Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 784~795
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.784

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소 이송 배관의 확률론적 위험도 평가 모델 구축을 위한 기초 연구

박희경 · 신홍철 · 장희라 · 서현석 · 황인주†

한국건설기술연구원 환경연구본부, 수소인프라센터

A Fundamental Study on the Development of a Probabilistic Risk Assessment Model for Hydrogen Transport Pipelines

HEE KYUNG PARK, HONG-CHEOL SHIN, HEE-LA JANG, HYEONSEOK SEO, INJU HWANG†

Department of Environmental Research / Hydrogen-infrastructure Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

†Corresponding author :
ijhwang@kict.re.kr

Received 17 November, 2025
Revised 2 December, 2025
Accepted 4 December, 2025

Abstract >> This study presents a probabilistic risk assessment model for hydrogen pipeline systems by integrating fault tree analysis with Bayesian network modeling. The proposed approach enables dynamic inference of failure probabilities and causal reasoning under uncertainty. Major failure modes were identified and mapped into a BN structure using GeNIe 5.0 software. The analysis revealed that the hydrogen effect exhibited the highest posterior probability (4.08×10;¹), indicating its dominant influence on pipeline failure mechanisms. The proposed fault tree analysis-Bayesian network combined model effectively quantifies both prior and posterior accident probabilities, providing a practical foundation for developing a hydrogen-specific risk assessment framework. These results can support safer design, operation, and management of hydrogen transport infrastructure.

Key words : Hydrogen Safety(수소 안전), Probabilistic Risk Assessment(확률론적 위험성평가), Pipeline(배관), Fault Tree Analysis(결함수분석), Bayesian Network(베이지안 네트워크)

1. 서 론

탄소중립 사회로의 전환이 가속화되면서 수소는 차세대 청정 에너지원으로 주목받고 있다. 수소는 높은 에너지 밀도와 무탄소 연소 특성을 바탕으로 산업·발전·운송·에너지 저장 등 다양한 분야에서 활용이 가능하다[1]. 이러한 수소 에너지의 전주기적 활용을 위해서는 대용량 수소의 장거리 수송이 필수적이며, 이에 따른 이송 인프라 연구는 수소 경제 실현의 핵심 기술로 간주된다.

현재 상용화된 수소 이송 방식에는 고정식 저장탱크, 튜브 트레일러, 암모니아 기반 수소캐리어(Hydrogen carrier) 기술 등이 있다. 그러나 이들은 저장 용량의 제약 및 고압 저장에 따른 안전성 문제 측면에서 대

규모·장거리 수송에는 적합하지 않다. 그 중 수소 배관망은 연속성과 경제성 측면에서 가장 효율적인 이송 방안으로 평가되고 있으며[2], 국내외에서도 수소 배관망 관련 연구와 실증 사업이 활발히 진행 중이다.

한편, 수소는 넓은 가연 범위(4-75%) 및 낮은 점화에너지, 빠른 확산성[3]을 비롯하여 금속 재질과의 상호작용에 따른 취화(Embrittlement) 가능성[4] 등 다양한 위험 특성을 지닌다. 이는 기존의 탄화수소계 연료와는 다른 수준의 안전관리 체계를 요구하며, 특히 지중에 매설되는 수소 배관 시스템에서는 외부 충격, 지반 침하, 부식, 자연재해 등과 복합적으로 작용[5,6]해 사고의 위험도가 상당히 높다. 이와 같은 사고를 방지하기 위해서는 배관 원인별 상세 고장(Failure) 및 사고 발생 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 신뢰성 있는 위험성 평가 모델링 기법이 필요하다. 이를 위해 실제 배관 시스템의 고장 가능성을 구조화된 방식으로 추정하는 확률론적 방법론 접근이 요구된다.

기존 위험성 평가 기법인 결함수 분석(Fault Tree Analysis, FTA), 사건수 분석(Event Tree Analysis, ETA), Bow-tie 분석[7,8] 등은 평가 대상 시스템의 고장 경로의 논리적 도식화에는 유용하지만, 정적 분석에 기반하고 있어 시스템 상태의 변화, 불확실성, 실시간 데이터 갱신을 반영하는 데에는 한계가 있다[9]. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 조건부 확률 기반의 베이지안 네트워크(Bayesian Network, BN) 모델이 최근 산업안전 분야에서 주목받고 있다.

BN은 사건 간 인과관계를 모델링할 수 있으며, 새로운 정보가 입력될 때 조건부 확률을 동적으로 갱신할 수 있는 특성이 있다. 그래서 복잡한 공정 시스템의 불확실성 하에서 위험도 예측 및 의사결정 지원에 효과적이다. 따라서, 결함수 분석과 베이지안 네트워크 구조를 결합하면, 기존의 정적 모델을 불확실성을 반영한 확률적 위험추론 모델로 확장할 수 있다[10]. 이러한 확률적 위험추론 모델은 배관망과 같은 화학 공정을 비롯하여 환경 및 의료 등 다양한 산업 분야에서도 위험 분석과 의사결정 지원 도구로 활용되고 있다[11-13]. 특히, 사고 요인 간 상호의존성이 높거나 입력 데이터의 불확실성이 큰 시스템에서는 베이지안 네트워크 모델이 잠재적 위험 요인을 사전에 식별하고 대응 전략의 도출에 효과적이다.

이에 본 연구에서는 국내 수소 배관망 실증 구축에 앞서, 결함수 분석을 기반으로 배관 시스템 고장 시나리오를 베이지안 네트워크로 변환하고 확률론적 위험도 평가가 가능한 분석 모델을 제안하고자 한다. 제안된 모델은 매립형 고압 수소 배관망을 대상으로, 국내외 문헌과 실제 사고 사례를 분석하여 고장 원인과 위험 요인 간의 인과 구조를 체계화하고 이를 통해 사고 발생 확률 및 주요 인자의 상대적 영향도를 정량적으로 평가하는 것을 목표로 한다.

위험도 모델 기반의 확률 추론을 통해 주요 인자의 민감도를 평가함으로써 수소 배관망의 취약 요소를 정량적으로 규명하고 효율적인 위험 관리 전략 수립에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법론

2.1 결함수 분석(Fault Tree Analysis)

본 연구에서는 수소 배관망 내 사고 발생 시나리오를 체계적으로 구조화하기 위해 결함수 분석 기법을 활용하였다. 결함수 분석은 시스템 사고 또는 고장과 같은 최상위 사건(Top Event)의 발생 메커니즘을 논리적으로 분석하고, 그 원인이 되는 중간 사건(Intermediate Event) 및 기본 사건(Basic Event) 간의 인과관계를 계층적 구조로 도식화하는 정형화된 위험 분석 기법이다[14].

