

# FMEA를 활용한 농업용 그린수소 공급 시스템의 위험 요인 분석

김병준<sup>1</sup> · 차찬수<sup>2,3</sup> · 고광춘<sup>1,4</sup> · 이영덕<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>한국폴리텍대학 석유화학공정과, <sup>2</sup>한국에너지공과대학교 에너지공학부, <sup>3</sup>전북테크노파크 이차전지사업단, <sup>4</sup>한국방폭협회 방폭기술본부

## FMEA-based Risk Factor Analysis of Green Hydrogen Supply Systems for Agricultural Applications

BYUNGJUN KIM<sup>1</sup>, CHANSOO CHA<sup>2,3</sup>, KWANG-CHUN KHO<sup>1,4</sup>, YOUNG DUK LEE<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Petrochemical Engineering, Korea Polytechnics, 4 Techno saneop-ro 81beon-gil, Nam-gu, Ulsan 44776, Korea

<sup>2</sup>School of Energy Engineering, Korea Institute of Energy Technology, 72 Ujeong-ro, Naju 58217, Korea

<sup>3</sup>Secondary Battery Division, Jeonbuk Technopark, 224 Wanjusandan 6-ro, Bongdong-eup, Wanju 55315, Korea

<sup>4</sup>Technical Department, Korea Engineering Committee for Explosion Protection, 15 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44412, Korea

†Corresponding author :  
ydlee@kentech.ac.kr

Received 15 July, 2025  
Revised 19 August, 2025  
Accepted 26 August, 2025

**Abstract >>** This study investigates potential risks in a green hydrogen supply system for agricultural use, combining alkaline water electrolysis and heat recovery. ASPEN Plus simulation was used to define key operating conditions, and risks were evaluated using a failure mode and effects analysis and correlation analysis. The highest risk priority number was associated with hydrogen leakage and membrane damage, both posing serious safety threats. Difficulty in fault detection was identified as a major contributor to overall risk, especially in gaseous states. The study proposes design and monitoring improvements to ensure safe hydrogen use in agriculture and support carbon neutrality.

**Key words :** Green hydrogen(그린수소), FMEA(고장 모드 및 영향 분석), Agricultural energy(농업 에너지), Risk assessment(위험성 평가), Hydrogen safety(수소 안전)

## 1. 서론

지구온난화로 인한 기후 변화는 전 세계적으로 인류가 직면한 가장 중대한 문제이다<sup>1)</sup>. 많은 연구에서 기후 변화의 원인이 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 비롯한 온실 가스의 과도한 배출임을 규명하였으며 이는 주로 우리가 사용하는 에너지원인 화석연료의 연소에서 발생한다<sup>1)</sup>. 따라서 2050 탄소중립을 실현하기 위해서

는 에너지 전환이 필요하며 그 핵심 대안 중 하나로 청정수소가 주목받고 있다<sup>1,2)</sup>. 청정수소는 연소 시 이산화탄소를 발생시키지 않으며 그린수소나 블루수소는 생산 과정에서도 탄소 배출을 최소화하거나 제거할 수 있다. 이는 수소를 연료전지, 산업용 연료, 발전용 에너지 등으로 활용할 때 기존의 화석연료 기반 시스템을 대체할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 특히 수소는 분자 구조상 에너지를 고밀도로 저

