

터널 내부 기류 변화에 따른 피난연락갱 간격 설정에 관한 연구

이동호¹, 김하영^{2*}, 유지오³

A study on an interval of tunnel cross passage considering inclination and internal airflow

Dong-Ho Rie, Ha-Young Kim, Ji-Oh Yoo

Abstract The escape connecting gallery in a tunnel on a road is one of emergency equipment to ensure safety for passer in the tunnel against the tunnel fire. Government stipulate over 500m tunnel has the cross passage at intervals of less than 250 m. However, this lump estimated interval is generated the concerns of exaggeration and under construction because peculiarity of the tunnel ex. The velocity of the tunnel airflow, an incline, degree of a fire, and innering area are not considered. The study indicate the way to estimate of the cross passage considered an incline and the velocity of the tunnel airflow for efficient application of cross passage on the tunnel design. As a result, in 0.0 m/s and 1.0 m/s of the velocity of the tunnel airflow case, the movement of smoke is influenced by the incline however, in 20 m/s case, it isn't influenced by incline much. According to the velocity of tunnel airflow and the incline, optimum interval of cross passage is not corresponded. Therefore established lump estimate that has 250 m intervals would be changed to estimate of optimum interval of cross passage that considered about the properties of tunnel, the velocity of the tunnel airflow, incline, degree of a fire and innering area of the tunnel.

Keywords: Tunnel fire, escape connecting gallery, tunnel airflow

요 지 도로터널내의 피난연락갱은 화재시 터널내 통행자의 안전성 확보를 위한 방재시설 중 하나이며 국내의 경우 500 m 이상 터널에서는 250 m 간격 이하로 설치하도록 규정하고 있다. 그러나 이러한 일괄적인 피난연락갱 간격 산정은 터널 내 풍속이나 구배, 화재강도 및 터널의 내공단면적 등 터널의 특성에 대한 고려가 되지 않기 때문에 과대 및 과소 설비가 될 우려가 발생한다. 본 연구에서는 터널 내 풍속 및 구배의 영향을 고려한 피난연락갱 적정간격 산정 방식을 제시하여 터널 설계시 피난연락갱의 효율적인 적용을 목표로 한다. 결과로 터널내 풍속이 0 m/s와 1.0 m/s의 경우 구배에 의한 영향이 뚜렷한 것으로 분석되었으나 2.0 m/s 이상의 경우 터널내 구배에 의한 연기의 이동은 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 터널 내부 기류속도 및 터널 구배에 따른 적정 피난연락갱 간격이 상이하게 나타나 250 m 간격인 기존의 일괄적인 피난연락갱 간격 산정이 아닌 터널 내 풍속이나 구배, 화재강도 및 터널의 내공단면적 등 터널의 특성에 대한 고려값을 적용한 적정 피난연락갱 산정이 필요하다.

주요어: 터널화재, 피난연락갱, 터널기류

1. 서 론

국가경제성장과 함께 기간산업 및 레저산업의 발전은 교통량을 크게 증가시켰으며, 이로 인해 산지가 70% 이상을 차지하는 우리나라는 지형적인 특성상 터널의 건설이 불가피하며, 장대터널의 설계 및 건설이 급격하게 증가되고 있다.

그러나 이러한 터널에서의 화재는 기류의 확산이 제한되어 화재연기로 인한 가시거리의 감소, 유독성가스

의 확산 및 급격한 온도상승, 산소농도의 감소를 초래하여 통행자의 생명을 위협할 뿐만 아니라 구조물이나 각종설비 및 차량의 손상을 유발할 수 있다. 또한 결과적으로 장시간 통행 불능상태를 초래할 가능성이 존재하여 화재사고 발생시 이로 인한 경제적인 피해가 아주 큰 것으로 보고되고 있다.

이와 같은 관점에서 도로터널에서는 만약의 사고에 대비하여 통행자의 안전 확보를 위해서 일반적으로 보다 더 많은 안전시설이 설치되게 되며, 화재상황에서 터널내 통행자의 탈출과 소화활동 및 구급요원의 구조 활동을 위한 방재시설의 설치가 의무적이며 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.

