

## 퍼지기반 해양 미생물 이용 수소 제조 공정의 고장유형 및 영향분석

박성호<sup>1,2,†</sup> · 안준건<sup>2</sup> · 김수현<sup>1</sup> · 유영돈<sup>1</sup> · 장대준<sup>2</sup> · 강성균<sup>3</sup>

<sup>1</sup>고등기술연구원, <sup>2</sup>한국과학기술원 기계공학과, <sup>3</sup>한국해양과학기술원

### Fuzzy Based Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Hydrogen Production Process Using the Thermococcus Onnurineus NA1

SUNG HO PARK<sup>1,2,†</sup>, JUNKEON AHN<sup>2</sup>, SU HYUN KIM<sup>1</sup>, YOUNG DON YOO<sup>1</sup>, DAEJUN CHANG<sup>2</sup>,  
SUNGKYUN KANG<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin 17180, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

<sup>3</sup>Korea Institute of Ocean Science & Technology, 385 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea

†Corresponding author :  
sh.park@iae.re.kr

Received 14 April, 2018  
Revised 5 July, 2018  
Accepted 31 August, 2018

**Abstract >>** In this study, the failure mode and effect analysis (FMEA) of hydrogen production process by using the Thermococcus onnurineus NA1 was conducted and advanced methodology to compensate the weakness of previous FMEA methodology was applied. To bring out more quantitative and precise FMEA result for bio-hydrogen production process, fuzzy logic and potential loss cost estimated from ASPEN Capital Cost Estimator (ACCE) was introduced. Consequently, risk for releasing the flammable gases via internal leakage of steam tube which to control the operating temperature of main reactor was caution status in FMEA result without applying the fuzzification and ACCE. Moreover, probability of the steam tube plugging caused by solid property like medium was still caution status. As to apply the fuzzy logic and potential loss cost estimated from ACCE, a couple of caution status was unexpectedly upgraded to high dangerous status since the potential loss cost of steam tube for main reactor and decrease in product gases are higher than expected.

**Key words :** Failure mode and effect analysis(고장유형및영향분석), Fuzzy logic(퍼지 논리), Hydrogen production(수소 제조)

## 1. 서론

에너지 수요 증가에 따른 화석 연료의 사용량 증

가는 환경오염과 지구온난화를 가속화시키며, 전 세계적으로 이러한 문제를 해결하기 위하여 친환경 에너지로의 패러다임 변화가 가속화되고 있다. 특히 파

리기후변화협약을 바탕으로 각국은 온실가스 감축 목표를 이행해야 하며, 이에 대한 대안으로 신재생에너지 보급/이용 확대 및 이산화탄소 포집 및 저장 기술이 중·장기적인 대안으로 제시되고 있다. 하지만 재생에너지(풍력/태양광/태양열)는 전력수요에 대응하여 안정적인 공급이 어렵고, 발전 효율이 화석연료를 이용하는 발전 설비에 비해서 상대적으로 낮은 단점이 있다. 뿐만 아니라 기존 원자력·화력 발전 시스템에 비해서 발전 원가가 높기 때문에 발전 수요자의 부담을 가중시킬 수 있다.

반면 신에너지 중 지구상에서 가장 풍부하고, 다양한 에너지 자원으로부터 전환할 수 있는 수소에너지는 기존 화석연료 중심의 전력 변환 시스템의 큰 변화 없이 적용이 가능하기 때문에 미래에너지 대안으로 평가받고 있다<sup>1,2)</sup>. 수소를 생산하는 방법은 태양광과 풍력 혹은 잉여 전력을 활용하여 수전해를 통하여 수소를 제조하는 기술과 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석 연료를 통하여 화학적 전환 기술로 크게 나뉜다. 재생에너지-수전해를 통하여 수소를 제조하는 기술의 경우, 높은 시설투자비와 낮은 가동률로 인하여 경제성이 결여될 수 있으며, 화석 연료를 통하여 수소를 제조하는 기술은 기존의 인프라를 활용하기 때문에 생산비용이 저렴하여 경제적이다 할 수 있다.

특히 석탄이나 바이오매스를 가스화하여 고농도 수소로 전환한 후 이산화탄소를 포집하는 기술은 화석연료 중 상대적으로 저렴한 석탄을 이용하여 수소를 생산할 수 있고, 이산화탄소를 연소 전에 포집할 수 있는 장점이 있다<sup>3-8)</sup>. 석탄 가스화 후 생성된 합성가스(CO 60%, H<sub>2</sub> 30%, H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> 10%)는 일반적으로 촉매를 사용하는 수성가스 전환 공정을 거쳐 고농도 수소를 생산하는 것이 일반적이다. 반면 해양 미생물 이용 수소 제조 기술은 기존의 수성가스 전환 반응의 촉매 역할을 초고온성 고세균 균주가 대신하며, 이를 배양하여 이를 합성가스와 반응시켜 고농도 수소를 제조할 수 있다<sup>9-14)</sup>.

해양 미생물 이용 수소 제조 기술은 촉매를 이용한 기존 수성가스 전환 반응 공정과 달리 상대적으

로 낮은 온도(100°C 미만)에서도 수성가스 전환 반응이 가능하고, 이에 따라 상대적으로 낮은 시설투자비가 요구된다. 뿐만 아니라 수성가스 전환 촉매에 비해서 상대적으로 저렴한 초고온성 고세균 균주인 *Thermococcus onnurineus* NA1을 최적 배양할 경우, 높은 가동률과 낮은 유지보수비용으로 수소 생산 공정의 경제성을 향상시킬 수 있다<sup>15)</sup>.

확산속도가 빠른 수소를 제조하는 공정의 경우, 수소 제조 설비 오작동으로 인한 누출 혹은 설비 손상으로 인한 외부 누출시 수소의 연소 범위 농도에 진입하여 지속적으로 체류하게 되면 화재나 폭발 위험성이 있기 때문에 수소 제조 공정에 대한 정량적인 위험성 검토가 반드시 필요하다. 이를 위해서 심각한 위험을 초래할 수 있는 설비의 잠재적인 고장 유형과 위험도를 분석하여 초기 설계 단계에 위험요소를 사전에 제거하기 위한 노력이 반드시 필요하다<sup>1,16)</sup>.

