

터널 내 화재 시 경사에 따른 온도층 및 연기유동 특성

이동호^{1*}, 김하영², 문성웅³, 유지오⁴

The dynamic characteristics of upper hot gas layer and smoke propagation along with tunnel slope in case of fire

Dong-Ho Rie, Ha-Young Kim, Sung-Woong Moon, Ji-Oh Yoo

Abstract The aim of this research is to analyse the dynamic characteristics of the hot upper smoke layer in case of fire in a tunnel. In order to get the result, computer simulation technique has been used. The fire scenarios were set on the basis of standard cross section of national and express highways through NIST's FDS. As the area of a tunnel increased, the influence of the wind velocity decreased. Furthermore, the influence of the slope of a road was reduced as the wind velocity increased. On the other hand, as the wind velocity increased, the influence of the slope of a road decreased. This phenomena is believed to be caused by the cooling effect of wind which is over 1 m/s in speed, hence, reducing the influence of the effect of slope.

Keywords: Smoke propagation, temperature upper hot gas layer, fire in a tunnel, FDS, cooling effect

요 지 본 연구는 터널 내 화재 시 온도층 및 연기층의 유동성향을 분석한다. 이를 위해 전산 시뮬레이션을 활용하였다. NIST 의 FDS를 통해 국도 및 고속도로 표준단면을 기준으로 화재 시나리오를 설정하였다. 연기층의 이동거리인 터널의 단면적이 증가할수록 내부 풍속에 의한 영향력이 감소하였으며, 내부 풍속이 상승할수록 경사에 의한 영향력이 감소하였다. 온도층의 이동거리인 내부풍속이 상승할수록 경사에 의한 영향력이 감소하였으며, 1 m/s 이상의 풍속에 냉각효과가 나타나 경사에 의한 영향력이 감소하였다.

주요어: 연기유동, 온도층, 터널화재, FDS, 냉각효과

1. 서 론

산악지형이 많은 우리나라 국토의 특성상 많은 도로 터널이 건설되었다. 도로선형을 직선화하고 절개지를 최소화하는 등 환경 친화적으로 도로를 건설하려는 노력으로 인해 터널공사는 꾸준히 증가되고 있는 추세이다. 실제로 2007년 12월말 기준 국내 터널은 1,064개소, 연장이 754 km로 전년대비 132개가 증가하였으며, 연평균 터널 수는 14.1% 연장은 37.6% 증가한 것으로 나타났다(국토해양부, 2008).

이처럼 많은 터널이 존재함에 따라 재해시의 대책 또한 함께 논의되고 있다. 도로터널은 화재 발생 시 밀폐된 공간적 특성으로 인해 연기 확산 속도가 빠르며, 시야 확보가 어렵다. 또한 대피 시간이 도로터널 연장에

비례해 증가하기 때문에 상당한 어려움이 있다. 따라서 화재 진화 시에도 연기와 열로 인해 화원에 쉽게 접근할

표 1. The incidence of accidents in a road and tunnel (국토해양부, 2009).

Year	The number of road accidents (A)	The number of tunnel accidents (number/year)		Rates of accidents	
		General accidents	Fire accidents	Rates of B/A [%]	Rates of C/B [%]
		number of accidents (B)	number of accidents (C)		
2000	290,481	301	12	0.10	3.99
2001	260,579	292	8	0.11	2.74
2002	231,026	259	13	0.11	5.02
2003	240,832	453	13	0.19	2.87
2004	220,755	382	4	0.17	1.05
2005	214,171	549	7	0.26	1.28
2006	213,745	567	32	0.27	5.64

¹정희원, 인천대학교 안전공학과 정교수
²정희원, 인천대학교 안전공학과 박사과정
³정희원, 인천대학교 안전공학과 석사과정
⁴정희원, 신홍대학 건축설비설계과 정교수
*교신저자: 이동호 (E-mail: riedh@incheon.ac.kr)

수 없는 어려움을 가지고 있다. 표 1은 최근 국내 일반도로 및 도로터널의 사고 발생률을 나타내며 도로터널의 사고로 인한 화재가 지속적으로 발생하고 있음을 알 수 있다.