¹정희원, 인천대학교 안전공학과

²정희원, 인천대학교 안전공학과 대학원

³정희원, 신홍대학 건축설비설계과

*교신저자: 김하영 (E-mail: konmul@incheon.ac.kr)

도로터널의 방재관련 연구는 주로 유럽의 지역에서 많은 연구가 이루어지고 있는 실정으로 유럽에서는 산악지형을 통과하는 장대터널의 건설로 터널안전사고가 지속적으로 발생하여 터널화재안전에 지대한 관심을 기울이고 있으며 유럽공동체의 유레카(Eureka)계획의 일환으로 1992년에 노르웨이의 페광에서 승용차, 버스, 가구를 적재한 화물차에 대한 실규모의 화재실험을 실시한 바 있다(Erika, 1994). 또한 PIARC(Road Tunnel Committee of the World Road Association)는 화재와 연기의 제어 기술에 관한 제안을 하였으며, 1999년 Fire and Smoke Control in road tunnels 보고서에 터널화재에 대한 방대한 자료를 정리하여 제시하였다(PIARC, 1999).

특히, 유럽에서는 1999년의 몽블랑(Mont Blanc) 터널과 Tauern 터널, 고타드 터널의 화재참사를 계기로 UNECE의 ITC(Inland Transport Committee)를 중심으로 터널안전에 관한 전문가회의가 출범하여 터널안전과 관련하여 최소한의 조치사항을 제시하고 있는 한편 기존터널의 화재안전을 도모하기 위한 대규모 연구과제(UPTUN)가 계획되고 있다.

한편 미국과 일본에서는 유럽과 같이 대규모 인명피해가 발생한 주요사고는 일어나지 않았으나 과거 발생한 터널사고를 조사하고 연구를 진행하여 터널에서의 안전을 확보하려는 노력을 하고 있다.

도로터널내의 피난연락갱은 화재시 터널내 통행자의 안전성 확보를 위한 방재시설중 하나이며 국토해양부의 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토해양부, 2008)에 근거 3등급 이상인 500 m이상 터널에서는 250 m 간격 이하로 설치하도록 규정하고 있다.

그러나 이러한 일괄적인 피난연락갱 간격 산정은 터널내 풍속이나 구배 등 터널의 특성에 대한 고려가 되지 않기 때문에 과대 및 과소 설비가 될 우려가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 터널내 화재시 풍속 및 구배의 영향을 분석하고 이를 고려한 피난연락갱 적정간격 산정 방식을 제시하여 터널 설계시 피난연락갱의 효율적인 적용을 목표로 한다.

2. 국내의 피난연락갱 설치지침

국내 피난연락갱은 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침을 기준으로 설치한다. 세부적인 사항으로 500 m이

상의 터널과 대피터널이 있는 대면 통행 터널에 250 m 이하(1200 m 이하 터널의 경우 300 m로 할 수 있음) 간격으로 설치하여야 하며, 3개소마다 구급차량이 통과할 수 있는 차량용 피난연락갱을 설치하여야 한다.

또한 피난연결통로는 평상시 환기의 신뢰성과 화재시 연기의 유입을 막기 위하여 차단문을 설치하여야 하며, 이러한 차단문은 터널간 차압이 작용하는 상태에서도 작은 조작력에 의해서 열릴 수 있도록 규정하고 있다.

3. 수치해석에 의한 연기유동 해석

본 연구에서는 터널 내 풍속 및 구배의 영향을 고려한 피난연락갱 적정간격 산정을 위해 화재 수치해석 프로그램인 FDS(Kevin et al., 2005)를 사용하여 수치해석하였으며 화재강도에 따른 비정상(unsteady) 연기농도를 좌표별로 데이터베이스화하여 이를 분석평가하였다. FDS는 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 화재 전용 수치해석 프로그램으로서 화재에 의해 유도되는 연기와 온도의 유동예측에 사용되고 있다.

3.1 터널 및 화재 경계조건

해석을 위한 대상터널은 한국도로공사에서 제시하는 고속도로 2차선 표준터널로 적용하였다. Table 1은 적용된 대상터널의 제원 및 설정조건을 나타내며, 표준터널과 유사한 형태 및 내공단면적으로 Fig. 1과 같이 수치해석 모델링 하였다. 또한 실제 화재와 유사한 결과를 도출하기 위하여 터널상부의 표면해석시 FDS의 톱니형태의 해석방법인 Sawtooth 해석 기능을 상부에 한하여

Table 1. Simulation setting variables

Tunnel length	1000 m
Tunnel height	7.8 m
Fire size	3.0×13.0×3.6 m
Fire position	no velocity : 500m, velocity exist : 200m
Grid	44×1000×26
Turbulence Model	LES form of the Navier-Stokes equations appropriate for low-speed
CO yield	0.168
Soot yield	0.133

제한하는 방법을 통해 결과를 보정하였다.

