

도로터널 위험도 평가프로그램 개발에 관한 연구(I)

유 지 오, 신 현 준, 이 동 호

신홍대학 건축설비디자인과, 한국건설기술연구원, 인천대학교 안전공학과

The study of development of quantitative risk assesment program for the road tunnel

Yoo jioh, Shin Hyunjun, Rie Dongho

Dept. of Building Mech Eng., Shin Heung collage, Euijungbu, Kyunggi, 117

Korea Institute construction technology, Ilsan, Kyunggi

Dept. of Safety Eng., Univ. of Incheon, Nam-ku, Incheon, 177

ABSTRACT :

Some large accidents in tunnels in recent years, such as Mont Blanc, Gotthard and Tauern tunnels, have lead to an increasing attention for tunnel safety and necessity of tool for quantitative risk assesment of road tunnel. And the purpose of this study is to develop the quantitative risk assesment tool for the application of road tunnel.

The objectives of this paper are as follows : (1) analyze of traffic accident rates in tunnel, (2) make out scenario for fire accidents, (3) develop the evacuation model and FED calculation model, (4) present the results from quantitative risk assesment for the model tunnel according with the fire heat release rates and distances of cross passage.

Key Words : Tunnel fire safety, Quantitative Risk Assesment, Fractional Effective dose

1. 서론

최근들어 도로터널의 위험성에 대한 정량적인 평가기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내의 경우에도 배후령 터널, 거제침매 터널 등을 설계하면서 외국의 용역사를 통해서 수행한 바 있다. 그러나 위험도에 대한 평가는 현재까지 정립된 기술기준은 없으며, 소수의 통계 데이터에 의존한 통계적 기법이 제시되고 있는 실정이다. 대표적인 위험도 평가모델로 OECD와 PIARC에 의해서 개발된 위험도 평가모델(QRAM)이 있으나, 이는 터널을 통과하는 LPG, 화학물질 등 위험물을 수송하는 차량에 국한하고 있으며, 아직까지 국내에 도입된 바는 없다.

2. 사고 발생을

Corresponding author

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

Email address : jolew@shc.ac.kr

2.1 사고발생건수

도로 및 터널에서 차량사고 발생률에 대한 국내 조사결과는 표 1에 나타낸 바와 같다.

표에 의하면 터널에서의 사고건수는 일반도로의 사고건수에 약 0.1 ~ 0.2%정도를 차지하고 있으며, 터널에서의 사고 중 화재사고의 비율은 2000년 이후 3.65%(2000), 2.74(2001), 4.63(2002), 2.43(2003)으로 최대 4.63%이며, 평균 3.36%로 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 67건의 터널사고 중 6건이 화재사고(약 9%)인 노르웨이의 통계자료나, Guðni가 아일랜드 Hvalfjörður터널에 대한 위험도 평가시 적용한 5%보다 작은 결과이다.

2.2 사고발생을

표 1은 국내의 2000 ~ 2003년 자료와 이로 부터 추정된 사고발생율을 나타낸 것이다.

터널에서 사고발생율은 감소요인을 고려하는 경우, 최근 평균 37 건/1억 Veh·km로 나타나고

있으며, 이는 0~50건/1억 Veh·km로 제시하고 있는 PIARC 95의 통계자료의 범위 안에 있는 수치로 판단되며, 감소요인을 고려하지 않는 경우, 일반사고 발생률은 평균 72.8건/1억 Veh·km이며, 터널내 화재사고 발생률을 추정한 결과, 감소요인을 고려하지 않는 경우에는 2.7건/1억 Veh·km으로 분석된다.

또한 국내의 화물차와 승용차의 총주행거리비(2003년 기준 61:39%) 및 PIARC에서 제시하고 있는 승용차와 화물차의 사고발생율(화물차에 대한 사고발생율/승용차의 사고발생율 = 3.51)을 고려하면 터널에서 승용차와 화물차의 화재사고 발생률은 각각 1.38, 4.84건/1억 Veh·km로 계산된다.

시나리오 작성시에는 화재발생율을 5%로 하여 산정한 결과를 적용하였으며, 이때 승용차 및 화물차의 사고발생율은 1.84, 6.46 건/1억 Veh·km이 되며, 이는 95년 PIARC에 제시된 프랑스 터널에서의 사고발생율(승용차: 2건/1억 Veh·km, 화물차 : 9.2건/1억 Veh·km)보다는

다소 작은 값으로 년도별 감소추세에 따른 결과로 판단된다.

