

## 위험물질 수송 시 위험성 평가에 관한 연구

류 병 태 · † 고 재 욱

광운대학교 화학공학과

(2002년 11월 6일 접수, 2002년 12월 12일 채택)

### A Study on Risk Assessment in Transporting Hazardous Material

Byung Tae Ryu and Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

(Received 6 November 2002 ; Accepted 12 December 2002)

#### 요 약

본 연구에서는 지금까지의 고정설비에 대한 정량적 위험성 평가에서 벗어나 위험물질 수송 시 고려되는 여러 가지 요소들을 확인하여 발생할 수 있는 잠재위험성을 확인하였다. 수송 시 발생할 수 있는 잠재위험성을 확인하였다. 또한 수송 시 발생할 수 있는 최악의 사고 시나리오와 대안적인 사고 시나리오를 통하여 피해 영향 범위에 대한 개인적 위험성 및 사회적 위험성을 평가하였으며 최적의 경로를 선정하였다. 이러한 평가를 기반으로 수송 시 중대사고의 피해 영향 범위에 대한 효율적인 위험성 감소 대책과 지역사회, 공공기관, 산업체들과의 연계를 통한 사고에 따른 피해를 최소화 할 수 있는 체계적인 비상대응 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

**Abstract** - In this research, the goal is to ascertain the potential danger when transporting hazardous material by considering the important elements that contribute to such situation, instead of relying on the quantitative risk assessment of fixed facilities. Also, this study will verify the social and personal risk according to damage zone limits, by applying the worst case scenario and the alternative scenario that occur during the transportation process. Moreover, it has selected the optimum transportation route for maximum safety. The result of this research could be used to construct a systematic emergency system that can minimize the damage from serious industrial accidents, by effectively decreasing the danger zone and forming a connection between the community, the society, and the industries according to such evaluations.

**Key words** : QRA(Quantitative Risk Assessment), TRA(Transportation Risk Analysis)

#### 1. 서 론

현대 산업사회가 더욱 복잡·대형화되고 경제 발전이 가속화됨에 따라 사회 전반에 에너지 사용량이 크게 증가하고 있으며, 여러 방법으로 위험물질을 수송하고 있지만 그에 따른

적절한 비상대응 시스템이 갖추어져 있지 못하다. 따라서 On-site, Off-site에 존재하고 있는 다양한 잠재위험으로 인한 화재, 폭발, 독성물질 누출 등의 중대산업사고의 발생 가능성 및 사고결과에의 피해 범위가 증가되고 있다. 사고가 발생한다면 근로자뿐만 아니라 인근지

역 주민 그리고 주변의 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있으며 사회적·경제적 불안 요소를 유발시킬 수 있다.

화학공장의 경우 미약하지만 어느 정도 자체적으로 비상대응 시스템을 구축하고 있지만 현재의 Off-site 비상대응시스템은 수송 시 발생할 수 있는 사고의 영향 분석과 적절한 비상대응시스템이 구축되어 있지 않아 효율적으로 비상대응을 할 수 없으므로 물적·인적피해를 충분히 보호하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 수송 시 발생할 수 있는 사고 시나리오를 선정, 그 영향을 분석하여 적절한 비상대응시스템의 구축을 위한 기틀을 마련하고자 한다.

## II. TRA 정량적 위험성 평가

TRA는 수송 시 수송 용기가 파열되는 사고나 안전밸브(relief valve) 또는 부속품과 같은 부수 장비의 고장으로 인한 위험한 물질(hazardous material ; HAZMAT)의 누출에 초점을 두고 있다. 다음은 수송 중 위험성 평가(TRA)를 수행하기 위한 절차를 나타내고 있다.

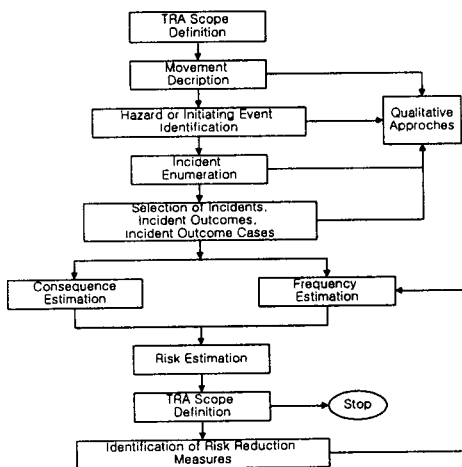


Fig 1. Framework of TRA.

