



프로필렌의 철도 수송에 따른 정량적 위험성 평가

*이재현 · 송동우 · 이수경

서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지안전공학과
(2009년 7월 27일 접수, 10월 28일 수정 2010년 10월 28일 채택)

The Quantitative Risk Analysis in Rail Transport of Propylene

*Jae-Hean Lee · Dong-Woo Song · Su-Kyung Lee

Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received 27. July. 2009, Revised 28. October. 2010, Accepted 28. October. 2010)

요 약

본 논문은 철도를 통해 운송되는 프로필렌의 사고위험을 정량적으로 분석하였다. 프로필렌의 수송 경로에 따라 사고 시 피해 위험이 높을 것으로 예상되는 지역인 익산역, 순천역, 전주역으로 대상지역을 선정하였다. 프로필렌의 운송 중 일어날 수 있는 사고유형을 고려한 후 ETA(Event Tree Analysis)를 이용하여 사고시나리오 및 발생빈도를 도출하였고, PHAST 6.53(Process Hazard Analysis Software Tool)을 이용하여 사고피해예측 평가 실시하여 주변에 미치는 피해정도를 산정함으로써 개인적·사회적 위험성정도를 제시하였다.

Abstract - This treatise analyzed the risk of propylene transported by railroad through quantitative analysis. As a result of survey on propylene transportation route, Iksan station, Suncheon station and Jeonju station were selected as object regions those were expected to have high accident risks. This treatise deduced the scenario of accident and the occurrence rate in accordance with the type of accident possibly to be happening during propylene transportation through ETA(Event Tree Analysis), and expressed the level of personal, social risks after calculating the level of damage influencing over surroundings based on the evaluation for the expected accident damage through PHAST 6.53.

Key words : Quantitative Risk Analysis, Hazardous Materials, Propylene, Individual Risk, Societal Risk

I. 서 론

선진국의 경우 철도를 이용한 위험물질의 수송은 경제 발전과 비례하여 그 수송량이 꾸준히 증가하여 왔다. 그리고 국내의 경우 열차가 대단위 주택가나 아파트 근처를 통과하는 경우가 많아 상대적으로 더 큰 위험에 노출되어 있어 충분한 대비를 필요로 한다.

철도위험물 수송의 위험성을 파악하고 이를 정량적인 수치로 표현하여 위험을 예방할 수 있는 지속적인 관리가 필요하다. 하지만 현재까지 국내에서는 위험도 평가를 하기 위한 기초자료가 미비한 것이 현실이다. 그 이유는 사고 보고에 대한 법

적 근거가 없으며, 사고 자료는 체계적인 DB관리가 수행되고 있지 않기 때문이다.

따라서, 본 논문에서는 철도운송취급주의 위험물인 프로필렌 수송에 대해 사고유발인자 및 유형, 수송경로, 인구밀도 등의 사전조사를 토대로 사고시나리오 작성, 사고 빈도 도출, 사고피해영향평가를 수행하여 정량적인 위험성을 도출하여 프로필렌 수송의 위험성을 파악하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1. 평균 개인적 위험

노출 인구 평균 개인 위험(Average Individual Risk, exposed population)을 결정하기 위해서는 적어도 한 개 이상의 사고결과에 노출되는 인구에

*주저자:

대한 결정이 필요하다. 즉, 위험 등가선 안 쪽의 각 지점에 위치하는 총 인구수가 반드시 결정되어야 한다. 이때, 노출 인구 평균 개인 위험은 다음 식에 의하여 결정된다.

$$IR_{AV} = \frac{\sum_{x,y} IR_{x,y} P_{x,y}}{\sum_{x,y} P_{x,y}}$$

- IR_{AV} : 노출인원의 평균개인의 위험(/year)
- IR_{x,y} : 좌표 x,y상에서 노출된 개인의 위험
- P_{xy} : 좌표 x,y상에서 노출된 사람수

실질적으로 노출되는 인원에 대한 개인의 위험을 나타내는 척도로서, 위험에 노출되는 총 인원수를 나누어 줌으로써 표현한다.

