# 다중판별 장치 스크리닝 기법을 이용한 LPG공정의 위험성 분석에 관한 연구

박정수, 김구회, 안성준, 한경훈, 윤종필, 윤인섭
서울대학교 응용화학부

# Hazard Analysis of LPG Process Using Multi-distinction Equipment Screening Algorithm

Jeong Su Park, Ku Hwoi Kim, Sung Joon Ahn, Kyounghoon Han, Jong Phil Yoon and En Sup Yoon

## 1. 서론

본 연구는 공정 장치의 잠재 위험성을 장치 및 시설적인 측면의 Consequence 판별항목으로서 물질, 유량, 공정조건을, Frequency 판별항목으로 장치 수명을 고려한 장치고장률을 가지고 각 해당 항목별로 어떠한 장치가 위험성을 가장 많이 내포하고 있는지를 각각 판별하고 또한, 모든 조건을 조합하였으며 전문가 시스템이 도입된 잠재위험 매트릭스 DB를 이용하여 다각적인 위험성을 판별하고 이를 공정시설의 설계 유지 보수 단계에 있는 사용자에게 위험대응시스템(Mitigation, Prevention) 및 설계변경에 필요한 의사결정에 편의를 제공하고자 하는데 연구목적이 있다. [1] 이에 LPG 공정장치의 설계 및 유지보수 단계에서 사용될 수 있도록 올바른 위험성 판단 Guideline을 제공하여 의사결정에 기여할 수 있는 다중판별 장치 스크리닝 알고리즘(MESA(Multi-distinction Equipment Screening Algorithm))을 제안하고 잠재적으로 가지는 공정 장치의 위험성을 판단하여 Rank를 매기고자 한다.

본 연구에서는 자체시설 및 장치의 위험도를 판별하는 것으로서 위험성 판별 제외 범위는 다음과 같다. Safeguard 영역장치로 위험성을 자체적으로 해결하려고 하는 제어 장치(Control Valve), 위험성을 사전에 알려주는 장치(Alarm, Control Variable Monitoring System(Sensor 포함)), 사고 발생시 위험을 최소화 시켜주는 장치(Mitigation 장치-Rupture Disc, Safety Valve, Safety barrier, Emergency By-pass System), 사고 발생을 원천적으로 막고자 하는 장치(Prevention장치-반응 억제제/중화제 투입장치) 또한, 모든 외부적인 위험을 줄 가능성이 있는 사항(Compressor의 구동 Air-Pressure)에 대한 위험성은 고려하지 않으며 또한, 천재지변(홍수, 산사태, 지진)과 주변에 의한 위험성(테러, 전쟁, 현장공장파업 등)을 제외함을 가정한다.

## 2. MESA(Multi-distinction Equipment Screening Algorithm)

MESA의 전체적인 구조도는 그림 1과 같으며, 대략적으로 설명하면 다음과 같다.