누출의 가능성은 일반적으로 이동거리의 함수이다. 그래서 사고의 빈도는 종종 거리당 사고율(accident rate per mile)로 표현된다. 따라서, 위험물질 운송의 지속시간(duration)은 중요한 변수이다.

## III. 위험물 수송 시 최적의 경로 선정 방법

위험물질 수송 경로의 선정 시, 다양한 관계자와 이에 관련된 제3자들이 있다는 사실을 알아야 한다. 관련된 제3자들에는 운반자, 소방서, 운송업체 그리고 환경단체, 공공기관, 시민단체 등이 포함된다. 그러므로, 분석과 결정을 정할 때 다양한 목적을 잘 조합해야 하며 아래에 제시한 인자들을 명확히 제시해야 한다.

1. 인구밀도
2. 도로유형
3. 위험물질의 종류와 양
4. 기존의 비상대응조치
5. 노출과 다른 위험인자
6. 수송의 지연

다양한 기준들은 주어진 출발지와 도착지 사이에 하나의 “최상의” 경로의 설정이 불가능하다는 것을 말해준다. 예를 들어, 어떤 경로는 위험에 노출된 사람의 수를 최소로 할 수도 있고, 다른 경로는 사고 확률을 최소로 하며, 또 다른 경로는 수송의 지연을 최소로 할 수도 있다. 이런 상황에서, 관심은 Trade-off를 확실히 설명할 수 있는 “비지배적인” 경로의 설정을 찾는 데 초점이 맞추어져 있다.

위에서 제시한 사항들을 고려해 경로 선정을 할 경우 무엇보다 중요한 것은 상황에 맞는 적절한 경로 선정을 하는 것이 무엇보다 중요하다. 다음에 제시한 사항들은 경로 선정 시 주의해야 할 요소들을 나타내고 있다.

1. 주거지역을 피하기 위한 노선변경
2. 높은 교통량 시간대를 피하기 위한 선적 시간의 변경
3. 외부 인구를 피하기 위한 야간 이동
4. 악천후를 피하기 위한 노선 변경이나 수송 정지
5. 중간 저장소와 주차 지역의 이용

주거지역이나 국부적인 불리한 조건을 피하기 위한 노선 변경은 우회거리의 증가에 기인하여 사고 위험의 증가를 야기시킬 수 있는 노선 선택의 결과를 가져올 수 있다. 이것은 일반인에게 위험을 감소시킬 수 있지만 환경 위험을 증가시킬 수 있다. 높은 교통량과 외부

활동을 피하기 위한 선적 시간의 조정은 야간 운행에서 제한된 시각과 피로가 사고율을 증가시키는 역할을 하는 결과를 가져올 수 있다. 다음은 위험물질 수송 시 최적의 경로선정 방법에 관한 예를 나타내고 있다.

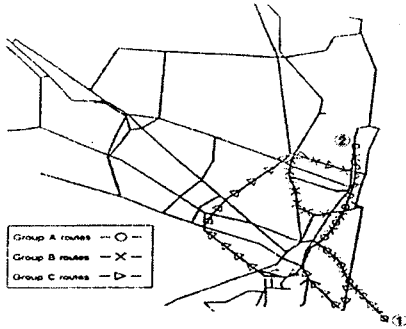


Fig 2. Sample of Route Select.

위험물질을 선적한 탱크로리의 노드①에서 노드②로의 위험물질 수송 시 9개의 경로가 있다. Table 1에서 특성화된 9개의 경로는 실제로 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 3개의 기본 경로 선택으로 나누어 질 수 있다.

- A 경로 : 수송비용과 사고율의 최소화
- B 경로 : 주변의 인구노출의 최소화
- C 경로 : 노출되는 학교 수의 최소화

Fig. 3은 노출된 학교의 수와 인구노출 사이의 9개의 경로에 대한 Trade-off를 보여준다. “C” 경로는 학교 수가 가장 적은 지역이라 할지라도, “A” 또는 “B”보다 더 많은 인구노출 지역임을 알 수 있다.