장할 수 있어 장거리 운송이나 계절 간 에너지 저장에도 유리하다. 화석연료는 자원 분포가 불균등하고 수입 의존도가 높은 반면 수소는 물, 바이오매스, 산업 부산물 등 다양한 원료로부터 생산될 수 있다. 이에 따라 수소는 특정 국가나 지역에 에너지 자립성을 제공할 수 있으며 장기적으로 에너지 안보를 강화할 수 있는 수단이 된다. 특히 재생에너지의 간헐성을 극복하기 위한 Power-to-X 기술은 향후 스마트 그리드 및 재생에너지 확산과도 밀접한 관련이 있다<sup>2)</sup>. 이때의 sector coupling의 핵심은 수소이다. 청정수소는 기존 산업 공정의 탈탄소화에도 필수적인 자원이다. 철강, 시멘트, 화학 등 고온의 열이 필요한 산업에서는 전기화가 어렵기 때문에 수소연료의 활용이 중요하다. 특히 농업 분야에서도 수소의 필요성은 점점 강조되고 있다. 현재 전 세계적으로 사용되는 비료는 대부분 암모니아를 기반으로 하며 이는 주로 천연가스를 개질하여 수소를 추출한 후 생산된다. 만약 이 수소를 청정수소로 대체할 경우 비료 생산의 탈탄소화를 달성할 수 있어 농업의 온실가스 배출을 크게 줄일 수 있다. 트랙터, 수확기 등의 농업의 필수 중장비는 주로 디젤 연료를 사용하는데 이를 수소 연료전지 기반의 전동 기계로 전환하면 대기오염과 온실가스 배출을 동시에 줄일 수 있다. 수소는 전기와 달리 대용량 저장이 가능하므로 농촌 지역에서 재생에너지로 생산된 전력을 수소로 변환해 저장함으로써 농산물의 냉장 저장, 가공 설비 등의 지속적 운영으로 농업 지역의 지속 가능한 성장이 가능해진다. 이는 특히 전력 기반이 부족한 지역에서 유리할 수 있다. 하지만 수소는 가연성이 높고 최소 점화 에너지가 매우 낮아 안전 관리가 철저히 필요한 에너지원이다. 수소는 4-75%vol의 넓은 연소 범위를 갖는다. 공기보다 가벼워서 누출 시 위쪽으로 빠르게 확산되며 실내 시설의 경우 축적되어 위험 농도 도달 가능성이 매우 높다. 화염의 경우 육안으로 식별이 어렵고 무색무취의 특성으로 사람이 감지하기가 어렵다. 저장의 장점이 있는 액화수소의 경우 약 20 K에서 저장되며 온도 유지에 실패할 경우 기화가 발생하여 약 800배의 부피 팽창으로 인한

위험이 있다. 특히 화학 설비의 경우 누출, 폭발, 화재의 위험을 항상 주의해야 하며 수소의 경우 더 강력한 관리가 필요한 실정이다. Kim 등<sup>3)</sup>은 수소 제품 검사 및 시험 시설에 대한 정량적 위험성 평가를 수행하고 비상 정지 시스템 도입을 포함한 위험도 저감 방안을 제시하였다. Kim 등<sup>4)</sup>은 수소충전소의 다양한 방호벽이 고압 수소 용기 폭발 시 폭발 압력과 피해를 얼마나 줄이는지 실정 연구를 수행하였다. Yoon 등<sup>5)</sup>은 대규모 반밀폐 콘크리트 구조물에서 수소 공기 혼합물 폭연 시 통풍구의 위치가 과압 및 화염 거동에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. Lee 등<sup>6)</sup>은 밀폐 공간에서 수소 누출 시 강제 환기가 수소 농도 감소에 미치는 영향을 computational fluid dynamics로 분석하였다. Jeon 등<sup>7)</sup>은 발전소 또는 수전해 시스템의 수소 폭발 사고 사례를 기반으로 위험성 평가를 수행하였다. Shin 등<sup>8)</sup> 및 Kim 등<sup>9)</sup>은 위험 및 운전 분석 및 작업 안전 분석 기반 위험성 평가를 통해 수소추출기 연계 연료전지 시스템 및 알칼라인 수전해 설비의 공정 및 인적 오류 관련 위험 요소를 파악하고 이를 바탕으로 안전 매뉴얼을 작성하였다. Kim 등<sup>10)</sup>은 알칼라인 수전해 시스템의 위험 요소를 결함수 분석 기법으로 파악하고 고압수소 저장탱크 폭발 시 발생할 수 있는 피해 범위를 분석하였다. Yu 등<sup>11)</sup>은 액화수소충전소에 대한 정량적 평가를 부품이나 설비에 따라 각각의 빈도 분석 방식으로 수행하여 위험도 결과를 비교하고 위험 저감 대책을 제안하였다. 기존 연구는 정량 위험성 평가, 충전소 및 사고 발생 후 영향성 등에 대한 연구를 수행하였다. 과거 발전용 연료전지 시스템의 경우 부품 결함으로 인한 시장의 어려움을 일으켰고 이에 따라 사고를 예방하고 시스템의 신뢰성을 향상하는 것이 중요하다<sup>12)</sup>. 이에 본 연구는 농업 시설에 수소를 공급하는 수전해 설비에 대한 위험성 평가를 잠재적인 고장 모드로 식별하는 failure mode and effects analysis (FMEA) 기법을 활용하여 수행하고 실내 환경에서의 수소 생산 공장에 초점을 맞춰 위험 요인과 개선 방안을 제시하고자 한다.

