

## 과산화수소 농축을 위한 투과증발공정의 정량적 위험성 분석

정호진\* · 윤익근\* · 최수형\*\*†

\*한국가스공사 연구개발원  
426-790 경기도 안산시 상록구 수인로 1248  
\*\*전북대학교 반도체·화학공학부  
561-756 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

(2014년 4월 17일 접수, 2014년 5월 23일 수정본 접수, 2014년 5월 25일 채택)

## Quantitative Risk Analysis of a Pervaporation Process for Concentrating Hydrogen Peroxide

Ho Jin Jung\*, Ik Keun Yoon\* and Soo Hyung Choi\*\*†

\*R&D Division, Korea Gas Corporation, 1248 Suin-ro, Sangrok-gu, Ansan, Gyeonggi 426-790, Korea

\*\*School of Semiconductor and Chemical Engineering, Chonbuk National University,  
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 17 April 2014; Received in revised form 23 May 2014; accepted 25 May 2014)

### 요 약

초고농도 과산화수소 제조를 위한 투과증발 공정의 정량적 위험성 분석을 수행하였다. 잠재적 주요 사고는 분해반응에 따른 폭발 및 화재이며 실험실 규모일 때 사고결과는 카테고리 3에 속하는 것으로 판단된다. 대상공정에서 분해반응이 일어나는 과정을 사건트리 형태로 모델링하고 사고원인들의 확률함수를 유사사건 발생빈도 자료를 근거로 설정하였다. 구축된 모델을 사용하여 사고율을 계산한 결과, 수용 가능한 위험수준, 즉 사고빈도가  $10^{-4}/\text{yr}$  이하가 되려면 추가 안전장치가 필요한 것으로 파악되었다. 이를 위해 방호계층분석을 적용한 결과, 촉매반응을 막기 위한 본질적 안전설계, 과열을 막기 위한 SIF (safety instrumented function), 그리고 분해반응이 일어나더라도 폭발로 이어지지 않는 것을 막는 릴리프 시스템이 요구되었다. 제안된 방법은 과산화수소 농축을 포함한 다양한 화학공정의 안전관리시스템 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** – Quantitative risk analysis has been performed for a pervaporation process for production of high test peroxide. Potential main accidents are explosion and fire caused by a decomposition reaction. As the target process has a laboratory scale, the consequence is considered to belong to Category 3. An event tree has been developed as a model for occurrence of a decomposition reaction in the target process. The probability functions of the accident causes have been established based on the frequency data of similar events. Using the constructed model, the failure rate has been calculated. The result indicates that additional safety devices are required in order to achieve an acceptable risk level, i.e. an accident frequency less than  $10^{-4}/\text{yr}$ . Therefore, a layer of protection analysis has been applied. As a result, it is suggested to introduce inherently safer design to avoid catalytic reaction, a safety instrumented function to prevent overheating, and a relief system that prevents explosion even if a decomposition reaction occurs. The proposed method is expected to contribute to developing safety management systems for various chemical processes including concentration of hydrogen peroxide.

Key words: Quantitative Risk Analysis, Fault Tree Analysis, Layer of Protection Analysis, Pervaporation, Hydrogen Peroxide

### 1. 서 론

과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )는 친환경적이며 효과적인 산화제로 산업 전반에서 다양하게 사용되고 있다[1]. 초고농도 과산화수소(high test

peroxide, HTP)는 일반적으로 85-98 wt% 과산화수소(hydrogen peroxide) 수용액을 의미하며, 촉매와 접촉하면 고온의 수증기와 산소로 급격히 분해되므로 로켓 추진제 겸 연료 산화제로 사용된다. 농도가 높을수록 고온의 기체를 배출하므로 추진력이 강해지지만 폭발 위험성 또한 증가한다.

