

# 위험성평가를 위한 다중모델 접근법에 의한 이상트리 합성알고리즘에 관한 연구

강병관, 김구희, 이병우, 윤인섭  
서울대학교 응용화학부

## A Study on Fault Tree Synthesis Algorithm by Multimodel Approach for Hazard Analysis

Byounggwan Kang, Kuhoy Kim, Byoungwoo Lee, En Sup Yoon  
School of Chemical Engineering, Seoul National University

### 1. 서론

화학공장에는 수많은 장치들이 매우 복잡한 구조를 가지고 배치되어 있다. 이러한 장치집약적인 특징으로 인해 화학공장은 항상 장치의 고장 또는 조업자의 실수로 인한 사고가 일어날 가능성을 안고 있다. 또한 화학공장에서는 여러 가지 위험한 물리적, 화학적 특성을 가진 물질을 다루고 운전상태가 고온, 고압일 가능성이 크므로 이러한 곳에서의 사고는 개인적인 상해뿐 아니라 화재, 폭발, 유독 물질 누출 등 대형 피해를 유발하는 사고로 일어나기가 쉽고, 공장의 내부뿐만 아니라 주변지역과 지역주민에 대해서도 직접, 간접적인 피해를 입히게 된다. 따라서 화학공장에서의 사고를 예방하고 안전을 확보하기 위해서는 잠재적인 사고 가능성 및 위험요인을 사전에 분석하고 예방하는 것이 중요하다. 이를 위한 활동들로는 온라인 이상 진단 (on-line fault diagnosis)과 오프라인 위험성 평가 (또는 위험성 분석: off-line hazard analysis)가 있다. 온라인 이상 진단은 공정에서 발생한 이상이 사고로 발전하는 것을 예방하는 것이 목적이고 오프라인 위험성 평가는 공장의 설계 단계나 기존 공정에 변화가 있는 경우에 수행하게 된다. 위험성 평가는 이상 진단에 비해 이상의 원인 (fault, symptom, deviation)뿐만 아니라 결과 (consequence)까지 알아내게 된다. 또한 이를 통해 본질적으로 안전한 공장을 확보하기 위한 설계 변경에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문에 중요하다.

화학공장의 잠재적인 위험 요소를 알아내기 위한 다양한 위험성 분석 기법들이 고안되어 사용되어져 왔다. 그 대표적인 것들로는 정성적인 방법으로 Hazard and Operability Study (HAZOP), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) 등이 있고 정량적인 방법으로 이상트리분석 (Fault Tree Analysis: FTA), 사건트리분석 (Event Tree Analysis: ETA) 등이 있다. 설계단계에서 정성적인 위험성평가방법을 사용하여 공정에서 발생가능한 사고와 그 사고를 예방하기 위한 safeguard를 찾아내면 그 다음으로 필요한 정보는 이러한 사고들이 실제로 발생할 확률과 빈도이다. 이러한 사고의 확률과 빈도는 이상트리분석 (FTA)을 통해서 얻을 수 있는데 지금까지는 정성적 위험성평가 방법들과는 별도로 이상트리분석을 위한 트리합성 알고리즘과 확률계산 알고리즘이 개발되어왔다. 그러나 위험성평가를 위한 통합시스템의 개발을 위한 한 방법으로 정성적, 정량적 위험성평가를 같은 지식기반(knowledge base) 하에서 구축하는 법을 생각해 볼 수 있다. 이 연구에서는 여러 가지 방법으로 개발되고 있는 이상트리 합성 알고리즘을 통합된 위험성평가시스템 구축을 위한 하나의 모듈로서 기존에 개발된 공정표현을 위한 다중모델을 사용하여 개발하는 방식으로 접근하였다.

## 2. 이상트리분석(FTA)

이상트리분석은 시스템안전공학의 발전과 때를 같이하여 1962년 미국의 Bell 연구소에서 미사일 발사제어시스템의 연구를 수행할 당시에 처음으로 고안되었고 주로 원자력발전에 응용되었으나 1970년대 후반 이후로 화학공장에의 응용과 자동화를 위하여 활발한 연구가 진행되었다. 이상트리는 대상시스템의 예기치 못한 사건을 결정하고, 시스템의 환경과 작업의 정황(context) 하에서 시스템을 분석하여 예기치 못한 사건이 일어날 수 있는 모든 가능한 방법들을 발견하는 분석 기술이다. 이는 예기치 못한 사건을 결과로 일으킬 수 있는 이상(fault)들이 다양하게 병행적, 순차적으로 조합된 하나의 시각적인 모델로서, 이상들은 공정장치의 이상, 인간 실수 또는 다른 여러 가지의 예기치 못한 사건을 일으킬 수 있는 것들이다. 이상트리는 정량화하기에 좋은 모델이지만 그 자체로는 정성적인 모델이다. 따라서 정성적 위험성평가를 위한 모델로도 이상트리를 구축할 수 있다는 사실을 예상해 볼 수 있다. 전형적인 이상트리 모델을 다음의 그림 1에 나타내었다.