화재 해석에 사용된 격자는 총 1,144,000개이며 균일 격자로 설정하였다. 초기 터널내 온도는 20.0℃로 설정하였으며 외부 기류 및 차량의 이동으로 인한 내부기류는 고려하지 않았다. 화재는 FDS에서 기본적으로 제공되고 있는 가연물질인 Propane을 적용하였으며 실제 화재시 발생하는 CO와 Soot의 발생량을 적용하기 위하여 Mott MacDonald가 제시한 실험값(Mott, 2006)을 Propane의 조성으로 환산하여 질량분율을 설정하였다.

화재 강도는 Table 2에 나타난 바와 같이 최대 강도 20 MW로 적용하였으며 NFPA 92B(NFPA, 2005)에서 제시하는 t²성장곡선을 적용하여 최대 화재 강도가 되는 시간은 450초로 설정하였다. 화재 시기별 누적열량은 Haukur Ingason이 제시한 실험값(Haukur, 2006)을 적용하였으

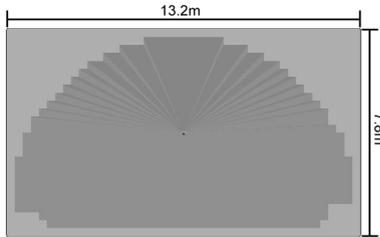


Fig. 1. Simulation modelling

Table 2. Heat release rate and fire curve

Heat Release rate(MW)	20.0	
Growth Rate(α)	0.1	
Decay Rate (β)	0.001	
Growth Time(sec)	450.0	
Cumulative heat (GJ)	Growth	3.14
	Decay	28.64
	Maintenance	9.22
Maintenance Time(sec)	455.3	

Table 3. Simulation cases

Tunnel Velocity	Tunnel Slope			
0.0m/s	0.3%	1.0%	1.5%	2.0%
1.0m/s	0.3%	1.0%	1.5%	2.0%
2.0m/s	0.3%	1.0%	1.5%	2.0%
2.5m/s	0.3%	1.0%	1.5%	2.0%
3.0m/s	0.3%	1.0%	1.5%	2.0%

며 감쇄기 및 지속기의 누적열량을 환산하여 감쇄율(β) 및 지속시간을 설정하였다.

Table 3은 수치해석 조건을 나타내며 터널내 풍속 및 구배에 따른 연기유동 특성을 분석하기 위하여 총 25개의 조건을 분석하였다. 구배는 최악조건을 고려하기 위해 FDS의 Gravity Vector 기능을 사용하여 대피진행방향으로 상승하는 것으로 설정하였다.

4. 수치해석 결과

본 연구에서는 터널 내 풍속 및 구배의 영향을 고려한 피난연락경 적정간격 산정을 위해 터널내 기류 흐름을 분석하고 터널 전 구간에서의 연기이동 전파특성을 분석하였다. 또한 분석된 시간에 따른 연기이동거리와 대피자의 위치를 비교 검토하여 적정 피난연락경을 산정하였다.

4.1 터널내 연기이동 분석

본 절에서는 구배 및 터널내 풍속이 연기이동속도에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

연기의 이동거리는 대피자의 호흡선인 높이 1.5 m 단면(김하영 등, 2008)을 길이별로 평균하여 분석하였으며 NFPA502(NFPA, 2008)에서 제시하고 있는 재실자의 대피를 위한 최소 허용 가시거리인 6 m를 농도로 환산한 값(Kevin et al., 2005)인 65 mg/m³ 이상인 지역에 대하여 연기가 이동한 영역으로 판단하였다.

