

대심도 터널 화재 시 균일배기 환기방식에서의 최적배연 연구

김종윤^{1*}, 임경범², 전용한³

¹서정대학교 소방안전관리과, ²대전과학기술대학교 소방안전관리과,

³상지영서대학교 소방안전과

Study of the Effective Fire and Smoke Control in Deep Underground Tunnel with Transverse Ventilation

Jong-Yoon Kim^{1*}, Kyung-Bum Lim², Yong-Han Jeon³

¹Department of Fire Safety Management, Seojeong College

²Department of Fire Safety Management, DaeJeon Institute of Science and Technology

³Department of Fire Safety, Sangji Youngseo College

요약 본 연구는 대심도 터널에서 화재발생 시 균일배기방식의 경우에 대하여 최적의 배연용량을 산정함으로써 환기설비의 설계기술기준 정립 및 세부설계인자 도출을 위한 기초자료로의 활용을 목적으로 한다. 수치해석은 FDS 프로그램을 사용하였으며, 대심도 터널 화재 시 비정상유동에 대하여 해석하였다. 화재해석 결과, 터널내부의 풍속이 0 m/s인 경우 배연용량이 80 m³/s로 연기이동거리가 250 m이내로 유지되었으나, 내부풍속이 3.0 m/s인 경우 배연용량이 197.1 m³/s로 약 2.5배 증가되어야 연기이동거리가 250 m 이내로 유지되었다.

Abstract This study represents the effective fire and smoke control in the case of fire in deep underground tunnels, even if the exhaust system can be calculated, the optimal smoke capacity can be determined by establishing technical standards for the transverse ventilation system focusing on the design as a basis for deriving the parameters for utilization. Numerical analyses were performed using the FDS program as a function of the unsteady flow in a deep underground tunnel fire. The analysis results were calculated within 250 m smoke using an inside wind velocity of 0m/s when the capacity of smoke was exhausted, 80 m³/s, whereas in case of an internal wind velocity of 3m/s, the capacity of smoke exhaust was 197.1m³/s, showing an approximately 2.5 fold increase.

Key Words : Deep underground tunnel, Tunnel fire, Exhaust smoke, Transverse ventilation

1. 서론

지하 도로터널은 지면으로부터 40 m이상의 지하에 격자형으로 계획되기 때문에 지상도로의 특성을 고려하여 제정된 현행의 환기 및 방재시설기준을 그대로 적용하는 것은 이용자의 안전 확보에 상당한 문제를 야기시킨다. 따라서 도로의 심도가 깊고, 연장이 길며, 접속부가 지하에 건설되는 지하도로의 특성에 적합하도록 각종 안전시설의 설치간격 및 용량 등에 대한 기술기준의 정비가 필

요하다. 또한 사고 발생 시 대피자의 인명보호를 위하여 감지수단, 제연설비, 피난대피통로의 간격 및 구난방법 등 대피환경의 확보에 대한 기준의 재검토가 요구된다. 특히, 대심도 지하터널의 경우 유사시 안전을 확보하기 위한 인명구조, 안전시설의 운영 등 정확한 사고대처 시나리오 작성과 이에 따른 각종시설의 정상적인 기능이 발휘되도록 하여야 한다.

본 연구에서는 대심도 터널에서 화재발생 시 균일배기방식에 의한 최적 배연용량을 산정함으로써 운전환경

*Corresponding Author : Jong-Yoon Kim(Seojeong College)

Tel: +82-31-860-5014 email: kimjy@seojeong.ac.kr

Received July, 29, 2014

Revised (1st September, 15, 2014, 2nd October, 21, 2014)

Accepted January, 8, 2015

과 방재안전을 위한 환기설비의 설계기술기준을 정립하고 세부설계인자 도출을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 수치해석 조건 및 방법

2.1 화재해석 모델[1][2]

본 연구에서 화재해석에 사용되는 소프트웨어는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire dynamics simulator)로서, 화재에 의해 발생하는 열과 연기 등 유체유동을 다루기 위한 화재전용 시뮬레이션 소프트웨어이다. FDS는 Navier-Stokes Equations에 의한 해석을 기초로 하고 있으며 FDS에 의해 연산된 결과를 Smokeview라는 가시화 툴을 이용하여 연기와 온도의 유동을 평가할 수 있다. 또한 수치해석 결과를 Data sheet 형태로 출력하여 시간과 위치에 따른 정량적인 평가가 가능하다.