이때, 각 사건 간의 논리적 관계를 AND 및 OR 게이트로 표현하여 개별 원인들의 조합이 어떻게 조합되어 사고로 이어지는지를 연역적으로 분석할 수 있다. 본 연구에서는 수소 배관망의 Top Event를 ‘배관 시스템의 고장’으로 정의하고, 주요 고장 원인의 분류는 ASME B31.12[15] 및 API RP 1160[16]의 기준을 참고하여 구분하였다. 이때, 단일 원인만으로도 상위 사건이 발생할 수 있다는 보수적 가정에 따라 전체 구조도에 대해서는 OR 게이트로 연결하였다. 결과

적으로 결함수 분석은 수소 배관망에서 발생 가능한 복합 고장 메커니즘을 구조적으로 표현하며, 이후 확률론적 추론이 가능한 베이지안 네트워크 모델로 확장하여 사고 발생 확률 분석에 활용하였다.

2.2 베이지안 네트워크(Bayesian Network)

결함수 분석으로 도출된 고장 논리 구조를 기반으로, 수소 배관망의 고장 및 사고 발생 가능성에 대한 확률 기반 예측 모델을 구축하기 위해 베이지안 네트워크를 적용하였다. 이는 조건부 확률 이론에 기반한 방향성 비순환 그래프(Directed Acyclic Graph, DAG) 구조[17]로, 사건 간의 인과적 및 조건부 의존 관계를 확률론적으로 모델링할 수 있는 기법이다. 베이지안 네트워크는 각 노드(Node)는 개별 변수나 사고 원인을, 링크(Link)는 변수 간 인과적 의존 관계를 나타낸다. 이러한 구조를 통해 시스템 내 노드 간 불확실성과 상호의존성을 정량적으로 계산할 수 있다.

베이지안 네트워크에서 '결합 확률 분포(Joint probability distribution)'는 네트워크 내 모든 노드의 상태가 동시에 발생할 확률을 의미하며, 이를 통해 최상위 사전의 확률을 포함한 전체 시스템의 확률적 구조를 표현할 수 있다. 즉, 시스템 내 요인 간의 조건부 확률 관계를 종합적으로 반영함으로써, 사고 발생 확률을 다음의 식과 같이 계산한다.

$$P(U) = \prod_{i=1}^{n} P(X_i \mid Pa(X_i)) \qquad (1)$$

이때, $Pa(X_i)$ 는 변수 X_i의 부모 노드 집합을 의미하며, 해당 변수에 영향을 미치는 인과적 요인을 나타낸다. $P(U)$는 전체 시스템의 확률 특성을 나타낸다.

베이지안 네트워크는 새로운 정보가 입력될 때, 확률값을 동적으로 갱신할 수 있다는 점에서 정적 분석 기법과 구별된다. 네트워크의 특정 노드에 확률값이 추가되면 기존의 사전 확률(Prior probability)을 바탕으로 관련 노드들의 확률이 재계산되며, 이러한 갱신 과정에서 노드 간 인과관계와 조건부 의존성이 함께 반영된다.

이와 같은 확률 갱신 및 추론 메커니즘은 베이즈 정리(Bayes' theorem)[17,18]에 의해 다음의 식으로 계산된다.

$$P(U \mid X) = \frac{P(X \mid U)\,P(U)}{P(X)} \qquad (2)$$

두 기본 사건 U, X에 대해 과거 데이터 분석을 통해 도출된 사전 확률은 각각 $P(U)$, $P(X)$로 표시된다. 사후 확률 $P(U \mid X)$는 사건 X가 발생했을 때 사건 U가 발생할 조건부 확률을 의미한다.

베이지안 네트워크에서는 일부 노드의 상태가 관측되었을 때, 전체 네트워크의 확률 구조를 즉시 재구성할 수 있으며, 이는 불확실성이 크거나 데이터가 불완전한 상황에서도 역추론(Diagnostic inference)[19]이 가능하다는 장점을 제공한다. 따라서 BN은 수소 배관망과 같이 상태 변화가 빈번하고 불확실성이 높은 공정 시스템의 고장 원인 분석과 위험도 예측에 효과적인 동적 분석 도구로 활용될 수 있다.

2.3 결함수 분석과 베이지안 네트워크의 결합 모델 구축

결함수 분석 논리 구조를 베이지안 네트워크와 결합하여 수소 배관망의 고장 요인 간 확률적 관계를 정량적으로 표현하고자 하였다. 결함수 분석은 사고의 인과관계를 계층적으로 구조화하는데 강점을 지니며, 베이지안 네트워크는 조건부 확률에 기반한 추론을 통해 고장 확률을 동적으로 계산할 수 있다는 점에서 상호 보완적이다. 두 기법을 활용하여 수소 배관망의 복합적 위험 요인을 체계적으로 평가하고, 입력 조건 변화에 따른 고장 확률의 갱신이 가능한 확률 기반 위험도 평가 모델을 구축하고자 한다. Fig 1은 본 연구에서 적용한 결함수 분석—베이지안 네트워크 방법론의 전체 절차를 4단계로 구분하였다.