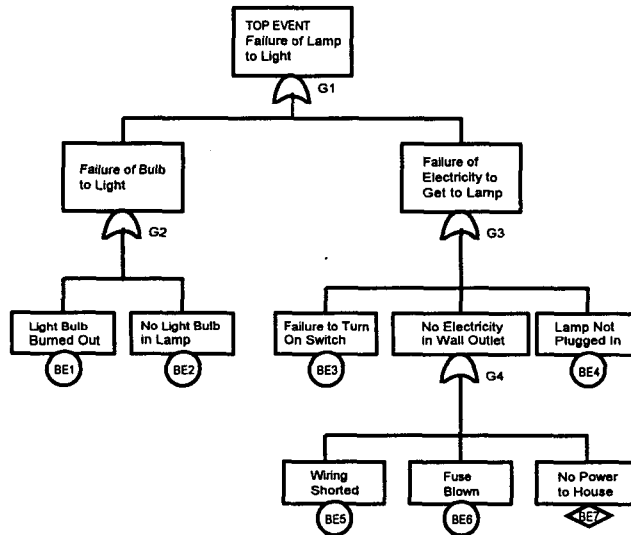


그림 1. 이상트리의 예: failure of lamp to light

## 3. 위험성평가를 위한 다중모델

지금까지 이상트리합성은 그 목적이 정량적 위험성분석을 위한 것임에도 불구하고 주로 온라인 이상 진단의 모델을 이용하였다. 즉 온라인 이상진단에 흔히 쓰이는 digraph 모델을 공정표현에 많이 응용하였고, 특히 자동화를 위한 연구에서는 이상트리의 event로 공정변수만을 다루는 경우가 많았다. 이 연구에서는 위험성평가를 위하여 개발된 다중모델을 소개하고 이를 이상트리의 합성에 응용하여 하나의 모델로 전향, 후향 양방향의 추론을 통한 위험성평가를 수행하는 시스템의 개발에 기여하고자 한다. 다중공정모델은 이해하기 쉽고 되도록 간단하면서도 위험성평가에 충분한 지식을 포함하도록 만들었으며 새로운 모델을 만드는데 지나친 노력을 필요로 하지 않고, 적은 수정으로 다양한 공정에 적용이 가능하게끔 만들었다.

### 3.1. 물질지식베이스(Material knowledge base)

본 연구에서는 NFPA (National Fire Protection Association) code를 이용하여 물질지식베이스를 구현하였다. 물질 지식 베이스는 위험성 지수(Hazard indices)를 나타내는데 위험성 지수는 NFPA code에 따라서 각 물질에 대한 인화성 지수(Flammability hazard rating(Nf)), 유해성 지수(Health hazard rating(Nh)), 반응성 지수(Reactivity hazard rating(Nr))로 되어있다. 각각의 지수는 0부터 4까지의 크기를 가지며 지수가 커짐에 따라 위험 정도가 높아짐을 나타낸다.

### 3.2. 구조지식베이스(Organizational knowledge base)

구조지식베이스(organizational knowledge base)는 단위 장치들의 공간적인 배치나 연결관계에 관한 지식을 가지고 있다. 이 지식은 하나의 공정이 어떤 단위 장치들로 구성되어있고, 그들이 서로 어떻게 연결되어있는지를 나타낸다. 이러한 정보는 P&ID같은 공정 도면과 사용자로부터 제공되어 완성된다. 이는 각각의 장치마다 장치의 종류명, 그 장치만 나타내는 장치이름, 추론알고리즘에 의해 이상이 전파되는 경로의 정보를 전달하기 위한 속성, 전후 장치의 연결정보등을 가지게 된다.

### 3.3. 장치지식베이스(Unit knowledge base)

장치 지식 베이스는 장치 거동 모델(unit behavior model)과 장치 기능 모델(unit function model)로 구성되는데 이들은 각각 단위 장치에서 기능 이상과 변수와의 관계, 단위 요소 변수들의 인과 관계를 나타내게 된다. 장치거동모델에서는 공정의 상태를 나타내는 여러 변수 중에서 위험성 평가에서 관심 있는 변수인 압력(pressure(P)), 온도(temperature(T)), 유량(flow rate(F)), 조성(composition(C)), 액위(level(L)), 반응 변수(reaction(r))등으로 이상 전파 관계를 표현한다. 장치기능모델은 단위 장치가 그 안에 있는 변수에 대해 어떤 기능을 하는가에 대해 나타낸 모델이다. 의미 있는 inlet variable, internal variable, outlet variable 별로 이들이 high malfunction과 low malfunction 상태에 이르게 하는 원인들을 결정한다.

