

화학공정의 사고 빈도 분석 S/W 개발

서재민·신동일*·고재욱

광운대학교 화학공학과

서울대학교 응용화학부*

(1999년 8월 10일 접수, 1999년 12월 8일 채택)

Development of Accident Frequency Analysis S/W for Chemical Processes

Jae Min Seo · Dong Il Shin* · Jae Wook Ko

College of Chemical Engineering, University of Kwang-woon

*School of chemical engineering, Seoul National University

(Received 10 August 1999 ; Accepted 8 December 1999)

요 약

본 연구는 정량적 위험 평가의 기반 조성을 위해서 다양한 위험 평가 기법 중에서 이상 트리 분석(Fault Tree Analysis) 방법을 이용하여 빈도 분석 프로그램을 개발하였다. 빈도 분석 프로그램을 구축하기 위하여 계산 과정에서는 gate-by-gate 방법과 부울 대수(Boolean algebra) 방법을 이용하였고, minimal cut set 방법을 이용하여 사고 발생 경로를 정량적으로 표현하였다. 결론적으로 본 연구에서 개발한 빈도 분석 프로그램을 이용하여 사고 발생 빈도를 낮출 수 있다면 공정 전체의 안전성을 높이는 데 큰 도움이 될 것이며, 기존에 사용되고 있는 외국의 S/W를 대체할 수 있을 것이라고 사료된다.

Abstract - In this study, a computerized prototype program was developed with frequency analysis system as a main system and data base as sub-items to utilize data. Through use of gate-by-gate analysis and minimal cut set using boolean algebra, the frequency analysis program performed the qualitative approach for the accident development path and a quantitative risk analysis. In conclusion, it is thought that the resulting installation will be effective for lessening the probability of accidents through use of this lower cost software.

Key words : fault tree analysis, quantitative risk analysis, frequency analysis system

1. 서 론

오늘날 가스연료는 가장 대중적이고 편리한 연료로서 거의 모든 국민의 생활연료로 자리 잡고 있다. 그러나 수입이나 생산의 대형저장소로부터 소비시설인 산업시설, 교통수단, 일반가정에 이르기까지의 유통체계가 높은 잠재 위험을 갖고 있는 특성을 지니고 있어 세론의

이목을 집중시키는 대형화재나 폭발재해가 종종 발생하고 있다.

이러한 대규모 위험성에 대한 예방책으로 선진국들에서는 수년 전부터 체계적인 안전대책을 수립하여 시행하고 있다. 그러나 안전에 대한 국내의 연구 활동의 상황은 몇몇 안전 전문 기관에 의해 필요에 의한 부분적인 연구가 이루어지고 있으나 이러한 결과를 각 회사

에서 효과적으로 활용하는데 있어서 한계가 있었던 것도 사실이다.

선진외국의 경우 피해를 미연에 방지하기 위하여 다양한 정량적 위험 평가 프로그램의 개발을 시도하고 있으며 이미 상용화된 프로그램도 상당수 있다. 빈도 분석 프로그램의 경우에는 DNV Technica에서 개발한 CARA와 Chemland 사의 Faulttrees 같은 프로그램이 국내에 도입되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 적용상의 문제들을 최소화하기 위하여 우리나라 가스산업 현실에 적합한 위험 평가의 진행순서, 정성적·정량적 방법, 편리한 프로그램, 그리고 위험의 제공원과 피해대상 사이에 상관되는 위험의 기준치(risk criteria) 설정 및 도식화 방법에 대한 연구는 현실적으로 당연한 현상이며 본 연구에서는 정량적 위험 평가 시스템을 구축하기 위해서 필수 불가결한 빈도 분석 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 이론적 배경

빈도 분석 평가 방법의 일반적인 목적은 잠재위험 확인 단계에서 확인된 가상 사고 시나리오나 원치 않는 사건들의 각각에 대한 발생 가능성을 산정하기 위한 것으로 사고결과의 발생 빈도를 산정하는데 일반적으로 다음의 세 가지의 기본적인 접근방법을 사용하고 있다.

2.1. 역사적 데이터에 의한 방법

사고 빈도를 측정하는데 있어서 과거에 발생했던 사건들로서 빈도를 결정할 수 있는 역사적 데이터를 조사하고, 그리고 나서 가상 시나리오 번호를 이용하여 미래에 발생할 수 있는 발생 가능성을 결정한다. 단, 역사적 데이터를 적용하는 데는 공정과 설계 상에 큰 변화가 없었다는 가정이 따라야 한다.

2.2 사건 트리 분석(Event Tree Analysis) 방법

사건 트리 분석 방법은 이상 트리 분석 방법과 더불어 대표적인 정량적 위험 평가 방법이지만 평가 절차에 있어서는 이상 트리 분석 방법과 대별되는 분석법이다.