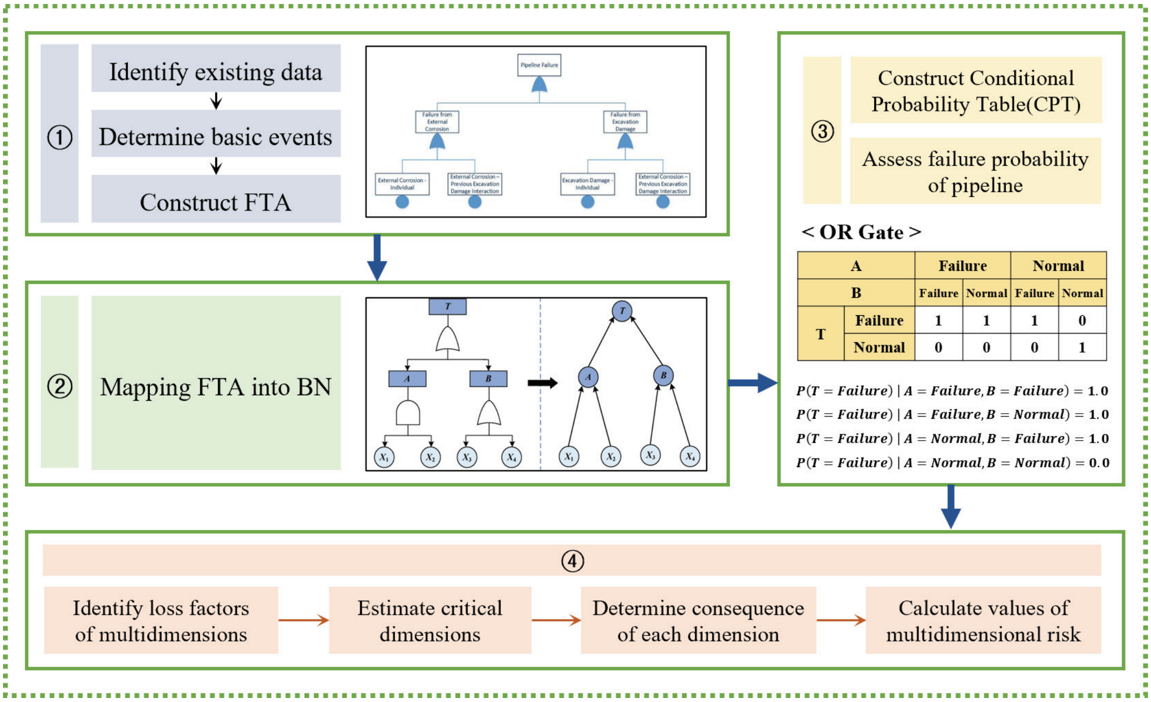

Fig. 1. Flow chart of the proposed FTA—BN integrated methodology

2.3.1 결함수 분석 구성 단계

결함수 분석 구성 단계에서는 시스템 내 발생 가능한 고장 요인들을 기본 사건 기존 문헌, 사고 통계, 운영 자료, 장비·재료 특성, 환경 요인 등 다양한 정보를 활용하여 고장 메커니즘을 분류하고 정의하는 절차가 포함된다. 이후 기본 사건들이 조합되어 중간 사건을 구성하도록 계층적 구조를 설정하며, 모든 중간 사건은 최종적으로 최상위 사건을 향해 구조적으로 연결된다. 결함수 분석 논리 구조는 AND 게이트와 OR 게이트를 기반으로 구성되며, 각각 '모든 부모 사건이 실패해야 상위 사건이 발생'하는 관계와 '부모 사건 중 하나라도 실패하면 상위 사건이 발생'하는 관계를 나타낸다. 이 단계에서는 각 사건 간의 논리적 의존성, 계층적 흐름, 게이트 유형이 명확히 정의되어야 하며, 도출된 구조는 이후 베이지안 네트워크의 기본 틀이 된다.

2.3.2 결함수 분석—베이지안 네트워크 매핑 단계

결함수 분석에서 구성된 계층 구조는 베이지안 네트워크의 방향성 비순환 그래프로 변환된다. 기본 사건은 최하위 노드로, 중간 사건은 중간 노드로 배치할 수 있으며 최상위 사건은 최상위 노드로 위치한다. 각 노드는 부모—자식 관계를 통해 인과구조를 형성하며, 결함수 분석의 논리 구족가 베이지안 네트워크에서도 동일하게 재현되도록 매핑을 하고자 하였다.

본 연구에서는 매핑하는 과정에서 논리적 일관성과 정확성을 확보하기 위해 다음과 같은 원칙을 준수하였다.

1) 노드 대응성(Node correspondence): FTA의 기본 사건, 중간 사건, 최상위 사건이 BN에서도 노드의 순서에 맞게 일대일로 대응하도록 변환되어야 한다.

2) 인과관계 구조의 보존: FTA의 논리적 관계(AND 및 OR 게이트) 구조를 유지하여 BN으로 매핑해야 한다. 이는 사건 간의 원인-결과 관계를 유지함으로써 모델의 신뢰성을 보장하기 위함이다.
3) 역추론 및 검증: BN 모델의 검증은 사후 확률(Posterior probability) 분석을 통해 수행되어야 하며, FTA에서 주요 요인은 다른 노드보다 높은 사후 확률값을 나타내야 한다. 이를 통해 BN 모델의 정량적 결과가 FTA의 정성적 분석 결과와 일관됨을 확인할 수 있다.

2.3.3 베이지안 네트워크의 조건부 확률표 구성 단계

베이지안 네트워크의 중간 노드는 부모 노드의 상태 조합에 따라 상위 사건의 발생 확률이 결정되므로, 결함수 분석에서 정의된 AND 및 OR 게이트는 조건부 확률표의 형태로 수치화된다. 베이지안 네트워크의 조건부 확률표는 각 노드의 조합을 열(Row)로 구성하고, 해당 조건에서 상위 노드가 ‘고장’ 또는 ‘정상’ 상태가 될 확률을 수치로 부여하는 방식으로 구성된다.

일반적인 베이지안 네트워크에서는 조건부 확률표에 0과 1 사이의 확률값을 입력하여 사고 원인의 영향 정도를 부분적으로 반영할 수 있다. 이러한 방식은 특정 고장 요인이 결과에 미치는 영향의 강도를 확률값으로 표현할 수 있다는 점에서 결함수 분석 대비 베이지안 네트워크의 큰 장점이다.

그러나 본 연구의 결함수 분석에서는 모든 논리 게이트를 OR 게이트로 정의하였다. OR 게이트는 부모 노드 중 하나라도 ‘고장’ 상태가 되면 상위 노드가 반드시 ‘고장’상태가 되는 구조이므로, 이를 조건부 확률표로 변환할 때 Fig. 1의 3단계 그림과 같이 0과 1을 기반으로 한 논리적 확률값을 부여한다. 이는 결함수 분석의 논리 게이트 구조를 베이지안 네트워크에서 정량적 형태로 일관성 있게 구현하기 위한 것이다. 즉, 결함수 분석에서 ‘결과가 반드시 발생하거나, 발생하지 않거나’라는 이분법적(Binary)인 결정 논리를 조건부 확률 형태로 변환하는 과정이며, 이를 통해 두 기법의 구조적 대응성을 확보하게 된다. 이후 사전 확률과 조건부 확률표가 결합되어 전체 베이지안 네트워크의 사후 확률 계산이 가능해진다.

2.3.4 수소 배관의 위험도 계산

베이지안 네트워크에서는 기본 사건의 사전 확률을 입력하여, 전체 네트워크의 사전 확률과 사후 확률을 모두 계산할 수 있다. 이때, 최상위 사건이 발생했다고 가정하여 전체 시스템에서 특정 고장 요인의 영향도와 민감도를 정량적으로 산출하였다.