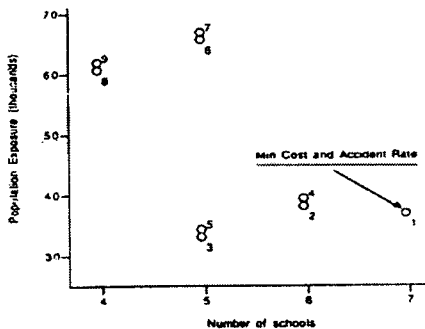


Fig 3. Sample of Trade-Off.

그러므로 최소 노출이라는 경로선택의 두 번째 항목(B)이 다른 두 개의 측정기준(A, C)에 대해서는 다른 경로선택을 이끌 수 있기 때문에 경로들 사이에는 중요한 Trade-off가 존재하는 것이다.

Table 1. Summary of Sample Node

경로	Group	Operating Cost	Accident Rate Per Trip	노출 인구	학교의 수
1	A	\$33.80	$3.52 \times 10^{-6}$	36,500	7
2	B	\$49.80	$8.02 \times 10^{-6}$	38,100	6
3	B	\$54.70	$9.15 \times 10^{-6}$	33,300	5
4	B	\$52.60	$8.02 \times 10^{-6}$	39,200	6
5	B	\$57.50	$9.15 \times 10^{-6}$	34,300	5
6	C	\$67.70	$6.57 \times 10^{-6}$	65,600	5
7	C	\$67.30	$5.63 \times 10^{-6}$	65,700	5
8	C	\$71.00	$9.72 \times 10^{-6}$	60,500	4
9	C	\$70.60	$8.79 \times 10^{-6}$	60,600	4

Table 1에서 “B”그룹의 경로 3은 “A”그룹보다 9%정도 인구노출정도가 낮지만 사고율은 16% 높고 수송비용은 62% 높다.

이와 같은 결과를 통해 한 가지 확실한 것은 연관되는 것들을 주의 깊게 다루지 않고 인구노출을 최소화하는 것처럼 단일 목적을 수행하고자 하는 경우에는 그리 바람직하지 않다는 것이다. 이 예에서 대부분의 물질들에 대해서 인구노출을 최소화하면서 발생하는 사고율의 증가는 Table 1의 경로 5에서 보여주는 것처럼 좋은 Trade-off가 되지 못한다.

#### IV. 사례 연구

00시의 가스 충전소에서 보유하고 있는 15 Ton LPG 탱크로리(butane) 차량이 3가지 경로를 통해 목적지인 충전소까지 도달하는 과정 중 사고로 인해 탱크로리에 50mm의 hole이 발생하여 누출된 물질이 점화원에 의해서 화재 및 폭발이 발생하였다. 대기 조건은 풍속 4.2m/s, 풍향은 북풍으로 선정하였다.

본 연구에서는 피해 영향이 큰 VCE와 BLEVE에 초점을 두어 사고 영향 분석 모델을 통해 피해 영향을 분석하여 잠재위험 및

피해거리를 계산하고 인구 밀도를 고려한 위험성을 3가지 경로를 통해 묘사하였다. 선정된 사고시나리오에 대한 Discharge Modeling, Dispersion Modeling과 Effect Modeling은 DNV Technology에서 개발한 PHAST - Professional Ver. 6.0을, 빈도분석은 (주)아스프에서 개발한 Easy FTA 프로그램을 각각 이용하였다.

4.1 결과 분석

- 탱크로리 사고 발생 시 누출량 산출

온도	대기안정도	Butane (단위 : kg/s)
12	F	18.02

- 증기운 확산거리

온도	대기안정도	Butane (단위 : m)
12	F	101.415

- VCE 발생 시 피해 영향 거리  
Butane (풍속 : 4.2m/s) (단위 : m)

온도	대기안정도	Distance to : Blast effect at		
		0.02 bar	0.14 bar	0.21 bar
12	F	375.77	193.636	179.24

- Jet Fire 발생 시 피해 영향 거리  
Butane (풍속 : 4.2m/s) (단위 : m)

온도	대기안정도	Distance to : Blast effect at		
		4.0kw/m <sup>2</sup>	12.5kw/m <sup>2</sup>	37.5kw/m <sup>2</sup>
12	F	144.80	117.01	96.92

- BLEVE 발생 시 피해 영향 거리  
Butane (풍속 : 4.2m/s) (단위 : m)

온도	대기안정도	Distance to : Blast effect at		
		4.0kw/m <sup>2</sup>	12.5kw/m <sup>2</sup>	37.5kw/m <sup>2</sup>
12	F	190.55	107.44	55.96

4.2 위험성 분석

도심으로 진입하는 시점부터 충전소까지의 경로를 아래와 같이 선정하였다.