본 연구에서는 건식 석탄 가스화기에서 생산되는 합성가스 930 kg/hr를 이용하여 약 1,405 kg/hr의 수소를 생산하는 해양 미생물 이용 수소 제조 실증 플랜트에 대한 고장유형 및 영향분석(failure mode and effect analysis, FMEA)을 수행하여 설비 가동률과 설비 안전에 큰 영향을 미치는 요인을 도출하였다. 또한 고장유형 및 영향분석 단계에서 심각도(severity), 발생빈도(likelihood), 검출빈도(detectability)를 통하여 계산된 위험도 우선순위(risk priority number, RPN)와 같은 자연어 표현을 수치화하기 위해서 퍼지 논리를 적용하였다. 퍼지 논리는 심각도와 발생빈도, 검출빈도의 변수를 소속도 함수(membership function)를 통하여 퍼지수로 수치화(fuzzification)하며, 무게 중심법(centroid technique)을 이용하여 위험도 우선순위를 결정할 수 있는 수학적 모델이다. 이러한 퍼지 논리를 고장유형 및 영향분석에 적용함에 따라 각 요소의 소속도를 분산시켜 표현시킴으로써 위험도 우선순위를 더욱 정밀하게 분석하였다. 기존 심각도 산정 방법 대신 ASPEN Capital Cost Estimator (ACCE)를 통해 산정된 시설투자비를 통하여 잠재적인 손실비용에 대한 가중치와 환경 및 인명에 대한 치명도를 반영하여 심각도를 산정한 후 퍼지화함으

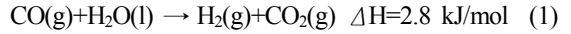
로써 더욱 객관적인 고장유형 및 영향분석을 수행하였다.

## 2. 해양 미생물 이용 수소 제조 공정

### 2.1 해양 미생물 이용 수소 제조 공정 반응

*Thermococcus onnurineus* NA1은 포도당 1 mole 당 수소 1-2 mole을 생산하는 중온성 미생물과 달리 포도당 1 mole 당 2-4 mole의 수소를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>11)</sup>. 초고온성 고세균 해양 미생물인 *Thermococcus onnurineus* NA1을 활용한 수성가스 전환 공정은 합성가스 중 일산화탄소로부터 수소를 제조하는 공정으로, 미생물을 활용한 수성가스 전환 반응은 열화학적 전환 반응을 통하여 수소를 제조하는 반응과 반응식은 동일하나, 화학촉매 대신 생

촉매인 미생물을 사용하면 반응식은 다음과 같다.



### 2.2 930 kg/hr급 해양 미생물 이용 수소 제조 공정

Fig. 1은 해양 미생물 이용 수소 제조 공정의 구조도를 나타낸 것으로, 합성가스를 수소로 전환하기 위한 전환 반응기와 해양 미생물의 지속적인 영양분을 공급하기 위한 공정, 전환 반응기 내부의 pH를 유지하기 위한 공정, 생산된 수소의 순도를 높이기 위한 응축 공정으로 나뉘어져 있다. 건식 석탄 가스화기에서 생산된 합성가스는 해양 미생물 이용 수소 제조 공정에 약 930 kg/hr를 공급하며 이는 해수, 효모균 추출물(yeast extract), 미량 금속 물질(trace metal element) 등 미생물의 영양분 역할을 하는 물질인 매질

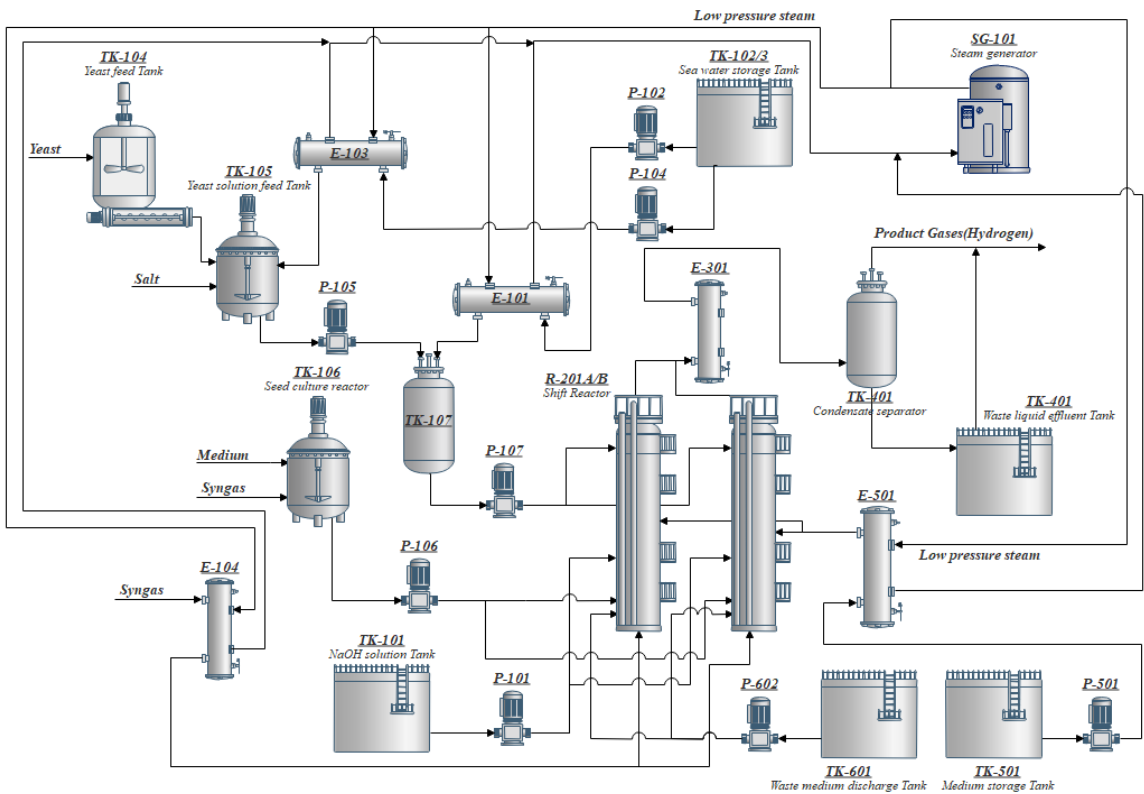


Fig. 1. Process schematic for Pilot plant of bio-hydrogen production from syngas

(medium)과 함께 전환 반응기(R-201A/B)에 공급되어 수소를 생산한다.