상용 과산화수소의 최대농도는 70 wt%이다. 추진제로는 보통 85, 90, 98 wt% 등급이 사용되며 상세규격은 미국 MIL-P-16005 Revision F에 기술되어 있다. 현재 추진제 등급의 고농도 과산화수소를 공급하는 업체는 Solvay Interlox, FMC, Degussa, Peroxide Propulsion 등

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: soochoi@jbnu.ac.kr

‡이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

이 있으며 취급자격을 갖춘 기관에만 판매한다. 따라서 일반인들은 70 wt% 이하 농도의 과산화수소를 구입하여 농축을 시도하는데 증류는 극히 위험한 일이다.

로켓 등급으로의 과산화수소 농축 방법으로는 감압증류(vacuum distillation), 분별결정(fractional crystallization), 막분리(membrane separation) 등이 있다. 감압증류는 효과적이거나 고농도의 과산화수소 증기를 다루어야 하므로 본질적으로 위험하고, 분별결정은 안전하나 효율적이지 못하다. 따라서 안전성 및 경제성 면에서 막분리 방법이 가장 선호되며, 미국 항공우주국(NASA)에서는 Nafion® 및 polysulfone hollow fiber 막을 사용하는 투과증발(pervaporation) 과산화수소 농축 시스템을 개발하여 특허를 냈다[2].

화학공정 설계 시에는 계획대로 운전되지 않는 상황을 미리 예상하고 거기에 잠재되어 있는 문제점과 위험성을 파악해야 한다. 이를 위해서는 먼저 정성적으로 사고발생 시나리오들을 도출하고 이에 대해 안전대책을 세우고 실시하는 HAZOP (hazards and operability) study가 필요하다. 또한 정량적 위험성 해석(quantitative risk analysis, QRA)을 통해 사고율을 예측하고 방호계층분석(layer of protection analysis, LOPA) 기법을 적용하여 적절한 사양의 장치로 설계하고 운전함으로써 사고발생 가능성을 수용가능 확률수준 이하로 낮추어야 한다.

본 연구에서는 이러한 안전관리기법을 실험실 규모부터 적용코자 한다[3]. 대상공정을 과산화수소 농축을 위한 투과증발공정으로 정하고 분해반응에 의한 폭발사고 빈도를 예측한 후, 이를 수용 가능한 위험수준이 되도록 낮추는데 필요한 추가 안전장치를 찾는다. 제안된 방법은 다른 과산화수소 농축공정의 안전성 향상에 기여할 수 있으며, 정량적 위험성 평가 시스템의 빈도분석 모듈[4] 및 통합 안전관리 시스템[5] 구축에 적용할 수 있다.

## 2. 이 론

### 2-1. 정량적 위험성 분석(QRA)

정량적 위험성 분석(Quantitative Risk Analysis)은 사건발생 확률계산을 근거로 한다. 어떤 시스템의 고장함수(failure function), 즉 시간에 따른 고장확률의 누적분포함수(cumulative distribution function)를  $F(t)$ 라 하면 확률밀도함수(probability density function)는  $f(t) = F'(t)$ , 신뢰성함수(reliability function) 또는 생존함수(survival function)는  $R(t) = 1 - F(t)$ 로 주어지며 고장률(failure rate)은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1)$$

고장률은 단위시간당 실패회수를 나타내며 초기고장(early failure)일 때는 시간에 따라 감소하고 마모고장(wear-out failure)일 때는 증가하게 된다. 만약 우연고장(random failure)을 가정하면 고장률은 상수가 되며 고장함수는 다음과 같이 Poisson 분포 형태가 된다.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

여기서 고장률  $\lambda$ 는 실패빈도(failure frequency)가 되며 역수  $1/\lambda$ 은 평균고장시간(Mean Time to Failure, MTTF) 또는 평균고장간격(Mean Time between Failures, MTBF)이 된다.