화재현상은 시간의 변화에 따라 급격한 온도상승과 압력변화, 복잡한 난기류의 생성 등을 수반하는 난류유동이므로 이에 대한 해석을 위하여 운동량 지배방정식은 비정상 유동(unsteady flow)으로 해석하며, 화재유동은 직교좌표계에서 대류 및 확산을 수반하는 3방향 속도 성분을 포함, 시간에 대한 압력변화 등을 반영하는 3차원 Full Navier-Stokes Equation을 이용하여 해석한다. 또한 에너지 지배방정식은 연료에 의한 에너지의 생성과 소멸을 포함하는 Non-homogeneous 형태의 방정식을 적용한다.

현재 국내에서는 FDS를 이용하여 건물이나 터널, 지하철에서의 화재시 적정 대피 루트나 화재에 대한 인원의 대피안전성에 대한 평가에 주로 사용하고 있으며 이에 대한 많은 적용사례가 있다. 또한 제연설비와 스프링클러 설비 그리고 건축물의 내화구조평가가까지 가능함에 따라 성능위주의 피난 안전성 평가에 대표적으로 활용되고 있다.

2.2 배연용량 산정

화재 시 배연은 주행공간에서 이루어지기 때문에 연기와 함께 주변의 공기가 같이 유입되게 되므로 배연을 위한 환기 용량은 연기발생량 보다 현저히 증가한다는 점을 고려해야 한다. 본 연구에서 배연용량(Q_e)은 반휘류

또는 횡류 환기방식을 전제로 화재발생 후 가능한 터널 내 유속과 연기발생량 (Q_s , 20 MW기준, $80 \text{ m}^3/\text{s}$)을 근거로 산정하며,^[3] 식(1)과 같다.

$$Q_e = A_r \times V_c + Q_s \quad (1)$$

여기서, Q_s 는 연기발생량(m^3/s), A_r 은 터널단면적, V_c 는 기류의 방향성제어를 위한 풍속을 나타낸다. $A_r \times V_c$ 는 주변공기의 유입으로 인해 증가하는 풍량으로 터널 내부 기류 속도(V_A)가 증가하면 현저하게 증대된다.

2.3 화재해석 설정조건

터널에서의 화재 발생 시 내부 기류 조건과 배연량에 따른 설정조건 및 화재시나리오를 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.

터널의 제원은 Figure 1과 같이 국내 도로설계편람[3]에 제시된 병설터널 TBM방식의 횡류식 단면도 수치를 적용하였으며, 발열량 및 연기 및 CO 발생율은 동 편람의 정량적 위험도 평가기법에 적용된 시나리오 작성기준을 참고하여 적용하였다.

화재해석시간은 화재 발생 이후 900초까지 실시하였으며 이는 화재 발생 시 화재지점으로부터 250 m의 안전거리까지 탈출할 수 있는 충분한 시간으로 판단하여 적용하였다.

[Table 1] Condition of Simulation

Elements	Value
Length	900 m
Width	9.3 m
Height	3.3 m
Cross sectional area(A_r)	29.97 m^2
Port numbers	280
Port size	$0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} (0.6 \text{ m}^2)$
Fire intensity	20.0 MW
Soot yield	0.133 g/g
CO yield	0.168 g/g
Mesh number	613,800
Mesh size	$0.3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$
Mesh resolution	$6.36^{[4]}$
Calculation time	900 sec

대심도 터널 화재에 대한 내부기류 및 배연시나리오는 내부로 유입되는 풍속(V_A)의 변화 5조건에 대하여 배연용량 산정식에 의한 제어풍속(V_c) 9조건을 조합하여 총 45개의 설정으로 화재해석을 실시하였다.

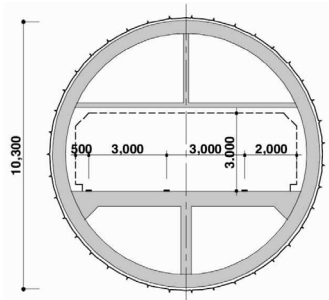
[Table 2] Fire Scenario (m/s)

		Inner Velocity(V _A)				
		0	1	1.75	2.5	3
V _c	0	A1C1	A2C1	A3C1	A4C1	A5C1
	0.5	A1C2	A2C2	A3C2	A4C2	A5C2
	1	A1C3	A2C3	A3C3	A4C3	A5C3
	1.5	A1C4	A2C4	A3C4	A4C4	A5C4
	2	A1C5	A2C5	A3C5	A4C5	A5C5
	2.5	A1C6	A2C6	A3C6	A4C6	A5C6
	3	A1C7	A2C7	A3C7	A4C7	A5C7
	4	A1C8	A2C8	A3C8	A4C8	A5C8
	5	A1C9	A2C9	A3C9	A4C9	A5C9

여기서 내부 풍속(V_A)은 터널 내부로 유입되는 자연풍으로서 교通风력이 적용되지 않은 화재 사고 발생 시의 차량이동이 제한된 시나리오 상의 풍속이다.