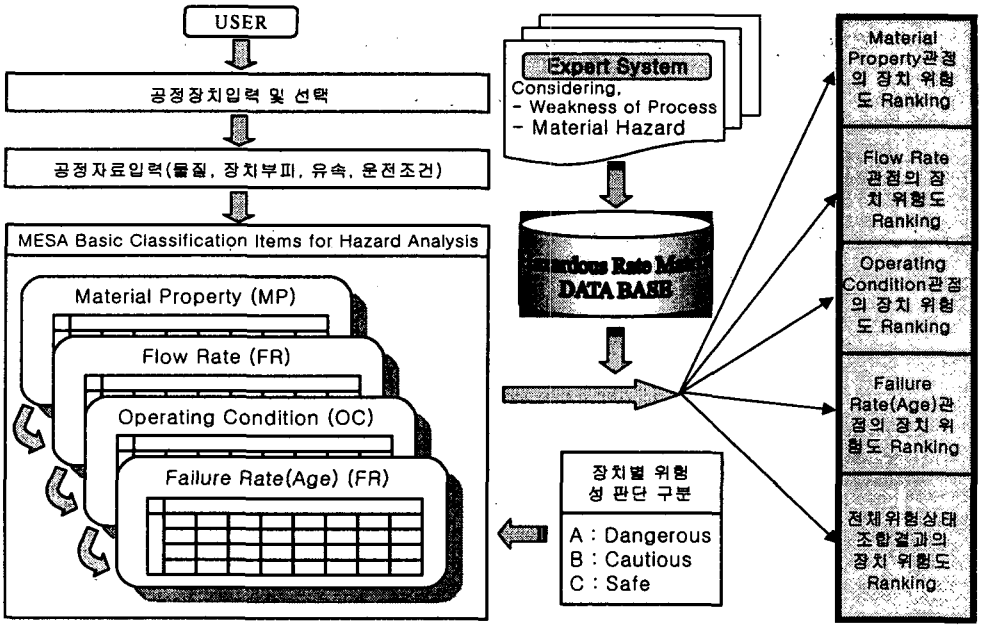



그림 1. MESA(Multi-distinction Equipment Screening Algorithm) 구조도

먼저 잠재된 위험성을 가지고 있는 장치의 위험도를 측정할 공정장치 입력 및 선택하고 위험도 분석 장치 스크리닝 알고리듬을 적용하기 위한 기본 자료(물질, 장치부피, 유속, 운전조건)을 입력한 다음 물질특성, 유속, 운전조건, 사고율(수명)을 고려한 위험분석을 위한 장치스크리닝 알고리듬을 적용하여 장치별 위험성 판단 구분된 값을 얻고 이 값을 장치 및 물질에 대한 위험성이 고려된 전문가 시스템을 포함하는 위험도 매트릭스 DB를 사용하여 수치화된 위험도를 각 장치별로 얻게 된다. 다음으로는 위험성 분석을 위한 다중판별 장치스크리닝 알고리듬의 기본 구분항목들에 대해서 알아본다.

2-1 물질특성 (Material Property; MP)

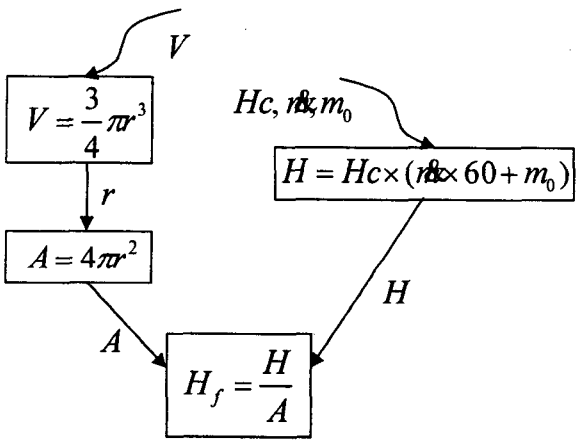
물질특성에 관한 위험성의 판단은 NFPA(National Fire Protection Association) code의 $N_f$(Flammable hazard rating ; 물질의 연소열 고려)와 $N_r$(Reactivity hazard rating ; 물질의 반응성 고려)값을 이용하여 물질의 위험성에 대한 영향을 A, B, C로 위험등급을 매겨 Matrix화하며, 그 내용은 그림 2와 같다. [3]

| | | $N_r$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $N_f$ | 0 | C | C | C | B | B |
| | 1 | C | C | B | B | A |
| | 2 | C | B | B | A | A |
| | 3 | B | B | A | A | A |
| | 4 | B | A | A | A | A |

그림 2. NFPA에 대한 위험도 지수 판별도표

그리고, 모든 장치의 위험성 물질 판단에 있어 솔벤트의 혼합물 또는 반응성 물질과 솔벤트의 혼합물의 경우 혼합물에 대한 최적의 물질계수에 대한 자료가 없는 경우 각 성분의 물질계수 중 구성성분이 혼합물 내에서 농도가 5%이상인 계수값이 가장 높은 것(Worst Hazard Case)을 선택한다. [4]

2-2 유속 (Flow Rate; FR)
유체 유속에 대한 위험도 지수의 산출 방법은 그림 3과 같이 장치의 부피를 구의 부피로 환산하여 폭발가상 구형 환산반지름 r을 구한 후, 이를 가지고 해당 장치의 위험전달 폭발면적을 구한다. 그리고 1분동안 장치에 Holdup된 물질의 양과 더불어 1분 동안 피폭될 수 있는 열량을 계산한 값에 계산된 폭발면적을 나누어 수치적인 위험도 크기를 구한다. [5]