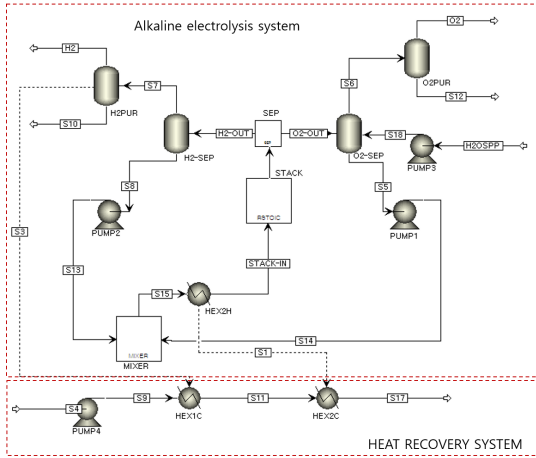


Fig. 1. Schematic of hybrid system between green hydrogen supply and heat recovery

Table 1. Design parameter for stack of electrolysis

Parameter	Unit	Value
Activation area	m <sup>2</sup>	0.1
Cell number		1,240
Current density	A/m <sup>2</sup>	4,000
Operating pressure	bar	7
Operating temperature	C	70
V_Cell	V	2.03
V_rev	V	1.23

Table 2. Operating condition of each component unit

Component unit	Phase	Temperature (°C)	Pressure (Bar)	Mol flow (kmol/hr)	H <sub>2</sub> O mol% (%)	H <sub>2</sub> mol% (%)	O <sub>2</sub> mol% (%)	KOH mol% (%)
Stack	Mixed	73.45	7.0	4,360.6	74.0	0.2	0.1	25.7
H2PUR	Vapor	25.00	6.7	9.3	0.5	99.5	0.0	0.0
O2PUR	Vapor	25.00	6.7	4.6	0.5	0.0	99.5	0.0
PUMP1	Liquid	73.45	7.0	2,180.4	74.3	0.0	0.0	25.7
PUMP2	Liquid	73.46	7.0	2,180.2	74.2	0.0	0.0	25.8
PUMP3	Liquid	25.07	7.0	0.1	74.3	0.0	0.0	25.7
PUMP4	Liquid	26.12	20.0	102.5	100.0	0.0	0.0	0.0
HEX1C	Liquid	29.19	20.0	102.5	100.0	0.0	0.0	0.0
HEX2C	Liquid	150.00	20.0	102.5	100.0	0.0	0.0	0.0

## 2. 연구 방법

### 2.1 농업 시설용 그린수소 공급 장치 시스템

농업 시설용 그린수소 공급 장치는 알칼라인 수전해 시스템을 선택하였다. 각 주요 부품에 대한 운전 조건을 도출하기 위하여 ASPEN Plus (AspenTech, Bedford, MA, USA)를 이용하여 시스템을 시뮬레이션하였다<sup>13)</sup>. Fig. 1과 같이 구성된 시스템에서 KOH 수용액은 수전해 스택으로 공급되고 반응 후 생성된 수소와 산소는 각각 음극과 양극으로 전달된 후 기액 분리기에서 수용액과 가스를 분리한다. 분리된 각각의 수소와 산소는 순도 확보를 위한 처리 시스템을 거쳐 고순도로 저장된다. 생산된 수소와 산소만큼의 소모된 수용액은 양극으로 보충되어 공급되며 각각의 수용액은 혼합기에서 혼합된 후 스택으로 공급되기 위하여 필요한 온도로 열 교환 후 재순환되는 구성을 갖는다. 열 교환에서 잃는 열에너지는 회수되어 열 공급 시스템을 통해 농업에 필요한 에너지로 공급된다. 본 시스템에 공급되는 전력은 1 MW로 설정하였으며 스택의 운전 조건은 Table 1과 같이 설계하였다<sup>13)</sup>. 패러데이 효율은 100%로 가정하였고 전극 사이의 가스 확산은 무시하였다. 시뮬레이션을 기반으로 도출된 총 9가지 부품에 대한 물질의 상태,

온도, 압력, 몰 유량, 구성 성분의 몰분율에 대한 운전 조건은 Table 2에 제시하였다.

### 2.2 FMEA를 활용한 위험성 평가 방법론

FMEA는 시스템의 각 구성 요소나 기능에 대해 예상할 수 있는 고장 모드를 식별하고 각 고장 모드가 시스템 및 주변에 미치는 영향을 분석하여 해당 고장 모드의 원인을 파악하는 방법이다. 위험성 평가 시 FMEA를 사용하는 절차는 Fig. 2와 같다.