## 4. 다중모델을 이용한 이상트리합성

지금까지의 Fault Tree Analysis에 있어서 가장 큰 단점 중의 하나는 작성하는 사람마다 서로 다른 결과를 나타낼 수 있다는 점이다. 이상트리합성은 대개 공정변수 중심 또는 공정장치이상 중심 중의 어느 한가지 방향으로만 접근되어져 왔다. 그림 2 와 그림 3 에 공정변수중심의 이상트리와 공정장치 이상중심의 이상트리의 대표적인 예가 나타나 있다. F. P. Lees의 이상트리는 변수 일탈을 중심으로 만들어졌고, J. R. Taylor의 이상트리는 사고와 기능 이상의 관점에서 작성되었다. 그러나 본 연구에서 제안된 모델을 이용하면 항상 같은 결과의 형태를 보이고 이 두가지 관점을 모두 수용할 수 있는 Fault Tree의 작성이 가능하게 된다. 본 연구에서 제안한 이상트리는 사용자가 대상 공정에 대하여 발상가능한 사고를 입력했을 때 추론이 시작된다. 알고리즘은 이 사고를 일으킬 수 있는 1차적 사건들을 rule로 구성된 사고추론알고리즘에서 찾아낸다. 추론알고리즘은 변수일탈과 공정장치이상의 두가지 측면 모두에서 해당 지식베이스로부터 사고의 전파과정을 찾아내어 트리를 구성해간다. 구성된 트리는 AND 또는 OR gate를 통해 malfunction과 variable deviation이 연결되고 malfunction hierarchy에 따라 fundamental malfunction까지 찾아들어가는 형태가 된다. 사건의 최초원인이 되는 basic event는 공정의 장치이상, 조업자의 실수 등의 malfunction 들로 구성된다. 그림 4 에 제안된 이상트리의 구조

가 나타나 있다. 그림 5는 이상트리 합성 알고리즘을 나타내었다.