### 2-1-1. Fault Tree Analysis (FTA)

다양한 원인이 복합적으로 관련된 사건은 본 논문의 사례연구에서 제안하는 모델에서와 같이 AND 게이트 및 OR 게이트로 연결된 트리구조로 표현하는 결함트리 분석(Fault Tree Analysis) 기법을 사용한다. 주어진 시간 내에 두 가지 실패가 모두 일어날 확률은  $F(t) = F_1(t)F_2(t)$ , 두 요소 중 하나 이상이 실패할 확률은  $F(t) = 1 - R_1(t)R_2(t)$ 로 계산함으로써 최종사건의 발생빈도를 예측할 수 있다.

### 2-2. 방호계층 분석(LOPA)

방호계층 분석(Layer of Protection Analysis)이란 원하지 않는 사고의 빈도나 강도를 감소시키는 독립방호계층의 효과성을 평가하는 방법 및 절차를 말한다. 여기서 독립방호계층(Independent Protection Layer, IPL)은 초기사고나 사고시나리오와 관련한 다른 어떤 방호계층의 작동과는 관계없이 원하지 않는 결과로 전개되는 것으로부터 사고를 방호할 수 있는 장치나 시스템 또는 동작이다. 독립적이라는 것은 방호계층의 성능이 초기사고의 영향을 받지 않고 다른 방호계층의 고장으로 인한 영향을 받지 않는다는 뜻이다.

다음은 특정시나리오가 최종사건으로 이르게 하는 사고의 발생빈도를 구하는 식이다[6].

$$f_i^C = f_i' \prod_{j=1}^J PFD_{ij} \quad (3)$$

여기서,

$f_i^C$  = 사고시나리오 i에 해당되는 사고의 빈도

$f_i'$  = 사고시나리오 i에 해당되는 사고의 발단이 되는 사건의 빈도

$PFD_{ij}$  = 사고시나리오 i가 발생하는 것을 막기 위한 IPL j의 요구시 실패확률(Probability of Failure on Demand)

사고의 결과(consequence)는 피해규모에 따라 Table 1에서와 같이 5개의 범주(category)로 정의되며 각 범주의 사고에 대해 수용 가능한 위험수준(risk tolerance), 즉 발생빈도에 대한 허용기준은 Table 2와 같다[7].

### 2-2-1. Safety Instrumented Function

SIF (Safety Instrumented Function)는 공정의 사고위험을 줄이기 위한 장치의 모임으로 Sensor, Logic Solver and Final Element 세 가지의 조합으로 구성된다[8].

(1) Sensor는 공정변수의 상태를 측정하여 Logic Solver로 전달하는 장치이다.

(2) Logic Solver는 Sensor를 통해 받은 공정변수를 하나 이상의 Logic을 통해 처리하여 Final Element에게 물리적 작동을 지시하는

Table 1. Consequence categories [7]

| Consequence class | Plant personnel | Community                   | Environment            |
|-------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| 1/2               | No lost time    | No hazard                   | No notification        |
| 3                 | Single injury   | Odor/noise                  | Permit violation       |
| 4                 | > 1 injury      | One or more injuries        | Serious offsite impact |
| 5                 | Fatality        | One or more severe injuries | Serious offsite impact |

**Table 2. Risk tolerance criteria [7]**

| Frequency<br>(/yr)                 | Consequence category |   |   |   |   |
|------------------------------------|----------------------|---|---|---|---|
|                                    | 1                    | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1-10 <sup>-1</sup>                 | I                    | N | N | N | N |
| 10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-2</sup> | I                    | I | N | N | N |
| 10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-3</sup> | A                    | I | I | N | N |
| 10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-4</sup> | A                    | A | I | I | N |
| 10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-5</sup> | A                    | A | A | I | I |
| 10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-6</sup> | A                    | A | A | A | I |
| 10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-7</sup> | A                    | A | A | A | A |

A: acceptable, I: intermediate range, N: not acceptable

**Table 3. Safety Integrity Levels [9]**

| Safety Integrity Level (SIL) | Probability of Failure on Demand (PFD) | Safety Availability (1-PFD) | Risk Reduction Factor (1/PFD) |
|------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|
| 4                            | .0001 ~ .00001                         | 99.99 ~ 99.999%             | 10,000 ~ 100,000              |
| 3                            | .001 ~ .0001                           | 99.9 ~ 99.99%               | 1,000 ~ 10,000                |
| 2                            | .01 ~ .001                             | 99 ~ 99.9%                  | 100 ~ 1,000                   |
| 1                            | .1 ~ .01                               | 90 ~ 99 %                   | 10 ~ 100                      |

장치이다.

