state에 [0, 0, 0, 0, 1]과 같은 형태의 정보로 입력되게 되며 해당 정보와 함께 BN의 추론 알고리즘이 수행되면 모든 노드들의 확률이 업데이트된다. Fig. 16은 EarthQuake 노드에 0.9g 정보가 입력되었을 경우 Shut-Down 노드들의 확률 변화를 나타낸 그림이다. 이때 지진으로 인해 운영정지가 발생할 확률은 10%에서 98%로 증가하며, 화재폭발이 발생할 확률은 2%에서 22%로 증가함을 확인할 수 있다.

다음으로 Fig. 17과 18은 PGA 0.1g, 0.5g, 0.9g가 발생하였을

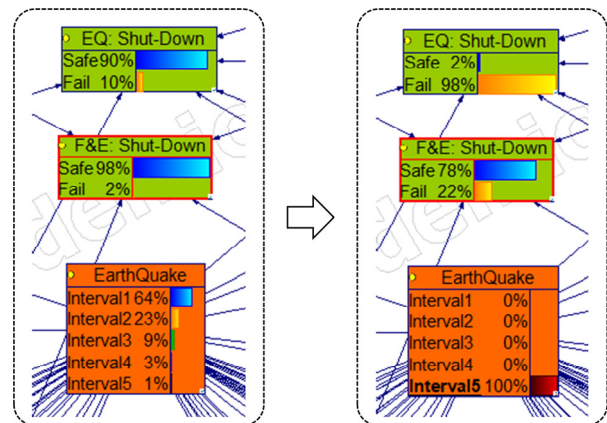


Fig. 16 Updated Result of BN When Given Evidence = PGA 0.9g 100%

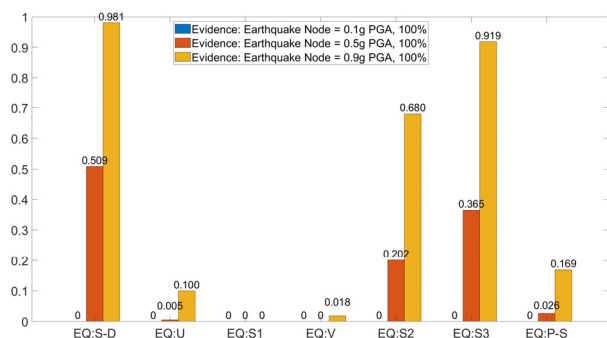


Fig. 17 Updated Results of BN according to Given Evidence of Earthquake: EQ-related Nodes

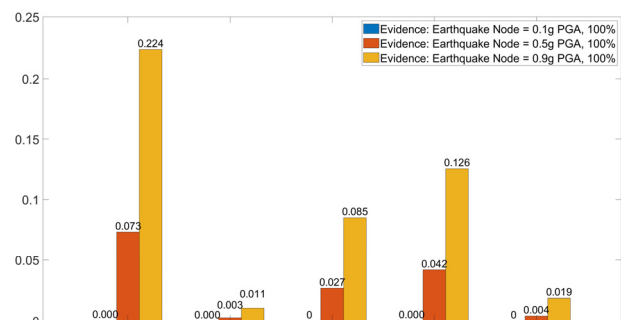


Fig. 18 Updated Results of BN according to Given Evidence of Earthquake: F&E-related Nodes



때의 지진 및 화재·폭발로 인한 Shut-Down 및 각 하위 시스템들의 확률을 나타내는 그래프들이다. 그래프들의 가로축의 EQ, F&E 뒤의 S-D, U, S1, V, S2, S3, P-S는 각각 Shut-Down, Unloading, Save, Vaporization, Supply, Substation, Piping-System을 의미한다. Fig. 17과 18에서 공통적으로 PGA 0.1g에 해당하는 지진이 발생하였을 경우 전체 시스템은 물론 각 하위시스템들에서 지진으로 인한 고장 및 화재·폭발 발생 확률이 전부 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 17에서 저장과 기화 하위시스템들(EQ: S1, EQ: V)의 고장확률이 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 많은 수의 저장탱크 및 기화 설비들이 병렬로 연결되어 특정한 설비에 문제가 생겨도 다른 설비들을 통해 기능 유지가 가능하기 때문이다. 반면, 화재·폭발의 경우 저장과 기화 하위시스템에서 상당한 고장확률이 산정되었는데, 이는 하위시스템 설비들 간 연결 형태와 별개로 화재·폭발이 개별 누출로부터 발생하기 때문으로 이해할 수 있다. 이러한 결과들을 이용한 의사결정 예로 지진에 주안점을 둘 경우 변전소를 화재·폭발에 주안점을 둘 경우 기화시스템을 최우선으로 안전 대응 및 보수·보강 계획을 수립할 수 있다.