3. 터널 화재발생 시나리오

터널화재는 승용차와 화물차에 의한 화재로 대별하여 화재강도를 선정하였다.

또한 화재당시의 교통특성에 따른 제연팬의 운전이 인명안전에 상반되는 결과를 초래할 가능성이 크기 때문에 화재시 터널내 차량의 주행속도를 고려하여 지체시와 정상운행시로 고려하여 시나리오를 설정하였으며, 그림 1과 같다.

3.1 승용차

승용차의 화재강도는 일반적으로 2.5~5MW정도로 하고 있으며, PIARC 95 보고서에는 CETU, EUREKA test결과 등을 인용하여 5MW로 권장하고 있으며, 전체총발열량은 6 GJ정도, 화재지속시간은 일반적으로 20~40분, 화재성장속도는 0.012 kW/s²정도로 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서도 승용차 1대에 대한 최대 화재강도를 5 MW로 하였다.

승용차의 화재중 소화기로 진화가 가능한 비율을 PIARC 보고서에서는 80~90%, 일본수도공단 자료에 의하면 53%정도로 제시되어 있는 자료를 근거로 하여, 본 시나리오에서는 40%를 경미한 화재사고로 설정하였으며, 이는 Hvalfjörður터널에 대한 위험도 평가시 적용한 수치와 동일한 비율이다.

또한 승용차의 화재시 2대 이상의 차량으로 화재가 확산되는 경우에 화재강도를 10MW로 하였다.

노르웨이의 경우, 터널내 차량충돌 사고 67건 중 6건(9%)이 화재사고로 이중 1건만이 연속적인 화재로 발전하는 것으로 보고하고 있으며, 독일의 Elb tunnel에서는 16년 간 63건의 화재중 1건이 인접차량으로 확대된 것으로 보고하고 있다. 이 자료에 의하면 인접차량으로 화재가 확대되는 비율이 각각 1.5%와 1.6%로 인접차량으로 화재가 확대되는 비율은 승용차에 의한 화재중 2%미만으로 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 터널에서 승용차화재가 발생하는 경우, 인접차량으로 화재가 확대될 가능성을 2%로 설정하였다.

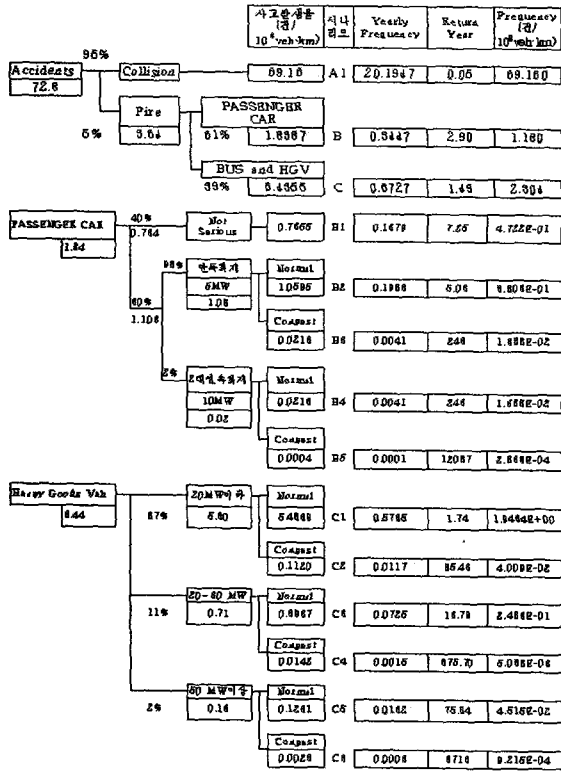
3.2 버스 및 화물차량(HGV)

화물차의 화재사고시 최대화재강도는 PIARC

표 1 일반사고 및 터널사고 발생률

구분		2000	2001	2002	2003	2004	
총주행거리 (10억 km)		290	300	310.8	317	324	
일반도로	건수(천건)	290.5	260.6	231.0	240.8	220.8	
	사망	10,236	8,097	7,224	7,212	6,563	
	부상(천명)	428	386.5	348	376.5	347	
터널	일반사고	건수(B)	301	292	259	453	-
		사망	13	9	8	25	-
		부상	593	578	545	949	-
	화재사고	건수(C)	11	8	12	11	-
		사망	4	1	2	-	-
		부상	2	-	-	48	-
발생비(%)	B/A	0.10	0.11	0.11	0.19	-	
	C/B	3.65	2.74	4.63	2.43	-	
터널사고발생률 (건/1억대km)	(I)	일반	100	87	74	76	68
		화재	3.4	2.9	2.5	2.6	2.3
	(II)	건수(천건)	137.2	123.1	125.4	96.8	104.3
		감소율(%)	52.75	52.75	45.7	59.8	52.75
		일반	47	41	40	30	32
		화재	1.7	1.1	1.9	0.7	0.8
(I) : 감소요인을 고려하지 않는 경우 (II) : 감소요인(차대사람, 추정차사고)을 고려 주 1 : 2003년의 증가율을 고려한 추정치임 주 2 : 2003,2002년의 감소율을 평균하여 적용 주 3 : 주1, 주2의 추정결과를 적용한 추정치임.							