효과적인 분석을 위하여 시스템을 잘 파악하고 있는 전문가로 팀을 구성한다. 본 연구에서는 석유화학 분야의 경험이 많은 공장장급으로 팀원을 구성하였다. 진단하려는 시스템을 각 구성 요소별로 발생할 수 있는 고장을 정의한다. Table 3과 같이 고장이 발생하였을 때의 영향을 심각도(severity)로 평가하고 고장이 발생할 빈도를 발생도(occurrence)로 평가한다. 이때 발생도는 산업용 데이터베이스를 참고하였다<sup>14)</sup>. 마지막으로 고장이 발생하기 전에 감지할 가능성을 검출도(detection)로 평가한다. 위험 우선순위(risk priority number, RPN)를 식 (1)과 같이 평가된 심각도, 발생도, 검출도의 곱으로 계산하였고 계산된 RPN이 높을수록 우선적으로 개선해야 할 위험이라고 판단하였다. 본 연구의 경우 설계 영역의 개선 인자를 도출하여 위험 요인을 분석하기 위하여 수행되

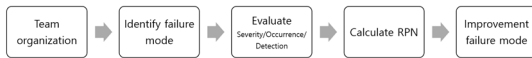


Fig. 2. Flowchart for the procedure of FMEA in risk assessment

Table 3. FMEA RPN scoring criteria

Score	Severity (effect impact)	Occurrence (failure frequency)	Detection (detection difficulty)
10	Critical	Certainty	Impossibility
7 to 9	Major	Frequency	Difficulty
4 to 6	Moderate	Occurrence	Moderate
1 to 3	Minor	Rarity	Ease

었고 화학 공장에서 공정 운전 중 가장 사고가 많은 밸브, 플랜지, 스위치, 계측 장치 등에 대한 영향은 무시하고 평가를 수행하였다.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

### 2.3 상관관계 분석

상관관계 분석은 두 변수 간에 존재하는 선형적 관계성을 분석하는 통계적 기법이다. 한 변수가 변화할 때 다른 변수도 함께 변하는 경향이 있는지, 그 정도가 어느 정도인지를 파악하기 위하여 사용된다. 상관관계 분석에서는 두 변수 간의 관계를 정량적으로 나타내기 위하여 식 (2)와 같이 상관계수(r)를 사용한다. 상관계수는 -1에서 1 사이의 값을 가진다.

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2)$$

상관계수가 1에 가까울수록 두 변수는 강한 양의 상관관계를 갖는다. 이는 한 변수가 증가하면 다른 변수가 증가한다는 것을 뜻한다. 상관계수가 -1에 가까울수록 강한 음의 상관관계를 갖는다고 해석한다. 이는 한 변수가 증가하면 다른 변수는 감소한다는 것을 뜻한다. 상관계수가 0에 가까울수록 두 변수 간에는 선형적 관계가 없음을 의미한다. 본 연구에서는 RPN과 온도, 압력, 상태, 조성에 따른 상관관계를 규명하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 고장 모드 분석 결과

Table 4는 9개의 시스템을 구성하는 주요 장치에서 발생할 수 있는 16가지 고장 모드를 분석한 결과이다. 분석 결과 스택에서 전해질막의 손상으로 발생할 수 있는 고장 모드가 RPN 값이 231.84로 가장 높았다. 알칼라인 수전해 스택의 전해질막에서의 손

Table 4. Summary on analysis results of failure mode and RPN

Rank	Component	Failure mode	Severity	Occurrence	Detection	RPN
1	STACK	Electrolyte membrane damage	9.2	4.2	6.0	231.84
2	H2PUR	Hydrogen leakage	9.4	5.8	4.2	228.98
3	H2PUR	Oxygen contamination	9.6	3.4	5.4	176.26
4	O2PUR	Hydrogen contamination	9.8	3.2	5.2	163.07
5	O2PUR	Oxygen leakage	6.4	5.2	4.0	133.12
6	HEX2C	Fouling	4.4	6.0	4.8	126.72
7	HEX1C	Fouling	4.2	5.8	5.2	126.67
8	STACK	KOH electrolyte leakage	7.4	5.2	3.2	123.14
9	PUMP2	KOH solution leakage	7.2	5.0	3.0	108.00
10	PUMP1	KOH solution leakage	7.4	4.8	3.0	106.56
11	HEX2C	Heat exchanger tube rupture	7.6	4.2	3.2	102.14
12	PUMP4	High pressure pump failure	5.8	5.2	2.2	66.35
13	STACK	Overheating	6.4	4.2	2.2	59.14
14	PUMP2	Pump failure	6.4	4.0	2.0	51.20
15	PUMP1	Pump failure	6.2	4.0	2.0	49.60
16	PUMP3	Pump failure	6.0	4.0	2.0	48.00

상 원인으로는 기계적 응력, 열응력, 재료의 화학적 부식, 제조 시 발생할 수 있는 불량 인자 등이 있다. 이는 수소와 산소가 혼합될 수 있으며 최악의 상황으로는 폭발이 발생할 수 있다는 것이다. 다음으로는 수소 정제 장치(H2PUR)에서의 수소 누출이 228.98로 RPN 값이 높았다.