사건 트리 분석을 이용한 위험 평가 방법은 초기 사건의 발달과정을 귀납적으로 추론해 가면서 최종사고에 이를 때까지의 사고 발생

경로를 파악하게 되는데, 공정/시스템에서의 사고 발생시 안전 장치의 작동여부에 따른 사고의 진행 유무를 순차적으로 검토해 나가는 원리로 위험 평가를 진행하게 된다.

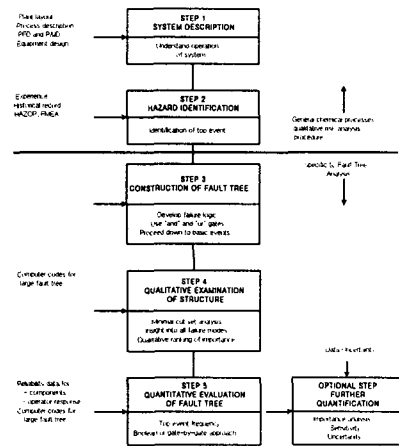


Fig. 1. Logic diagram for application of fault tree analysis

2.3. 이상 트리 분석(Fault Tree Analysis) 방법

이상 트리 분석 방법은 대상 시스템의 예기치 못한 사건을 결정하고 시스템의 환경과 작업의 정황(context) 하에서 시스템을 분석하여 예기치 못한 사건이 일어날 수 있는 모든 가능한 방법들을 발견하는 분석기술이다. 이상 트리 분석 방법은 모든 시스템의 고장에 대해 모든 가능한 원인을 다 찾는 모델은 아니며 정해진 최상위 사건에 기여하는 이상만을 포함하게 된다. 또한 이러한 이상들도 가능한 것이 모두 나열되는 것은 아니며 분석자의 평가에 따라 가장 확실한 이상만을 다루게 된다. 또한 이상 트리 분석 방법은 그 자체로는 정량적 모델이 아니다.

이상 트리 분석을 수행하는 일반적인 절차는 다음과 같다.

- 1) 시스템 정의와 시스템 경계의 선택
- 2) 위험 분석과 정상 사상의 선택
- 3) 이상 트리의 작성
- 4) 이상 트리의 정성적 분석
- 5) 이상 트리의 정량적 평가

경로와 발생 확률 또는 빈도를 계산하는 단계이다.

그림 1은 이상 트리 분석 방법을 수행하는 절차를 표현한 그림이다.

2.4. 이상 트리의 정량적 분석 방법

이상 트리의 구조가 완성되고, 각각의 기본 사상과 undeveloped 사상의 사고 발생 확률 또는 빈도가 산정 된다면 정량적 평가를 통하여 정상 사상의 사고 발생 확률 또는 빈도를 산정 할 수 있다.

정량적 평가 방법에는 크게 gate-by-gate 방법과 minimal cut set 방법이 있는데, 전자의 경우 트리 구조 내에 같은 기본 사상이 한 차례 이상 다른 부분에서 발견된다면 계산상의 오류를 가져올 수 있어서 대단위 공정의 정량적 평가에는 적합하지 못하다. 또한 식 (1)을 이용하여 정상사상의 사고 발생 확률 또는 빈도를 계산할 수 있다.

Minimal cut set을 이용하여 정상사상의 사고 발생 확률 또는 빈도를 구하는 관계식은 식 (1)과 같다.

$$F_T = \sum_i F_i \quad \text{or} \quad P_T = \sum_i P_i \quad - (1)$$

여기서, FT (or PT) = 정상사상의 발생 빈도

F_i (or P_i) = minimal cut set

C_i 의 빈도 (또는 확률)

C_i = minimal cut set I

2.5. 결함 빈도 자료

장치의 성질과 사용되는 방법에 의존하는 빈도 자료는 시간당 고장 횟수로 표현되며, 일반적으로 [failure/hour] 또는 [failure / year]의 형태를 갖는다. 또한 일반적으로 잘 사용하지 않는 시스템이나 장치, 즉 비상 장치, 경보(alarm)와 같은 장치들은 [failure/demand]와 같은 형태의 결함율을 갖는다.

결함 빈도 자료는 근본적으로 운전중인 그 독특한 시스템에 의존하며, 그 시스템으로부터 자료를 수집하여 신뢰도 자료를 생성한다.

3. 결과 및 검토

3.1. 사고 빈도 분석 프로그램 개발

사고 빈도 분석의 형태 중에서 FTA를 효과적으로 수행하기 위해 프로그램을 개발하였고, 『Easy-Tree』라 명명하였다.