베이지안 네트워크를 통한 사후 확률의 역추론 결과는 고장 원인 간 상대적 기여도 분석이 가능하며, 특정 기본 사건의 확률 변화가 최상위 사건이 발생할 확률에 미치는 영향도 평가가 가능하다.

이와 같은 연구의 흐름을 통해 결함수 분석의 정성적 인과 구조와 베이지안 네트워크의 정량적 확률 추론 기능을 통합적으로 활용할 수 있으며, 복잡한 고장 시나리오를 체계적으로 분석하는 확률 기반 위험도 평가 체계를 구성할 수 있다.

3. 연구 결과 및 논의

3.1 결함수 분석의 구조화 및 고장 확률 분석

본 연구에서는 최상위 사건을 ‘수소 배관 시스템의 고장’으로 정의하였다. 이는 배관망 내에서 발생할 수 있는 누출 및 파손 등 다양한 형태의 결함을 포괄하며, 시스템의 정상적인 가스 이송 기능이 상실되는 상태를 의미한다.

고장 모드(Failure modes)의 원인 분류는 체계적으로 도출하기 위해, Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA)[20,21], European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG)[22] 등 국제 배관 안전기준 및 사고 데이터베이스에서 제시하는 분류 체계를 참고하였다. 기관의 자료를 종합한 결과 일반적인 가스 배관망에서 발생하는 대표적인 여섯 가지 고장 유형은 다음과 같다. 본 분류 체계는 수십 년간 배관망의 사고 통계를 기반으로 도출된 것으로, 배관 시스템의

일반적인 결함 발생 원인을 설명할 수 있다.

1. 내부 및 외부 부식(Corrosion)
2. 운전 오류 및 관리 실패(Incorrect operation)
3. 재료 및 용접 결함(Material & weld defect)
4. 장치 및 시스템 결함(Equipment defect)
5. 외부 충격 및 기계적 손상(Third-party damage)
6. 지반 침하, 지진 등 자연재해(Natural force damage)

그러나 본 고장 유형 분류는 PHMSA, EGIG 등 천연가스 및 석유계 배관망을 대상으로 구축된 분류 체계이므로, 수소 배관망에 직접 적용할 경우, 연료 특성 차이를 충분히 반영하지 못하는 한계가 존재한다. 따라서 해당 기준을 기반으로 고장 유형을 선별하더라도, 수소의 물리·화학적 특성이 초래하는 고유 손상 메커니즘을 별도로 고려할 필요가 있다.

수소는 높은 확산성 및 낮은 분자량으로 인해 금속 내부로 침투하여 연성 및 강도를 저하하는 수소 취화[23]를 유발하며, 고압 조건에서 수소유기균열(HIC), 트래핑(Trapping), 블리스터(Blister) 등 다양한 형태의 재료 손상 및 구조적 안정성 저하를 초래할 수 있다[24]. 이러한 특성은 기존 연료 배관망에서는 상대적으로 낮게 평가되었으나, 수소 배관망에서는 주요 고장 기여 요인으로 작용한다.

이에 본 연구에서는 기존 여섯 가지 고장 모드 외에 수소 물성으로 인한 위험 요인(Hydrogen effect)을 독립적인 상위 고장 모드로 추가하였으며, 관련 세부 원인을 하위 기본 사건으로 세분화하여 결함수 분석 구조에 반영하였다. 이는 수소 취화 현상만을 의미하는 것이 아닌, 수소의 물성으로 인해 금속 재료에서 발생할 수 있는 여러 형태의 손상 메커니즘을 포괄하는 상위 고장 원인의 범주로 정의된다. Fig. 2는 ‘수소 배관 시스템의 고장’을 최상위 사건으로 설정한 전체 구조를 나타내며, 직접적 및 간접적 요인을 각각 중간 사건과 기본 사건으로 구성하였다.

총 10개의 중간 사건(IE_{A-J})과 57개의 기본 사건(BE)으로 구성되어 있으며, 각 사건의 상세 설명과 고장 발생 확률값은 Table 1에 제시하였다. 사전 확률은 국내·외 배관 사고 통계(가스사고연감, PHMSA, EGIG)[20-25], 수소 배관망의 위험성 평가에 관한 선행연구[26-32], 수소 취화 및 유기 균열 등 재료 열화 특성을 다룬 실험과 시뮬레이션 연구[33-35]의 정량값 기준으로 범위를 설정한 뒤, 전문가 판단을 반영하여 최종 산정하였다. 데이터가 제한적인 요인에 대해서는 자료 간 비교·검증을 통해 보수적 추정치를 적용하였다.

3.2 베이지안 네트워크 구조화 및 고장 전 · 후 확률 계산

결함수 분석에서 정의된 논리 구조를 기반으로 수소 배관망의 고장 확률을 추론하기 위해 베이지안 네트워크를 구축하였다. 본 연구에서는 GeNIe 5.0 소프트웨어를 활용하여 베이지안 네트워크의 방향성 비순환 그래프를 Fig. 3과 같이 도시하였다. GeNIe (Graphical Network Interface)는 베이지안 네트워크의 시각화 및 확률론적 추론 도구로, 불확실한 인과관계를 정량적으로 분석할 수 있기에 학술 연구와 데이터 분석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서 결함수 분석의 논리 게이트는 베이지안 네트워크에서도 동일한 수학적 관계를 유지하고, 모든 상위 사건을 OR 게이트 논리로 구성하였으므로, 상위 사건의 발생 확률은 다음 식으로 계산된다.

$$P(U) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P(1 - P(A_i)) \tag{3}$$

여기서 $P(A_i)$는 i번째 하위 사건의 발생 확률을 의미한다. 하위 사건 중 하나라도 발생하면 상위 사건이 발생하는 것으로 간주하여 확률값을 계산한다.

베이지안 네트워크에서는 식 (3)을 기반으로 각 노드 간의 조건부 확률표가 Fig. 4와 같이 자동 구성된다.