그림 1 터널화재발생시나리오(Event Tree)



95보고서에 의하면 15~130MW로 제시되어 있으며, CETU, NFPA의 기준에서도 일반버스의 화재강도는 약 20 MW로 하고 있다. 또한 Ingason은 EUREKA 터널의 화재실험등을 인용하여 2001의 연구에서 버스의 화재강도를 29~34 MW로 발표하고 있다.

따라서 화물차량의 화재강도는 적재화물이나 유류의 유출여부 등에 따라 많은 영향을 받으나, PIARC의 자료를 근거로하여 화물차량과 버스의 화재중 87%는 20MW급, 11%는 30MW급, 2%는 매우 심각한 화재로 고려하여 50 MW이상급으로 고려하여 시나리오를 설정하였다.

Ingason은 버스의 화재시 화재성장특성은 NFPA의 분류에 Ultra fast에 속하며, 화재성장율을 0.1 kW/s²로 제시하고 있다. 또한 총발생열량은 Public bus의 경우, PIARC 99보고서에는 41 GJ, Ingason은 54 GJ로 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 20, 30MW의 화재에 대해서 화재성장율 및 총발생열량을 0.1 kW/s², 41GJ, 54GJ로 하였다.

또한 50MW급 이상의 화재에 대해서는 최근

Runehammer tunnel에서 실시된 실험결과를 인용하여 화재성장율을 0.215 kW/s², 총발생열량을 65 GJ로 적용하였다.

3.3 정체빈도에 적용방안

종류환기방식을 적용하는 일방통행 터널이나 대면통행 터널에서는 화재시 환기팬의 가동은 터널내 풍속을 증가시켜 화재하류에 위치해 있는 대피자를 연기가 덮칠 가능성을 증대하며, 이로 인한 인명피해를 가중할 우려가 있다.

따라서 화재발생 시나리오에서는 교통특성을 정체시와 정상시로 구분하여 반영하였다.

정체비율에 대한 평가방법은 아직 이론이 발표된 바 없기 때문에 본 연구에서는 거제터널 설계시 외국용역사에서 적용한 것과 같이 일평균시간 교통량이 도로용량을 초과하는 시간을 계산하여 이를 정체비율로 계산하였다.

4. 대피특성에 대한 검토

터널에서 화재 또는 비상시 대피시간은 일반적으로 차량대기시간(Time in car or Leave the car), 결정시간(Hesitation time), 대피시간(Walking time)으로 구분을 하고 있으며, 터널화재시 대피시간에 대한 연구는 많은 인원을 동원하여야 하며, 실질적인 데이터를 얻기가 곤란하다는 점에서 전무한 실정이다.

따라서 대부분 위험도평가나 대피 시뮬레이션을 수행하는 경우, 일반적으로 화재 후 감지시간 및 결정시간을 1~2분 정도로 가정하고 있는 실정이다.

대피시간에 대한 가장 광범위한 연구로 Anders Noren에 의해서 수행된 바가 있으며, 본 연구에서도 Anders의 연구결과를 적용하여 대피 모델을 프로그램 하였다.

Anders의 연구에 의하면 경고 방송전에 대피하는 대피자는 80~130초 전에 차량을 하차하는 그룹(I그룹)과 이후에 하차하는 그룹(II그룹)으로 나누어지는 특성을 보이고 있으며, 대부분의 사람이 경고방송 이후에 하차(III그룹)하는 것으로 보고하고 있으며, 다수의 반복 실험을 통해서 각각의 그룹에 대한 비율 및 확률분포를 제시하고 있다. 이를 정리하면 표 2와 같다.