반응기는 약 7.8 barg/80°C로 운전되며, 일산화탄소(CO)는 해양 미생물에 의해서 수소(H<sub>2</sub>)와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 전환된다. 해양 미생물의 증식을 지속적으로 유지하기 위한 효모균 용액(yeast solution)과 해수를 공급할 수 있는 교반 공급 장치(TK-104, TK-105, TK-106, TK-107)가 구성되어 있고, 반응기 작동 온도를 유지하기 위하여 저압 증기를 활용한 가열(E-101, E-103, E-104)로 구성되어 있다. 또한 반응기 내부 산성화를 방지와 pH 조절을 위한 NaOH 저장탱크(TK-101)와 공급 장치(P-101)로 구성되어 있으며, 전환 반응기 내부의 pH를 제어할 수 있도록 설계되었다. 전환 반응기에서 생성된 수소 1,405 kg/hr는 냉각수를 통하여 열교환기(E-301)에서 냉각된 후 수소에 포함되어 있는 수분을 제거하기 위하여 응축기(TK-401)로 공급된다. Table 1은 전환 반응기 반응 전/후 조성을 나타내었다.

### 3. 고장유형 및 영향분석(FMEA) 결과

#### 3.1 퍼지(Fuzzy) 이론과 모델링

Zadeh는 불확실한 상태를 수학적으로 표현하는 방법론인 퍼지 이론을 제안하였으며, 이러한 퍼지 이론은 부정확한 정보와 환경 속에서 모호한 논리

의 숫자 집합을 정량화하여 불확실성을 해소하는데 그 목적이 있다. 논리 집합을 이진법으로 한정하지 않고, 그 집합에 속하는 정도를 소속도 함수(membership function)로 나타내어 정량화함으로써 그 불확실도를 해소한다<sup>17-19</sup>. 퍼지 집합 Q는 전체 집합 U에 대하여 다음 식 (2)로 표현된다.

$$Q = \{(u, \mu_Q); u \in U, \mu_Q \in [0, 1]\} \quad (2)$$

원소 u의 소속도가 1에 가까울수록 퍼지집합 Q에 속하는 정도가 높고 0에 가까울수록 속하는 정도가 낮음을 의미한다. 소속도에 따라 산출되는 퍼지수를 예측하기 위해서는 퍼지 형상 모델링이 필요하며 삼각형, 정규분포형, 사다리꼴형, 지수형 및 L-S형 퍼지 형상을 가정하여 모델링하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 퍼지수 Q가 폐구간(a, d)에서 정의되는 사다리꼴 형태로 가정하고 중심 C와 지지 S가 다음 식 (3)와 (4)를 만족하도록 퍼지 형상을 모델링한다<sup>20</sup>. 또한 Fig. 2의 퍼지구간을 결정하는데 있어 모델링 수행 주체의 주관성을 배제하기 위해서 Dubois and Prade가 제안한 가능성 분포 방법론을 통해 퍼지구간을 선정하였다<sup>18,19</sup>. 퍼지집합 Q에 관한 가능성분포함수 F(u)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (6)과 식 (7)에 의해서 최대 분포 및 최소 분포의 기댓값을 각각의 상한 및 하한 경계로 취하여 계산된다. 이를

Table 1. Simulation result on shift reactor (R-201A/B)

Contents		Shift reactor	
		IN	OUT
Pressure (barg)		7.8	7.8
Temperature (°C)		80	80
Flow rate (kg/hr)		930	1,463
Gas composition (mol,%)	CO	61.5	2.1
	H <sub>2</sub>	31.3	53.7
	CO <sub>2</sub>	5.8	38.4
	H <sub>2</sub> O	-	5.1
	N <sub>2</sub>	1.3	0.8

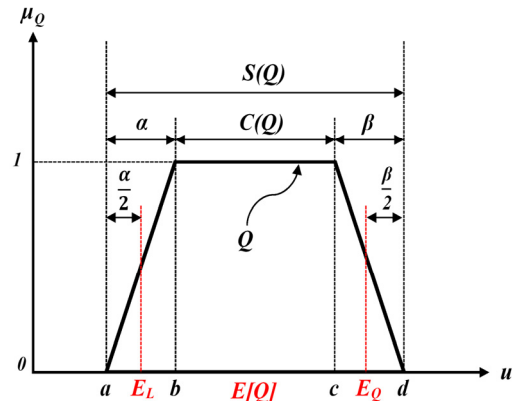


Fig. 2. Fuzzy number and membership

통하여 심각도, 발생빈도, 검출빈도의 언어변수는 식 (3)의 소속도 함수를 통하여 퍼지화(fuzzification)되어 퍼지수로 수치화된다<sup>21,22)</sup>.

$$\mu_Q(u) = \begin{cases} 0, & u < a \\ \frac{u-a}{b-a}, & a \leq u \leq b \\ 1, & b \leq u \leq c \\ \frac{d-u}{d-c}, & c \leq u \leq d \\ 0, & d < u \end{cases} \quad (3)$$

$$C(Q) = \{u | \mu_Q(u) = 1, \forall u \in U\} \quad (4)$$

$$E[Q] = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u) du = [E_L, E_U] \quad (5)$$

$$E_L = b - \int_{-\infty}^b \mu_Q(u) du = b - \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

$$E_U = c + \int_c^{+\infty} \mu_Q(u) du = c + \frac{\beta}{2} \quad (7)$$

### 3.2 고장유형 및 영향분석(FMEA)

고장유형 및 영향분석(FMEA)은 위험요소 및 운전

성 검토(hazardous operability review, HAZOP), 결함수 해석(fault tree analysis, FTA), 예비 위험도 해석(preliminary hazard analysis, PHA)과 함께 위험도기반설계에 이용되는 대표적인 정성적, 귀납적 분석 방법이다<sup>23-25)</sup>.