본 연구는 도로터널 화재 시 터널형태와 터널 내 풍속 속도, 터널의 경사의 변화에 따른 전산시뮬레이션을 수행하여 온도 및 연기유동의 특성 분석을 통하여 도로터널 설계 및 방재시설 설치의 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 설정 및 경계조건

본 연구의 해석은 FDS Ver.5.0을 사용하여 화재강도에 따른 비정상(unsteady) 연기농도, 온도, 이산화탄소, 일산화탄소 농도를 ASCII값으로 데이터베이스화하여 평가를 수행하였다. FDS는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 화재 전용 수치해석 프로그램으로서 화재에 의해 유도되는 연기와 온도의 유동예측에 사용되고 있다(Kevin McGrattan, 2008).

2.1 수치해석 모델 설정 조건

본 연구에서 적용된 도로터널의 내공단면은 한국도로공사에서 제시한 터널표준단면을 적용하여, 표 2와 같이 국도 및 고속도로 2차로, 고속도로 3-4차로 표준단면을 기준으로 하였다.

도로터널의 종단경사는 0.3%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 3.0%를 기준으로 하였다. 터널 개통후의 터널내부 용출수를

종단배수구에 의해 자연유출 시키려면 통상적으로 0.1% 이상의 경사가 있으면 효과적이거나, 시공 중의 용출수를 자연유출 시키기 위해서는 용출수가 적을 경우 0.3% 이상, 많은 경우는 0.5%의 경사를 필요로 하기 때문에 최소 종단 경사를 0.3%로 설정하였다. 또한 기계 환기를 필요로 하는 터널에서는 환기 계획상 특수한 경우를 제외하면 일반적으로 0.3~2.0% 사이의 경사로 계획하고 있다(국토해양부, 2008). 이에 극단적인 예외사항을 함께 고려하기 위해 3.0%의 조건을 설정하였다.

도로터널 내 풍속은 정체시의 경우와 임계풍속을 포함하여 0.0 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s로 설정하였으며, 도로터널의 계산조건으로 터널연장 1000 m, 계산 시간 1000 sec로 설정하여 총 100 Case에 대한 전산 시뮬레이션을 수행하였다.

2.2 화재 설정 조건

본 화재 시나리오의 화재강도는 버스를 기준으로 하여 20 MW(PIARC 95 기준)(국토해양부, 2009; PIARC, 1995)로 설정하였다. 또한 초기 온도는 20°C로 설정하였으며 화원의 크기는 버스(3.0 m × 12.0 m × 3.6 m)의 크기로 설정하였다.

터널 내 화재 위치는 무풍일 경우 중간지점(750 m)으로 설정 하였으며, 풍속이 존재할 경우 연기의 이동을 고려하여 200 m 지점으로 설정하였다. 화재는 450초에 최대 발열량인 20 MW에 도달하며 화재시의 연기발생량인 80 m³/s로 설정하였다(Billington, et al., 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1 연기층의 유동특성

그림 1~8을 통해 도로터널 내 풍속과 경사에 따른 연기층의 이동거리를 화재 최대 성장시간인 450초를 기준으로 하여 얻은 결과를 나타낸다.

3.1.1 경사에 따른 분석

그림 1은 국도 2차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 연기층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 140 m의 거리차가 발생하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s일 경우 최대 8 m의 거리차가 발생해 두 모델

표 2. The setting conditions on numerical analysis

Tunnel Frame (W×L×H) [m]	A two-lane national highway (12.6 × 1500.0 × 7.2)
	A two-lane expressway (13.2 × 1500.0 × 7.8)
	A three-lane expressway (15.3 × 1500.0 × 9.0)
	A four-lane expressway (18.9 × 1500.0 × 9.6)
The wind velocity in a tunnel [m/s]	0.0, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0
The slope of a road [%]	0.3, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0

사이의 연기층의 이동거리의 차가 94.2% 감소하였다.