표에서 경고 방송전에 차량에서 하차하는 대피자의 비율은 18.4%정도이며, 이중 8%정도가 지

표 2 대피특성 및 확률분포 (by Anders Noren)

그룹	대기시간		결정시간
	비율(%)	Statistical Distribution	비율/확률분포식
I	18.4	51	8(지체없이 대피하는 비율) 0.08+ (1-0.08)Norm(151,8)
II		49	
II	81.6	GEV(-0.22,19.81, 33.08)	

확률분포		
	<p>Time for Leave the car [sec]</p>	<p>Hesitation Time [sec]</p>

주) $Norm(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$, $GEV(x;k,\mu,\sigma) = \exp\left(\frac{1}{(1-k(x-\mu)/\sigma)^{1/k}}\right)$, $Gumb(x;a,b) = \exp\left(\frac{1}{\exp\left(-\frac{x-b}{a}\right)}\right)$

체없이 대피를 시작하며, 81.6%정도가 대피를 알리는 경고 방송후에 차량에서 탈출하며, 이중 28%만이 결정시간 없이 대피를 하는 것으로 분석하고 있다.

또한 각 그룹별 확률분포는 표에 나타난 바와 같으며, 표의 그림은 행동특성별 시간대별 확률분포를 나타내면 그림으로 나타낸 것이다.

5. 위험도 평가모델

5.1 위험도 평가모델 개요

위험도 평가모델은 터널내 화재시 온도 및 유독가스가 대피자에게 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 대피자에 대한 FED(Fractional Effective Dose) 값을 구하기 위한 프로그램이다.

위험도 평가모델은 그림 2에 나타난 바와 같이 Event tree 기법에 의한 화재시나리오를 작성하고 각각에 대한 화재사고 발생율을 계산하는 화재시나리오 모델, 화재시 터널내 정체차량의 배치 및 대피자의 배치를 위한 Traffic Que모델, 시간에 따른 대피자의 위치를 계산하기 위한 대피시물레이션 모델, 화재시 터널내 온도 및 유해가스농도를 계산하기 위한 모델 및 대피자의 유해가스의 노출정도를 정량적인 값(FED)으로 계산하기 위한 FED 계산모델로 구성 된다.

5.2 대피시물레이션 모델

대피시물레이션 모델은 교통정체모델에서 구한

정체존에 대한 터널내 화재진 주행속도 및 차종별 혼입율을 고려하여 차종별 차량수 및 차두간격을 계산하고 차량을 배치한다.

또한 차량의 배치에 따라서 차종별 승차인원에 따른 대피자를 배치하고 각각의 대피자에 대한 차량하차시간 및 결정시간을 고려하여 대피전 지체시간을 설정하고 대피가 시작되면 대피자의 보행속도를 계산하여 대피시물레이션을 수행한다.

본 연구에서 차두간격은 현재 한도공기기준에 준하여 정체시 차량밀도(D₀)로부터 차종별 승용차

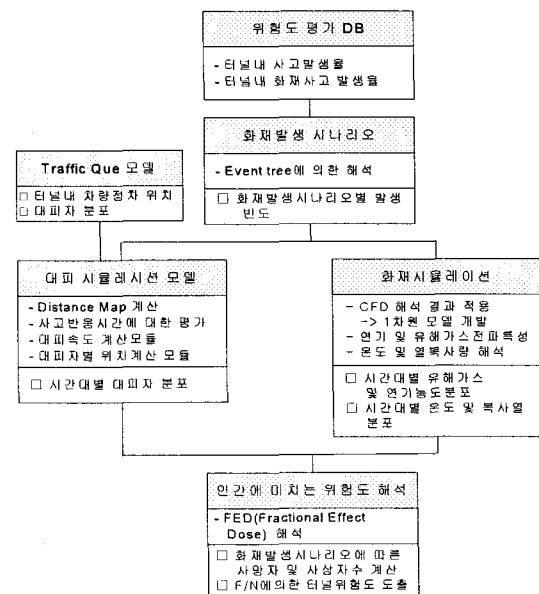


그림 2 유해물질 위험도 평가 모델

환산계수 및 차종별 혼입율을 고려하여 정체차량 수를 식(1)로 구한다.

$$N_i = D_o / PCU_{Total} \cdot \phi_i \quad (1)$$

평균차두간격(D_v)의 계산은 식(2)으로 구한다.

$$D_v = 1 / \sum_{i=1}^n N_i \cdot CL_i \quad (2)$$

정체존에 차량의 배치는 정체길이에 대해서 차종별 정체차량수를 구한 후에 무작위로 배치하였다.

차종별 승차인원은 차종별 최대 탑승인원을 고려하였다.