수소 특성상 장치 및 배관, 밸브, 플랜지 등의 구성 요소들의 밀봉 불량 혹은 진동 등의 에너지로 인한 균열 등으로 누출되면 수소의 폭발 범위가 4-75% 수준의 높은 가능성으로 화재 혹은 폭발로 이어질 수 있다. 같은 장치에서 176.26 RPN 값을 도출한 산소 혼입의 위험이 있다. 이는 RPN 값이 가장 높은 전해막 손실과 유사한 상황으로 산화제와 가연물이 섞여 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다. 이어서 RPN 값이 163.07로 산소 정제 장치(O2PUR)에서의 수소 혼입 상태이다. 수소는 4% 수준의 양만 있어서 폭발이 가능하므로 가장 높은 심각도인 9.8이 도출되었다. 그리고 동일 장치의 산소 누출 모드가 133.12 RPN 값이 도출되었다. 수소 정제 장치에서의 누출과 같이 배관, 밸브 등의 손상 및 진동으로 인한 결함으로

밀봉에 문제를 일으킬 수 있으며 이는 순 산소가 누출되는 것이기 때문에 주변에 인화성 물질이 있으면 쉽게 화재로 이어질 수 있다. 다음으로는 고온으로 동작하는 열교환기(HEX2C) 및 저온으로 동작하는 열교환기(HEX1C)에서의 파울링이 RPN 값이 각각 126.72, 126.67로 도출되었다. 내부의 오염물질로 인한 스케일 형성, 부식 생성물 축적 등이 발생할 수 있으며 이로 인한 열전달 효율이 저하되고 내부 압력이 상승할 수 있다. STACK의 수용액 누출로 인한 고장 모드가 RPN 값 123.14로 도출되었다. 스택의 밀봉재 결함, 소재 부식, 운전 중에 발생할 수 있는 진동 및 열팽창 등으로 인한 문제로 주변 장비의 부식 가속화, 환경오염 등의 문제가 발생할 수 있다. 또한 재순환되는 펌프(PUMP2, PUMP1)에서의 KOH 수용액 누출이 각각 108.00, 106.56 RPN 값을 도출하였다. 펌프는 회전기계로 진동이 수반되며 밀봉의 결함 및 진동, 부식 등의 문제로 인한 누출은 STACK의 누출과 동일하게 주변 장비의 부식 가속화, 환경오염, 시스템의 불균형을 일으킬 수 있다. 다음으로는 고온 열교환기(HEX2C)의 튜브 파손으로 인한

RPN 값이 102.14로 도출되었다. 150°C의 운전 온도로 인한 열 응력, 부식, 피로 등으로 인한 냉각수 누출로 전체 시스템의 열 균형을 깨트릴 수 있고 이는 전체 시스템의 효율 및 수명에 영향을 줄 수 있다. 다음은 냉각 시스템 고압 펌프의 고장이 66.35 RPN 값이 도출되었다. 20 bar의 고압으로 작동하기 때문에 가스켓의 손상 혹은 캐비테이션 발생 가능성이 높고 이에 따른 열교환기에서의 냉각 효율이 떨어져 전체 시스템에 영향을 줄 수 있다. 다음은 스택에서 과열로 인한 고장 모드가 RPN 값이 59.14로 도출되었다. 알칼라인 수전해는 저온으로 동작하는 설비지만 위에서 열거한 전체 냉각 시스템의 결함으로 인하여 발생할 수 있는 문제와 내부 전해질막의 손상 등으로 과전류 등이 발생할 수 있고 이는 전체적인 효율을 저하시키며 막 손상의 가속화, 이를 통한 폭발 화재로 이어질 수 있다. 마지막으로 펌프(PUMP2, PUMP1, PUMP3)의 고장은 각각 51.20, 49.60, 48.00의 RPN 값이 도출되었다.

### 3.2 RPN과 FMEA 분석 변수의 상관관계 분석 결과

Table 5는 계산된 RPN과 심각도(S), 발생도(O), 검출도(D) 간의 상관관계 분석 결과이다. RPN 값은 검출도와 *P-value*가 0.000으로 통계적으로 유의한 상관관계수 0.859로 매우 강한 양의 상관관계를 갖는다. 각각의 독립변수가 독립성을 갖는 것을 확인하기 위해서 다중 공선성 검토 결과 각각 1.8, 1.5, 1.3의 값을 보여 서로 독립임을 확인하였다<sup>15)</sup>.

