

도로터널 방재시스템 개발

- 자연환기를 수행하는 중규모 도로터널의 정량적 위험도평가관한 연구 -

유 지 오, 신 현 준, 김 종 원

신흥대학 건축설비디자인과, 한국건설기술연구원,(주)범창종합기술

Development of safety system for Road Tunnel

- The study of Quantitative risk assessment for middle scale road tunnel with natural ventilation system -

Yoo Jioh, Shin Hyunjun, Kim Jongwon

*Dept. of Building Mech Eng., Shin Heung collage, Euijungbu, Kyunggi, 117
Korea Institute construction technology, Ilsan, Kyunggi
Bumchang Engineering Co. Ltd.*

Abstract : As a part of the project on road tunnel fire safety system development, Quantitative Risk Assessment program was developed. In this study, We carried out Quantitative Risk Assessment with this program by using a factor of cross passage interval, warning announcement time and congestion ratio etc for 1km tunnel with natural ventilation. In the case of 250m below of cross passage interval, Risk value due to warning announcement time was a slightly changed. but if cross passage interval is more than 250m, expected fatalities in the same HRR(heat release rate) was sharp increased. As a result, Quantitative Risk Assessment program which was developed in this research project is possible to risk assessment with ventilation type, cross passage for evacuation and detection system response property etc. hereafter, this program look forward to use as a tool for road tunnel performance based design.

Key Words : Tunnel fire safety, Risk Assessment, Cross Passage interval

1. 서 론

도로터널은 구조상 화재시 연기의 배연이 제한적이기 때문에 터널내 화재안전대책을 수립하고 기준을 정립하여 이에 따른 방재시설을 설치하고 있다. 그러나 현재까지 터널에 대한 방재시설의 설치 및 설계는 여타 다른 소방시설과 마찬가지로 강제성을 갖는 규제나 법규에 의한 것이었다.

최근 유럽을 중심으로 터널의 방재시설에 대한 위험기반의 성능위주설계가 도입되기 시작하였으

며, 성능설계를 위한 정량화된 지표를 제시하기 위한 정량적이 위험도 평가기법의 개발되고 있다.

현재 국내의 도로터널 설계시 위험도 평가는 화재모델 해석을 통하여 화재연기의 확산속도와 simulex등 피난전용모델에 의한 피난시간해석결과를 비교하여 승객이 안전지역으로 탈출하는데 요구되는 시간(RSET : Required Safe Egress Time)이 화재연기의 확산시간(ASET : Available Safe Egress Time)을 초과하는지 여부로 안전성 여부를 평가하고 있다. 그러나 이 경우 화재에서 발생하는 유해가스의 영향(사망)이 RSET이

Corresponding author

Tel.:+82-31-870-3611; fax:82-31-870-3619

Email address : jolew@shc.ac.kr

ASET을 초과하는 순간에 바로 나타난다는 오류를 가지고 있다고 볼 수 있으며, 대피시뮬레이션에서는 대피결정시간이나 연기에 의한 가시거리 저하에 따른 대피속도의 감소를 반영하지 못하는 오류를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 화재 해석의 연기농도해석결과에 따른 대피속도의 감소를 고려하는 대피해석과 대피자의 위치에 따른 유해가스농도 해석결과를 고려하여 유해가스에 대한 유효복용분량(FED : Fractional Effective Dose)을 해석함으로써 유해가스 및 열환경이 대피자에 미치는 영향을 정량적으로 계산하여 사상자수를 추정할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 개발된 프로그램의 적용성 및 도로터널의 정량적 위험도에 대한 평가를 목표로 한다. 이에 1.0 km의 터널을 대상으로 화재강도, 기류의 영향, 정체빈도, 피난연결통로의 간격, 경고방송시간, 환기방식(자연환기, 기계환기)에 따른 화재발생시나리오를 작성하고 각각에 대한 사상자수를 추정하고 F/N(Frequency and Number of Fatalities)선도를 작성하여 국내에 알려진 사회적 위험도와 비교·검토하였다. 또한 위험도평가 결과를 통해서 현 방재시설설치지침을 적용하는 경우에 적정 사회적 위험도 평가기준을 제시

하였다.

2. 터널제원 및 화재발생시나리오

위험도평가 대상터널은 표 1에 나타났다.