Fig. 2는 터널내 풍속이 존재하지 않는 경우 시간에

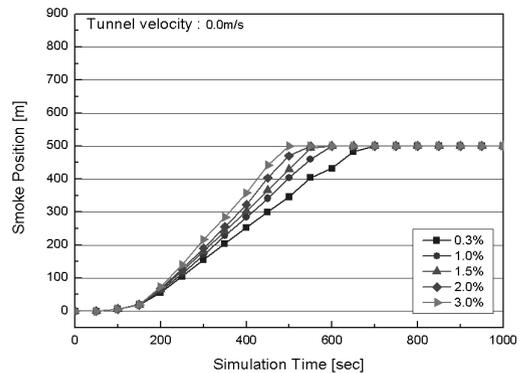


Fig. 2. Smoke movement for a tunnel vel. 0.0 m/s

다른 터널구배별 연기이동거리를 나타낸다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 터널의 구배별로 연기의

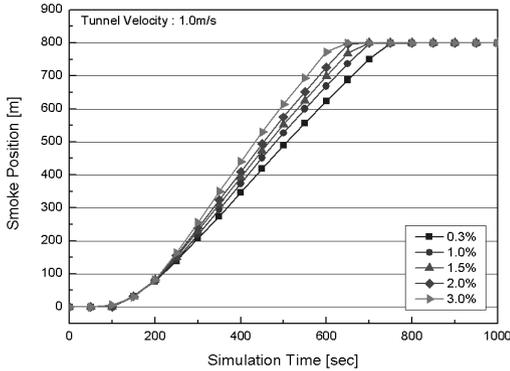


Fig. 3. Smoke movement for a tunnel vel. 1.0 m/s

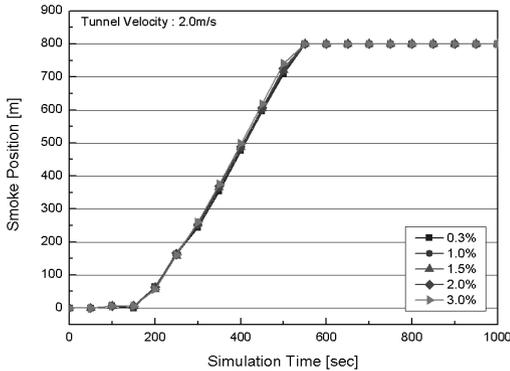


Fig. 4. Smoke movement for a tunnel vel. 2.0 m/s

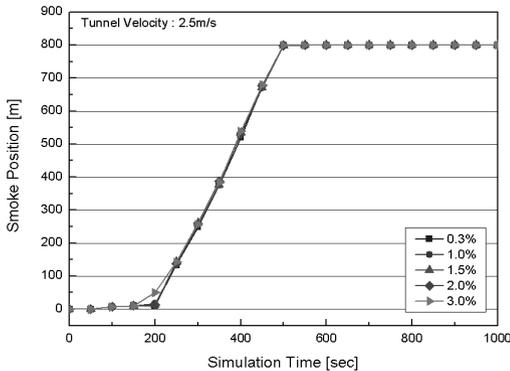


Fig. 5. Smoke movement for a tunnel vel. 2.5 m/s

이동거리 차가 발생하였으며 구배 3.0%의 경우가 0.3% 구배의 경우와 비교하여 최대 화재강도에 도달하는 시간인 화재발생 450초 경과후에 최대 154 m의 연기이동거리차가 더 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 3~6은 터널내 풍속이 존재할 경우를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 터널내 풍속이 1.0 m/s의 경우 화재발생 450초 경과후에 최대 112 m의 차가 발생하는 것으로 나타남으로써 구배에 의한 영향이 뚜렷한 것으로 분석되었다. 그러나 2.0 m/s 이상의 경우 터널내 구배에 의한 연기의 이동거리차가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 화재발생 후 화재 강도가 최대가 되는 시점인 450초의 연기이동거리를 측정하여 시간으로 나눈 터널내 평균 연기이동 속도를 나타낸다. 구배에 따른 연기층의 이동특성은 외기가 약할 경우 연기의 이동거리가 구