(3) Final Element는 Logic Solver의 지시를 받아 공정을 안전한 상태로 만들기 위해 필요한 물리적 작동을 하는 장치이다.

2-2-2. Safety Integrity Level

SIL (Safety Integrity Level)은 일정기간 내에 SIS (Safety Instrumented System)가 요구된 SIF를 만족스럽게 수행할 확률의 등급을 말한다. SIL이 높을수록 요구된 SIF를 수행할 확률이 더 높아지며, 시스템의 가용성(Availability, 어떤 시간대에 시스템이 정상적으로 작동하는 확률)과 시스템 구성에 대한 요구사항이 증가한다[8]. SIL은 1부터 4 까지 있으며, 각 레벨의 정의는 Table 3과 같다[9]. 단, SIL4는 현실적으로 구현하기 어려운 것으로 알려져 있다[10].

3. 사례연구

3-1. 대상공정

투과증발 공정은 선택적 투과막을 이용해 부분증발을 일으켜 액체 혼합물 분리에 사용되는 막 기술이다. 본 연구의 대상 공정흐름도(Process Flow Diagram)는 Fig. 1과 같다. 탱크에 투입된 과산화수소 수용액이 액체상태를 유지하며 가열된 후 지속적으로 막과 접촉하며 순환하는데, 막 반대편의 진공이나 sweep gas에 의해 일부가 막을 통하여 투과증발되며 이때 과산화수소 분자보다 물 분자가 상대적으로 더 많이 통과하기 때문에 과산화수소가 농축된다[11].

3-2. Quantitative Risk Analysis (QRA)

과산화수소 농축공정의 주요 잠재적 사고는 분해반응에 의한 폭발 및 화재이다. 대상공정에서 발생할 수 있는 분해반응의 원인과 결과의 관계를 NASA 보고서[12]의 사고사례 등을 토대로 사건트리(event tree) 또는 결함트리(fault tree) 형태로 모델링하여 Fig. 2에 도시하였다. 조업자의 부주의 또는 장치의 밀봉상태 불량으로 인해 외부오염 물질이 촉매역할을 하거나, 장치내부 오염, 온도제어 실패 또는 가열 장치의 결함으로 인해 과열될 경우 폭발적으로 분해반응이 일어날

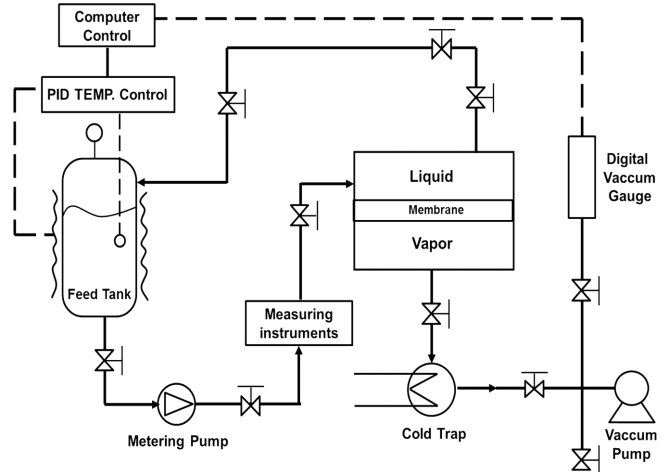


Fig. 1. Pervaporation process.