특히 고장유형 및 영향분석(FMEA)은 단위 설비별 상세한 고장분석을 수행하는 고장예방수단으로써, 개념설계 단계에서 위험요소 식별에 필수적이다. 뿐만 아니라 플랜트 분야에서는 플랜트 공정 설계 단계에서 운용상 발생 가능한 잠재적 고장 원인들을 사전에 식별하여 고장발생 이전에 제거, 보완을 통한 위험요소를 최소화시킬 수 있는 기법 중에 하나로 알려져 있다<sup>26,27)</sup>. 이는 단일 고장 원인(베어링 파손, 침식, 부식, 누설 등)에 의한 고장 상태를 가정하고, 시스템 혹은 공정의 기능/성능에 미치는 영향을 분석한다. 고장 유형으로 분류된 요소에 대해서 심각도(severity)와 발생빈도(likelihood), 검출빈도(detectability)를 산정하고, 이를 통하여 위험도 우선순위(RPN)를 선정한다. 상위 위험도를 가지는 단위 장치 및 공정에 대해서 설계 보완 및 변경을 통하여 플랜트의 위험도를 저감시킴과 동시에 가동률을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 고장유형 및 영향분

Potential Failure Mode and Effect Criticality Analysis(FMEA)																	
Project CODE/Name		2018BG02-Demonstration project for Bio-hydrogen production using syngas							Prepared	Checked	Approved						
Project Information		Project location Toson Korea Western Power Co.			Client Kyungdong ENG												
		Management group Energy-Environment R&D			Construction period												
		FMEA administrator S.H Park			Start-up date 2018.01.12												
		FMEA date 2018.01.12			Document No.												
Description on Item		Description of failure			Effect of failure		Failure rate, per 10 <sup>6</sup> hours	Failure rate	Time required for one failure(year)	Failure Rate Ranking (1-10)	Severity Ranking (1-10)	Detectability Ranking (1-10)	RPN				
Reference NO.	Reference drawing	System category	Sub-system Category	Item Description	Operational mode	Failure mode	Failure cause of malfunction	Detection of failure	On the sub-system	On the system function							
TK-101	EP102-103	Cylindrical Tank	Cylindrical vessel	Size 1080*2180 Design condition 2 barg @ 45oC Material SUS316	Store the NaOH solution and it should maintain the NaOH solution storage level	Abnormal Instrument reading	None or Error of signal from I.T-101	Sensor	Overflow or Poor Level	Overflow or Poor Level	44.75	0.00004475	2.551	5	2	3	30
				Material SUS316	occasionally supplied to R-201/202 or TK-106 by P.	Plugged/Checked	Sludge/Residue	-	Overflow/Mar or Less feed NaOH	None	8.95	0.00000895	12.755	4	2	4	32
				100mm-2,000mm 4-20mA	To measure the storage capacity of NaOH	Fail to function on demand	Level sensor failure	-	Overflow or Poor Level	Overflow or Poor Level	12.68	0.00001268	9.003	4	3	4	48
P-101	EP102-103	Centrifugal Pump	Pump unit	Power transmission	Supplying the NaOH solution to R-101, and NaOH is pressurized above operating pressure of R-201/202.	Fail to start on demand	No input current(A)	Sensor	No feed NaOH	No feed NaOH	4.53	0.00000453	25.200	3	5	3	45
				External leakage	Casting Damage, Drain valve open, Air vent valve open	Operator's observation	Less feed NaOH	No feed NaOH	7.51	0.00000751	15.200	4	2	3	24		
				Internal leakage	Impeller damage	-	Less feed NaOH	No feed NaOH	2.69	0.00000269	42.437	3	2	5	30		
				Structural deficiency	Corrosion, Wear	-	Less feed NaOH	No feed NaOH	2.06	0.00000206	55.415	3	2	4	24		
				Plugged/Checked	Fail to control pressure, Fail to suction pipe plugged	Sensor	No feed NaOH or More feed NaOH of Motor shutdown	No feed NaOH or More feed NaOH of Motor shutdown	0.65	0.00000065	175.623	1	5	3	15		
				Vibration	Impeller emission	-	Impeller emission	Impeller emission	6.31	0.00000631	18.091	4	2	4	32		
				Noise	Cavitation	-	-	-	1.32	0.00000132	86.481	2	1	4	8		
				Vibration	Poor Lub-Oil	Sensor	Corrosion	-	6.31	0.00000631	18.091	4	2	3	24		
Noise	Poor Lub-Oil	Sensor	-	-	1.32	0.00000132	86.481	2	1	4	8						
Lubrication system																	

Fig. 3. Failure mode effect analysis (FMEA) sheet for bio-hydrogen production process