#### 4.2 의사결정 과정(2): 전체 시스템 파괴 가정

사건수목과 고장수목은 하행(Top-down) 방식의 논리적·연역적 방법론으로 사건수목은 사건이 진행되는 과정을 고장수목은 정점 사건을 발생시키는 하위 사건들을 파악하는 방식으로 구성된다(Hauptmanns, 2004; Hwang and Chou, 1998; Kim et al., 2009). 새로운 정보들이 주어질 때, 사건수목의 경우 최종 사건(Final Event), 그리고 고장수목의 경우 정점 사건(Top Event)외에 다른 사건들의 확률 추론을 하기에 효율적이지 못하다(Zwirgmaier, 2016). 반면에 BN의 경우, 초기 사건, 최종 사건, 정점 사건 등이 정의되어 있지 않으며 모든 사건들은 동일한 확률변수로서 주어진 정보에 따라 같은 알고리즘을 이용하여 효율적인 확률 추론이 가능하다(Kwag and Gupta, 2016; Zwirgmaier, 2016). 이러한 특성을 이용할 경우 지진으로 인한 전체 시스템의 운영정지 확률 산정뿐만 아니라, 역으로 전체 시스템의 고장 정도에 따른 지진 강도를 예측하거나, 운영정지가 발생하였을 경우 어떤 하위시스템이 가장 높은 고장확률을 가지고 있는지 파악할 수 있다.

다음으로 지진으로 인해 운영정지가 발생함을 가정하고, 각 하위시스템들의 고장확률 업데이트를 통해 운영정지에 대한 영향도 분석을 수행한다. 추가적으로 지진으로 인한 운영정지와 더불어 화재·폭발이 발생한다면 어떤 하위시스템에서의 발생 가능성이 높은지를 확률 업데이트를 통해 분석한다. Fig. 18은 운영정지가 발생하였을 경우 각 하위시스템들의 고장확

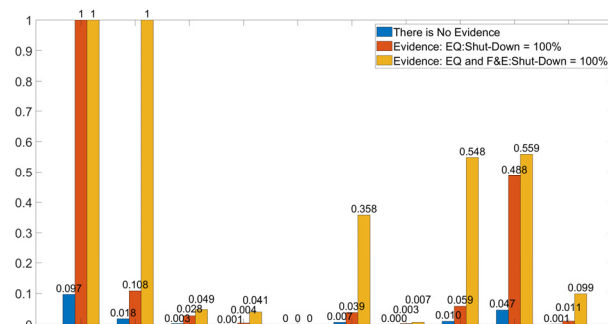


Fig. 19 Updated Results of BN according to Given Evidence of Shut-Down-related Nodes

률을 나타낸다. Fig. 19에서 주황색 막대들은 지진으로 인해 운영정지가 발생하였을 경우를 의미하며, 이때 화재폭발이 발생할 확률도 10.8%로 증가함을 확인할 수 있다. 그리고 EQ: S2(Supply)의 경우의 확률(48.8%)이 가장 크므로, 지진으로 운영정지가 발생하였을 경우, 공급망에 대해 가장 높은 보수·보강 순위를 결정하는 것이 바람직하다. 다음으로 노란색 막대들은 지진으로 인한 고장과 더불어 화재·폭발이 발생함을 가정한 경우로서 기존 공급망과 더불어 저장과 기화 하위시스템들도 상당히 높은 확률이 산정됨을 확인할 수 있다. 이때, 화재·폭발로 인한 추가 피해 발생을 저지하는 것에 주안점을 둔다면 공급의 경우 지진으로 인한 고장확률(EQ: S2, 55.9%)은 높지만 화재·폭발 발생 확률은(F&E: S2, 9.9%) 다른 기화 및 저장 시스템의 화재·폭발 발생 확률들(F&E: V, 54.8%; F&E: S1, 35.8%)보다 낮으므로 기화 및 저장 시스템을 우선 점검하는 의사결정을 내릴 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 가스플랜트를 대상으로 지진 유발 화재·폭발 복합재해에 대해 PSA(Probabilistic Safety Assessment)를 수행하기 위한 방법론을 제시하였다. 선행연구(Lee et al., 2023)에서 제안된 고장수목 기반 베이지안 네트워크(Bayesian Network, BN)를 기반으로 화재·폭발 BN 모듈을 개발하고 연계함으로써 확장된 BN 모델이 제안되었다. 최종적으로 구축된 BN은 161개의 노드와 369개의 링크로 구성된 대규모 네트워크로, 복잡한 구성관계를 시각적으로 보여주며, 여러 정보가 순차적으로 입력될 때마다 유연한 확률추론이 수행 가능함을 예제들을 통해 입증하였다.