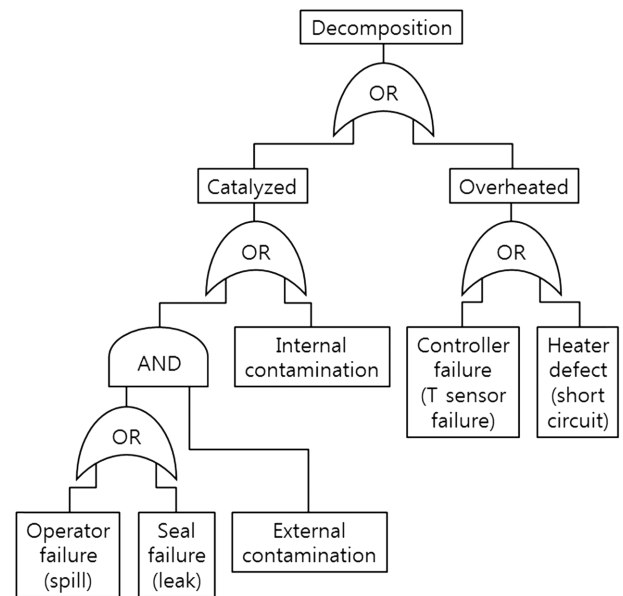


Fig. 2. Fault tree for concentrating hydrogen peroxide.

수 있다.

과산화수소의 분해반응을 유발할 수 있는 사건 중 조업자의 실수는 발생률이 시간에 따라 감소하는 초기고장 패턴을 나타내고, 이와는 반대로 장비와 장소에 관련된 나머지 사건들은 모두 발생률이 시간에 따라 증가하는 마모고장 패턴을 보일 것으로 예상된다. 그러나 현재 각 사건에 대한 고장함수의 상세 모델링을 위한 자료는 현저히 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 모든 사건을 우연고장으로 가정하고 각 사건의 발생빈도를 유사사건 빈도자료[6]를 토대로 추정하여 Table 4에 표시하였다.

대상공정에서 촉매와의 접촉에 의한 과산화수소 분해반응이 일어나지 않을 확률의 누적분포함수, 즉 청결 신뢰성함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 R_7(t) &= \{1 - [1 - R_1(t)R_2(t)]F_3(t)\}R_4(t) \\
 &= [1 - (1 - e^{-0.2t})(1 - e^{-t})]e^{-0.1t} \\
 &= e^{-0.3t} + e^{-1.1t} - e^{-1.3t}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

**Table 4. Failure events in concentrating hydrogen peroxide**

| Number | Event                                 | Frequency (/yr)        |
|--------|---------------------------------------|------------------------|
| 1      | Operator failure (spill)              | 0.1 (0.01/opportunity) |
| 2      | Seal failure (leak)                   | 0.1                    |
| 3      | External contamination                | 1                      |
| 4      | Internal contamination                | 0.1                    |
| 5      | Controller failure (T sensor failure) | 0.1                    |
| 6      | Heater defect (short circuit)         | 0.1                    |

과열에 의한 과산화수소 분해반응이 일어나지 않을 확률의 누적 분포함수, 즉 온도 신뢰성함수는 다음과 같다.

$$R_8(t) = R_5(t)R_6(t) = e^{-0.2t} \quad (5)$$

따라서 과산화수소 농축공정의 고장함수, 즉 분해반응 확률의 누적분포함수는 다음과 같다.