그림 2는 고속도로 2차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 연기층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 142 m의 거리차가 발생하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s일 경우 최대 11 m의 거리차가 발생해 두 모델 사이의 연기층의 이동거리의 차가 92.3% 감소하였다.

그림 3은 고속도로 3차선의 경사별 터널내 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 연기층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최

표 3. The intensity of fire analysis

The fire intensity [MW]	20.0
The inner temperature [°C]	20.0
The size of the fire [m]	3.0 × 12.0 × 3.6
The condition of the growth of fire	$Q=at^2$ (450초, 최대)

The curve of the growth of fire

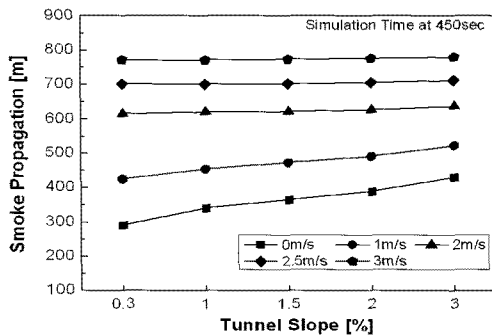
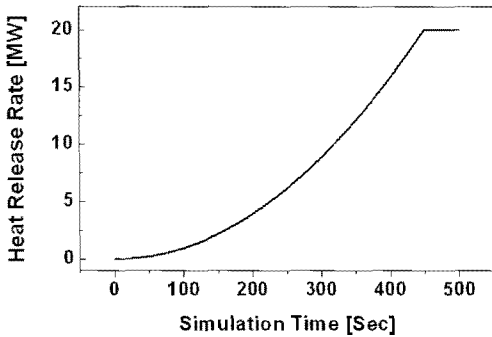


그림 1. The moving distance of the layer of smoke in a two-lane national highway.

대 144 m의 거리차가 발생하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s일 경우 최대 18 m의 거리차가 발생해 두 모델 사이의 연기층의 이동거리의 차가 87.5% 감소하였다.

그림 4는 고속도로 4차선의 경사별 터널내부 풍속에 따

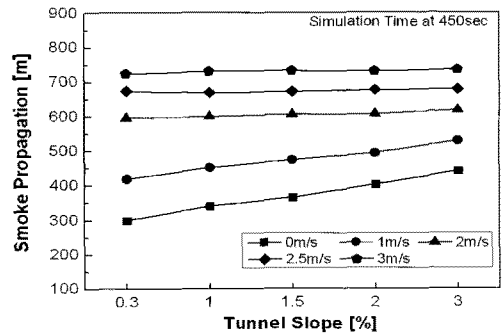


그림 2. The moving distance of the layer of smoke in a two-lane expressway.

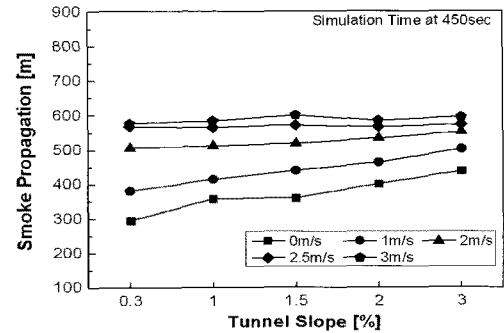


그림 3. The moving distance of the layer of smoke in a three-lane expressway.

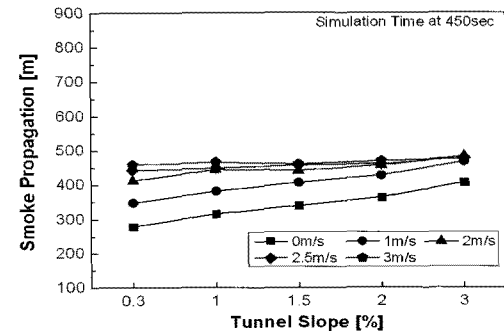


그림 4. The moving distance of the layer of smoke in a four-lane expressway.