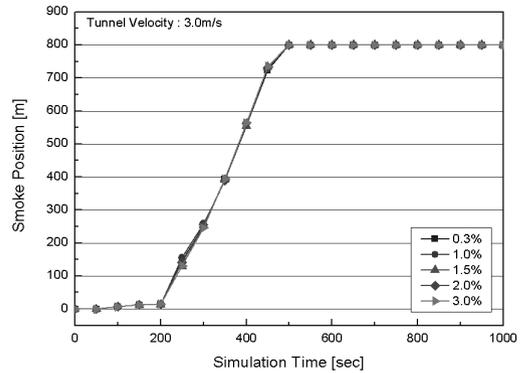


Fig. 6. Smoke movement for a tunnel vel. 3.0 m/s

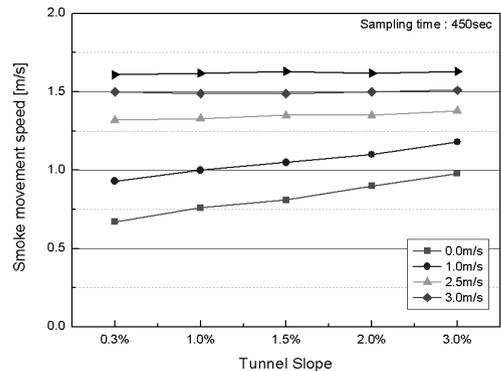


Fig. 7. Smoke movement speed at tunnel for slope

배별로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으나 외기가 강할수록 외기의 지배력으로 인해 구배에 대한 연기 이동 거리의 차가 낮아지는 것으로 분석되었다.

4.2 피난연락갱 적정간격 산정

터널내 적정간격 산정은 대피자와 위험인자와의 관계로 적용된다. 특정거리에서의 최종대피자 필요대피시간인 RSET(Required safe egress time)과 연기의 이동거리가 특정거리에 도달되기 전까지의 시간을 안전한 시간인 허용 한계 대피시간인 ASET Available safe egress time)으로 표현한다면 적정 피난연락갱 간격은 RSET과 ASET이 같은 값을 나타내는 거리를 적정 피난연락갱 간격으로 산정할 수 있다.

본 연구에서는 한국표준과학연구소에서 연구된 한국인의 보행속도인(이창민 등, 2004) 어른의 경우 1.3 m/s, 아이의 경우 0.9 m/s로 이동하는 것으로 설정하여 적정 피난연락갱 간격을 산정하였다. 피난 연락갱 적정 간격은 최종대피자의 위치와 연기의 위치를 시간별로 분석하여 최종대피자와 연기의 위치가 동일해 지는 지점을 적정 간격으로 산정하였다. 대피방향은 최악 조건을 고

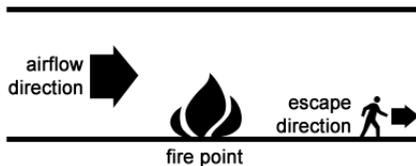


Fig. 8. Escape scenario at fire point

려하기 위하여 터널 내부기류와 동일한 것으로 설정하였으며 Fig. 8은 터널 내부 기류와 대피자의 이동방향에 대해 도식한 내용이다.

실제 설계시에는 대피자의 인지속도 및 개인별 속도차, 차량의 형상에 따른 차량에서의 대피시간차, 병목현상 및 연기농도에 따른 이동속도 감소 등 여러 가지 변수를 고려하여 산정하여야 하나 본 연구에는 대피자와 위험인자와의 상관관계를 단순 제시하므로 이러한 변수를 적용하지 않았다.

Fig. 9~13은 시간 경과에 따른 터널 구배별 연기 및 대피자의 위치를 나타낸다.

터널 내부 기류가 존재하지 않을 경우인 Fig. 9의 경우 어른은 연기에 의한 위험에 노출되지 않는 것으로 나타났으며, 아이의 경우 구배 1.5%이상의 터널에서 위험에

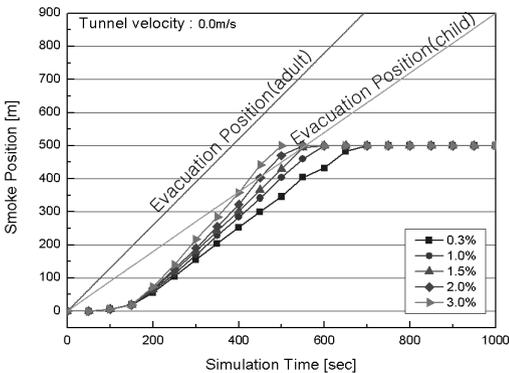


Fig. 9. Smoke & human position at time response (tunnel vel.: 0.0 m/s)