2.2 사회적 위험

일반적으로 사회적 위험(Societal Risk)의 기준은 사고로 한번에 다수가 사망할 수 있는 위험에 대하여 사회적으로 수용할 수 있는 기준을 제시한다.

허용불가(Unacceptable)영역은 수용할 수 없는 위험을 나타내며, ALARP(As Low As Responsible Practicable)영역은 수용은 할 수 있으나 위험이 크므로 위험을 경감시키기 위한 노력을 기울여야 하며, 허용(Acceptable)영역은 위험을 수용할 수 있으므로 위험경감을 위한 특별한 조치를 취하지 않아도 무방한 영역으로 판정한다. 본 연구에서 사회적 위험 판정기준은 1991년 영국 산업안전보건청 ACDS의 기준으로 적용한다.

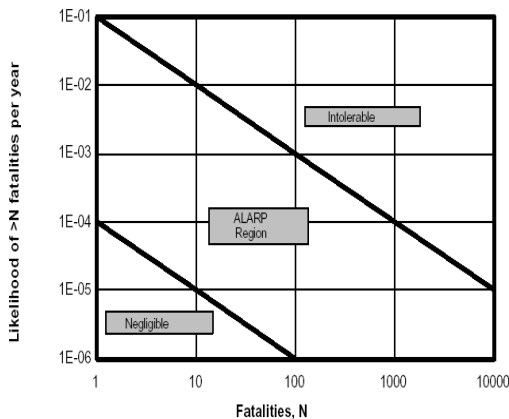


Fig. 1. Societal Risk Criteria(ACDS).

III. 사고시나리오 및 사고빈도분석

3.1. 누출사고 유발인자 및 유형

탱크화차의 운송 중 누출사고 유발인자는 두 가지로 크게 분류될 수 있다. 첫째는 외부충격에 기인된 것과 둘째는 탱크자체의 결함에 의한 것이다.

그리고 누출 후 사고의 유형은 피해 없음, 제트화재(Jet Fire), 액면화재(Pool Fire), BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), 증기운 폭발(UVCE) 및 FLASH 화재(Flash Fire)가 발생할 수 있고, 이렇게 발생한 누출사고는 가스상과 액체상 누출에 따라 그 흐름을 달리한다.

점화원의 조건은 즉시 점화와 지연점화가 있으며, 즉시 점화가 발생할 수 있다. 이러한 점화원이 유형에 따른 사고유형은 ETA분석에서 다루고 있다.

3.2. ETA에 의한 사고시나리오 작성 및 빈도 분석

시나리오를 작성하기 위해서 ETA(Event Tree Analysis)기법을 사용하였다.

Fig. 2는 ETA에 의한 프로필렌 누출사고에 대한 사고시나리오를 ETA로 도출한 것이며 초기누출사고빈도 및 중간사건에 의한 빈도값은 다음에 제시한다.

가. 초기누출사고빈도

초기누출사고빈도는 먼저 국내 철도청 사고통계를 통하여 기존의 국내 화차 운행에서 발생할 수 있는 탈선 및 충돌사고의 빈도를 산정한다. 이후 현재 운송구간의 운행 특성을 반영하여 이에 대한 조건부 확률을 분석·적용하며, 이를 통하여 초기 누출 사고가 발생할 수 있는 빈도를 도출하였다.

Table 1은 유형별 사고발생 빈도를 나타낸 것으로 화물열차의 운행 사고 빈도는 각각 독립 사건인 충돌/접촉, 탈선, 건널목에서 차 대 열차 사고의 사고 발생빈도의 합으로서, 사고발생확률은 1.15E-08/km·year 이었다[1].

Table 1. Occurrence ratio of accidents by type.