대피시물레이션 모델에서는 시간경과에 따라서 대피자를 피난연락갱이나 터널의 입출구부로 이동시키며, 대피자의 대피속도(walking speed)는 전방의 대피자와의 거리와 밀도에 의해서 계산한다. 전방의 대피자와의 거리에 따른 보행속도는 Thompson이 Simulex 모델에 적용한 식(3)으로 계산하며, 밀도에 의한 보행속도는 SPFE에 제시된 식(4)로 계산한다.

$$W_{spd} = V_u \cdot \sin\left(\frac{90}{180} \pi \cdot \frac{D_p - b}{T_D - b}\right), \quad b \leq D_p \leq T_D$$

$$W_{spd} = V_u, \quad D_p > T_D \quad (3)$$

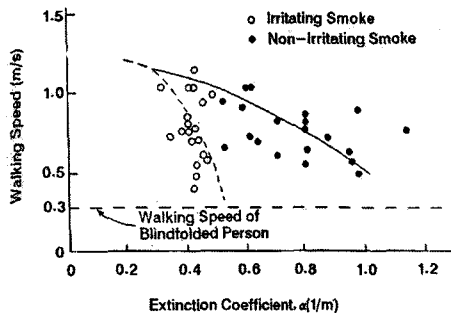
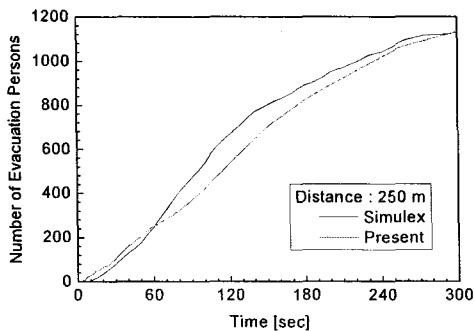


그림 3 가시도와 보행속도 관계



(a) 피난연락갱 간격 250 m

표 3 Simulex와 대피모델에 의한 대피시간 비교

피난 연락갱 간격	Simulex		Presents		명/시간		시간비 (s-p)/s
	대피 인원	대피 시간	대피 인원	대피 시간	pres ent	simul ex	
200	880	241.0	881	225	3.916	3.651	6.6%
250	1125	292.7	1149	311	3.695	3.844	-6.3%
300	1335	344.8	1336	349	3.828	3.872	-1.2%
350	1561	396.7	1529	395	3.871	3.935	0.4%
400	1791	449.0	1783	474	3.762	3.989	-5.6%
500	2197	557.4	2169	577	3.759	3.942	-3.5%
750	3288	817.8	3286	855	3.843	4.021	-4.5%

여기서, V_u 는 방해물이 없는 경우에 보행속도로 $V_u = 1.4 \text{ m/s}$, D_p 는 앞사람과의 거리, $T_D : 1.6 \text{ m}$, b : body depth이다.

$$W_{spd} = k - a \cdot k \cdot D, \quad D_H > 0.55 \text{ person/m}^2 \quad (4)$$

$$W_{spd} = 0.85k$$

여기서, $a = 0.266 \text{ m}^2/\text{person}$, D_H : 밀도, k 는 상수로 Ramp나 Corridor, doorway의 경우에는 1.4 m/s 이다.

본 프로그램에서는 전술한 두가지 방법으로 구한 보행속도중 작은 값을 대피자의 보행속도로 하며, 또한 터널내 연기농도를 고려하는 경우에

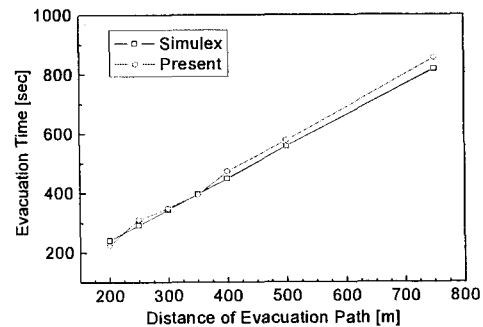
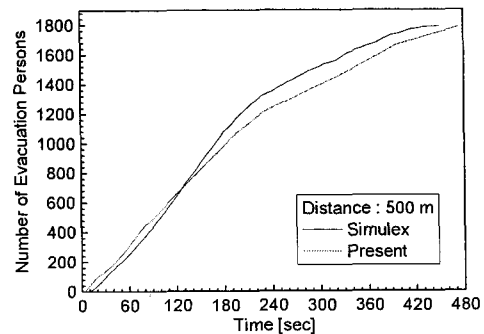


그림 4 대피시간 비교



(b) 피난연락갱 간격500 m

그림 5 시간대별 대피인원 비교

는 연기농도를 가시거리로 환산하여 PIARC 95 보고서에 제시되어있는 그림 3의 가시거리에 따른 대피속도를 적용하도록 하였다.