석(FMEA)을 통하여 해양 미생물 이용 수소 제조 공정의 단위 장치에 잠재적인 고장 원인을 식별 및 가정하여, 전체 해양 미생물 이용 수소 제조 공정에 미치는 영향을 분석하고, 고장 유형 중 상위 위험도를 가지는 요인에 대해서 설계 변경 및 보안을 수행하였다. Fig. 3은 해양 미생물 이용 수소 제조 공정의 잠재적인 고장 원인과 영향을 분석한 결과의 일부를 나타낸 것이다. 왼쪽 1열부터 7열까지는 고장 원인을 분석하기 위한 대상에 대한 기본 정보 및 단위 설비에 대한 작동 상태와 전체 공정상에서 기능, 정상 상태에서의 작동 상태를 나타낸 것이며, 8열부터 10열까지는 잠재적인 고장 유형 정의 및 발생 원인에 대한 정의, 11열부터 12열은 잠재적인 고장 유형이 단위 공정에 미치는 영향과 전체 공정에 미치는 영향을 정의한다. 초록색열의 왼쪽부터 발생빈도의 정도인 고장률 단계(O), 심각도 단계(S), 검출빈도 단계(D)를 산정하였다. 이렇게 선정된 값은 위험도 우선순위(RPN)를 산정하는 식 (8)에 따라 계산되며, 1부터 125까지의 범위 중 높을수록 위험도가 큰 것을 의미한다.

$$RPN = S \times O \times D \quad (8)$$

발생빈도는 각 단위 설비의 element 단위의 잠재적인 고장 원인을 사전에 식별하고, OREDA database를 통하여 element 단위의 고장률(failure rate)을 수집하여 Table 2의 고장률에 따른 순위를 산정하였다<sup>28)</sup>. 심각도의 경우 인명, 재산, 환경에 미치는 심각도를 1에서부터 5까지 순위로 공정 설계자, 안전 관리자,

공정 운전자의 의견을 취합하여 선정되는 것으로서 상위 집단의 경험과 공학적 가능성을 포함한 주관적인 의견이 반영되는 것이 일반적이다.

하지만 이 경우 불확실한 정보 및 환경에서 의사결정자의 주관적인 판단으로 순위 결정이 영향받기 때문에 인명, 재산, 환경의 변수 사이의 상대적인 중요도를 객관적으로 반영하기 어렵다. Fig. 4는 퍼지화한 위험도 우선순위(f-RPN)를 계산하기 위한 절차를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 ASPEN Plus를 통하여 해양 미생물 이용 수소 제조 공정을 공정 설계 및 해석을 수행하고, 해양 미생물 이용 수소 제조 공정에 대한 PFD와 P&ID, 열/물질 수지도를 도출하였다. 도출된 PFD와 P&ID, 열/물질 수지도를 기반으로 Fig. 5와 같이 ASPEN Capital Cost Estimator (ACCE)를 통하여 각 설비에 대한 비용과 전체 건설비를 산정하였다.

ACCE는 ASPEN Plus/HYSYS를 통하여 도출된 열/물질수지 결과를 토대로 각 설비에 대한 sizing을 수행하고, sizing된 설비 기준으로 설비비용을 산정할 수 있다. 뿐만 아니라, P&ID 기준의 전/계장, 배관 및 밸브 물량을 입력하여 비용을 산정할 수 있기 때문에 정확한 전체 건설비 산출이 가능하다. 이렇게 산정된 전체 건설비를 통하여 각 설비가 전체 시설 투자비에서 차지하는 비중과 고장률을 통하여 발생빈도에 따른 잠재적인 손실비용을 가정하고, 인명/환경에 미치는 영향을 가중치로 적용하여 심각도를 산정하였으며, 결정된 심각도, 발생빈도, 검출빈도를

Table 2. Occurrence probability ranking

Ranking value	Ranking term	Occurrence probability
1	Remote	<1 in 100,000
2	Low	1 in 20,000
3	Moderate	1 in 1,000
4	High	1 in 40
5	Very high	1 in 8

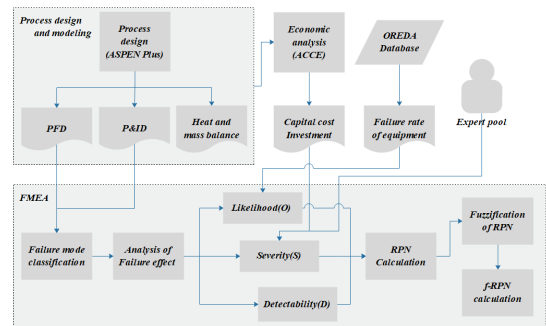


Fig. 4. Process of f-RPN calculation for bio-hydrogen production

퍼지화하여 퍼지화된 위험도 우선순위(f-RPN)를 산출하였다.

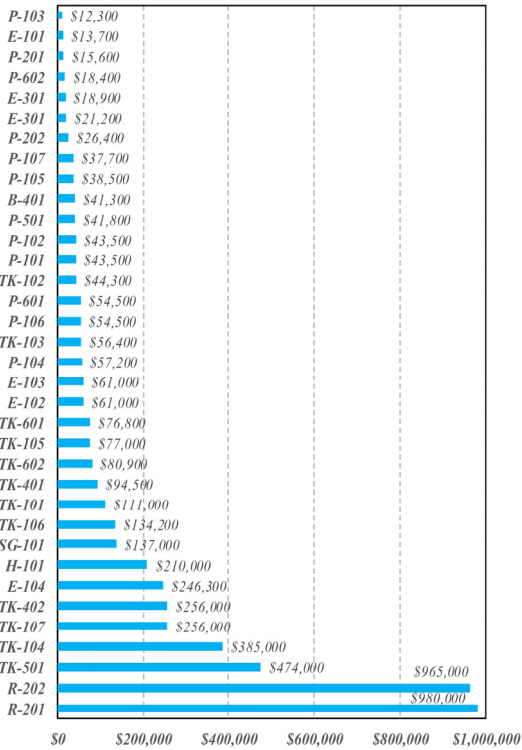


Fig. 5. Total capital cost of bio-hydrogen production

### 3.3 퍼지기반 고장유형 및 영향분석 결과

본 연구에서는 해양 미생물 이용 수소 제조 공정에 대한 잠재적인 고장 유형을 식별하고, 이들의 고장 영향을 평가하기 위한 고장유형 및 영향분석을 수행하였다. 또한 심각도, 발생빈도, 검출빈도의 불확실한 정보와 논리를 정량화하여 불확실성을 해소하기 위한 퍼지 논리를 도입하였으며, 심각도 평가의 객관성을 높이고자 ACCE를 통하여 도출된 전체 건설비용과 각 설비의 고장률을 바탕으로 잠재적인 손실비용을 산정하고 인명, 환경의 영향성을 반영하여 고장유형 및 영향 평가를 수행하였다.