V : 장치 내부 물질 수용 부피 [$m^3$]
r : 폭발 가상 구형 환산반지름 [m]
A : 장치 위험전달 가상 구형 폭발면적 [$m^2$]
Hc : 물질의 연소열 [J/kg]
$\dot{m}$ : 물질의 질량유속 [kg/sec]
$m_0$ : 물질 holdup양 [kg]
H : 물질의 연소에 따른 유체 열전달속도 [J/sec]
$H_f$ : 단위면적당 폭발 에너지 크기 [$J/m^2$]

그림 3. 유속에 대한 위험도 도출을 위한 계산 알고리즘

위에서 도출된 가상 구형 폭발 열전달 플럭스를 SFPE(Society of Fire Protection Engineers)에서 규정한 위험상황에 맞춘 기준인 두 가지 상황 즉, 37.5[$kW/m^2$]만큼의 열량을 1분 동안 피폭되게 되면 사망에 이르고, 4[$kJ/m^2$]만큼의 열량을 1분 동안 피폭되게 되면 화상을 입게 되는 열플럭스의 피폭에 대한 인체의 피해 기준에 맞추어 그림 4와 같이 위험도 지수를 구분한다. [5]

| 범 위 | 위험도 지수 |
|---|---|
| | A |
| | B |
| | C |

그림 4. 가상 구형 폭발 열전달 플럭스에 대한 위험도 지수 산출 도표

2-3 운전조건 (Operating Condition; OP)

해당 공정에 대한 조업조건인 온도와 압력을 위험 범위로서 온도로는 FP(Flash Point)와 BP(Boiling Point)를 기점으로 하여 위험도 단계를 3단계로 나타내고 압력으로는 기준을 압축가스의 경우에는 $2Kg/cm^2$를 액화가스의 경우에는 $10Kg/cm^2$를 기준으로 하여 위험도를 판단하도록 한다. 위험도 Matrix의 구분 온도의 경우 BP(Boiling Point)와 FP(Flash Point)로 상변화가 일어나는 시점에 기준을 두었고, 압력의 경우는 1984년에 공포된 "고압가스안전관리법시행령"의 가스에 대한 기준에 맞추어 압축가스에는 $10Kg/cm^2$를, 액화가스에는 $2Kg/cm^2$를 기준으로 하여 Matrix가 구성되었다. 그리고 압력의 해당 부분에 있어 진공영역에 해당되는 " $-1 \leq p < 0$"영역은 운전시 물질의 특성 및 상에 따라 위험성을 자체 내포(반응물이 진공상태에서 Leak 발생시 외부의 공기유입과 동시에 산소와의 반응으로 인한 폭발반응발생 가능 ; $N_f$항에는 1항을 $N_r$항에는 2~3에 해당되는 경우)하고 있다는 것을 알 수 있기에 위험도를 "주의 요함"상태에 둔다. 그리고 각 해당 온도와 압력의 범위를 온도가 크면 클수록, 압력이 크면 클수록 위험도를 크게 하는 매트릭스를 작성한다. 그리고 Input이 2phase(Gas-Liquid)의 경우는 발생 위험을 모두 포함할 수 있는 Liquid Phase에서의 위험도 Matrix를 적용한다.

| | | 온 도 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | T≥BP | BP>T≥FP | T<FP |
| 압 력 | P≥10 | A | A | B |
| | 0>p≥-1 | A | B | C |
| | 10>p≥0 | B | C | C |

그림 5. Gas Phase에서의 위험도 Matrix

| | | 온 도 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | T≥BP | BP>T≥FP | T<FP |
| 압 력 | P≥2 | A | A | B |
| | 0>p≥-1 | A | B | C |
| | 2>p≥0 | B | C | C |

그림 6. Liquid Phase에서의 위험도 Matrix

그리고 반응기 물질의 특성에 대한 위험성을 구분하는 사항에서 온도와 압력의 기준은 모두 반응기의 내부를 출구의 온도와 압력과 동일한 의미로서 사용하여 위험성을 판별한다.