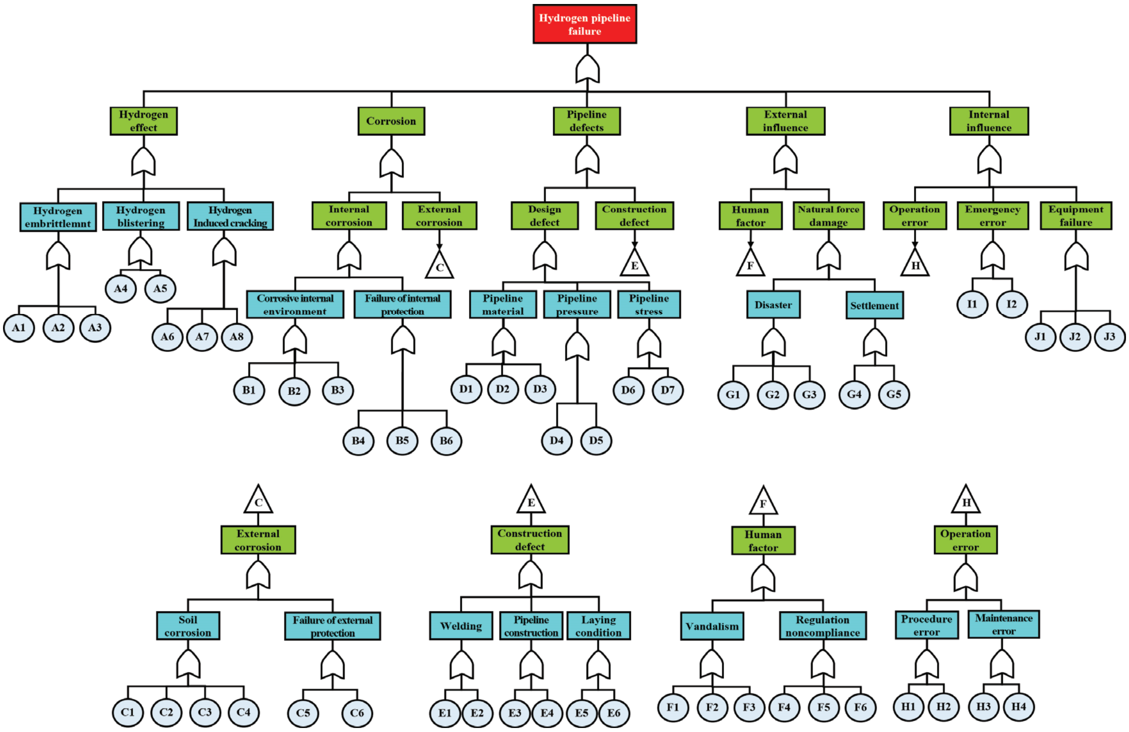

Fig. 2. Fault tree structure of the hydrogen pipeline failure

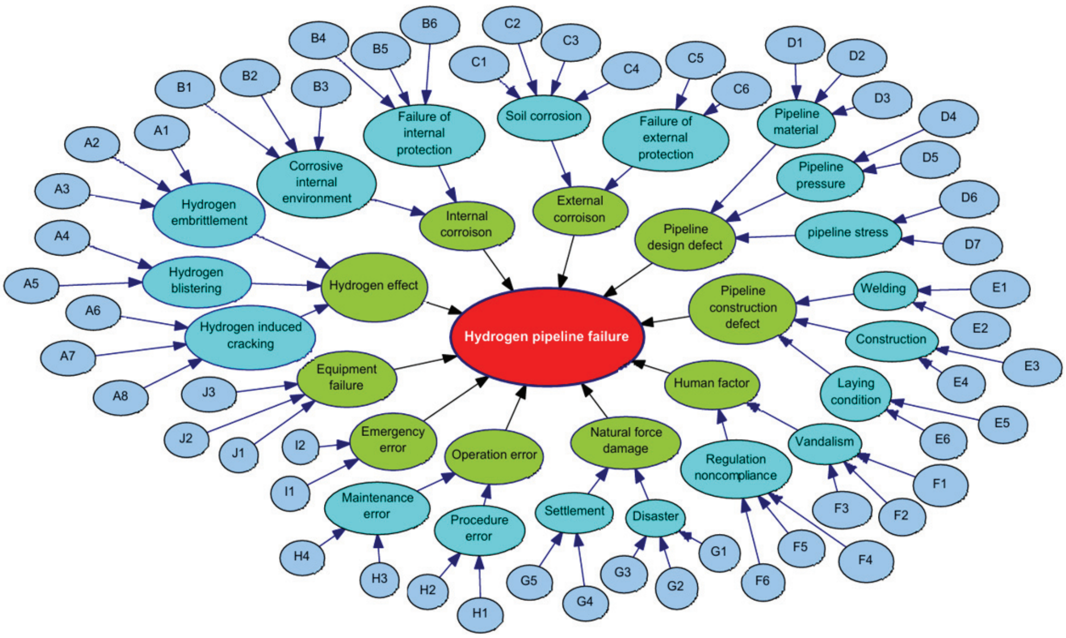

Fig. 3. Directed Acyclic Graph of Bayesian Network for the hydrogen pipeline failure

Table 1. Symbols description and prior probability of the basic events

Symbol	Description	Possibility	Symbol	Description	Possibility
TE	Hydrogen Pipeline failure	-	D7	Pipe stress concentration	3.03×10^{-3}
A1	High strength steel	2.01×10^{-2}	E1	Insufficient skills of operators	4.30×10^{-3}
A2	High tensile load	2.90×10^{-2}	E2	Low acceptance quality of the welded junction	4.30×10^{-3}
A3	High hydrogen concentration	4.98×10^{-2}	E3	Insufficient stress relief from pipeline	5.38×10^{-3}
A4	Coating disbondment	8.33×10^{-3}	E4	Pipeline damage during construction	7.01×10^{-3}
A5	Local hydrogen accumulation	4.54×10^{-3}	E5	Poor quality of pipe trench	7.48×10^{-3}
A6	Hydrogen trap	1.12×10^{-2}	E6	Poor backfill quality	9.02×10^{-3}
A7	High pressure at defect	1.81×10^{-2}	F1	Pipeline inspection frequency is low	1.81×10^{-3}
A8	Low pH value	1.75×10^{-2}	F2	Low quality of pipeline inspection	9.77×10^{-3}
B1	High hydrogen sulfide content	4.03×10^{-4}	F3	Low line patrol frequency	5.12×10^{-3}
B2	High water content	1.27×10^{-3}	F4	Insufficient pavement hardening	2.48×10^{-3}
B3	Product is highly corrosive	5.40×10^{-4}	F5	Warning signs are not obvious	1.26×10^{-2}
B4	Lack of internal corrosion detection	1.72×10^{-3}	F6	Insufficient buried depth of the pipeline	1.72×10^{-2}
B5	Lack of regular logging	2.28×10^{-3}	G1	Unstable soil structure	5.99×10^{-3}
B6	Thinning of the inner coating	1.91×10^{-3}	G2	Flood	4.64×10^{-3}
C1	High soil moisture content	9.00×10^{-3}	G3	Earthquake	3.41×10^{-2}
C2	Low soil resistivity	5.79×10^{-3}	G4	Unstable geological structure	7.26×10^{-3}
C3	Soil is more acidic	1.07×10^{-2}	G5	There are many ground buildings	6.38×10^{-3}
C4	Serious microbial corrosion	6.75×10^{-3}	H1	Failure to follow operating procedures	3.41×10^{-2}
C5	Cathodic protection failure	7.16×10^{-3}	H2	Careless operation personnel	7.98×10^{-3}
C6	Poor coating quality	5.20×10^{-3}	H3	Equipment not regularly maintained	4.46×10^{-3}
D1	Lower pipe diameter	1.78×10^{-3}	H4	Failure to follow maintenance procedures	4.30×10^{-3}
D2	Thickness of the pipe wall is thin	1.62×10^{-3}	I1	Personnel did not conduct an emergency drill	2.68×10^{-3}
D3	Improper pipeline material selection	4.03×10^{-4}	I2	No emergency plan has been prepared	5.55×10^{-5}
D4	Design maximum bearing pressure is low	1.20×10^{-4}	J1	Operating equipment failure	4.30×10^{-3}
D5	High pressure during operation	2.75×10^{-4}	J2	Failure of monitoring equipment	3.21×10^{-3}
D6	Significant residual stress of pipeline	3.03×10^{-3}	J3	Failure of communication equipment	1.98×10^{-3}