Fig. 6은 이러한 개념을 바탕으로 검출빈도 3단계와 4단계의 위험도 우선순위(RPN)의 변화를 나타낸 risk matrix이다. Risk matrix에서 파란색 영역은 위험도 안정 구간, 노란색 구간은 주의 구간, 붉은색 영역은 위험 구간을 나타낸 것으로, 노란색과 붉은색 영역의 고장 유형에 대해서는 반드시 공정 설계자와 안전 관리자, 공정 운영자의 의견을 종합하여 식별 위험인자 제거 혹은 설계 변경이 수행되어야 한다.

Risk matrix 상에 검정색 삼각형은 기존 고장유형 및 영향분석(비퍼지화)의 위험도 우선순위(RPN)를 나타낸 것이며, 주황색으로 표시된 것은 퍼지화된 위

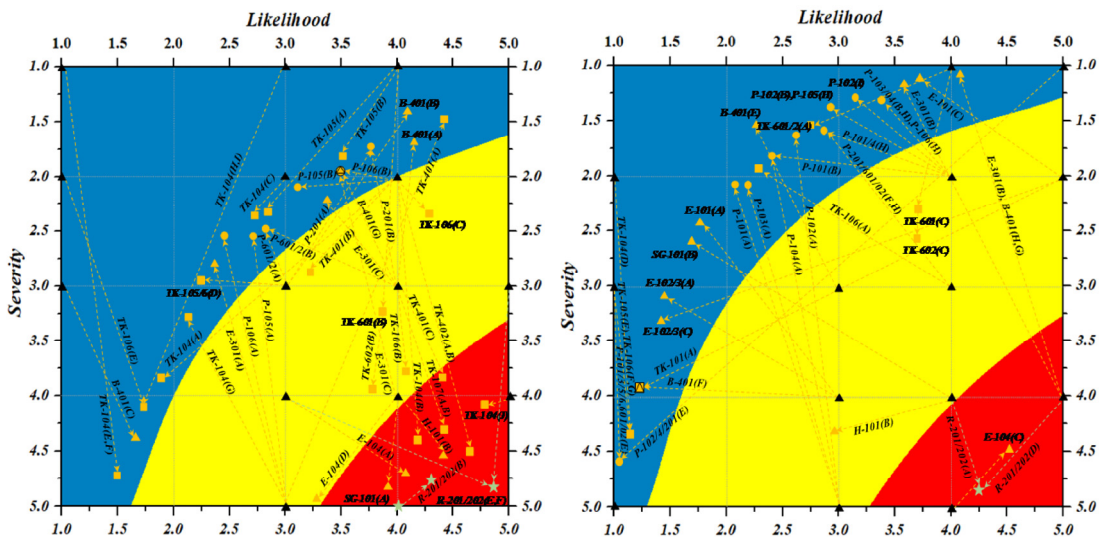


Fig. 6. FMEA result for RPN and f-RPN on Detectability level 3 (left) and level 4 (right)

험도 우선순위(f-RPN)를 나타낸 것이다. 사각형 마크는 탱크류, 삼각형 마크는 열교환기류, 원형은 펌프류, 별 마크는 반응기류를 나타낸다.

검출빈도 2단계(Fig. 6, 좌)의 경우, 대부분의 열교환기류, 탱크류, 펌프류가 주의 구간에서 안정 구간으로 위험도가 완화되었다. 완화된 단위 설비의 대부분이 인명, 환경적인 요인에 비해서 잠재적인 손실비용이 적기 때문에 심각도가 감소하여 안정 구간으로 완화된 것으로 확인되었다. 이에 따라 불필요한 공정 개선비용과 위험부담비용을 감소시킬 수 있었다.

반면에 일부 탱크류(TK-104, TK-107, TK-402)의 외부 누설(B category)은 주위 구간에서 위험 구간으로 격상된 것을 확인할 수 있었다. 효모균 저장 탱크(TK-104)와 매질 저장 탱크(TK-107)는 Fig. 5에 나타나듯이 전체 건설비에서 차지하는 비중이 크고, 외부 누설에 대한 고장률이 상대적으로 높아 잠재적인 손실비용이 크고 외부 누출에 따른 공정 가동률과 수소 전환을 저하에 영향을 미칠 수 있기 때문에 위험 구간으로 분류되었다.

합성가스 재열기(E-104)와 증기 발생기(SG-101)의 외부 누설(A category) 또한 주위 구간에서 위험 구간으로 격상되었으며, 이는 저압 증기가 공정 작동 온도 제어에 활용됨에 따라 증기 누설은 수소 전환을 저하에 영향을 미칠 수 있으며, 특히 재열기에서 외부 누설은 합성가스의 외부 누출로 인한 인명, 환경에 대한 심각도가 크고, 합성가스 재열기의 잠재적 손실비용이 크기 때문에 위험 구간으로 격상된 것으로 확인되었다.

주 반응기(R-201/02)의 경우, 온도 제어를 위한 내부 증기관의 손상으로 인한 내부 누설(E category)과 생산된 수소가스 배출구의 막힘(F category)은 주위 구간에서 위험 구간으로 격상된 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에 나타나듯이 주 반응기가 전체 시설 투자비에서 40% 이상을 차지하고 있으며, 내부 누설과 막힘 현상에 의한 고장률을 반영한 손실비용이 가장 높은 것으로 확인되었다. 뿐만 아니라 내부 누설로 인하여 생산된 수소의 외부 누출 가능성은 인명/재산/환경에 미치는 영향이 크다. 특히 미생물, 매질

(medium) 및 합성가스의 반응과정에서 반응기 상부에 부유물 형태로 생성되는 거품 불순물은 수소가스 배출구의 막힘을 유발할 수 있으며, 이는 압력 제어 불능으로 이어질 경우 막대한 인명/재산 피해를 유발할 수 있기 때문에 위험 단계로 격상되었다.