표 3 및 그림 4는 피난연락갱 간격에 따른 simulex에 의한 계산결과와 본 연구에서 개발된 프로그램에 의해서 계산되는 대피시간을 나타낸 것이다. 대피시간의 오차는 최대 6.6%정도로 나타나고 있다.

또한 그림 5는 피난연락갱 간격이 250, 500 m 인 경우에 시간에 따른 누적 대피인원을 나타낸 것으로 중간과정에서 최대오차가 160명 정도로 비교적 크게 발생하고 있으나 거의 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

5.5 터널내 열환경 및 유해가스농도 계산모델

터널내 화재에 따른 평균온도 및 유해가스농도 계산모델은 터널내 대피자의 위치에 따른 온도 및 유해가스농도를 계산하기 위한 모델이다.

본 연구에서는 두가지 방법으로 평가할 수 있도록 프로그램을 구성하였으며, 첫째방법은 온도, 복사열 및 유해가스농도(CO, CO₂, 매연, 가시거리)를 Ingason이 제시하는 계산식에 의해서 계산하는 간략계산 방법이며, 두번째 방법은 CFD 시뮬레이션을 수행하여 계산결과를 MDB파일로 생성하여 계산하는 방법이다.

Ingason이 제시하는 터널내 열 및 유해가스에 대한 평가식은 다음과 같다.

(1) Temperature

t 초 후 화재하류 x m 지점에서 온도는 식(5)로 계산된다.

$$T_{avg}(x,t) = T_a + [T_{avg,x=0}(\tau) - T_a] \exp\left[-\left(\frac{hpx}{m_a C_p}\right)\right] \quad (5)$$

$$\tau = t - (x/u), \quad h = 0.02 \sim 0.04 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$$

$$T_{avg,x=0}(\tau) = T_a + \frac{2}{3} \frac{Q(\tau)}{m_a C_p} \quad (6)$$

(2) Radiation heat flux(q'')

$$q'' = \frac{F_s \cdot m \cdot \Delta H_c}{4\pi X^2} \quad (7)$$

F_s = Fraction of the combustion heat radiated from the flame surface = 0.3

m = Burning rate(kg/s) = 0.055 kg/(s.m²)

ΔH_c = 가솔린의 발열량 = 43.7 MJ/kg

x = 화재로 부터의 거리 (m)

(3) 유해가스 농도

유해가스(j)의 농도는 식(8)과 산소저감율은 식(9)로 계산한다.

$$X_{i,avg} = Y_i \frac{M_a}{M_i} \frac{Q(\tau)}{m_a H_T} \quad (8)$$

$$X_{O_2,avg} = 0.2095 - \frac{M_a}{M_{O_2}} \frac{Q(\tau)}{m_a \times 13,100} \quad (9)$$

(4) 가시도 및 가시거리

터널화재시 가시거리(V, m)는 식(10)으로 계산한다.

$$V = 0.87 \frac{uA Hec}{Q(\tau) D_{mass}} \quad (10)$$

여기서, Hec: 발열량, u, 터널풍속이며, D_{mass}: Mass optical density로 Ingason이 제시한 값을 적용하였다.

5.6 FED 계산 모델

열환경 및 유해가스가 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 FED(Frational effective dos)를 평가하는 방법이 널리 이용되고 있다.

FED는 인간이 열환경이나 유해가스에 노출되어 나타나는 영향을 정량화하여 평가하기 위한 것으로 식(11)로 표현될수 있으며, 본 연구에서는 Ct_{effect}로 인간을 무력화(incapacitation)하는 값으로 적용하였다.

$$FED_{effect} = \frac{\text{dos received at time } t}{\text{effective } Ct \text{ dose}} = \frac{\sum Ct}{Ct_{effect}} \quad (11)$$

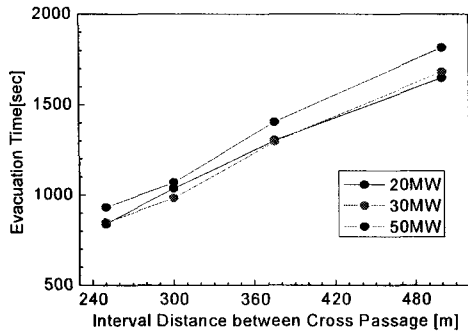
FED 계산을 위한 모델은 Purser's model, N-GAS model, 미국 FAA의 모델 등이 있다.