$$F_9(t) = 1 - R_7(t)R_8(t) = 1 - e^{-0.5t} - e^{-1.3t} + e^{-1.5t} \quad (6)$$

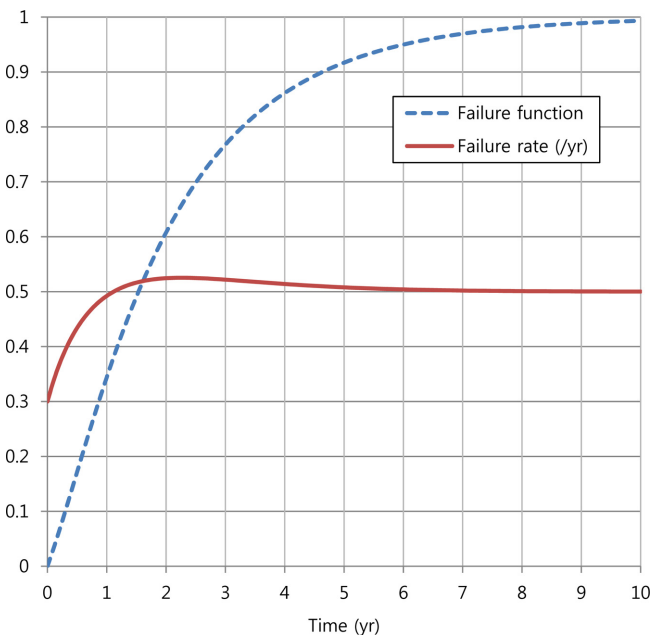
예상 사고율(/yr)은 다음과 같다.

$$\lambda_9(t) = \frac{f_9(t)}{R_9(t)} = \frac{0.5e^{-0.5t} + 1.3e^{-1.3t} - 1.5e^{-1.5t}}{e^{-0.5t} + e^{-1.3t} - e^{-1.5t}} \quad (7)$$

시간에 따른 변화는 Fig. 3과 같으며 0.3/yr에서 시작하여 최대값은 약 0.53/yr이다.

**3-3. Layer of Protection Analysis (LOPA)**

본 연구의 분석결과에 따르면 과산화수소 농축을 위한 투과증발 공정에서 분해반응이 일어나는 예상 사고율은 최대 0.53/yr이다. 이는 추가안전장치 없이 운전을 계속하면 약 2년에 한번 꼴로 분해반

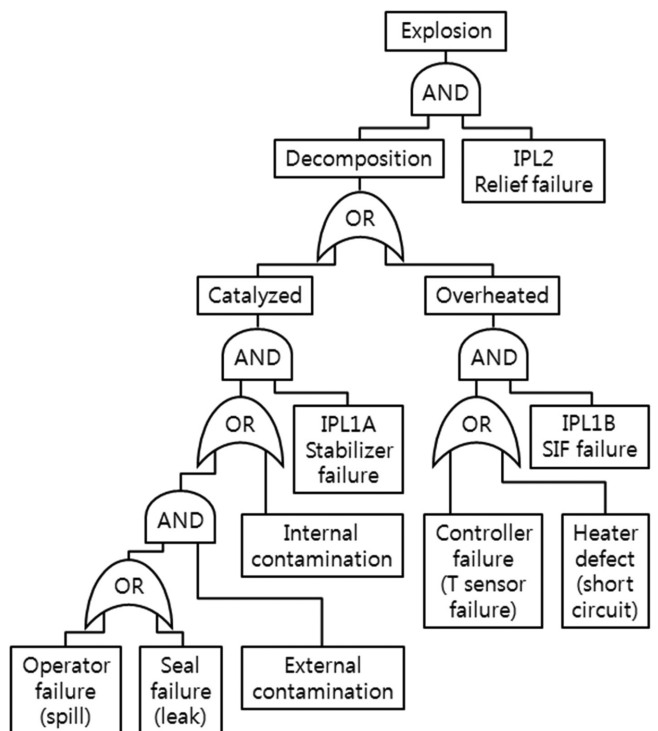


**Fig. 3. Failure function and failure rate of concentrating hydrogen peroxide.**

응이 발생할 수 있음을 의미한다. 실험실 규모의 과산화수소 농축공정에서 분해반응이 일어나고 이것이 폭발로 이어지면 사고결과는 Table 1의 정의에 따르면 Category 3에 해당한다. 그러므로 대상공정의 위험성이 수용 가능한 수준이 되게 하려면 Table 2의 기준에 따라 예상 사고빈도를 10<sup>-4</sup>/yr 이하로 낮추어야 한다. 이를 만족시키기 위해서는 식 (3)에 따라 PFD가 1.9×10<sup>-4</sup> 이하인 IPL을 추가해야 한다.