**Table 5.** Result of correlation analysis between RPN and severity, occurrence, and detection

	RPN	Severity	Occurrence
Severity	0.649		
	0.007		
Occurrence	0.138	-0.511	
	0.609	0.043	
Detection	0.859	0.381	0.076
	0.000	0.145	0.779

Cell contents: Pearson correlation (top) and *P-value* (bottom).

이는 고장을 발견하기 어려울수록 RPN 값이 증가한다는 의미로 위험성 평가 결과 검출도의 영향력이 매우 크다는 것을 의미한다. 그래서 상용화 플랜트를 안전하게 운영하기 위해서는 고장을 조기에 발견할 수 있는 계측 시스템의 체계의 강화가 매우 중요하다는 것을 제시할 수 있다. 또한 심각도와 *P-value*가 0.007로 통계적으로 유의한 상관관계수 0.649로 양의 상관관계를 갖는다. 즉 심각도가 높은 고장 모드에 대응할 수 있는 다양한 설계 개선 및 관리의 필요성을 나타낸다. 하지만 발생도와 *P-value*는 0.609로 통계적으로 유의하지 않는 결과를 도출하였다. 또한 심각도와 발생도와는 *P-value* 0.043으로 통계적으로 유의한 상관관계수 -0.511의 음의 상관관계를 갖는 결과를 도출하였다. 이는 치명적인 고장일수록 발생 빈도가 낮고 자주 발생하는 고장은 상대적으로 대응이 가능하다는 것을 의미한다. 이는 플랜트를 장기 운영한 경험적 요인이 반영된 결과로 해석할 수 있다.

### 3.3 FMEA 분석 변수와 운전 조건 상관관계 분석 결과

정량 분석을 위하여 물질의 상태는 액체는 1, 액체 기체 혼합 상태는 2, 기체 상태는 3으로 변경하여 분석을 진행하였다(Table 6). 물질의 상태는 발생도를 제외한 RPN 값, 심각도, 검출도와 각각 *P-value* 0.005, 0.003, 0.040으로 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 나타났다. 심각도가 상관관계수 0.684로 가장 높았고 RPN 값은 0.663, 검출도는 0.519로 나타났다. 이는 물질의 상태가 액체에서 기체로 갈수록 고장 발생 시 심각도가 커지고 검출이 어려워지며 위험도가 높아진다고 해석할 수 있다. 즉 본 시스템에서 수소, 산소 등의 기체 상태의 공정이 액체 상태의 공정보다 잠재적 위험도가 크다는 것을 알 수 있고 관리의 우선순위가 높다는 실증적 근거로 판단할 수 있다. 물의 물농도는 RPN 값, 심각도와외의 관계성이 *P-value* 0.033, 0.004로 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 나타났다. 심각도가 -0.675로 음의 상관성이 가장 높았으며 RPN 값이 -0.534로 나타났다.

**Table 6.** Result of correlation analysis between operation condition and FMEA variables

Variable	RPN	Severity	Occurrence	Detection
Phase	0.663	0.684	-0.197	0.519
	0.005	0.003	0.465	0.040
Temperature	-0.167	-0.241	0.131	-0.092
	0.537	0.369	0.629	0.734
Pressure	-0.147	-0.558	0.460	0.096
	0.586	0.025	0.073	0.723
Mol flow	-0.066	0.100	-0.122	-0.190
	0.809	0.130	0.652	0.481
H <sub>2</sub> O mol%	-0.534	-0.675	0.280	-0.375
	0.033	0.004	0.293	0.152
H <sub>2</sub> mol%	0.558	0.547	-0.017	0.339
	0.025	0.028	0.950	0.199
O <sub>2</sub> mol%	0.195	0.230	-0.199	0.282
	0.469	0.392	0.460	0.290
KOH mol%	-0.380	-0.038	-0.256	-0.504
	0.146	0.890	0.339	0.046

Cell contents: Pearson correlation (top) and *P*-value (bottom).