본 연구에서는 FED값을 FAA model 보다 높게 평가하고 있으며, 또한 도로터널 위험도 평가에 일반적으로 적용하고 있는 Purser's model을 적용하였으며, 환경 및 가시거리에 대한 모델을 추가로 적용하였으며, 최종적인 평가식은 열과 복사에 대한 평가항을 추가한 식(12)를 적용하였다..

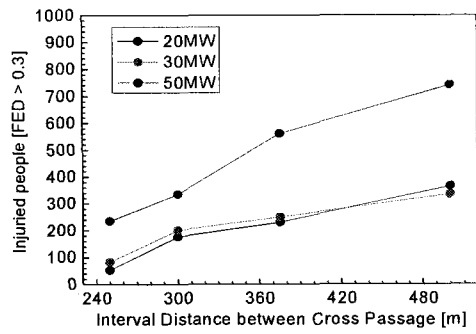
$$FED_1 = F_{ICO} \times V_{CO_2} + F_{ICO_2} + F_{IO} + F_{IHeat} + F_{IRAD} \quad (12)$$

$$F_{ICO} = \frac{\%COHb}{D} = \frac{8.2925 \times 10^{-4} (\text{ppmCO})^{1.036} t}{D}$$

$$F_{IO_2} = \frac{t}{e^{8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2)}}$$

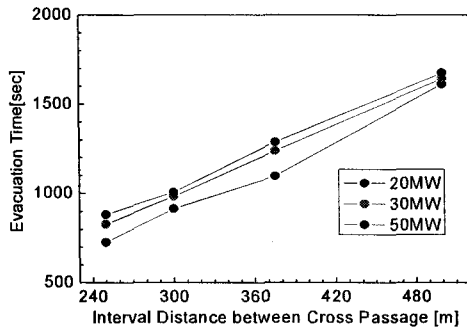


(a) 대피시간

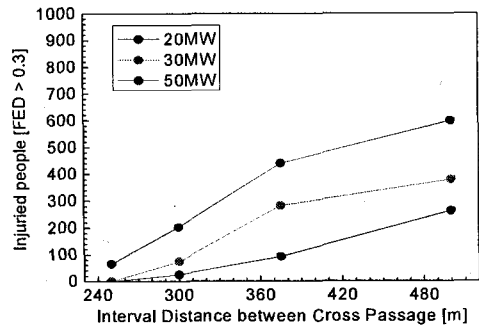


(b) 부상자예측

그림 6 피난연락갱간격별 대피시간 예측 및 부상자예측 결과(유해물질 농도계산식을 적용한 경우)



(a) 대피시간



(b) 부상자예측

그림 7 피난연락갱간격별 대피시간 예측 및 부상자예측 결과 (FDS수치해석적용)

$$V_{CO_2} = \frac{e^{0.2496\%CO_2 + 1.9086}}{6.8}$$

$$F_{ICO_2} = \frac{t}{e^{(6.1623 - 0.5189\%CO_2)}}$$

$$F_{HEAT} = \frac{t}{e^{5.1849 - 0.0273T}}$$

$$F_{IRAD} = \frac{q''^{1.33}}{1.33} t$$

6. 프로그램 계산결과 고찰

본 절에서는 위험도 평가프로그램의 적용성을 검토하기 위하여 1500 m 터널에 대해서 예상되는 부상자수 및 대피시간에 대한 시뮬레이션 결과를 고찰하였다.

터널에서의 화재는 터널 양방향으로 차량이 정체된 상황에서 화재가 발생하는 것으로 가정하였으며, 계산조건은 다음과 같다.

- 계산조건 :

- 터널연장 1,500 m
- 극심한 정체로 차량이 터널전체에 정체된 상황
- 화재강도 20, 30, 50 MW
- 대피인원 : 2,372명(차량의 탑승인원은 모든

차량의 최대탑승인원으로 고려하였음.)

- 대피시간에 차량을 버리는 시간과 대피를 결정하는 시간고려
- 경고방송은 화재발생후 120 s만에 방송되는 것으로 가정하였음.

부상자수에 대한 평가는 전절에서 설명한 FED 값이 0.3이상이 되면 대피자를 잠재적인 부상자로 고려하였다.

그림 6은 화재시 유해물질 및 온도분포에 대한 계산을 전술한 수식을 적용하여 FED계산에 반영한 결과이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 피난연락갱 간격이 증가하면 대피시간은 거의 선형적으로 증가하고 있다. 또한 화재강도가 증가하면 연기에 의한 가시거리저하로 대피속도가 감소하기 때문에 대피시간이 증가하는 것을 알 수 있다.