유형	모집단 사고빈도	화물차량 키로비율	사고비율	유형별 사고빈도
충돌/접촉	5.29E-07	0.25	0.001	4.80E-10
탈선			0.007	3.64E-09
건널목			0.014	7.41E-09
합 계				1.15E-08

Event	누출크기	즉시점화	안전변적동성공	ERP Action성공	지연점화	사고결과	Probability	Modified Probability	
초기누출발생 9.20E-10	대규모누출 Yes (0.0384)	Yes (0.2)		Yes (0.9948)		Flash Fire	7.64E-03	7.03E-12	
				No (0.0052)		BLEVE	3.99E-05	3.67E-14	
		No (0.8)		Yes (0.9948)	Yes (0.7)	Pool fire	2.14E-02	1.97E-11	
				No (0.0052)	No (0.3)	Safe	9.17E-03	8.43E-12	
		Yes (0.2)		Yes (0.9996)	Yes (0.7)	UVCE	1.12E-04	1.03E-13	
				No (0.0004)	No (0.3)	Safe	4.79E-05	4.41E-14	
	No (0.0416)	소규모누출	Yes (0.2)	Yes (0.9948)	Yes (0.7)	Flash Fire	8.32E-03	7.65E-12	
				No (0.0052)	No (0.3)	Jet Fire	3.31E-06	3.05E-15	
	No (0.92)	누출하지 않음	No (0.8)	Yes (0.9948)	Yes (0.7)	Flash Fire	2.32E-02	2.13E-11	
				No (0.0052)	No (0.3)	Safe	9.93E-03	9.14E-12	
							UVCE	1.21E-04	1.11E-13
							Safe	5.19E-05	4.78E-14
							Safe	9.20E-01	8.46E-10
							계		9.20E-10

Fig. 2. Accident scenarios and frequency by ETA.

탈선 또는 이로 인한 충돌 시 사고로 인한 탱크 내부의 누출확률은 속도와 저장방식에 밀접한 관련이 있다. 현재 국내 사고통계로써는 탈선 또는 충돌 후 사고빈도를 산출할 수 없기 때문에 DOT FRA자료로 HAZMAT에 보고된 사고 보고에 의해 정리된 자료를 사용하였다[2]. 저장방식별로 볼 때 압력탱크와 대기압탱크로 구분하며, 압력탱크의 경우 누출이 발생할 확률은 총 충돌 및 탈선 사고 중 8%(0.08)이다.

이에 사고빈도의 합과 압력탱크의 누출 발생 확률의 곱으로 9.2E-10이라는 초기누출사고빈도를 도출하였다.

나. 누출크기

Table 2은 탈선 및 충돌 사고 시 발생할 수 있는 탱크부위별 누출 비율을 나타낸다.

누출구의 크기를 보면 상부 부속류(Top fitting) 등에서는 소규모누출로 가정하였으며, 탱크 셸(Tank shell) 등에서는 대규모누출로 가정하여 누출 크기를 결정하였다. 그 결과 소규모누출은 0.52, 대규모누출은 0.48의 확률을 가진다. Table 25에서 합계가 115%로 나온 이유는 충돌 또는 탈선 시 사고 부위가 한군데만으로 국한되지 않기 때문이다.

철도이송 주요위험물질 중 액화프로필렌은 압력탱크를 사용하여 이송되며 위의 자료를 기준으로 하여 누출가능성과 누출구의 크기를 결정하면 Table 3과 같은 결과 값을 도출할 수 있다.

Table 2. Distribution of accident-caused releases[3].

구분		백분율
Top Fitting	PRD	23.4
	Manway	16.1
	Other fitting	6.2
	Liquid Line	6.2
	소계	52
Bottom Fitting		16
Tank Head		19
Tank Shell		28
계		115

Table 3. Release probability type of tank.

분류	압력탱크의 누출확률
대규모 누출	0.0384
소규모 누출	0.0416
누출하지 않음	0.92

다. 점화 가능성

액화 프로필렌 가스의 누출 시 점화가능성은 누출량에 따라 누출 즉시 점화가 발생할 것인지, 누출 후 지연점화가 발생할지, 내지는 점화가 발생치 아니하고 대기 중으로 확산할 지 여부는 매우 중요한 요소가 되고 있다. 현재 이러한 사실을 근거로 제시되어 있는 자료 중 액화프로필렌에 가장 근접한 LPG철도차량 누출 시 점화될 가능성은 Table 4와 같다.