Hydrogen embrittlement	Failure				Normal			
Hydrogen blistering	Failure		Normal		Failure		Normal	
Hydrogen induced cracking	Failure	Normal	Failure	Normal	Failure	Normal	Failure	Normal
Failure	1	1	1	1	1	1	1	0
Normal	0	0	0	0	0	0	0	1

Fig. 4. Conditional probability table for the events in the BN

Table 2는 결함수 분석을 통해 산정된 사전 확률과 이를 베이지안 네트워크에 입력하여 도출된 사후 확률을 제시한다. 사후 확률은 수소 배관 시스템 고장을 증거(Evidence)로 설정하여 도출된 결과로, 확률값은 1.00으로 고정되며 이를 기준으로 하위 모든 사건의 확률이 네트워크 구조에 따라 재산정된다.

산정 결과, 모든 사건의 사후 확률은 사전 확률 대비 증가하였으며, 이는 사고 발생 조건 하에서 각 요소들이 실제 고장에 기여했을 조건부 가능성이 상대적으로 상승했기 때문이다. 베이지안 네트워크의 구조적 특성상 최상위 사건의 발생을 가정하면 네트워크 내 모든 하위 요인의 잠재적 발생 가능성이 재평가되며, 이 과정에서 낮게 평가되었던 사전 원인들도 사고 발생 조건에서는 인과적 관련성이 상승하여, 고장 요인으로서의 기여도가 재평가된다. 이러한 확률

Table 2. Comparison of Prior and Posterior probability in the FTA - BN Model for Hydrogen pipeline failure

Symbol	Description	Prior probability	Posterior probability	Rank
Top Event	Hydrogen pipeline failure	3.47×10^{-1}	1.00	-
IE_A	Hydrogen effect	1.42×10^{-1}	4.08×10^{-1}	1
IE_B	Internal corrosion	8.10×10^{-3}	2.34×10^{-2}	9
IE_C	External corrosion	4.38×10^{-2}	1.26×10^{-1}	5
IE_D	Pipeline design defect	1.02×10^{-2}	2.95×10^{-2}	7
IE_E	Pipeline construction defect	3.69×10^{-2}	1.07×10^{-1}	6
IE_F	Human factor	4.81×10^{-2}	1.39×10^{-1}	4
IE_G	Natural force damage	5.73×10^{-2}	1.65×10^{-1}	2
IE_H	Operation error	5.02×10^{-2}	1.45×10^{-1}	3
IE_I	Emergency error	2.74×10^{-3}	7.89×10^{-3}	10
IE_J	Equipment failure	9.46×10^{-3}	2.73×10^{-2}	8

적 재분배는 수소 배관의 고장은 다중 요인에 의해 발생하는 구조임을 뒷받침하는 근거가 된다.

그 중에서도 Hydrogen effect(IE_A)의 사전 확률은 1.42×10^{-1}, 사후 확률은 4.08×10^{-1}인데, 이는 다른 주요 인자인 자연 재해(IE_G), 운전 및 운영 오류(IE_H)와 비교했을 때 약 2배 이상 높은 수치이다. 즉, 수소의 고유한 물리·화학적 특성이 수소 배관 시스템의 전체 위험도에 가장 결정적인 영향을 미친다는 점을 정량적으로 입증하는 결과로 해석된다. 이러한 결과는 배관과 같은 고강도 강재에서 관찰되는 수소 취화 및 유기 균열, 응력 집중 가속화 등 배관의 구조적 손상 메커니즘에 큰 영향을 미친다는 기존의 실험 및 문헌의 결과와도 일관된다.

하지만 수소 관련 영향이 타 요인이 다른 인자보다 높은 사후 확률을 보인 결과에 대해서는 현재 활용 가능한 확률 데이터의 한계를 함께 고려할 필요가 있다. 수소 배관망에 대한 실증 사례와 장기 사고 통계는 천연가스·석유계 배관망에 비해 매우 제한적이며, 이는 일부 입력 확률이 과대 추정될 가능성을 내포한다. 특히 수소의 물리·화학적 특성에 기인한 손상 메커니즘은 실험 환경과 실제 현장 조건 간 차이가 존재하므로, 이러한 차이가 베이지안 네트워크 내에서 구조적 리스크를 과도하게 반영했을 가능성이 있다.

따라서 향후 연구에서는 확률값 산정의 신뢰도를 제고하기 위해 실증 배관망 기반의 사고 이력, 누출 빈도, 점검·정비 기록 등 현장 데이터를 체계적으로 수집하고 장기적 통계 데이터베이스를 구축할 필요가 있다. 또한 배관망 실증 사업에서 확보 가능한 운영·모니터링 데이터, 재료 열화 시험·시뮬레이션 결과, 압력·온도·환경 조건 변화에 따른 실측 자료 등을 활용하여 입력 확률을 정량적으로 보정하는 것이 중요하다. 아울러 전문가 판단 기반 불확실성 보정 기법을 병행하여 입력 확률의 변동성과 불확실성을 완화한다면 위험도 예측의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

이러한 방법론은 실증 지역의 지형·환경적 특성, 시공·운영 방식 차이 등을 추가로 반영하여 확률 인자 보정이 이루어진다면 보다 정교한 위험 예측 모델을 구축할 수 있을 것이며, 본 연구는 이러한 데이터 기반 모델 고도화를 통해 수소 배관망의 안정적 운영에 기여하고자 한다.