화재발생 시나리오는 유에 의해서 제시된 기본 시나리오를 적용하였으며, 자연환기시에는 터널내 풍속제어가 불가능하므로 자연풍의 영향을 고려하기 위해서 화재전 풍속이 순풍, 역풍, 0 m/s 인 경우를 가정하여 작성하였다. 정체빈도 및 역풍의 발생빈도는 개별터널별로 적용하여야 하나 본 연구에서는 사패산 및 거제터널에서의 추정치를 적용하여 0.18%, 2%로 하였으며, 역풍(0 m/s 포함)은 0.18%(사패산터널 추정)와 하향경사를 고려하여 50%를 적용하였다.

3. 자연환기시 정량적 위험도평가

3.1 발생빈도 및 회귀기간분석

표 3은 자연환기시 시나리오별 발생빈도 및 회귀기간(return year)을 나타낸 것이다.

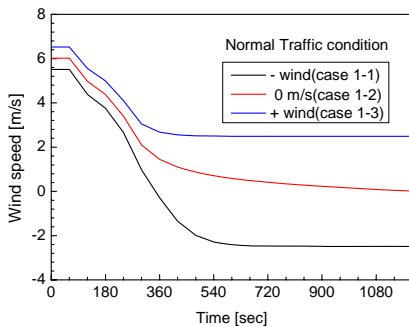
표에 의하면 본 터널의 경우, 일반사고는 8.99건/년, 화재사고는 0.468건/년이 발생하는 것으로 예상되며, 화재사고중 승용차 화재사고는 0.169건/년으로 5.9마다 1건 정도가 발생하며, 화물차량

표 1 위험도 평가대상 터널 제원

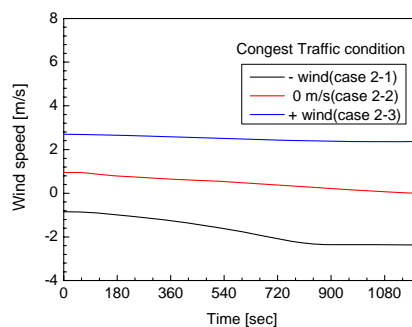
연장	1,000 m미만		단면적	73.02m ²				
교통량			높이	7.3 m				
구분	승용	버스		트럭			합계	
		소형	대형	소형	중형	대형	특수	
교통량	30242	1604	1463	3616	3591	1395	400	42311
혼입율	71.5	3.8	3.5	8.5	8.5	3.3	0.9	100

표 2 위험도평가조건

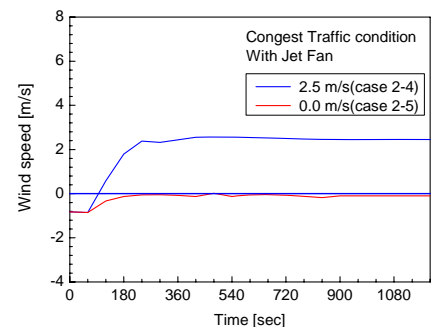
교통 조건	풍속 조건	풍속변화		
		초기풍속	최종풍속	적용풍속분포
정상 주행	역풍	54	-25	case 1-1
	0	60	0.0	case 1-2
	순풍	64	25	case 1-3
정체	역풍	26	25	case 2-1
	0	1.0	0.0	case 2-2
	순풍	-0.9	-25	case 2-3



(a) 정상주행시 풍속변화



(b) 정체시 풍속변화



(c) 정체시 기계환기기에 의해서 제연하는 경우

그림 1 화재시 풍속변화

표 3 시나리오별 사고발생빈도 및 회귀기간

구 분	사고 발생확률 (건/1억Vehk m)	Freq. 1/Yr	Return Year
일반교통사고 (traffic Accidents)	40.38	9.35E+00	0.107
충돌 등(95%) (collision등)	38.36	8.89E+00	0.11
화재사고(5%)	2.02	4.68E-01	2.1
승용차	1.02	1.69E-01	5.9
버스&화물차	3.57	2.36E-01	4.2

에 의한 화재사고는 0.236건/년으로 4.2년 마다 1건 정도가 발생하는 것으로 예측된다.

3.2 각 시나리오별 사상자수 추정결과

3.2.1 정상주행시

표 4는 정상주행시 증가사상자수에 의한 예상 사상자수를 나타낸 것이다. 이 경우, 대피인원은 약 504명 정도이며, 피난연결통로 간격이 400 m인 경우에 터널연장은 800 m로 하여 계산한 경우이다.

이 경우, 설계화재강도(20MW)에서는 피난연결통로의 간격이 400m이상인 경우에 역풍이 작용하는 조건에서 사상자가 발생하는 것으로 예상되며, 화재강도가 30MW인 경우에는 피난연결통로의 간격이 333 m일때 역풍이 부는 조건에서 사상자가 발생할 것으로 예측된다.