하지만 지역별로 인구가 많이 살고 있는 지역과 살지 않는 지역 간에는 점화가능성이 다르게 나타날 것이다. Table 5는 영국 안전 보건청에서 제시하는 사람 거주에 따른 점화가능성에 대한 조건부 확률을 나타낸다.

사람이 거주하는 장소에서의 조건부 확률은 0.7, 거주하지 않는 장소의 경우 0.2 점화가 발생치 않을 확률은 0.1이 된다. 따라서 본 연구에서의 위험성 평가 대상지역이 인구 밀집 지역이므로 누출 시 점화될 가능성은 다음 Table 6 과 같이 적용한다.

라. 밸브차단

유량에 의해 작동하는 차단밸브의 오작동 확률은 1000번의 작동요구 당 최소 0.306건에서 최대 6.62건

Table 4. Ignition probabilities for LPG by Rail[2].

구분	점화유형		
	즉시점화	지연점화	점화 없음
소량누출	0.1	0	0.9
대량누출	0.2	0.1	0.7

Table 5. Delayed ignition probabilities[4].

인구조건	조건부 확률
사람이 거주하는 장소	0.7
사람이 거주하지 않는 장소	0.2
점화가 발생치 않음	0.1

Table 6. Applied ignition probabilities.

구분	점화유형		
	즉시점화	지연점화	점화 없음
성공	0.2	0.7	0.1
실패	0.8	0.3	0.9

의 고장빈도를 나타낸다. 이에 대한 평균값은 2.2건으로써 이 수치를 적용하였다[5].

2.2E-03/d의 고장률은 사고발생 1000건당 오작동으로 인하여 차단할 수 없음을 의미한다. 사고 발생 시 두 개의 밸브가 작동하여야 하므로 오작동 확률은 4.4E-03/d가 된다. 따라서 사고발생당 밸브가 작동치 않을 확률은 0.0044며, 성공할 확률은 0.9956이 된다.

마. 안전변 작동

압력에 의해 작동하는 안전변의 오작동 확률은 1000번의 작동요구당 최소 0.0079건 에서 최대 0.798건의 고장빈도를 나타낸다. 이에 대한 평균값은 0.212건으로써 이 수치를 적용하였다[5].

2.12E-04/d의 고장률은 사고발생 1000건당 오작동으로 인하여 작동하지 않음을 의미한다. 사고 발생 시 두 개의 밸브가 작동하여야 하므로 오작동 확률은 4.24E-04/d가 된다.

따라서 사고발생 당 밸브가 작동치 않을 확률은 0.000424며, 성공할 확률은 0.999576이 된다.

바. ERP Action의 성공

ERP Action의 성공 여부는 수송근무자와 호송인의 역할과 이후에 수행하는 비상대응팀의 역할에 의해 좌우된다.

먼저 수송근무자와 호송인의 정상적 역할 수행을 위해 운전사고 발생 시 사망가능성을 추론하여야 하며, 이를 위해서는 열차사고당 몇%의 인명피해가 발생하는 지에 대한 여부를 판단하여야 한다. 1993년에서 2003년까지의 철도운전사고 중 발생한 여객 인명피해 및 사고건수와 건당 인명피해를 통해 확률을 도출한다. 실질적인 정확도를 높이기 위해서는 화물사고 대비 인명피해를 산출하여야 하나 이에 대한 자료는 분류상 제시된 바 없으므로 여객사고의 통계로 같음하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{인명피해확률} &= \frac{[\text{건당 피해인원}]}{[\text{회당 평균 운송인원수}]} \\
 &= 4/790 \\
 &= 0.00506
 \end{aligned}$$

통계를 분석한 결과 승무원이나 호송인이 1회 사고 당 직접적인 인명피해를 입을 수 있는 확률은 0.00506이다[6]. 반대로 인명피해를 입지 않고 역할을 수행할 수 있는 조건에 대한 가능성은 0.99494이다. 여기서 다시 사고 시 개인이 가지는 스트레스로 인하여 패닉과 같은 상황이 발생하였을 때 주어진 직무를 망각하는 행동을 할 수가 있다. 인간이 최대의 스트레스로 10분 이내에 하나의 행동을 결정할 때의

Table 7. Summary of probabilities.