『Easy-Tree』를 실행시키기 위한 운영체제를 Windows 95, 98나 Windows NT로 사용할 수 있도록 하였으며, Pentium 이나 486DX Processor를 장착한 16MB 이상의 메모리를 가진 컴퓨터에서 작동할 수 있다. Visual C++ 6.0 Enterprise 버전을 사용하여 active X control을 사용할 수 있게 하여 앞으로 프로그램의 확장이 용이하게 하고 현재의 계산 환경에 최적화 되도록 하였다. 『Easy-Tree』는 공정전문가들에 의해서 구성된 FTA를 Drawing Tool역할로서 화면에 도시해줄 뿐만 아니라 FTA에 관련된 모든 Calculation기법을 사용하여 효율적으로 분석할 수 있다.

그림 2는 사고빈도분석 프로그램의 진행 절차를 묘사한 그림이며, 『Easy-Tree』를 실행했을 때 초기 화면의 모습을 그림 3에 나타내었다.

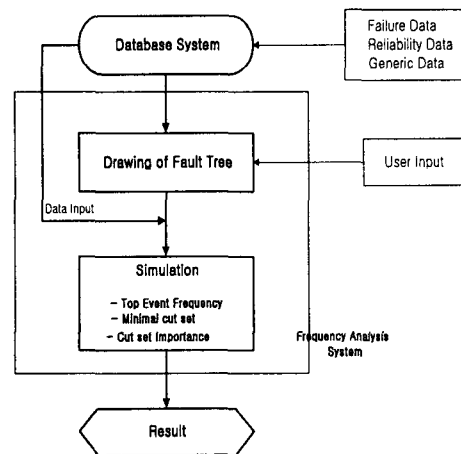


Fig. 2. Structure of Frequency Analysis System

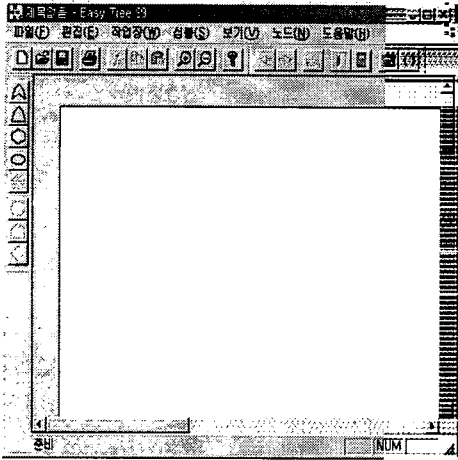


Fig. 3. Initial screen of 'Easy-Tree'

3.2. 사고 시나리오

사례 검토 대상 공정은 탱크로리(tank lorry)로부터 받은 LPG를 지하 저장탱크에 저장한 후, 가정용 실린더 용기와 산업용 소형 저장탱크, 그리고 부탄을 사용하는 차량에 충전용을 하는 LPG 충전공정이며, 저장압력은 7 ~ 8 atm, 저장온도는 5 ~ 30 °C이다. LPG가 누출 됐을 경우를 정상사상으로 두고 트리를 작성하고 정상사상의 빈도 및 minimal cut set을 계산하라.

3.3. 잠재위험 확인

잠재위험을 확인하기 위한 목적으로 이용되는 평가 방법은 많이 있으나 본 사례연구에 있어서는 대표적인 잠재위험 확인 방법인 HAZOP study를 연구·검토하여, LPG 충전시설의 잠재위험을 확인하는데 적용하였다.

HAZOP study 결과 사고 발생 가능한 잠재위험으로는 파이프라인 파열에 의한 LPG 누출 사고와 외부 열원에 의한 저장 탱크의 파열, relief valve를 통한 LPG 누출, 적재/적하 (loading/unloading) 작업시, 그리고 조업자 실수에 의한 사고 등이 사고 발생 원인으로 파악되었다.

3.4. 프로그램을 이용한 이상 트리 작도

이상 트리에 있어서 정상 사상은 LPG의 누출이 되고, 트리 작성시 조업자의 실수에 대한 사고 발생은 고려하지 않았으며, 정상사상인 LPG 누출을 가져올 수 있는 중간사상으로는 다음과 같은 다섯 가지 경우로 나타났다.

- Pipe line break
- External event
- Major tank rupture
- Spill during the loading process
- Residual gas tank rupture

이상 트리의 작도결과 총 기본사상의 수는 21개이며, 총 중간사상은 11개로 나타났다. 그림 4, 5, 6은 프로그램을 이용하여 작성한 LPG 충전 시설에 대한 이상 트리이며, 작성된 프로그램 상에서 정상 사상의 빈도 계산과 minimal cut set이 계산되어진 결과와 경로를 그림 7에서 표현하였다