2-4 고장률(수명) (Failure Rate(Age); FR)

장치의 고장률에 대한 위험성을 판단하는 기준으로서 장치/시설물이 해당 반응물질의 보관/접촉에 있어서 압력 내구성(내압, 외압), 부식성과 외기온도 변화의 스트레스에 대한 견고성을 포함하는 자료인 고장률에 대해 해당 시설물 및 장치의 사용연수를 곱하여 사고 기대값을 얻을 수 있다. 장치 고장률에 대한 수명과의 곱으로 장치의 위험성을 도출하며, 그 위험도 지수 구분은 그림 7과 같다. [2]

| 범 위 | 위험도 지수 |
|---|---|
| $F_r \geq 10^{2}$ | A |
| $10^{2} > F_r \geq 10^{6}$ | B |
| $10^{-6} > F_r$ | C |

그림 7. 장치 고장률(수명)의 위험도 지수 구분 도표

3. 사례연구

사례연구로서 그림 8과 같은 LPG지하저장공정 및 수송공정에 대해서 위의 MESA를 적용하여 보았다. 사용되는 물질로는 Propane, Nitrogen, Methanol, Dimethylsulfide 그리고 물이 사용되었다. 물질특성, 유속, 운전조건, 고장률(수명)에 대해 MESA를 적용하여 보았으며, 그 결과는 그림 9와 같다. 잠재위험성이 크게 나타난 장치로는 P-2(Pump), Dryer, Dry Tank였는데, 이러한 장치들은 모두 유속 운전조건, 고장율(수명)에서 높은 위험순위 및 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 하위 위험장치에 대한 순위도 전체위험순위(Overall hazard rank)를 통하여 확인할 수 있다.