그림에서 예상되는 부상자수는 화재강도가 20MW와 30MW인 경우에 거의 비슷한 분포를 보이고 있으며, 화재강도를 50 MW로하는 경우에는 예상되는 부상자수가 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 본 계산 결과에 의하면, 피난연락갱 간격을 250 m로하는 경우에는 화재강도가

10 MW인 경우에는 예상되는 부상자는 없는 것으로 나타나고 있으며, 20, 30, 50MW에 대해서 전체인원에 대한 예상되는 부상자의 수는 각각 2.2, 3.2, 9.9%로 나타나고 있으며, 피난연락갱 간격이 500 m이고 화재강도가 50 MW인 경우에 예상되는 부상자수는 31.3%로 나타나고 있다.

또한 대피시간은 가시거리에 영향을 많이 받기 때문에 화재강도에 영향을 받으며, 자체시간을 고려하면 가시거리와 자체시간을 고려하지 않는 Simulex에 의한 대피시간보다 최대 3.8배까지 증가하는 것으로 나타나고 있다.

따라서 터널내 대피시간 산정을 위해서 자체시간에 대한 검토와 가시거리 저하에 따른 보행속도의 감소영향을 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.

그림 7은 유해가스의 농도와 온도분포를 FDS에 의한 해석하여 지면으로부터 1.5 m지점을 호흡면으로 하여 호흡면에서의 평균값을 적용한 결과이다.

이 경우 예상되는 부상자의 수와 대피시간은 전술한 수식을 적용하는 경우보다 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

예상되는 부상자의 수는 동일한 조건에서 수식을 적용하는 경우와 비교하여 상당한 차이를 보이고 있으나, 전체인원에 대한 부상자수의 비율에 대한 차이는 -1.8%에서 7.2%의 차이를 보이고 있어 전체인원에 대한 비율은 큰 차이가 없는 것으로 나타나고 있다.

또한 대피시간의 편차는 수식을 적용하는 것을 기준으로 하는 경우, 0.0%에서 13%의 편차를 보이는 것으로 나타나고 있다.

따라서 이 경우에도 비교적 큰 편차가 발생하는 것으로 판단되나 유해가스 및 온도에 대한 동일한 결과를 적용하는 경우에는 피난연락갱 간격 및 경고방송에 따른 상대적인 비교가 가능한 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 도로터널의 위험도를 정량적으로 평가하기 위해서 화재발생 시나리오를 검토하였으며, 도로터널의 대피시뮬레이션 모델 및 FED 계산모델을 분석하여 위험도 평가프로그램을 개발하였으며, 이 과정에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 국내 도로터널에서 차량사고에 대한 시나리오

를 작성했으며, 도로터널에서 일반사고발생율은 72.8건/10⁸veh-km, 승용차 및 화물차 화재사고발생율은 각각 1.84, 6.46 건/1억 veh-km로 제시하였다.

2. 대피시뮬레이션 모델을 개발하였으며, simulex에 의한 계산결과와 비교한 결과, 대피시간은 6.6%정도의 차이가 발생하며, 대피시간에 대피를 위한 대기시간 및 결정시간이 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다.
3. 터널화재시 유해가스의 농도계산을 위해 수식을 적용하는 간략계산모델과 시뮬레이션 프로그램의 계산결과를 DB로 구축하여 적용하는 모델을 제시하였다.
4. 모델터널에 대해 위험도 평가프로그램을 적용하여 적용성을 검토하였다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업(C03-01)의 “도로터널방재시스템 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Alan Beard and Richard Carvel, 2004, The Handbook of Tunnel Fire Safety, Thomas Telford, London
2. Louise C. Spetitel, 1995.1, Toxicity Assessment of Combustion Gases and Development of Survival Model, U.S. Dept. of Trans., Federal Aviation Administration
3. 한국도로공사, 2005.4 2004 고속도로 교통량 통계, 한국도로공사, 서울
4. 교통공단, 2004.12, 2003년도 자동차 주행거리 실태조사연구, 교통안전공단, 서울
5. OECD, 2001, Safety in Tunnels, OECD.
6. PIARC, 1995, Road Safety in Tunnel, PIARC Committee on Road Tunnel.
7. Purser, 1988, "Toxicity Assessment of the combustion products, the SFPE Handbook of Fire protection Eng. National Fire Protection Association, Massachusetts, USA.
8. Anders Noren, 2003, "Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and Design for faster evacuation", Lund, Univ., Sweden