구분	누출	접화가능성		안전변 작동	ERP Action
		인구밀집			
	압력탱크	즉시 접화	지연 접화		
성공	0.08	0.2	0.7	0.9996	0.9948
실패	0.92	0.8	0.3	0.0004	0.0052

실패가능성은 0.1이다.

현재 기관사2인, 차장1인, 그리고 호송인 1인이 운송에 참여하고 있으므로 4명의 사람이 동시에 실패할 확률은 0.0001로 주었다. 따라서 승무원이 피해를 입지 않는 조건과 동시에 직무를 수행할 수 있는 가능성은 0.9948을 적용한다.

Table 7은 각각의 중간사건에 대한 성공과 실패에 관여하는 기대 값을 정리하여 나타내었다.

IV. 사고영향평가 모델링

4.1 피해기준

4.1.1 Thermal Radiation Effect

본 연구에서는 복사열 영향을 감안하여 12.5kW/m², 25 kW/m²에 대하여 분석하였다. 12.5kW/m²의 복사열에 노출될 경우 1분내 1%의 사람이 사망할 수 있으며, 25kW/m²의 복사열에 노출될 경우에는 1분내 100% 사망에 도달하는 것으로 가정하였다[7].

4.1.2 Pressure Effect

폭발압력에 의한 인명피해 기준에서 제시하고 있는 2.5Psi와, 15.5Psi에 대해서 적용하며, 2.5Psi의 경우 1%사망, 15.5Psi의 경우 100% 사망으로 적용한다[7].

4.2 사고피해영향평가 결과

본 연구에서 사고피해영향을 평가하기 위해서 PHAST 6.53(Process Hazard Analysis Software Tool)를 사용하였다.

시뮬레이션 구동 결과, 프로필렌 수송탱크가 catastrophic rupture로 대규모 누출이 되었을 때 발생 가능한 사고의 유형은 BLEVE와 Explosion이며, 이에 대한 피해 범위를 Fig. 3과 Fig. 4에서 보여주고 있다. 또한 탱크에서 프로필렌이 소규모로 누출될 때, 발생 가능한 사고의 유형은 Jet Fire와 Explosion이며, Fig. 5에서 복사열로 인한 피해범위와 Fig. 6

Table 8. Consequences of possible accident releases

누출크기	시나리오	면적 (km ²)		영향거리 (m)	
		1% 사망	100%사망	1% 사망	100%사망
대규모누출	BLEVE	0.2863	0.1017	302	180
	Explosion	0.1051	0.0066	183	46
소규모 누출	Jet Fire	0.0095	0.0079	55	50
	Explosion	0.0088	0.0011	53	19

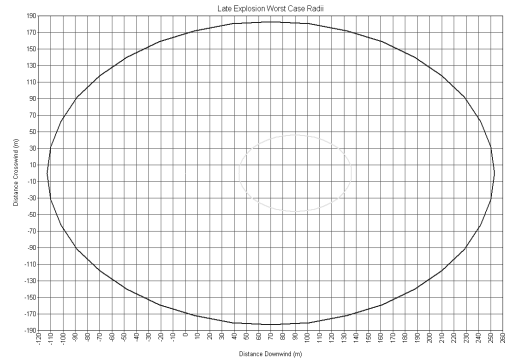


Fig. 3. Overpressure Radius of BLEVE on the catastrophic rupture of propylene.