른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 연기층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 128 m의 거리차가 발생하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s일 경우 최대 18 m의 거리차가 발생해 두 모델 사이의 연기층의 이동거리의 차가 85.9% 감소하였다.

그림 1~4를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

내부 풍속에 의한 연기층의 이동거리는 경사가 0.3% 일 경우 단면적별로 주어진 조건 중 최소 풍속인 무풍에 비해 최대 265.3%~164.5% 증가하는 것으로 나타났으며, 경사의 증가에 따라 차이가 감소하여 최대 경사인 3.0%의 경우 무풍에 비해 최대 180.9~117.2% 증가하는 것으로 나타나 경사가 증가할수록 터널 내부 기류에 의한 영향이 감소하는 것으로 분석되었다.

3.1.2 터널 내 풍속에 따른 분석

그림 5는 국도 2차선의 터널내부 풍속별 경사에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 경사가 0.3% 일 때 최대 481 m의 거리차가 발생하였으며, 경사가 3.0% 일 때 349 m의 거리차를 보여 두 모델 사이의 연기층의 이동거리 차가 27.3% 감소하였다.

그림 6은 고속도로 2차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 경사가 0.3% 일 때 최대 424 m의 거리차가 발생하였으며, 경사가 3.0% 일 때 293 m의 거리차를 보여 두 모델 사이의 연기층의 이동거리 차가 30.8% 감소하였다.

그림 7은 고속도로 3차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 경사가 0.3% 일 때 최대 282 m의 거리차가 발생하였으며, 경사가 3.0% 일

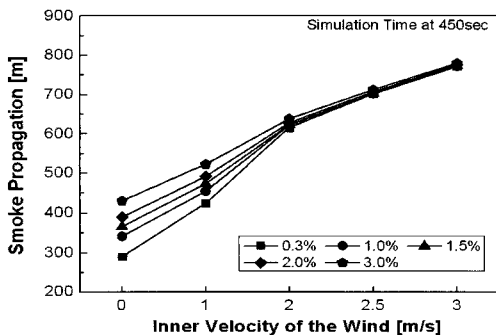


그림 5. The moving distance of the layer of smoke in a two-lane national highway.

때 156 m의 거리차를 보여 두 모델 사이의 연기층의 이동거리 차가 44.7% 감소하였다.

그림 8은 고속도로 4차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 경사가 0.3% 일 때

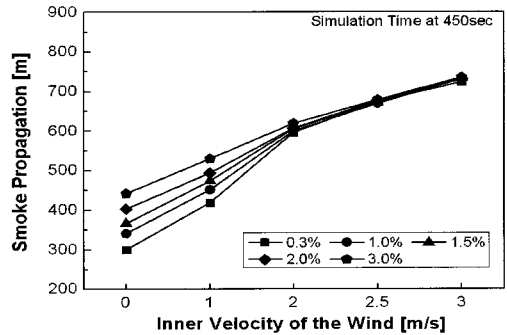


그림 6. The moving distance of the layer of smoke in a two-lane expressway.

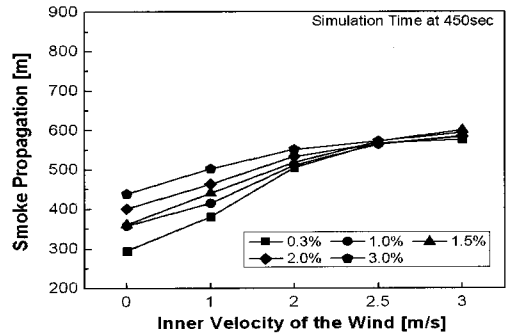


그림 7. The moving distance of the layer of smoke in a three-lane expressway.