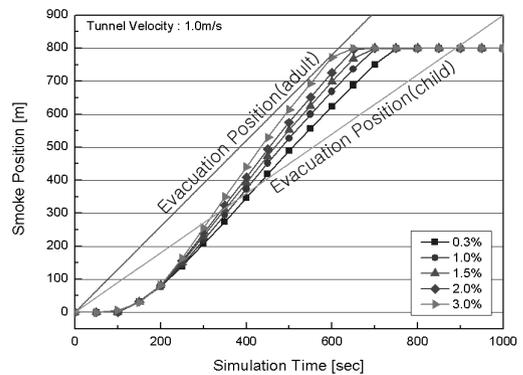


Fig. 10. Smoke & human position at time response (tunnel vel.: 1.0 m/s)

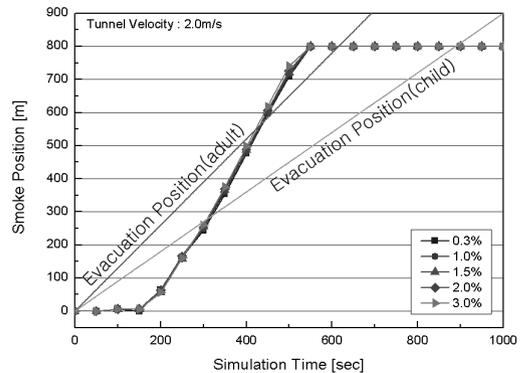


Fig. 11. Smoke & human position at time response (tunnel vel.: 2.0 m/s)

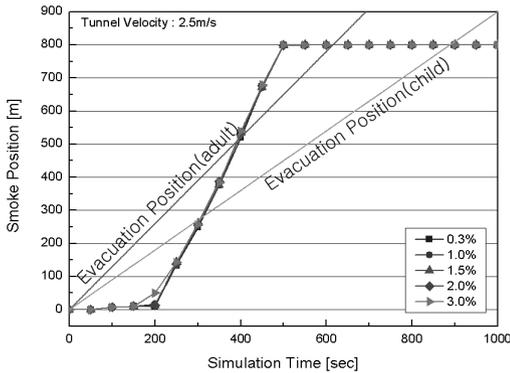


Fig. 12. Smoke & human position at time response (tunnel vel.: 2.5 m/s)

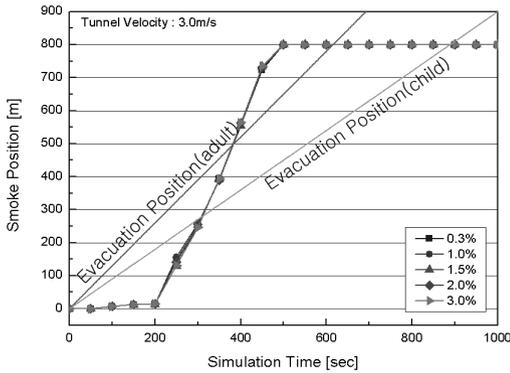


Fig. 13. Smoke & human position at time response (tunnel vel.: 3.0 m/s)

노출되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 터널 내부기류가 1.0 m/s일 경우 어른은 연기에 의한 위험에 노출되지 않는 것으로 나타났으나 아이의 경우 구배에 따라 277~383 m에서 연기의 이동거리와 접하게 되는 것으로 나타남에 따라 이를 고려한 피난연락경 간격을 선정하여야 하는 것으로 나타났다.

터널 내부 기류속도가 2.0 m/s 이상인 경우(Fig. 11~13) 구배의 영향에 비해 터널 내부기류의 지배력이 커짐에 따라 구배별 연기이동거리의 차가 거의 발생하지 않아 대피자와 연기 이동 거리 간 접점의 차가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 터널 내부 기류속도로 인하여 2.0 m/s 이상 전 속도에서는 모든 구배에서 위험영역이 발생하는 것으로 나타나 이에 따른 적정 피난

Table 4. Optimal interval of cross passage

구분	0.0 m/s	1.0 m/s	2.0 m/s	2.5 m/s	3.0 m/s	
0.3%	adult	-	-	567	517	490
	child	-	383	288	277	275
1.0%	adult	-	-	557	503	490
	child	-	340	284	277	275
1.5%	adult	-	-	558	503	490
	child	494	319	281	277	275
2.0%	adult	-	-	549	503	490
	child	410	299	277	277	275
3.0%	adult	-	-	540	503	490
	child	361	277	273	277	275

연락경 간격이 산정되어야 하는 것으로 분석되었다.

Table 4는 Fig. 9~13에 나타난 결과를 토대로 분석된 적정 피난연락경 간격을 나타낸다.