특히, 화재강도가 100 MW인 경우에는 피난연결통로의 간격이 200 m일지라고 사상자가 발생하는 것으로 예상되며, 피난연결통로의 간격이 증가할수록 예상되는 사상자수가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2.2 정체시

표 5는 화재전 차량이 완전히 정체된 상태일 때 예상사상자를 나타낸 것이다. 설계화재강도(20MW)에서는 피난연결통로의 간격이 250 m이하인 경우에는 사상자가 발생하지 않는 것으로 예상되나, 피난연결통로 간격이 333 m로 증가하면 설계화재강도를 적용하는 경우에도 사상자가 발생하는 것으로 추정된다.

이 경우에도 화재강도가 증가하고 피난연결통로의 간격이 증가하면 사상자수가 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

이상의 고찰에서 설계화재강도를 적용하는 경우에는 피난연결통로의 간격은 250 m정도로 하는 것이 적절한 것으로 평가된다.

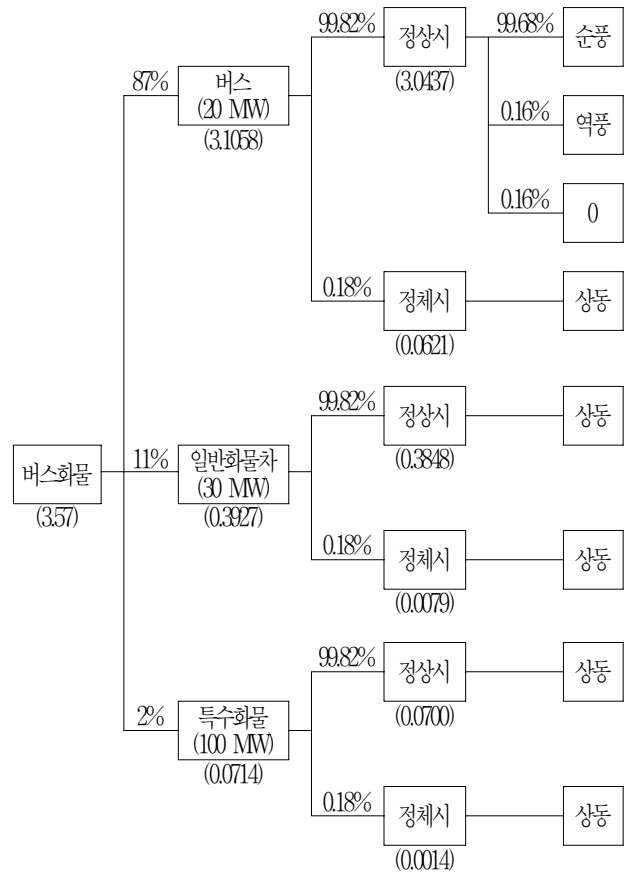


그림 2 자연환기시 화물차 화재발생 시나리오

3.3 사회적 위험도 평가

그림 4,5는 경고방송시간에 따른 F/N선도 및 사회적위험도 평가기준을 나타낸 것이다.

또한 식(1)로 표현되는 RI(Risk Index, Expected value)를 정리하면 표 6에 나타낸 바와 같다. RI는 주어진 사건에 대한 기대치로 Melcher는 일반도로에서의 위험도(RI)를 2×10^{-4} (1/yr)정도로 제시하고 있다.

$$RI = \sum f_i \cdot N_i \quad (1)$$

여기서, f_i : I사건(Events)의 발생빈도(1/yr)이며, N_i : 사건의 결과로 증가사망수이다.

그림 및 표에서 알 수 있는 바와 같이 피난연결통로의 간격이 200 m인 경우에는 경고방송시간 등 외부적인 인자영향을 거의 받지 않으며, 특히 기계환기를 적용하는 경우에도 위험도감소효과가 거의 없는 것으로 평가된다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 경고방송시간을 120초로 가정하는 경우, OECD 및 영국의 HSE기준을 적용하면, 피난연결통로의 간격이 500 m인 경우에도 ALARP영역을 만족하는 것으로

표 4 예상사망자수 예측결과(정상주행시)

화재 강도 (MW)	풍향	발생빈도	회귀기간	피난연결통로 간격에 따른 예상사망자수				
				200	250	333	400	500
				20	순풍	3.71E-02	27	0
	역풍	1.86E-02	54	0	0	0	2	28
	0	1.86E-02	54	0	0	0	0	0
30	순풍	3.50E-03	286	0	0	0	0	1
	역풍	1.75E-03	571	0	0	3	15	130
	0	1.75E-03	571	0	0	0	0	0
100	순풍	5.11E-05	19,578	1	1	1	1	1
	역풍	2.55E-05	39,155	1	31	1345	216	292
	0	2.55E-05	39,155	1	1	1	1	1