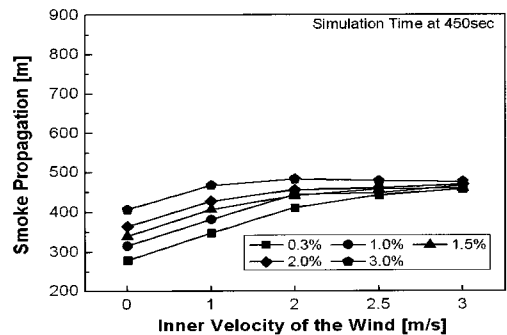


그림 8. The moving distance of the layer of smoke in a four-lane expressway.

최대 180 m의 거리차가 발생하였으며, 경사가 3.0% 일 때 70 m의 거리차를 보여 두 모델 사이의 연기층의 이동거리 차가 61.1% 감소하였다.

그림 5~8을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

도로터널의 경사에 따른 연기층의 이동거리는 내부 풍속이 존재하지 않을 경우 단면적별로 최소 경사인 0.3%에 비해 최대 48.1~45.9% 증가하는 것으로 나타났으며 풍속이 증가함에 따라 차이가 줄어들어 최대 터널 내부풍속인 3 m/s의 경우 최소 경사에 비해 최대 1.0~3.9% 증가하는 것으로 나타나 터널내부 풍속이 상승할 수록 경사에 의한 영향은 낮아지는 것으로 분석되었다.

3.2 온도층의 이동거리

그림 9~12를 통해 도로터널 내 경사에 따른 온도층의 이동거리를 화재 최대 성장시간인 450초를 기준으로 하여 얻은 결과를 나타낸다.

그림 9는 국도 2차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 온도층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 49.5% 증가하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s 일 경우 최대 2.9% 감소하였다.

그림 10은 고속도로 2차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 온도층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 43.4% 증가하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s 일 경우 최대 0.7% 감소하였다.

그림 11은 고속도로 3차선의 경사별 터널내부 풍속에 따른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존

재하지 않을 경우 온도층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 23.2% 증가하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s 일 경우 최대 7.5% 감소하였다.

그림 12는 고속도로 4차선의 경사별 터널내부 풍속에

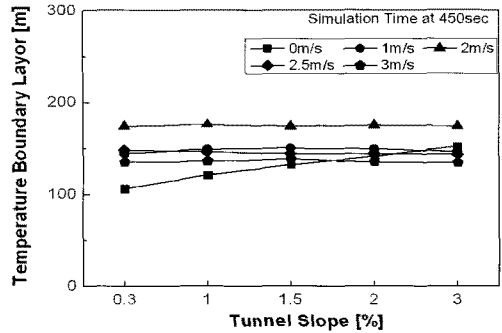


그림 10. The moving distance of the temperature upper hot gas layer in a two-lane expressway.

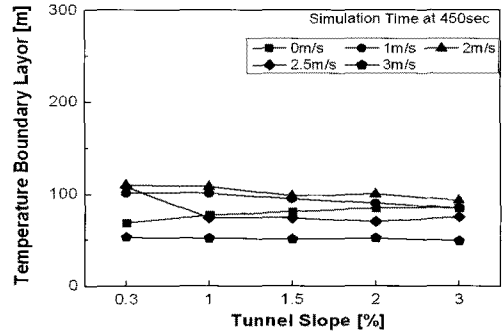


그림 11. The moving distance of the temperature upper hot gas layer in a three-lane expressway.

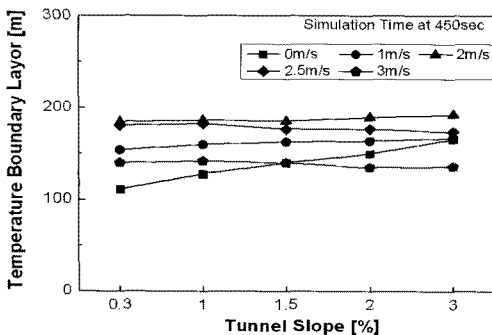


그림 9. The moving distance of the temperature upper hot gas layer in a two-lane national highway.