본 연구에서는 고속도로 표준단면 2차선의 화재규모 20 MW에 대해 풍속 및 구배의 영향을 고려한 적정 피난연락경 산정시 각 설정조건에 따라 적정 피난연락경 간격이 상이하게 나타났다.

또한 화재의 규모가 Tank lorry 차량과 같은 대형화재일 경우 국내에서 채택하고 있는 250 m간격 기준 이하로 발생할 가능성도 배제할 수 없으므로 기존의 피난연락경의 일괄적인 250 m 간격 선정이 아닌 계획 또는 설계단계에서 터널 내 발생하는 최대 풍속 예측이나 터널의 구배 특성에 대한 고려값을 적용한 적정 피난연락경 산정이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널 내 풍속 및 구배의 영향을 고려한 피난연락경 적정간격 산정을 위한 분석 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 터널내 풍속이 0 m/s와 1.0 m/s의 경우 구배별로 각각 최대 154 m, 112 m의 차가 발생하는 것으로 나타나 구배에 의한 영향이 뚜렷한 것으로 분석되었으나 2.0 m/s 이상의 경우 터널내 구배에 의한 연기의 이동은 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.
2. 구배에 따른 연기층의 이동특성은 외기가 약할 경우

연기의 이동에 많은 영향을 주지만 외기가 강할수록 외기의 지배력으로 인해 구배에 대한 변동폭이 낮아지는 것으로 분석되었다.

3. 터널 내부 기류속도 및 터널 구배에 따른 적정 피난연락갱 간격이 상이하게 나타남에 따라 화재의 규모가 Tank lorry 차량과 같은 대형화재일 경우 국내에서 채택하고 있는 250 m간격 기준 이하로 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 기존의 피난연락갱의 일괄적인 250 m 간격 선정이 아닌 계획 또는 설계단계에서 터널 내 발생하는 최대 풍속 예측이나 터널의 구배 특성에 대한 고려값을 적용한 적정 피난연락갱 산정이 필요하다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2008), 도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침. 행정간행물등록번호 11-1611000-000411-01, pp. 63-67.
2. 김정엽, 신현준, 강세구, 안경철 (2004), 도로터널 화재 발생시 연기유동에 관한 축소모형실험 연구, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 141-148.
3. 김종윤 (2007), 터널화재 시 임계풍속 산정 및 제연특성 연구, 인하대학교.
4. 김하영, 이동호, 김정엽 (2008), 지하철 승강장 급배기 조건에 따른 화재 위험성 평가, 한국화재소방학회 논문지, 제22권, 제5호.
5. 유홍선, 양승신 (2005), 터널 화재시 배연속도가 연소율 변화에 미치는 실험적 연구, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 119-131.
6. 이동호, 김하영, 문성용, 유지오 (2009), 터널 내 화재 시 경사에 따른 온도층 및 연구유동 특성, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 221-228.
7. 이창민, 성화경, 김정룡, 유재우, 남윤자, 김구자, 최경미, 황민철, 정의승 (2004), 제5차 한국인 인체치수조사사업 보고서(2차년도 최종보고서), 산업자원부 기술표준원.
8. Bettelini, B. and Henke, A. (2003), Upgrading the Ventilation of the Gotthard road tunnel, 11th Int. Sym. on the Aero. and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHRGroup, pp. 29-45.
9. Baum, H. R. and McCaffery, B. J. (1989), Fire Insuced Flow Field-Theory and Experiment, Fire Safety Science Proceedings of the Second International Symposium, pp. 129-148.
10. Erika Ivarson (1994), Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels SP-Swedish National Testing and Research Institute, Sweden.
11. Haukur Ingason (2006), Design fires in tunnels, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, Second International Symposium, pp.42.
12. Kevin McGrattan, Glenn Forney (2005), Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide, NIST, USA.
13. Mott MacDonald (2006), Ventilation during road tunnel emergencies, TRL Limited, pp. 42.
14. NFPA (2005), NFPA 92B Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, Quincy, MA, USA.
15. NFPA (2008), NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, Quincy, MA, USA.
16. PIARC (1999), Fire and smoke control in road tunnels, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC.
17. RABT (2002), Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von StraBentunneln (RABT), Germany.

접수일(2009.8.31), 수정일(2009.12.22), 게재확정일(2009.12.28)