즉 물이 많을수록 고장 발생 시 심각도와 위험 우선순위가 낮아진다고 해석할 수 있다. 수소의 몰농도는 RPN 값, 심각도와의 관계성이 *P*-value가 0.025, 0.028로 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 나타났다. 상관관계수는 RPN 값이 0.558, 심각도가 0.547로 나타났다. 수소 농도가 높아질수록 RPN 값 및 심각도가 증가한다. 이는 수소 자체가 가지고 있는 잠재적 위험성이 크다고 해석할 수 있다. 압력과 심각도의 관계성이 *P*-value 0.025로 통계적으로 유의한 상관관계수 -0.558의 음의 상관관계가 나타났다. 이는 수전해 시스템과 열 회수 시스템을 분리해서 해석하면 작동유체가 물인 열 회수 시스템에서의 운전 압력이 높고 상대적 저압으로 운전되는 수전해 시스템에서 더 많은 수소 등의 위험물을 취급하기 때문이라고 사료된다. KOH의 몰농도 역시 검출도와 *P*-value 0.046 상관관계수 -0.504로 음의 상관관계가 나타났다. KOH 농도가 높을수록 고장 검출이 쉽다는 것을 알 수 있으며 KOH 용액의 누출 발생 시 감지가 상대적으로 용이하다고 사료된다.

#### 4. 제 언

농경지 등 넓은 야외 환경에서 운영되는 농업용 수소 공급 시스템은 일반적인 산업 환경과 달리 외부 기후, 지리적 분산, 접근성의 제약 그리고 다양한 외부 요인에 영향을 받기 쉽다. 이러한 특성을 고려할 때 시스템의 안전성과 효율성, 환경적 적합성을 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서 규명한 바와 같이 스택의 전해질막 손상과 수소 정제 장치의 수소 누출이 가장 위험도가 높은 고장 모드로 나타났다. 농경지 환경에서는 넓은 지역에 분산 활용되는 경우가 많으므로 장치별로 내구성 높은 소재와 구조를 적용하고 외부 충격이나 진동, 기상 변화에 견딜 수 있도록 설계 보강이 필수적이다. 또한 농경지의 넓은 공간적 특성상 고장이나 누출 발생 시 신속한 대응이 어려울 수 있으므로 고장 조기 발견을 위한 계측 및 감지 시스템의 강화가 무엇보다 강하게 요구된다. 검출도가 RPN 값과 매우 높은 상관관계를 보이는 점을 고려할 때 각 주요 지점에 수소 및 산소 농

도 모니터링 센서, 누출 감지 센서 등을 분산 배치하여 실시간으로 데이터를 수집하고 이상 징후가 발생하면 즉시 경보 및 자동 차단이 이루어질 수 있도록 하여야 한다. 기체 상태의 공정 구간에서 고장 발생 시 위험도가 높아지는 경향이 있으므로 해당 구간의 운전 조건을 더욱 보수적으로 관리하여야 한다. 반면 물의 농도가 높을수록 위험도가 낮아지는 것으로 분석되었으므로 농업용 관개 시스템과 연계하여 적정 수분을 유지하고 냉각 효율을 높이는 방안도 함께 고려하면 더 실효성 있는 운영이 가능할 것으로 판단된다. 수소 농도가 높아질수록 위험도가 증가하므로 농경지 내 구역별로 수소 농도 기준치를 설정하고 이를 초과하면 자동으로 공급이 중단되거나 환기가 이루어지도록 하는 운영 기준을 마련하여야 한다. 열교환기와 펌프 등 주요 설비는 먼 거리의 분산 설치로 인하여 유지 보수가 쉽지 않으므로 주기적인 순회 점검과 함께 스케일 및 부식 관리, 진동 모니터링 등 예방 정비 체계를 강화해야 한다. 이는 플랜트 공정에서 쌓인 노하우를 기반으로 계획 정비를 통해 해결할 수 있다. 특히 KOH 용액 누출은 토양 및 수질 오염으로 이어질 수 있으므로 내화확성이 우수한 밀봉재를 사용하고 누출 감지 시스템을 통해 환경 피해를 최소화해야 한다. 관리하지 않으면 농작물의 피해로 이어질 수 있다. 마지막으로 농경지 환경에서는 장비 접근성이 떨어질 수 있으므로 비상 상황 발생 시 신속하게 대응할 수 있는 이동식 점검 장비와 비상 대응 매뉴얼을 사전에 마련하는 것이 중요하다 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 알카라인 수전해 시스템을 통해 생산된 수소를 농업 시설에 공급하는 장치에 대한 위험성 평가를 FMEA 기법을 활용하여 수행하고 실내 환경에서의 수소 생산 공정에 초점을 맞춰 다음과 같은 위험 요인 분석 결과를 도출하였다.

- 1) 주요 고장 모드 및 위험성 분석 결과 스택의 전해질막 손상 및 수소 정제 장치에서의 수소 누

출로 인한 고장 모드가 가장 높은 RPN 값을 갖는 것으로 분석되었다. 이는 수소와 산소의 혼합으로 인한 폭발 및 수소 누출로 인한 화재 폭발로 이어질 수 있는 잠재 위험이 가장 크다고 판단된다.