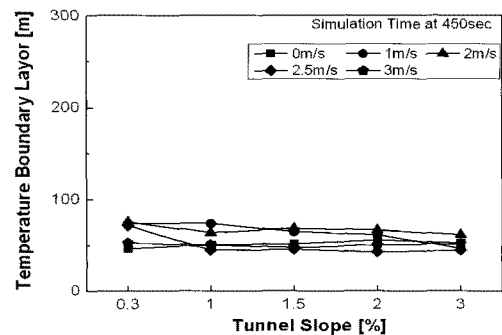


그림 12. The moving distance of the temperature upper hot gas layer in a four-lane expressway.

다른 화재해석 결과이다. 이를 통해 터널내부 풍속이 존재하지 않을 경우 온도층의 이동거리는 경사가 증가함에 따라 최대 12.8% 증가하였으며, 터널내부 풍속이 3 m/s 일 경우 최대 1.9% 감소하였다.

그림 9~12를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

도로터널의 경사에 따른 온도층의 이동거리는 내부 풍속이 존재하지 않을 경우 단면적별로 최소 경사인 0.3%에 비해 최대 49.5~12.8% 증가한 것으로 나타났으며 풍속이 증가함에 따라 차이가 줄어들어 최대 터널 내부풍속인 3 m/s의 경우 최소 경사에 비해 최대 2.9~1.9% 감소한 것으로 나타나 터널내부 풍속이 상승할수록 경사에 의한 영향은 낮은 것으로 나타나 온도층의 이동양상은 연기층의 내부기류흐름과 비슷한 양상을 보이는 것으로 분석되었다.

그러나 온도의 이동거리는 연기층의 양상과는 다르게 2.0 m/s 이상의 경우 기류기 양상은 동일하나 이동거리가 오히려 2.0 m/s 보다 낮게 나타났다. 이는 터널내부의 기류 속도가 높아짐에 따라 낮게 상승한 온도층의 이동은 낮은 기류속도보다 멀리 이동하지만 기류로 인해 발생하는 냉각효과로 인해 위험 온도 영역인 60°C 이상의 온도층은 상대적으로 줄어들게 되는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내부 풍속에 의한 연기층의 이동거리의 경우 경사별 거리차를 통해, 터널의 단면적이 증가할수록 터널 내부 기류에 의한 영향이 감소하는 것으로 나타났다.
2. 도로터널의 경사에 따른 연기층의 이동거리는 내부 풍속이 상승할수록 경사에 의한 영향력이 감소하는 것으로 나타났다.
3. 도로터널의 경사에 따른 온도층의 이동거리는 내부 풍속이 상승할수록 경사에 의한 영향은 낮은 것으로 나타났다.

4. 온도층의 이동거리는 터널 내부 풍속이 존재하지 않을 경우 연기층의 이동과 비슷한 기류기의 양상을 나타냈지만 풍속 1 m/s 이상의 터널 내에서는 공기흐름으로 인한 냉각효과로 고온의 공기가 희석됨에 따라 기존 온도층의 이동거리는 경사에 거의 영향을 받지 않으며 오히려 감소하는 것으로 나타났다.
5. 경사가 일정하지 않은 터널 내 화재에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 인천대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2008), 도로 교량 및 터널 현황 조사 2008.
2. 국토해양부 (2008), 도로설계편람 제6편 터널 1차년도 개정안.
3. 국토해양부 (2009), 도로터널 방재시설설치 및 관리지침, pp. 97.
4. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식 (2004), “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 129-140.
5. 김정엽, 신현준, 강세구, 안경철 (2004), “도로터널 화재 발생시 연기유동에 관한 축소모형실험 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 141-148.
6. 유홍선, 양승신 (2005), “터널 화재시 배연속도가 연소를 변화에 미치는 실험적 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 119-131.
7. Kevin McGrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka and Jason Floyd (2008), Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST, pp. 3-4.
8. M.J. Billington, Anthony Ferguson, and A.G. Copping (1998), Means of Escape form Fire, Blackwell Science.
9. PIARC (1995), Fire and Safety in Road Tunel.

접수일(2009.5.27), 수정일(2009.7.2), 게재확정일(2009.7.10)