4. 결 론

본 연구는 수소 배관망에서 발생할 수 있는 다양한 사고·고장 원인에 대한 위험도를 정량적으로 평가하기 위해, 기존의 정적 위험 분석 기법과 확률 기반의 동적 분석 기법을 연계한 통합 모델을 제안하였다. 결함수 분석을 통해 도출된 사고 시나리오를

베이지안 네트워크로 확장함으로써, 시스템의 고장 발생 전·후 확률을 동적으로 추론할 수 있는 구조를 구축하였다.

1) 결함수 분석을 통해 수소 배관망의 주요 고장 원인을 10개의 중간 사건과 57개의 기본 사건으로 구조화하였다.
2) 문헌·사고 통계 및 전문가 판단을 바탕으로 각 기본 사건의 삭전 확률을 산정하여 고장 시나리오를 정량화하였다.
3) 베이지안 네트워크에 기반한 사후 확률 계산을 수행한 결과, 수소 취화 등 수소 물성 관련 인자가 전체 시스템 고장 확률에 큰 영향 (4.08×10^{-1})을 미치는 주요 위험 요인으로 산정되었다.

제안된 결함수 분석—베이지안 네트워크 통합 모델은 다양한 사고 요인 간의 인과 구조와 상호작용을 반영하여 수소 배관망의 위험도를 정량적으로 예측할 수 있다. 입력 조건 변화에 따른 확률값 갱신이 가능하다는 점에서 기존 정적 기법 대비 실질적인 장점을 갖는다. 복합적 위험 요인을 통합적으로 평가할 수 있는 본 모델은 향후 배관망의 유지관리를 위한 우선순위 설정, 취약 구간 선별, 설계 기준 정비 및 지역 맞춤형 안전대책 수립 등 실무적인 분야에서도 활용 가능성이 높다. 더 나아가, 본 연구의 위험도 모델링 기초 연구는 기존 도시가스 배관망을 수소 전용 또는 혼입 배관 운송망으로 전환하는 과정에서 지역별 취약 구간 판별 및 전환 가능성을 사전에 평가하는 기초 자료로 활용될 수 있어 정책적 의사결정에도 기여할 수 있을 것이다.

한편, 본 연구는 수소 배관망 위험도 모델의 기초 구축 단계로 실증 기반 데이터가 충분히 확보되지 않은 상황에서 문헌 자료와 전문가 판단을 활용한 추정 확률을 입력값으로 사용하였다. 이러한 접근은 입력 확률이 Epistemic(지식 기반) 불확실성을 내포함을 의미한다. 미국 샌디아 국립 연구소(SNL)의 수소 QRA 연구(SAND2012-10150)[36]에서도 누출 빈도, 점화 확률, 폭발파의 과압 예측 등 분야에서 수소 관련 신뢰도 데이터 부족이 주요 Epistemic 불확실성의 원인임을 지적한 바 있다. 본 연구 또한 동일한 한계를 지니며, 입력 확률에 대한 변동 가능성이 존재하고 이에 따라 주요 원인들의 고장 확률은 약 1.3～1.5배까지 변화할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제시한 위험도 분석 결과는 절대적 수치보다는 위험 요인의 상대적 영향도 비교에 중점을 두어 해석하는 것이 적절하다. 향후에는 실증 배관망의 사고 이력, 누출 및 점검 기록, 운영 환경 데이터 등 현장 기반 정보를 체계적으로 수집하여 입력 확률의 신뢰도를 높이고, 모델의 불확실성을 단계적으로 축소할 필요가 있다.

아울러, 퍼지 이론 기반의 불확실성 보정, 동적 객체지향 베이지안 네트워크(Dynamic Object-Oriented Bayesian Network, DOOBN) 등의 고도화된 확률추론 기법을 병행한다면 모델의 예측 정밀도와 실무 적용성을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 이러한 후속 연구를 통해 본 연구에서 제시한 모델은 실증 데이터에 기반한 고도화된 위험도 평가 체계 및 실시간 의사결정 지원 도구로 발전할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다(연구개발과제번호 RS-2023-00245737).

References

1. J. H. Lee, J. H. Kim, H. J. Kim, D. H. Lee, J. H. Kim, S. H. Kang, C. Y. Lee, M. J. Lee, and D. W. Kim, "Trends in the development of carbon-free fuel technology using hydrogen and ammonia to respond to carbon neutrality", Journal Energy & Climate Change, Vol. 19, No. 1, 2024, pp. 115-131, doi: https://data.doi.or.kr/10.22728/jecc.2024.19.1.115.
2. A. Raj, I. A. S. Larsson, A. L. Ljung, T. Forslund, R. Andersson, J. Sundström, and T. S. Lundström, "Evaluating hydrogen gas transport in pipelines: current state of numerical and experimental methodologies", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 67, 2024, pp. 136-149, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.140.