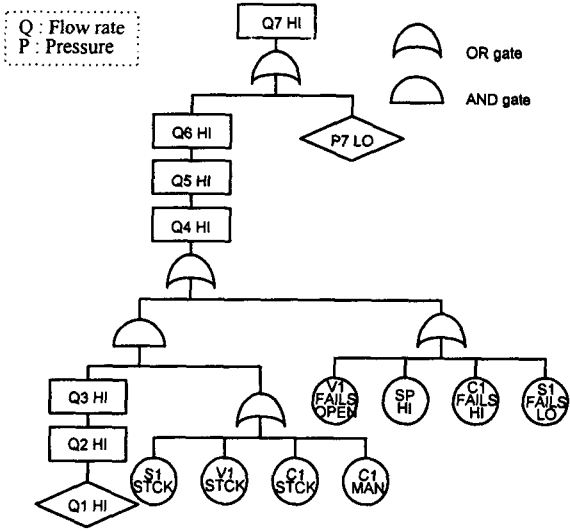


그림 2. F.P.Lees의 이상트리

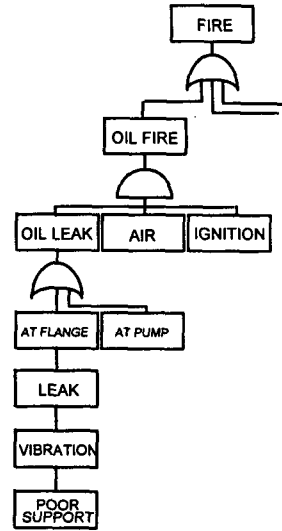


그림 3. J.R.Taylor의 이상트리

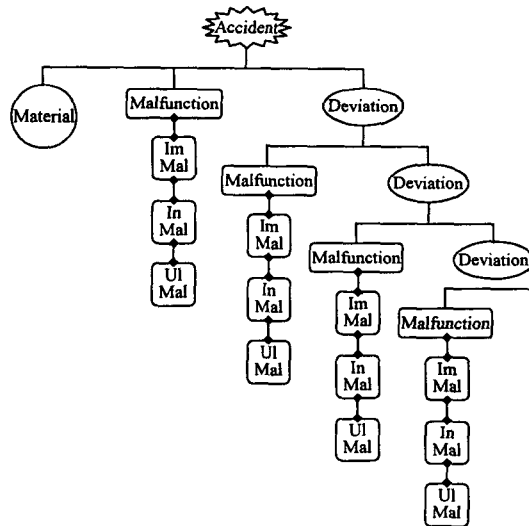


그림 4. 제안된 이상트리의 구조

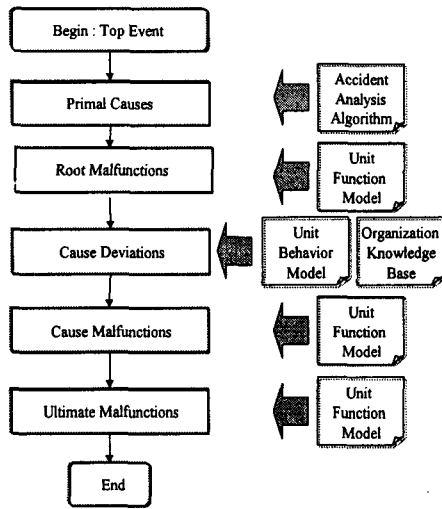


그림 5. 제안된 이상트리 합성 알고리즘

## 5. 사례연구

사례연구로서 DAP(Diammonium Phosphate) reactor 시스템의 위험성평가에 이상트리 합성기법을 적용해 보았다. DAP 공정은 액상의 phosphoric acid와 액상의 ammonia를 각각의 flow control valve를 통해 교반기에 의해 회전되는 DAP 반응기에 주입시키고 반응기 내에서 반응을 일으켜 위험성이 없는 DAP로 변화되는 공정으로 유량의 증가시 미반응 암모니아가 DAP 저장탱크로 흘러나와 조업자가 유독물질에 의한 피해를 입을 가능성이 있다. 이 공정을 그림으로 나타내면 그림 6 과 같다. 한편 이 공정에 대해 저장탱크에서의 암모니아 유출사고를 가정하여 작성한 이상트리를 그림 7 에 나타내었다.

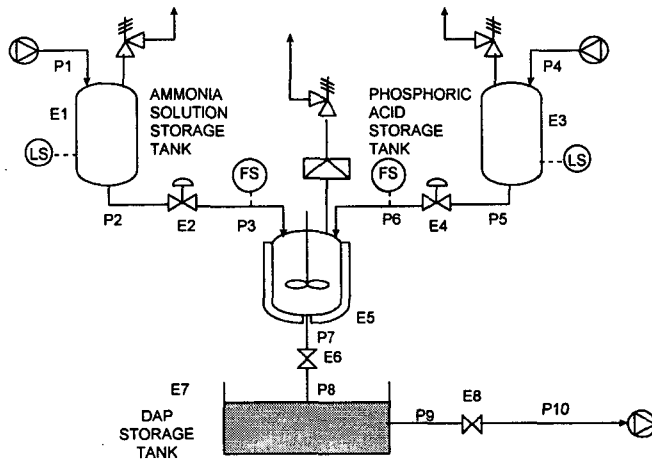


그림 6. DAP process

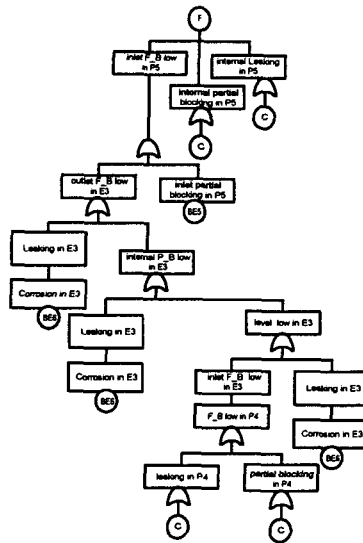


그림 7. 작성된 이상트리(일부)

## 6. 결론

본 연구에서는 위험성 평가 자동화의 한 분야인 이상트리 합성의 자동화를 위하여 기존에 개발된 공정지식 표현을 위한 다중모델접근법을 이용하여 변수변이와 장치이상의 양방향에서 작성이 가능한 이상트리 합성 알고리즘을 제안하였다. 제안된 이상트리합성모델을 DAP 공정에 적용하여 보았을 때 트리안에 변수의 일탈과 장치의 고장에 의한 원인 탐색 과정이 기존의 알고리즘에 비하여 보다 엄밀하고 자세하게 표현되었고 위험성 평가에 적절한 모델에 의한 추론이므로 지나치게 복잡하지 않다는 장점이 있었다.

## 7. 참고문헌

- Geymayr, J.A.B. & Ebecken, N.F.F. Fault-Tree Analysis : a Knowledge-Engineering Approach. *IEEE Transactions on Reliability* , 44(1), 37-45 (1995).
- Rasmussen, B. & Whetton, C. Hazard identification based on plant functional modelling. *Reliability Engineering and System Safety*, 55, 77-84 (1997).
- Suh, J.C., Lee, S. & Yoon, E.S. New strategy for automated hazard analysis of chemical plants. Part 1: Knowledge modelling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 10(2), 113-126 (1997).
- Suh, J.C., Lee, S. & Yoon, E.S. New strategy for automated hazard analysis of chemical plants. Part 2: Reasoning algorithm and case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 10(2), 127-134 (1997).
- Vaidhyanathan, R. & Venkatasubramanian, V. Experience with an Expert System for Automated HAZOP Analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 20(Suppl.), S1589-S1594 (1996).