검출빈도 2단계에서 격상된 위험요인에 대해서는 설계 변경을 통하여 위험도 제거를 수행하였으며, 주 반응기의 경우 내부 증기관의 손상으로 생산된 수소 배출을 방지하기 위해서 반응기 작동 압력보다 높은 증기 공급 및 주 반응기 생성 거품 불순물 제거를 위한 매질(Medium) 분사 노즐 설치와 거품 트랩 등으로 위험요소를 제거하였으며, 탱크류 외부 유출 감지를 위한 모니터링 계측기 추가 및 설계 압력 증가로 외부 유출을 최소화하도록 설계 변경을 수행하였다.

검출빈도 3단계(Fig. 6, 우)의 경우, 주위 구간에 분류되어 있던 위험요소들이 대부분 안정 구간으로 분류된 것으로 확인되었다.

탱크류(TK-106, TK-601/02)의 계측기 오류(A category)는 잠재적인 손실비용이 상대적으로 낮기 때문에 안정 구간으로 이동하였으며, 열교환기(E-102/03)의 외부 누설(A category)과 내부 누설(C category)은 공급 해수의 승온을 위한 것으로 잠재적인 손실비용은 상대적으로 크지만 누출에 따라 인명/환경에 영향이 상대적으로 적어 심각도가 낮아서 안정 구간으로 변경된 것으로 보인다. 펌프류의 경우, 고장 빈도가 상대적으로 낮고 Fig. 5에 나타나듯이 전체 설비비용에서 차지하는 비중이 낮아 잠재적인 손실비용이 낮아 안정 구간으로 이동한 것으로 확인되었다.

반면에 주 반응기(R-201/02)의 수위 계측기(A category)와 온도 계측기(D category)는 주위 구간에서 위험 구간으로 격상되거나, 위험도가 더욱 높아진 것으로 확인되었다. 주 반응기의 수위 계측기는 해수 공급 설비와 연계되어 있으며, 계측기 오류에 따라 해수 공급 부족은 미생물의 증식 활동을 저하시켜 수소 생산량에 치명적인 영향을 줄 수 있으며, 온도 계측기는 공급되는 증기 유량 제어와 연계되어 있기 때문에 증기 공급량 과잉으로 인한 미생물 고사 혹은 증기 공급량 부족으로 인한 미생물 번식 저하를



유발할 수 있기 때문에 위험도가 높아진 것으로 확인되었다. 이러한 위험요인을 제거하기 위해서 반응기 계측기의 추가 설치 및 모니터링을 통하여 단일 계측기에 따른 제어 의존도를 분산시켰다.

## 4. 결론

본 연구에서는 건식 석탄가스화 복합 플랜트에서 생산되는 합성가스 중 930 kg/hr를 활용하여 1,405 kg/hr의 수소를 생산하는 해양 미생물 이용 수소 제조 실증 플랜트에 대한 잠재적인 고장 유형을 정의하고, 고장 유형별 영향성과 위험도를 분석하였다.

또한 고장 유형 및 영향분석의 심각도를 식별하는 단계에서 불확실한 환경과 정보를 토대로 공정 설계자, 안전 관리자, 공정 운전자 등의 경험과 공학적 가능성을 포함한 주관적인 의견이 반영된 문제를 객관화하기 위한 방법론을 제안하였다. 상기의 불확실도가 높은 문제를 해결하기 위해서 ACCE를 통하여 산정된 전체 설비비용과 각 단위 설비별 발생빈도를 통하여 잠재적인 손실비용을 가정하고, 인명/환경에 미치는 영향도를 반영하여 비교적 객관적으로 심각도를 산정하고 이렇게 산정된 심각도와 발생빈도, 검출빈도를 퍼지화하여, 상대적인 관계를 고려한 위험도 우선순위(f-RPN)를 식별하였다. 이렇게 식별된 위험도를 risk matrix 상에 비퍼지화 위험도 우선순위와 퍼지화 위험도 우선순위의 변동을 표기하고 이들의 위험도가 변동된 원인을 도출하였다.

검출빈도 2와 3에 대해서 퍼지화된 위험도 우선순위 중 주위 구간에서 위험 구간으로 변경된 위험요소에 대해서 설계 변경을 통해서 위험도를 제거하였다. 특히 해양 미생물 이용 수소 제조 실증 플랜트의 핵심 기기인 주 반응기에서 식별된 위험요소 중 반응기 온도 제어를 위한 증기관 손상과 매질/미생물/합성가스의 반응을 통하여 생성된 거품 불순물로 인한 위험요소 제거를 위하여 반응기 설계 변경을 수행하였다. 또한 계측기 오류로 인하여 공정 제어 상에 발생할 수 있는 위험요소를 제거하기 위해서 단일 계측기에 따른 제어 의존도를 분산시키는 설계

변경을 수행하였다. 결과적으로 해양 미생물 이용 수소 제조 실증 플랜트의 상세 설계 전 잠재적인 위험요소의 사전 식별과 위험요소 제거를 위한 설계 변경을 통하여 보다 안정적이고 가동률이 높은 플랜트 설계가 이루어질 수 있도록 하였다.

## 후 기

이 논문은 해양수산부의 재원으로 해양생명공학 기술개발사업(20150581, 해양 고세균 이용 바이오수소 생산 실용화 기술개발) 연구개발비에 의하여 수행되었다.