- 2) 위험도 변수 및 운전 조건과의 상관관계 분석 결과 RPN 값은 검출도와 통계적으로 유의한 강한 양의 상관관계(0.859)를 보였다. 이는 고장이 발견하기 어려울수록 RPN 값이 증가한다는 것을 의미하며 안전한 운영을 위한 고장을 조기에 발견하여 조치할 수 있는 계측 시스템의 강화가 필요하다. RPN 값과 심각도는 통계적으로 유의한 양의 상관관계(0.649)를 보였다. 이는 심각도가 높은 고장 모드에 대한 설계 개선 및 관리의 필요성을 나타낸다.
- 3) 물질의 상태와 위험도의 상관관계 분석 결과 액체에서 기체로 갈수록 심각도가 커지고 검출이 어려워지며 위험도가 커지는 양의 상관관계를 보였다. 이는 수소, 산소 등의 기체 공정에서 발생할 수 있는 잠재적 위험도가 크며 엄격한 관리가 필요하다는 근거로 활용할 수 있다.
- 4) 수소가 가지고 있는 잠재적 위험성이 크다는 것을 수소 몰농도와 RPN 값 및 심각도와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 통해 규명하였다.
- 5) 농업 특성상 토양 및 수질의 관리가 매우 중요한데 KOH 몰농도와 검출도의 음의 상관관계 분석 결과는 KOH 누출 시 감지가 상대적으로 용이하다는 결론을 내릴 수 있다. 이는 농경지로의 악영향을 사전에 방지할 가능성이 크다는 것으로 해석할 수 있다.

## 후 기

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: RS-2021-RD010043)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## References

1. International Energy Agency (IEA), "Net zero roadmap: a global pathway to keep the 1.5°C goal in reach", IEA, 2023. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.
2. B. Kim, "Statistical analysis and optimization of power-to-X systems coupled with wind energy for South Korea [Doctoral Dissertation]", Berlin: Technische Universität Berlin, 2024.
3. J. Kim, Y. Kim, and S. Jung, "Risk assessment of hydrogen product inspection and testing facility using EFFECTS & RISKCURVES", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 751-762, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.751>.
4. D. Kim, S. Kim, H. Lee, J. Kim, and C. Yu, "Analysis of the impact of high-pressure hydrogen vessel explosion pressure on protective barriers and rear areas", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 5, 2024, pp. 563-571, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.563>.
5. U. Yoon, J. Kim, B. Park, I. Hwang, W. Kim, and Y. Kim, "Effect of vent location on a vented deflagration of hydrogen-air mixtures in semi-confined space", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 2, 2025, pp. 184-194, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.2.184>.
6. S. Lee, S. Oh, J. Moon, and B. Ma, "Numerical study of forced ventilation effects on hydrogen leaks in semi-closed space", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 64-74, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.64>.
7. M. H. Jeon, D. J. Jang, and M. C. Lee, "A study on the risk assessment and improvement methods based on hydrogen explosion accidents of a power plant and water electrolysis system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 66-74, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.66>.
8. D. Shin, S. Hong, G. Rhie, D. Lee, H. Kim, and D. Seo, "Risk assessment for fuel cell demonstration facility linked to hydrogen extractor to create a safe operation manual", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 5, 2024, pp. 469-474, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.469>.
9. H. Kim, K. Rhie, T. Kim, S. Hong, D. Lee, D. Shin, and D. Seo, "A study on the development of emergency stop safety manual for alkaline water electrolysis", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 4, 2024, pp. 460-467, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.4.460>.
10. J. Kim, H. Jeong, J. W. Lee, T. Kim, D. Kim, and C. H. Yu, "Impact of risk factors inherent in alkaline water electrolysis on accidents", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 5, 2024, pp. 554-562, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.554>.
11. E. Yu, B. Kim, M. Kim, and S. Kang, "Study on methods for conducting quantitative risk assessment of liquid hydrogen fueling stations", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 681-689, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.681>.
12. B. Kim, Y. D. Lee, and T. Morosuk, "Thermal-statistical approach for diagnosis of bus bar degradation in MCFC power plant", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 70, 2025, pp. 106158, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106158>.
13. B. Kim and Y. D. Lee, "Correlating the influence of the purity of hydrogen produced by a surplus power on the production of green ammonia", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 146, No. 1, 2024, pp. 012701, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4063663>.
14. OREDA, "Offshore and onshore reliability data handbook", OREDA, Norway, 2015.
15. J. F. Hair Jr, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, "Multivariate data analysis", 7th ed, Pearson, UK, 2009.