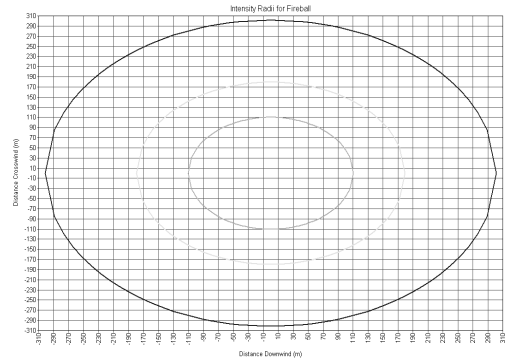


Fig. 4. Overpressure Radius of Explosion on the catastrophic rupture of propylene.

에서 과압에 의한 피해 범위를 나타내었다.

다음 Table 8은 피해예측 프로그램을 이용하여 모사한 결과를 시나리오 별로 피해 면적과 영향거리를 나타낸다.

프로필렌의 철도 수송에 따른 정량적 위험성 평가

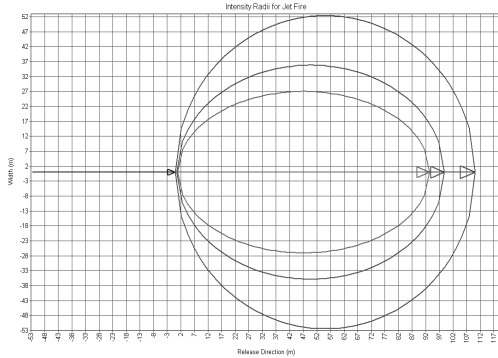


Fig. 5. Radiation of Jet fire on the Leak of propylene.

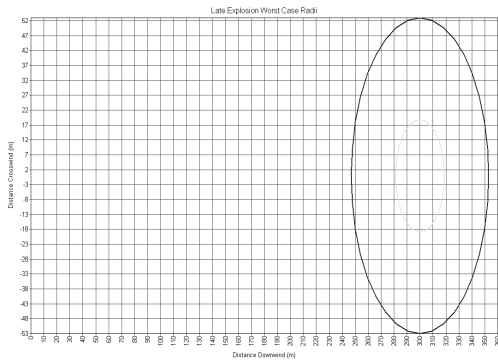


Fig. 6. Overpressure Radius of Explosion on the Leak of propylene.

V. 위험의 표현

5.1 개인적 위험

개인적 위험은 사고피해영향 평가를 통해 얻은 시나리오 별 피해범위 내의 위험성을 운송거리, 인구밀도, 사고빈도를 통하여 도출하였다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 익산역, 순천역, 전주역의 거리에 따른 개인적 위험도를 지도상에 표현한 것이다.

익산역, 순천역, 전주역의 평균 개인 위험은 각각의 역의 예상 피해 총 인원수(익산역 : 320.4명, 순천역 : 152.3명, 전주역 : 1300명)로 나누어 줌으로써 산출한다. 각 지역의 도출된 평균 개인 위험은 익산역 6.52E-08/year, 순천역 1.55E-08/year, 전주역 6.5E-08/year로 나타났다. 도출된 개인의 전체 평균위험수준은 판정 기준값인 1.0E-06/year보다

Table 9. Population Density & Transport Distance for each Area.

지역	인구밀도 (인/km ²)	운송거리 (km)
		익산
순천	289	14,527
전주	2,466	58,218



Fig. 7. Risk contour of Individual Risk on Iksan station

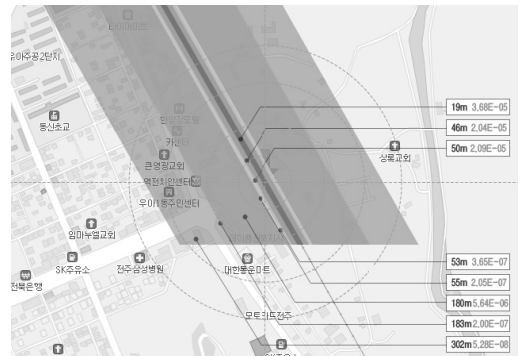


Fig. 8. Risk contour of Individual Risk on Suncheon station
낮아 안전한 것으로 판단된다.