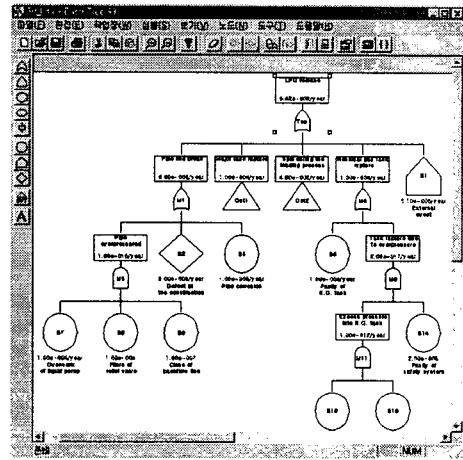


Fig. 4. Fault tree for LPG charging facilities

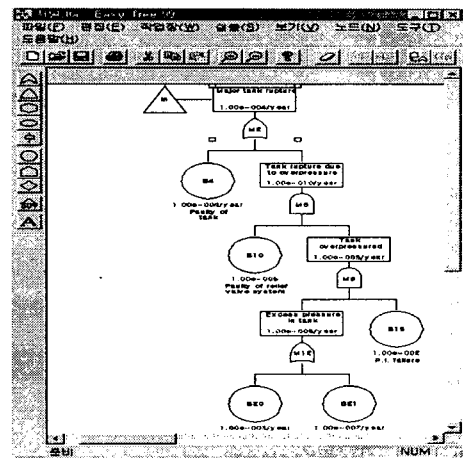


Fig. 5. Fault tree for transfer symbol OUT1 of figure 4

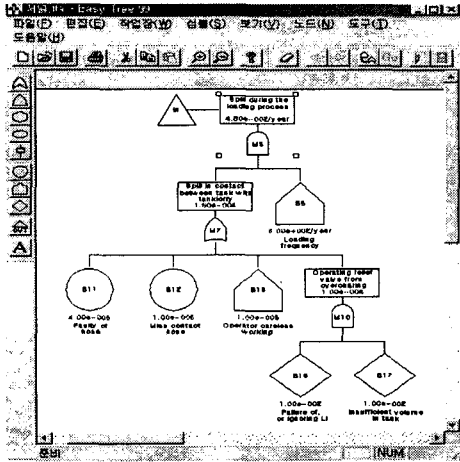


Fig. 6. Fault tree for transfer symbol OUT2 of figure 4.

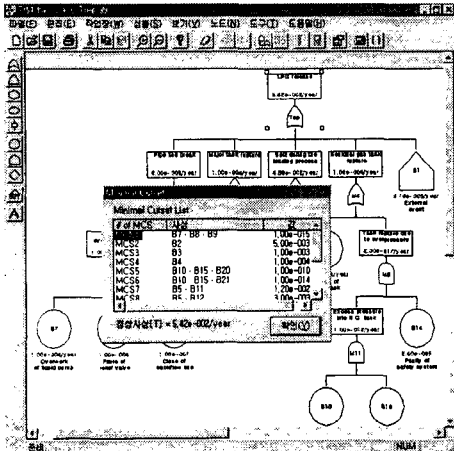


Fig. 7. Picture of frequency analysis program for minimal cut set.

4. 결론

본 연구에서는 가스산업시설에 존재하는 잠재적 화재·폭발·누출과 같은 대형 재해의 사고 발생 경로와 시스템의 결함에서 발생할 수 있는 사고의 유형과 형태에 대한 잠재적인 위험을 파악하였으며, 공정/시스템의 손실에 의한 사고 발생 확률을 산정하기 위하여 이상

트리 분석 방법을 이용한 사고 빈도 분석 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 통해 트리를 작성하는 과정이 간소화되어 입력 및 시간 감소 효과를 확인하였으며, 정상 사상의 결과와 minimal cut set의 결과와 경로가 표시됨으로써 사용자가 쉽게 이해할 수 있었으며, 가스산업시설을 증설 및 신설할 때 효과적으로 이용할 수 있음을 확인하였다.

5. 감사

본 연구는 광운대학교 학술연구비 지원과 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호 :96-0602-01-01-3)지원에 의하여 수행하였으므로 이에 감사드립니다.

6. 참고 문헌

1. Bueker, D. J., et al, *Fault Tree Analysis of an HCN Pumping System*, 1983.
2. CCPS, *Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York, 1989.
3. CCPS, *Guideline for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*, AIChE, New York, 1989.
4. Drago, J. P., Borkowski, R. J., Pike, D. H., and Goldberg, F. F., *The In-Plant Reliability Data Base for Nuclear Power Components : Data Collection and Methodology Report*, NUREG/CR-2641, ORNL/TM-9616, 1985.
5. Fussel, J. B., *Fault Tree Analysis-Concepts and Techniques*, Aerojet Nuclear Company Report, Idaho Falls, 1973.
6. *Probabilistic Risk Assessment Course Documentation (Volumes 6 : Data Development NUREG/CR-4350-V6)*, Nuclear Regulatory Commission. Washington, D. C., August (available from NTIS). 1985.
7. Prugh, R. W., *Application of Fault Tree Analysis*, Chemical Engineers Progress, 1980.