대부분의 복합재해에 대한 연구들은 각 재해들에 대한 리스크 평가를 개별적으로 수행한 후 간단한 합산으로 최종 평가한다. 하지만 개발된 방법론은 전체 시스템에 대한 지진과 화재·폭발의 복잡한 인과 관계를 시각적으로 분석하고, 해당 관계

들을 조건부 확률로 산정하여 실질적인 복합재해 평가를 수행할 수 있다는 점에서 큰 장점이 있다. 또한, 구축된 BN은 재해에 대한 새로운 정보들이 주어질 때 마다 반복적으로 확률추론을 수행하여 전체시스템과 더불어 하위시스템, 개별 설비들의 고장확률, 화재·폭발 발생 확률 및 변화를 산정이 가능하며, 역으로 지진으로 인한 하위시스템들의 영향 분석 및 화재·폭발 발생 가능성 등을 비교·분석할 수 있다. 이러한 유연한 확률추론은 재해 긴급 대응 및 보수·보강 우선 순위 결정 시 합리적인 의사결정을 용이하게 한다.

제안된 방법론은 지진 유발 화재·폭발이라는 복합재해에 대해 확률모델을 제시했다는 점에서 큰 의의가 있다. 이를 실제 플랜트들에 적용하기 위해서는 주요 대형 설비들에 대한 취약도 산정 연구는 필수적이며, 정확한 화재·폭발 확률 산정을 위해 문헌 조사와 함께 각 설비들에 대한 적절한 점화 확률 선정이 수행되어야 한다. 이와 더불어 해당 설비들 타입에 따른 구조 손상으로 인해 누출이 발생하는 메커니즘(Mechanism)을 실험 혹은 데이터를 통해 자세히 규명할 수 있다면, 더욱 실제 상황을 모사하는 확률 모델을 구축하여 제안된 복합재해 BN에 연계될 수 있을 것이다. 추가적으로 시간에 따른 연쇄 화재·폭발 메커니즘을 분석하여 구축된 BN을 확장한다면, 산업시설물에 더욱 특화된 효용성 있는 복합재해 리스크 평가가 가능할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호: RS-2021-KA163162).