5.2 사회적 위험

프로필렌이 운송되는 3개 역사에 대한 Societal Risk를 분석하였으며 각 역사별 분석결과와 Fig. 10과 같다. 세로축은 화재나 폭발등으로 인한 인명사고가 발생할 수 있는 모든 사건의 누적빈도를 나타내고 있으며, 가로축은 사망예상인수를 나타낸다. 본 연구에서 사회적 위험판정기준은 1991년 영국

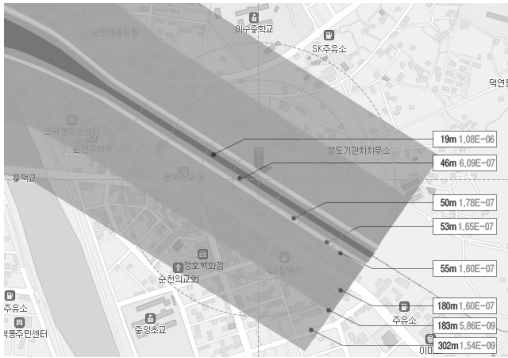


Fig. 9. Risk contour of Individual Risk on Jeonju station

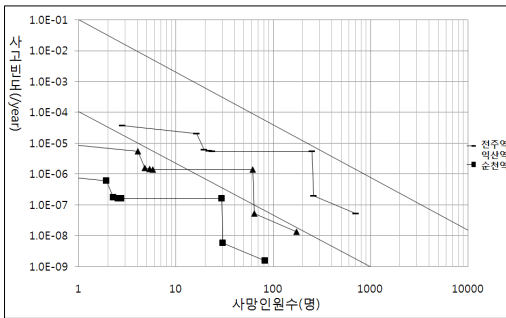


Fig. 10. Total societal risk.

산업안전보건청 ACDS의 기준으로 적용한다[4]. 사회적위험 표현 결과, 전주역이나 익산역이 ALARP 영역에 포함되는 것을 확인할 수 있었다.

VI. 결론

본 연구에서는 프로필렌 수송 시 발생할 수 있는 사고모드를 분류하고, 이를 근거로 프로필렌의 운

행노선에 따른 위험을 정량적으로 평가하여 제시 해보았다. 그 결과 피해 위험이 높을 것으로 생각되는 주요 역의 개인적 위험은 안전한 수치를 나타내고 있었으나 사회적 위험의 경우에는 위험감대책을 요구하는 (ALARP)범위 내에 포함되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

전주역이나 익산역과 같이 인구밀도가 높고 운행 중 정차시간이 긴 지역을 통과하는 위험물의 철도운송에 있어서는 사고발생 시 막대한 인명, 재산 및 환경피해를 야기 시킬 수 있는 우려를 내포하고 있다. 철도 위험물 수송사고는 초기 대응이 어려울 뿐만 아니라 지리적으로도 접근이 용이하지 않은 경우가 많으므로 이에 대비한 사고 자료의 체계적인 분석 및 DB관리를 통해 사고의 대처 및 예방 활동을 강화하여 위에서 언급된 위험에 대비한 충분한 대비가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] “철도사고통계연보”, 철도청 (1985~2005)
- [2] AIChE/CCPS. “Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis”, New York, (1995)
- [3] “Ensuring Tank Car Safety”, Federal Railroad Administration(FRA), Washington, D.C. (1996)
- [4] “Advisory Committee on Dangerous Substances (ACDS)”, HSE, UK, (2004)
- [5] AIChE/CCPS., “Guidelines for Process Equipment Reliability Data”, New York, (1989)
- [6] A.D. Swain, & H.E. Guttman, “HandBook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application”, (1983)
- [7] “Use of Tank Car”, 49 CFR part 173.31, Department of Transportation(DOT), US, (2002)