우선 분해반응이 일어나지 않도록 하는 IPL을 설치하되 촉매접촉과 과열사고에 대해 각각 대응해야 한다. 촉매반응은 전조증상이 없으므로 사실상 수동적(passive) IPL만 가능하다. 따라서 본질적으로 보다 안전한 설계(inherently safer design)가 필요하다. 공정전체를 부식되지 않는 소재로 구축하고 분해방지 안정제(stabilizer)가 포함된 원료만을 사용해서 운전해야 한다(IPL1A). 본질적 안전설계의 PFD는 10<sup>-2</sup>이다[6]. 촉매접촉 예상빈도는 최대 0.33/yr이므로 촉매반응 사고빈도는 최대 3.3×10<sup>-3</sup>/yr이다. 열분해에 대해서는 능동적(active) IPL로서 온도 및 압력센서를 통해 이상징후 발견 시 공정을 멈추는 SIF를 설치할 수 있다. Table 3에 제시된 SIL1의 SIF를 추가하면 된다(IPL1B). PFD는 10<sup>-2</sup>이라 가정한다. 과열원인 발생빈도는 0.2/yr이므로 과열사고 예상빈도는 2×10<sup>-3</sup>/yr이다. 분해반응을 막는 이 두 개의 평행 IPL을 적용함으로써 대상공정의 분해반응 발생빈도는 최대 5.3×10<sup>-3</sup>/yr가 된다.

끝으로 분해반응이 일어나도 폭발로 이어지지 않고 안전한 방향으로 분출되도록 feed tank와 membrane module에 relief valve 또는 rupture disk를 설치해야 한다(IPL2). 이 IPL의 PFD는 10<sup>-2</sup>이다[6]. 지금까지 고려한 모든 IPL을 적용하면 대상공정의 과산화수소 분해반응에 의한 폭발사고 예상빈도는 최대 5.3×10<sup>-5</sup>/yr로 수용 가능한 위험수준이 된다. 제안된 시스템의 결합트리는 Fig. 4와 같다.



**Fig. 4. Fault tree after QRA and LOPA.**

## 4. 결 론

과산화수소 농축을 위한 투과증발공정의 분해반응 사고에 대한 정량적 위험성 분석을 실시하였다. 초고농도 과산화수소의 분해반응이 폭발로 이어지는 사고는 실험실 규모일 때 한 사람이 부상당하는 Category 3에 해당한다고 볼 수 있다. 이 경우 수용 가능한 발생빈도는  $10^{-4}/\text{yr}$  이하이다.

대상공정에서 분해반응의 예상 발생빈도는 최대  $0.53/\text{yr}$ 로, 추가 안전장치가 필요하다. 분해반응은 촉매접촉 또는 과열에 의해 발생하므로 이를 막기 위한 IPL로 각각 PFD가  $10^{-2}$ 인 본질적 안전설계 및 SIL1의 SIF 설치를 제안하였다. 또한 분해반응이 일어나더라도 폭발로 이어지는 사고를 막기 위해서 feed tank와 membrane module에 PFD가  $10^{-2}$ 인 relief valve 또는 rupture disk의 설치를 제안하였다. 이를 적용하면 예상 사고율은 최대  $5.3 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 로 수용 가능한 위험 수준이 된다.