## References

1. D. C. Jun, "A Study on Safety Policies for a Transition to a Hydrogen Economy", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 25, No. 2, 2014, pp. 161-172.
2. M. H. Son, S. W. Nam, and K. N. Kim, "The Role of Government to Supply Fuel Cell Electric Vehicle in Korea and Japan", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 1, 2016, pp. 71-82.
3. G. Voitic, S. Nestl, K. Malli, J. Wagner, B. Bitschnau, F. A. Mautner, and V. Hacker, "High purity pressurized hydrogen production from syngas by the steam-iron process", The Royal Society of Chemistry, Vol. 6, 2016, pp. 53533-53541.
4. D. H. Kho, W. S. Cho, and Y. S. Baek, "A Study on the Reaction Optimization for the Utilization of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from Bio-gas", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 5, 2016, pp. 554-561.
5. D. B. Han and Y. S. Baek, "A Simulation Study on the Synthesis of Syngas from mthe Reforming Reaction of Biogas", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 1-10.
6. J. D. Mackaluso, "The use of syngas derived from biomass and waste products to produce ethanol and hydrogen", Microbiology and Molecular Genetics, Vol. 3, 2007, pp. 98-103.
7. S. Chianese, S. Fail, M. Binder, R. Rauch, H. Hofbauer, A. Molino, A. Blasi, and D. Musmarra, "Experimental investigations of hydrogen production from CO catalytic conversion of tar rich syngas by biomass gasification", Catalysis Today, Vol. 277, 2016, pp. 182-191.
8. A. Paula, G. Peres, B. H. Lunelli, and R. M. Fllho, "Application

- of Biomass to hydrogen and Syngas Production”, Chemical Engineering Transactions, Vol. 32, 2013, pp. 589-594.
9. M. S. Kim, H. N. Fitriana, T. W. Kim, S. G. Kang, S. G. Jeon, S. H. Chung, G. W. Park, and J. G. Na, “Enhancement of the hydrogen productivity in microbial water gas shift reaction by *Thermococcus onnurineus* NA1 using a pressurized bio-reactor”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 42, 2017, pp. 27593-27599.
  10. A. R. Choi, M. S. Kim, S. G. Kang, and H. S. Lee, “Dimethyl sulfoxide reduction by a hyperthermophilic archaeon *Theromcoccus onnurineus* NA1 via a cysteine cystine redox shuttle”, Journal of Microbiology, Vol. 54, No. 1, 2016, pp. 31-38.
  11. S. M. Lee, T. W. Kim, H. S. Lee, J. H. Lee, and S. G. Kang, “Statistical Optimization of Medium for Formate-driven Bio-hydrogen Production by Hyperthermophilic Archaeon, *Thermococcus onnurineus*”, Ocean and Polar Research, Vol. 39, No. 4, 2016, pp. 269-277.
  12. H. C. Jung, S. H. Lee, S. M. Lee, Y. J. An, J. H. Lee, H. S. Lee, and S. G. Kang, “Adaptive evolution of a hyperthermophilic archaeon pinpoints a formate transporter as a critical factor for the growth enhancement on formate”, Scientific Reports, 2016.
  13. H. J. Kim, S. Y. Kim, and J. Ahn, “Dynamic thermal design of 1-ton Class Bio-Hydrogen Production System Simulator Using Industrial Waste Heat and by-Products”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 29, No. 5, 2017, pp. 259-268.
  14. S. H. Cho, M. S. Kim, Y. J. Jeong, B. R. Lee, J. H. Lee, S. G. Kang, and B. K. Cho, “Genome-wide primary transcriptome analysis of H<sub>2</sub>-producing archaeon *Thermococcus onnurineus* NA1”, Scientific Reports, 2017.
  15. S. H. Park, Y. D. Yoo, and S. G. Kang, “Economic Feasibility study for Commercial Production of Bio-hydrogen”, Ocean and Polar Research, Vol. 38, No. 3, 2016, pp. 225-234.
  16. N. Kasai, Y. Fujimoto, I. Yamashita, and H. Nagaoka, “The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 41, 2016, pp. 13308-13314.
  17. L. A. Zadeh, “Fuzzy sets”, Information and Control, Vol. 8, No. 3, 1965, pp. 338-353.
  18. D. Dubois and H. Prade, “Fundamentals of Fuzzy Sets”, Springer, USA, 2000.
  19. T. J. Ross, “Fuzzy Logic with Engineering Applications”, 3rd ed, Wiley, USA, 2010.
  20. G. D. Baek, S. S. Kim, S. P. Cheon, H. W. Suh, and D. H. Lee, “Prioritizing for Failure Mode of Dynamic Positioning System Using Fuzzy-FMEA”, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 25, No. 2, 2015, pp. 174-179.
  21. R. Nait-Said, F. Zidani, and N. Ouzraoui, “Modified risk graph method using fuzzy rule-based approach”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 164, 2009, pp. 651-658.
  22. R. Nait-Said, F. Zidani, N. Ouzraoui, “Fuzzy risk graph model for determining safety integrity Level”, International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, Vol. 2008, 2008, pp. 1-12.
  23. IMO, “Guidelines for Formal Safety Assessment for Use in the IMO Rule-Making Process”, International Maritime Organization, London, 2002.
  24. T. Tronstad, H. H. Åstrand, G. P. Haugom, and L. Langfeldt, “Study on the use of fuel cells in shipping”, DNV GL, Norway, 2017.
  25. IMO, “International Code of Safety for High-Speed Craft (HSC Code), Annex 4 – Procedures for Failure Mode and Effects Analysis”, The International Maritime Organization, 2000.
  26. E. Adar, M. Ince, B. Karatop, and M. S. Bilgili, “The risk analysis by failure mode and effect analysis (FMEA) and fuzzy-FMEA of supercritical water gasification system used in the sewage sludge treatment”, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 5, 2017, pp. 1261-1268.
  27. J. K. Ahn, Y. L. Noh, S. H. Park, B. I. Choi, and D. J. Chang, “Fuzzy-based failure mode and effect analysis (FMEA) of a hybrid molten carbonate fuel cell(MCFC) and gas turbine system for marine propulsion”, Journal of Power Sources, Vol. 364, 2017, pp. 226-233.
  28. N. T. N. U. Sintef, “Offshore and Onshore Reliability Data”, OREDA Handbook, 6th ed, DNV, Oslo, 2015.