표 5 예상사망자수 예측결과(정상주행시)

화재 강도 (MW)	풍향	발생빈도	회귀기간	피난연결통로 간격에 따른 예상사망자수				
				200	250	333	400	500
				20	순풍	7.58E-03	1320	0
	역풍	3.79E-04	2640	0	0	25	9	105
	0	3.79E-04	2640	0	0	1	3	18
30	순풍	7.15E-05	13993	0	2	19	60	180
	역풍	3.57E-05	27985	0	0	45	50	176
	0	3.57E-05	27985	0	1	22	51	80
100	순풍	9.38E-07	106583	205	80	1585	200	323
	역풍	4.69E-07	213177	45	63	192	244	303
	0	4.69E-07	213177	145	68	179	245	293

로 나타나고 있다.

또한 PHI기준을 적용하는 경우에는 경고방송시간을 120초로 가정하는 경우에는 333 m까지, 180초를 적용하는 경우에 200 m인 경우에 ALARP 영역을 만족하는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 안전설계에 대한 만족여부를 OECD기준 적용하

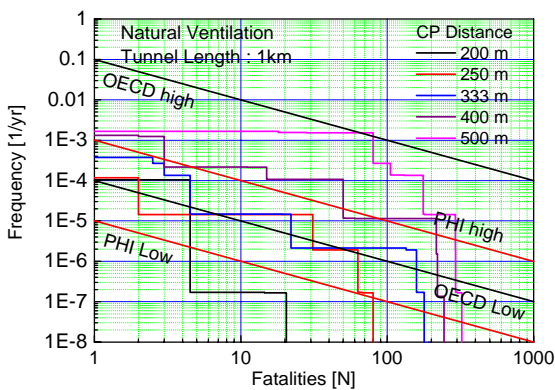


그림 3 화재발생후 120초에 경고방송을 하는 경우 F/N선도 및 사회적 위험도 평가기준

표 6 화재발생 시나리오에 따른 Risk Index(RI)

대피거리	정체빈도(0.18%)		정체빈도(20%)	
	역풍빈도(3.2%)	역풍빈도(50%)	역풍빈도(0.32%)	역풍빈도(50%)
200	1.07E-4	1.07E-4	1.40E-4	1.30E-4
250	1.95E-4	9.13E-4	4.38E-4	1.18E-3
333	1.30E-3	9.45E-3	5.58E-3	1.46E-2
400	5.68E-3	5.77E-2	1.86E-2	7.22E-2
500	6.59E-2	7.81E-1	1.65E-1	8.90E-1

여 판단한다면 ALARP영역의 범위가 너무 광범위하여 자칫 설계자 편의로 생각하여 안전을 저해할 소지가 있는 것으로 사료된다. 따라서 OECD에서 제시하는 기준 보다 엄격한 PHI기준을 사회적 위험도 판단기준으로 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이 기준을 적용하는 경우에 중규모터널의 경우 피난연결통로의 적정이격거리는 경고방송시간에 따라서 200~250m정도가 적절한 것으로 판단된다.

4. 결론

자연환기를 수행하는 중규모터널에 대한 정량적 위험도평가 및 피난연결통로의 적정성 평가결과, 도로터널의 위험도 평가를 위한 사회적위험도평가기준은 PHI기준을 적용하는 것이 타당하다. 또한 피난연결통로의 간격에 따른 위험도 평가결과 간격이 250 m이하인 경우에는 외부적인 요인이 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 평가된다. 따라서 이격거리는 250 m정도가 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2003년 건설교통부 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(C03-01)의 “도로터널방재 시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

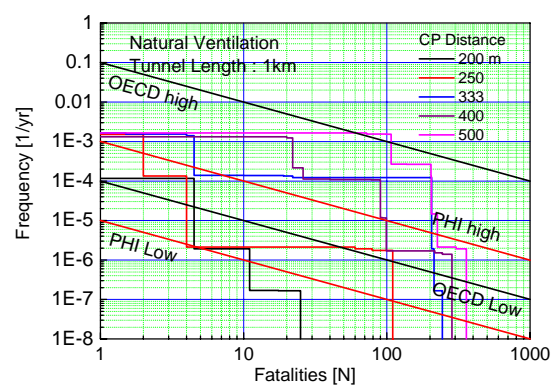


그림 4 화재발생후 180초에 경고방송을 하는 경우 F/N선도 및 사회적 위험도 평가기준