구간	출발지로부터 사고 발생 지점거리	총 거리	인구밀도 (명/km <sup>2</sup> )
I	1015 m	1187 m	29,561
II	447 m	793 m	43,707
III	556 m	755 m	26,936

빈도 분석은 고압가스통계와 교통안전공단의 통계자료에 따른 탱크로리 사고현황을 참조한 것이다.

- 탱크로리 1대당 교통사고 발생빈도  
 $\frac{5.7 \text{ (연평균 교통사고발생건수)}}{1031 \text{ (운행되는 탱크로리대수)}} = 5.53 \times 10^{-3}$

- 단위거리 당 사고발생빈도  
 $\frac{5.53 \times 10^{-3} \text{ (교통사고발생빈도)}}{205.5 \text{ km (1대당 일일주행거리)}} \times 365 \text{ 일} = 7.3 \times 10^{-3} \text{ 회/km}$

경로 I, II, III에 대한 사고 유형별 빈도분석 결과는 다음과 같다. Table 2는 각 사고 유형별 빈도분석 결과이다.

Table 2. 사고 유형별 빈도분석.

Incident Outcome Case	Frequency (×10 <sup>-3</sup> )		
	경로 I	경로 II	경로 III
Explosion	1.62	1.07	1.03
Fireball	3.23	2.18	2.09
VCE-early ignition	0.81	0.54	5.18
Flash fire-early ignition	1.64	1.09	1.04
VCE-intermediate ignition	0.49	0.33	0.31
Flash fire - intermediate ignition	0.98	0.65	0.63
VCE-late ignition	0.17	0.11	0.11
Flash fire - late ignition	0.32	0.22	0.21
Average of Individual Risk	1.16	0.78	0.74

- 경로 I (주행거리 : 134515.275 km/yr)  
 $7.3 \times 10^{-3} \times 134515.275 = 9.81 \times 10^{-3} \text{ (회/yr)}$

- 경로 II (주행거리 : 90017.395 km/yr)  
 $7.3 \times 10^{-3} \times 90017.395 = 6.57 \times 10^{-3} \text{ (회/yr)}$

- 경로Ⅲ (주행거리 : 85703.825 km/yr)  
 $7.3 \times 10^{-8} \times 85703.82 = 6.25 \times 10^{-3}$  (회/yr)

Fig. 5는 경로 Ⅲ에서의 부탄에 대한 위험성 평가(BLEVE)결과이다.

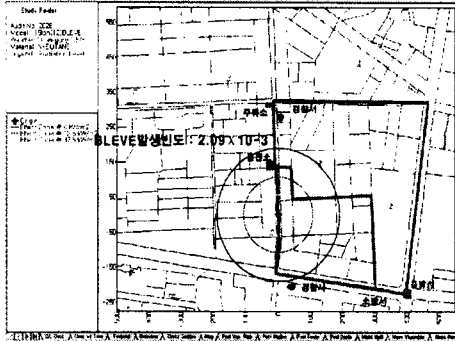


Fig 5. 부탄에 대한 위험성 평가(BLEVE).

다음은 사회적 위험성을 도출하기 위해 계산된 결과 값을 보여주고 있다.

BLEVE와 VCE 각각의 Probit 값을 백분율 전환표를 참조하였다.