### References

- Abbiati, G., Brocardo, M., Filippo, R., Stojadinovic, B., Bursi, O.S. (2021) Seismic Fragility Analysis of a Coupled Tank-Piping System based on Artificial Ground Motions and Surrogate Modeling, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 72(2021), p.104575.
- Barber, D. (2012) Bayesian Reasoning and Machine Learning, Cambridge: Cambridge University Press.
- Bayes Fusion, LLC. (2023) GeNie (Version 4.0.3005) [Computer Software], Released on Jun 5, 2023, from www.bayesfusion.com.
- Bensi, M., Der Kiureghian, A., Straub, D. (2011) A Bayesian Network Methodology for Infrastructure Seismic Risk Assessment and Decision Support, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Bensi, M., Der Kiureghian, A., Straub, D. (2013) Efficient Bayesian Network Modeling of Systems, *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, 112(2013), pp.200~213.
- Bursi, O.S., Filippo, R., Salandra, V., Pedot, M., Reza, M.S. (2018) Probabilistic Seismic Analysis of an LNG Subplant, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 53(2018), pp.45~60.
- Byun, J.-E., Zwirgmaier, K., Straub, D., Song, J. (2017) Matrix-based Bayesian Network for Efficient Memory Storage and Flexible Inference, *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, 185(2017), pp.533~545.
- EPRI (1994) Methodology for Developing Seismic Fragilities, TR-103959, Electric Power Research Institute.
- EPRI (2003) Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide, TR-1002989, Electric Power Research Institute.
- Hauptmanns, U. (2004) Semi-Quantitative Fault Tree Analysis for Process Plant Safety using Frequency and Probability Ranges, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 17(2004), pp.339~345.
- Hwang, H.H.M., Chou, T. (1998) Evaluation of Seismic Performance of an Electric Substation using Event Tree/Fault Tree Technique, *Probab. Eng. Mech.*, 13(2), pp.117~124.
- KICT (2021) Development of Integrated Risk Management Package Technology based on Safety of Facilities, Annual Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
- Kim, M.-K., Choun, U.-S., Choi, I.-K., Oh, K.-H. (2009) Seismic Fragility Analysis of Substation Systems by Using the Fault Tree Method, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 13(2), pp.47~58.
- KOSHA (2021) KOSHA GUIDE, P-87-2021, Korea Occupational Safety & Health Agency.
- Kwag, S., Eem, S., Choi, E., Ha, J. G., Hahm, D. (2021) Suggestions for Enhancing Sampling-based Approach of Seismic Probabilistic Risk Assessment, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 34(2), pp.77~84.
- Kwag, S., Gupta, A. (2016) Bayesian Network Technique in Probabilistic Risk Assessment for Multiple Hazards, *Proceedings of 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24)*, June 26-30, 2016, Charlotte, NC, US.
- Lee, S.-H., Mun, C., Park, S., Cho, J.-R., Song, J. (2023) Probabilistic Safety Assessment of Gas Plant Using Fault Tree-based Bayesian Network, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 36(4), pp.273~282.
- Lee, S.-H., Song, J. (2016) Bayesian-Network-based System Identification of Spatial Distribution of Structural Parameters, *Eng. Struct.*, 127(2016), pp.260~277.
- Oh, J., Kwag, S. (2018) A Study on Seismic Probabilistic Safety Assessment for a Research Reactor, *J. Comput. Struct. Eng.*



*Inst. Korea*, 31(1), pp.31~88.

**Vanem, E., Antao, P., Ostvik, I., Castillo, F.** (2008) Analysing the Risk of LNG Carrier Operations, *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*,

93(2008), pp.1328~1344.

**Zwirgmaier, K.** (2016) Reliability Analysis with Bayesian Networks, Ph.D Thesis, Technische Universitat Munchen.

---

## 요 지

최근 원자력 지진 PSA(Probabilistic Safety Assessment)를 토대로 산업시설물의 지진 PSA를 수행하는 연구가 진행되었다. 해당 연구는 원자력 발전소와 산업시설물의 차이를 파악하고, 최종적으로 운영정지를 목표로 하는 고장수목(Fault Tree)를 구축한 후 시각적 확률도구인 베이지안 네트워크(Bayesian Network, BN)으로 변환하였다. 본 연구는 선행연구를 기반으로 지진으로 유발된 구조손상으로 인해 발생 가능한 화재·폭발에 대해 PSA를 수행하고자 하였다. 이를 위해 화재·폭발을 사건수목(Event Tree)으로 표현하고, BN으로 변환하였다. 변환된 BN은 화재·폭발 모듈로서 선행연구에서 제시된 고장수목 기반 BN과 연계되어 최종적으로 지진 유발 화재·폭발 PSA를 수행할 수 있는 BN 기반 방법론이 개발되었다. 개발된 BN을 검증하기 위해 수치예제로서 가상의 가스플랜트 Plot Plan을 생성하였고, 가스플랜트의 설비 종류가 구체적으로 반영된 대규모 BN을 구축하였다. 해당 BN을 이용하여 지진 규모에 따른 전체시스템의 운영정지 확률 및 하위시스템들의 고장확률 산정과 더불어 역으로 전체시스템이 운영 정지되었을 때 하위시스템들의 영향도 분석과 화재·폭발 가능성을 산정하여 다양한 의사결정을 수행할 수 있음을 제시함으로써 그 우수성을 확인하였다.

**핵심용어** : 확률론적 안전성 평가, 베이지안 네트워크, 고장수목, 사건수목, 의사결정, 가스 플랜트