3. H. Park and M. Lee, "Consequence analysis on the leakage accident of hydrogen fuel in a combined cycle power plant: based on the effect of regional environmental features", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 698-711, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.698.
4. Y. Park, J. Jang, T. Kim, H. J. Kim, and T. Kim, "A study on the improvement of fatigue life against hydrogen embrittlement of STS316 steel peened with effective Almen intensity", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 26, No. 3, 2024, pp. 424-432, doi: https://doi.org/10.17958/ksmt.26.3.202406.424.
5. W. J. Kim, Y. Park, and D. J. Park, "Quantitative risk assessments of hydrogen blending into transmission pipeline of natural gas", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 91, 2024, pp. 105412, doi: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105412.
6. D. I. Kim, J. S. Yu, J. Y. Park, and C. H. Lee, "A study on the risk reduction method of hydrogen buried pipes based on quantitative risk assessment", Journal of The Korean Institute of Gas, Vol. 29, No. 1, 2025, pp. 115-124, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2025.29.1.115.
7. H. K. Park, S. W. Jung, Y. J. Choi, and M. C. Lee, "Semi-quantitative risk assessment using bow-tie method for the establishment of safety management system of hydrogen fuel storage facility in a combined cycle power plant", Journal of the Korean Society of Safety Vol. 39, No. 2, 2024, pp. 75-86, doi: https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2024.39.2.75.
8. D. Seo, K. Rhie, D. Lee, D. Shin, H. Kim, and T. Kim, "A study on the FT libraries for hydrogen system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 3, 2025, pp. 328-333, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.3.328.
9. H. Borgheipour, G. M. Tehrani, T. Eskandari, O. C. Mohammadieh, and I. Mohammadfam, "Dynamic risk analysis of hydrogen gas leakage using bow-tie technique and Bayesian network", International Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 18, 2021, pp. 3613-3624, doi: https://doi.org/10.1007/s13762-020-03090-4.
10. B. Zerouali, M. Kara, and B. Hamaidi, "Bayesian network and bow tie to analyze the risk of fire and explosion of pipelines," Process Safety Progress, Vol. 36, No. 2, 2016, doi: https://doi.org/10.1002/prs.11860.
11. S. B. Park and C. Yoo, "Development of a graphical model of causal gene regulatory networks using medical big data and bayesian machine learning", Journal of the Korean Medical Association, Vol. 65, No. 3, 2022, pp. 167-172, doi: https://doi.org/10.5124/jkma.2022.65.3.167.
12. S. Y. Ha, M. J. Lee, and J. B. Baek, "Development of near miss assessment model using Bayesian network and derivation of major causes", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 38, No. 4, 2023, pp. 54-59, doi: https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2023.38.4.54.
13. H. Joo, S. Hong, K. Kim, S. Kim, and H. S. Kim, "Integrated index for flood risk assessment development using Bayesian network", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 18, No. 6, 2018, pp. 269-281, doi: https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.6.269.
14. D. H. Seo, T. H. Kim, K. W. Rhie, and Y. E. Choi, "A study on FTA of off-site packaged hydrogen station", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 73-81, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.73.
15. The American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Hydrogen Piping and Pipelines (B31.12)", ASME, 2019, Retrieved from https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines.
16. American Petroleum Institute (API), "Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines (API RP 1160)," API, 2019, Retrieved from https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/recommended-practice-1160.
17. F. V. Jensen, An Introduction to Bayesian Networks, Vol. 210, London: UCL Press, 1996, pp. 1-178.
18. J. M. Joung and Y. W. Park, "A risk evaluation model of power distribution line using bayesian rule – overhead distribution system", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 6, 2013, pp. 870-875, doi: https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.6.870.
19. J. Jeong and J. Lee, "Probabilistic failure analysis of door system using Bayesian network", Korean Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 26, No. 1, 2021, pp. 40-49, doi: https://doi.org/10.7315/CDE.2021.040.
20. Korea Gas Safety Corporation, "2024 Gas Accident Yearbook", Korea Gas Safety Corporation, 2025. Management No. KGS 2025-019.
21. Korea Gas Safety Corporation, "2023 Gas Accident Yearbook", Korea Gas Safety Corporation, 2024. Management No. KGS 2024-054.
22. Korea Gas Safety Corporation, "2022 Gas Accident Yearbook", Korea Gas Safety Corporation, 2023. Management No. KGS 2023-023.
23. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), "Pipeline Incident 20 Year Trends", U.S. Department of Transportation, June 3, 2019, Retrieved from https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-20-year-trends.
24. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), "Pipeline Incident Flagged Files", U.S. Department of Transportation, May 31, 2019, Retrieved from https://www.phmsa.dot.gov/data-and-statistics/pipeline/pipeline-incident-flagged-files.

25. European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG), "Gas Pipeline Incidents: 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (Period 1970-2016)", 2018, Doc. No. VA 17.R.0395.
26. J. Baek, Y. Jang, and C. Kim, "Analysis of influence factors on hydrogen embrittlement of pipe steel according to hydrogen pipeline operating conditions", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 216-229, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.2.216.
27. S. J. Kim, "Theoretical considerations of numerical model for hydrogen diffusion behavior of high-strength steel under combined action of tensile stress and H_2S corrosion", Corrosion Science and Technology, Vol. 18, No. 3, 2019, pp. 102-109, doi: https://doi.org/10.14773/CST.2019.18.3.102.
28. Y. Wang, A. Xia, R. Li, A. Fu, and G. Qin, "Probabilistic modeling of hydrogen pipeline failure utilizing limited statistical data", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 95, 2024, pp. 1052-1066, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.285.
29. F. F. C. L. Viana, M. H. Alencar, R. J. P. Ferreira, and A. T. De Almeida, "Multidimensional risk assessment and categorization of hydrogen pipelines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 42, 2022, pp. 18424-18440, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.057.
30. Z. Wang, X. Gui, W. Wang, X. Zhao, and X. Ji,"Gas pipeline leakage risk analysis based on dynamic bayesian Network", Processes, Vol. 13, No. 4, 2025, pp. 927, doi: https://doi.org/10.3390/pr13040927.
31. Y. Wang, A. Xia, and G. Qin, "Fuzzy Bayesian network-based multidimensional risk assessment for leakage of blended hydrogen natural gas pipelines", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, Vol. 15, No. 2, 2024, doi: https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1577.
32. U. Dao, Z. Sajid, F. Khan, and Y. Zhang, "Safety analysis of blended hydrogen pipelines using dynamic object-oriented bayesian network", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 52, Part B, 2024, pp. 841-856, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.334.
33. Q. Li, H. Ghadiani, V. Jalilvand, T. Alam, Z. Farhat, and M. A. Islam, "Hydrogen impact: a review on diffusibility, embrittlement mechanisms, and characterization", Materials, Vol. 17, No. 4, 2024, pp. 965, doi: https://doi.org/10.3390/ma17040965.
34. H. Yu, A. Díaz, X. Lu, B. Sun, Y. Ding, M. Koyama, J. He, X. Zhou, A. Oudriss, X. Feaugas, and Z. Zhang, "Hydrogen embrittlement as a conspicuous material challenge: comprehensive review and future directions", Chemical Reviews, Vol. 124, No. 10, 2024, pp. 6271-6392, doi: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00624.
35. J. Zhou, M. Wu, J. Qiu, R. Cheng, and M. Tian, "Influence of H_2S on the hydrogen embrittlement susceptibility of X80 pipeline steel in hydrogen-doped natural gas", ACS Omega, Vol. 10, No. 26, 2025, pp. 28233-28242, doi: https://doi.org/10.1021/acsomega.5c03111.
36. K. M. Groth, J. L. LaChance, and A. P. Harris, "Early-stage quantitative risk assessment to support development of codes and standard requirements for indoor fueling of hydrogen vehicles", SANDIA REPORT., SAND2012-10150, 2012.