본 연구는 실험실 규모의 투과증발공정에 대해서 수행되었으나 제안된 방법은 산업현장의 상업용 규모 또는 다른 방식의 공정에도 적용할 수 있다. 감압증류나 분별결정 등 다른 방법을 사용하더라도 분해반응 발생요인(촉매 또는 열)은 같으므로 대상공정의 결함트리는 Fig. 4와 유사한 형태가 될 것으로 예상된다. 단, 사망사고 사례[12]가 있거나 공정의 규모가 클 경우 사고결과는 Category 5에 해당하므로 예상 사고율을  $10^{-6}/\text{yr}$  이하로 낮추어야 한다. 이를 위해서는 보다 신뢰성 높은 IPL 적용 또는 IPL 추가가 요구된다.

본 연구에서 수행한 정량적 위험성 분석은 각 초기사건이 우연히 발생한다고 가정하는 일정 고장률 사고빈도 분석기법에 기반을 두었다. 이는 이어진 방호계층분석에서도 마찬가지이다. 그러나 실제로 화학공정의 사고율은 장비의 노후화에 따라 증가한다. 이를 반영하기 위해서는 각 장비의 마모고장 패턴을 보여주는 신뢰성함수 모델이 필수적이다. 이러한 자료가 구축되면 본 연구에서 제안한 방법을 적용함으로써 운전시간에 따른 사고율을 예측하여 적정시점에 안전 조치를 취할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감 사

본 연구를 수행할 수 있도록 지속적으로 지원해주신 서울대학교 윤인섭 교수님께 감사 드립니다.

## References

1. Jones, C. W., *Applications of Hydrogen Peroxide and Derivatives*, Royal Society of Chemistry, MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, UK, 1999.
2. Parrish, C. F., "Concentration of Hydrogen Peroxide," *U.S. Patent* 7122166 B2(2006).
3. Yoo, J. H., Lee, H. S., Choi, J. W., Seo, J. M., Park, C. and Ko, J. W., "Development of Laboratory Safety Management System for Chemistry and Chemical Engineering Laboratory," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(2), 376-382(2008).
4. Oh, S.-K. and Yoon, I. K., "Apparatus and Method for Implementing a Frequency Analysis Module of a Quantitative Risk Assessment System," *Patent* WO2012002686A2(2012).
5. Yang, J. M., Ko, B. S., Park, C., Yoo, B., Shin, D. and Ko, J. W., "Design and Implementation of An Integrated Safety Management System for Compressed Natural Gas Stations Using Ubiquitous Sensor Network," *Korean J. Chem. Eng.*, **31**(3), 393-401 (2014).
6. Crowl, D. L. and Louvar, J. F., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, 3rd ed., Pearson Education, Boston, MA(2011).
7. Babu, J. R., "Layer of Protection Analysis - An Effective Tool in PHA," *ASSE Risk Assessment Resources*, <http://www.oshrisk.org/assets/docs/Tools/4%20Sustain%20and%20Continuously%20Improve%20Risk%20Assessment%20Process/Layer%20of%20protection%20analysis.pdf>(2006).
8. Kim, J. H., Kim, B. S., Yang, J. M., Jang, C. B., Kim, M. S., Jung, S. Y. and Ko, J. W., "A Study of Risk Reduction by SIL (Safety Integrity Level) Determination," *KIGAS*, **15**(5), 57-62(2011).
9. Kwon, H. M., Park, H. C., Chun, Y. W. and Park, J. H., "Towards the Application of Safety Integrity Level for Improving Process Safety," *KOSOS*, **27**(5), 64-69(2012).
10. Kern, A. G., "Safety Instrumented Function Design Reduces Nuisance Trips," *Hydrocarbon Processing*, <http://www.hydrocarbonprocessing.com/Article/2925731/Safety-instrumented-function-design-reduces-nuisance-trips.html> (2011).
11. Nguyen, H. H., Lee, S. T. and Choi, S. H., "Modeling a Pervaporation Process for Concentrating Hydrogen Peroxide," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(5), 560-564(2011).
12. Greene, B., Baker, D. L. and Frazier, W., "Hydrogen Peroxide Accidents and Incidents: What We Can Learn from History," *NASA Technical Reports*, 20050217417(2005).