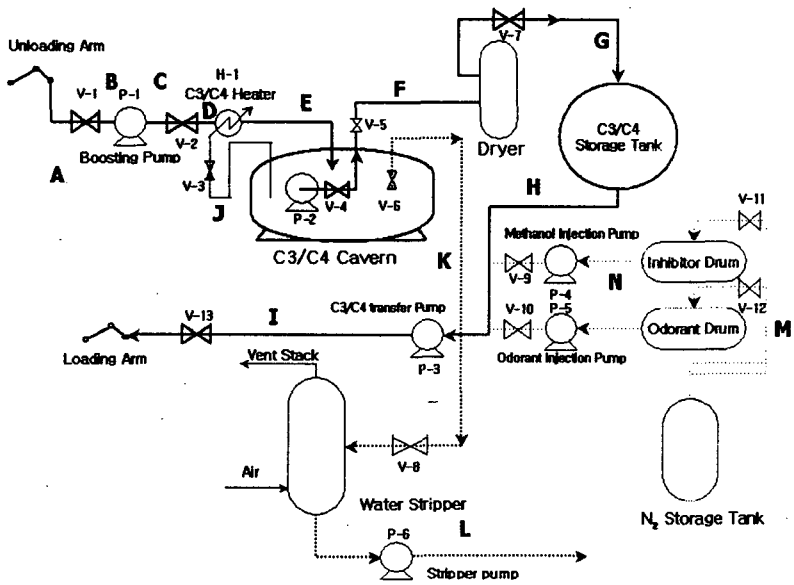



그림 8. PFD of LPG underground storage and shipping process

| Unit No. | Device Name | Material hazard rank | Flow rate hazard rank | Operating condition hazard rank | Failure rate hazard rank | Overall hazard rank |
|---|---|---|---|---|---|---|
| V-1 | Valve | B | A | C | B | 60.0 |
| P-1-1 | Boosting pump | B | A | C | A | 80.0 |
| V-2 | Valve | B | A | C | B | 60.0 |
| H-1 | Heater | B | A | B | A | 90.0 |
| V-3 | Valve | B | A | B | B | 70.0 |
| | Cavern | B | A | B | A | 90.0 |
| **P-2** | **Pump** | **B** | **A** | **A** | **A** | **100.0** |
| V-4 | Valve | B | A | A | B | 80.0 |
| V-5 | Valve | B | A | A | B | 80.0 |
| V-6 | Valve | B | A | B | B | 70.0 |
| | **Dryer** | **B** | **A** | **A** | **A** | **100.0** |
| V-7 | Valve | B | A | A | B | 80.0 |
| | **Dry tank** | **B** | **A** | **A** | **A** | **100.0** |
| | Storage tank | C | C | B | A | 40.0 |
| V-11 | Valve | C | C | B | B | 25.6 |
| | Inhibitor drum | B | A | C | A | 80.0 |
| P-4-1 | Injection pump | B | C | B | A | 56.0 |
| V-9 | Valve | B | C | B | B | 40.0 |
| V-12 | Valve | B | C | C | B | 32.0 |
| | Odorant drum | B | A | C | A | 80.0 |
| P-5-1 | Injection pump | B | C | A | A | 64.0 |
| V-10 | Valve | B | C | A | B | 48.0 |
| P-3 | Transfer pump | B | A | B | A | 90.0 |
| V-13 | Valve | B | A | B | B | 70.0 |
| V-8 | Valve | B | A | B | B | 70.0 |
| | Water stripper | B | A | B | A | 90.0 |
| P-6 | Stripper pump | C | C | C | A | 33.6 |

그림 9. LPG 지하저장공정 장치별 위험도 지수도표

4. 결론

본 연구를 통해 LPG지하저장공정에서의 위험도를 장치별로 계산해 잠재 위험도 순위를 MESA를 이용하여 판별하였다. 본 연구의 결과로 도출된 장치들에 대해서 장치의 이상거동에 따른 그 영향과 원인을 분석하여 정량적 위험성 평가의 사고 시나리오로 활용될 수 있다. 또한, 본문에서 제시된 이러한 방법론들은 공정의 설계단계에서의 사고영향 평가의 신뢰성을 확보함으로써 좀더 정확하고 유

연한 비상계획(Emergency Plan)을 제시할 수 있도록 도와주며, 사고 시나리오의 근거를 마련할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 공정설계단계에서 이를 고려하여 안전성의 확보뿐만 아니라 인적, 물적 절감의 효과도 얻을 수 있으며, 장치 및 물성 등에 근거한 시나리오 결정기법은 정량적 공정 안전성 평가시스템의 일부로 구축되어 공장 외 지역으로의 영향 평가에 활용될 수 있을 것이다. 그리고 Dow에 F&EI(Fire and Explosion Index)의 위험성 분석 알고리즘의과 비교로서 MESA는 간단한 4가지의 중요한 위험성 특징을 다각적으로 평가하여 보다 쉽게 준정량적 위험성분석을 할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 F&EI에서는 공정위험계수 도출시 사용되는 자료는 Dow사에서 오랫동안 축적된 DataBase를 바탕으로 Data Regression된 Dow사의 통계자료인즉, Dow사의 지역적, 환경적 특색이 감안된 위험성 통계자료기에 공장의 조건이나 설비, 안전 교육 및 관리시스템이 다른 우리나라의 화학공장에 그대로 적용시키기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 Expert System이 고려된 Hazardous Rate Matrix DB에 의해 경험적(역사적)으로 결정된 사실을 토대로 잠재 위험성에 대한 판단 결과를 얻을 수 있어 Gas, 석유화학, 제조업의 어느 시스템에도 적용 가능한 위험성 판별기법이며 외국의 위험성판별기법을 사용하지 않고 우리나라의 실정에 맞는 위험성 판별 알고리즘으로서 사용될 수 있는 구조라고 본다.

**감사**

본 연구는 교육인적자원부의 Brain Korea 21의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 김구회, "화학공정의 가상 사고 시나리오 합성에 기반한 위험성 평가 시스템", 박사학위논문, *서울대학교 화학공학과* (2000).
2. AIChE, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", *Center for Chemical Process Safety of AIChE*, New York, (1989).
3. NFPA, "NFPA 409 : Hazardous Chemicals Data", 10th ed., *NFPA*, Quincy, (1991).
4. AIChE, "Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide", 7th ed., *AIChE*, New York, (1994).
5. Society of Fire Protection Engineers, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, *National Fire Protection Association, (2nd ed.), 5*, 111, (1995).