- BLEVE

$$Pr = -14.9 + 2.56 \ln \left( \frac{t I^{4/3}}{10^4} \right)$$

- Thermal radiation(I) = 4 kw/m<sup>2</sup>
- 누출시간(t) = 100 s
- Probit(Pr) = 3.72
- 치사율 = 10 %
- 피해 영향 거리 = 190.55 m
- 사회적 위험성 분석 결과

구 분	I	II	III
인구밀도(명/km <sup>2</sup> )	29,561	43,707	26,936
피해범위 내 인구수(명)	3,371.9	4,985.6	3,027.2
Fatality(명)	337.2	498.6	307.2

- VCE

$$Y_{Eardrums}(Pr) = -15.6 + 1.93 \ln(21000 N/m^2)$$

- Overpressure = 0.21bar (21000N/m<sup>2</sup>)
- Probit = 3.61
- 고막이 파손될 확률 = 9 %
- 피해 영향 거리 = 179.24 m
- 사회적 위험성 분석 결과

구 분	I	II	III
인구밀도(명/km <sup>2</sup> )	29,561	43,707	26,936
피해범위 내 인구수(명)	2,983.6	4,411.3	2,718.6
Fatality(명)	268.5	396.99	244.6

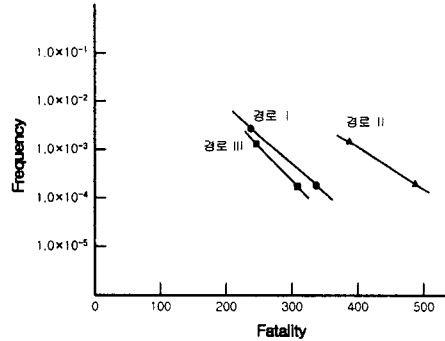


Fig 6. 부탄 탱크로리의 F-N Curves.

Fig. 6은 앞의 결과 값을 사용해 부탄 탱크로리에 따른 발생 가능한 사회적 위험성을 F-N Curves로 작성한 것이다. 단 VCE 치사율 계산 과정 중 치사율 값을 도출하여야 하지만 선정 범위가 제한되어 있으므로 Eardrums로 대체하여 계산하였다.

종합적으로 분석해보면,

- 경로 I

상가 밀집 지역으로 이동인구와 차량이동이 상당히 높은 지역이다. 수송 경로 또한 다른 경로에 비해 길며 사고 발생 빈도 또한  $9.81 \times 10^{-3}$ 으로 타 경로보다 높게 나타났다.

- 경로 II

주거 밀집 지역으로 다른 경로에 비해 인구 밀도가 가장 높으며 사고 발생 빈도는  $6.57 \times 10^{-3}$ 으로 나타났다. 그림 6에 나타난 것처럼 사회적 위험성 또한 가장 높게 나타났다.

- 경로 III

교통량은 다소 많지만 평균 인구 밀도보다 다른 지역보다 낮은 지역이다. 수송 경로 또한 다른 경로 보다 적으며 사고 발생 빈도가  $6.25 \times 10^{-3}$ 로 가장 낮은 사고율을 나타내고 있다. 또한 경찰서와 소방서와 인접해 있기 때문에

사고 발생에 따른 대응이 용이하므로 피해를 최소화 할 수 있다.

결과적으로 3가지 경로 중 경로 III으로 수송하는 것이 가장 바람직하다고 사료된다.

### V. 결 론

본 연구에서는 TRA 기법을 이용하여 위험물 수송 시 잠재위험을 확인하고 위험성을 평가함으로써 최적의 수송 경로 선정방법을 알아보고 이에 따른 물적·인적 피해 영향에 대한 안전성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제안한 위험물질 수송 시 위험성 평가에 따른 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 수송 시 TRA 방법을 고려하여 위험성을 표현, 최적의 경로를 제안하였으며, 수송 사고 발생의 예방에 대한 새로운 방향을 제안하였다.
2. 위험물질 수송에 따른 사고가능성 및 인적, 물적 피해 영향을 사전에 평가하는 모델 제시하였다.
3. 국내 위험물질에 대한 전반적인 수송 시 안전관리 방향 및 협력 프로그램을 개발할 수 있는 기반을 제공하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2002년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Loen N. Moses, *Transportation of Hazardous Materials Issues in Law, Social Science, and Engineering*, Kluwer Academic, (1993)
- [2] CCPS, *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis*, AIChE, New York, 1995.
- [3] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Analysis*, AIChE, New York, (1989)
- [4] EPA, *Guidelines on the Application of Refined Dispersion Models to Hazardous/Toxic Air Pollutant Release*, (1993)
- [5] 백 종배, 고 재욱, LPG 탱크로리 수송 중 위험성 평가에 관한 연구, 한국산업안전학회지, (1997)