2.4 연기이동거리 산정 방법[2][5]

FDS에서 가지거리에 대한 평가는 발광원에서 발광한 빛이 일정한 거리(L)에 위치한 수광원에 도달할 때 발광원과 수광원에서 수광되는 빛의 강도비를 나타내는 소광계수 K(extinction coefficient)에 의해서 평가된다.



[Fig. 1] Cross Section of Tunnel

FDS에서의 가지거리 산정방법은 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering에서 제시하고 있는 수식을 사용한다.

발광원에서 빛의 강도(I₀)와 수광원에서 빛의 강도(I), 소광계수(K)의 관계는 다음의 수식(1)과 같다.

$$I/I_0 = e^{-KL} \tag{2}$$

또한, 소광계수는 빛의 소멸정도를 나타내는 값으로 빛의 소멸은 빛의 전파경로 상에 탄소입자에 의한 빛의 흡수에 의해서 발생하므로 소광계수는 연기(smoke particle) 농도에 영향을 받게 되며, 소광계수(K)와 연기농도(ρY_s, density of smoke particulate)관계는 아래의 식과 같다.

$$K = K_m \cdot \rho Y_s \tag{3}$$

여기서, K_m (Specific extinction coefficient)은 일반적 값인 8,700 m²/kg을 적용하였다.

소광계수(K) 와 가지거리(S) 관계는 아래의 식으로 표현된다.

$$S = C/K \tag{4}$$

여기서, C는 상수로 연기의 종류 및 상황에 따라서 달리 적용되고 있으나 일반적으로 빛을 발광하는 물체에 대해서는 C=8 이며, 반사체에 대해서는 C=3을 적용한다.

FDS에서는 계산되는 연기농도의 값을 미리 설정된 K_m과 C를 통하여 가지거리를 출력할 수 있으며 본 연구에서는 가지거리가 10 m 이하일 경우 해당 위치까지 연기가 이동한 것으로 판단하였다.

3. 화재해석결과

2절에 제시된 설정조건 및 화재 시나리오에 따라 대심도 터널 화재에 대한 수치해석을 실시하였으며 그 결과를 Table 3 ~ Table 7에 나타내었다.

일방통행터널에서는 대인용 피난연결통로의 설치간격을 250 m 이하^[3]로 설치해야 하므로 이 기준에 따라 화재 시 연기의 이동거리는 250 m 이하로 유지되도록 제어 풍속을 설정하여야 한다.

따라서 수치해석을 통하여 배기장치의 풍속을 0 m/s ~ 5 m/s의 범위에서 0.5 m/s간격으로 증가시키며 연기의 이동거리를 해석하고 이 결과에 따라 제어풍속을 설정하였다.

[Table 3] Soot distribution for inner velocity 0.0 m/s

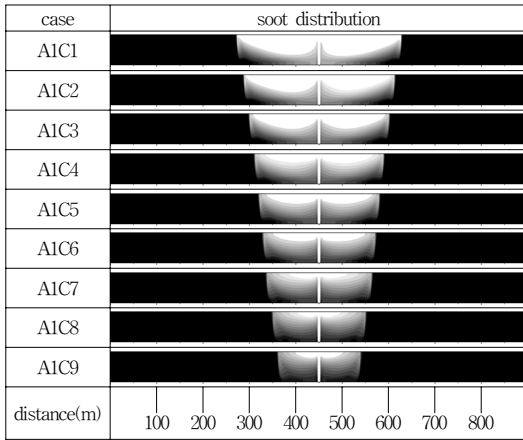


Table 3.에 터널 내부풍속이 무풍(0 m/s)일 경우 제어 풍속에 따른 연기 분포를 나타내었다.

터널의 수평거리는 900 m이며 화재 위치는 터널 450 m 지점에서 발생한 것으로 가정 하였다.

내부풍속이 무풍일 경우 제어풍속에 따른 연기의 이동거리는 95 ~ 182 m로 나타났으며 모든 조건에서 연기 분포가 250 m 이하로 유지되었다.

따라서 내부풍속이 무풍일 경우는 배기장치의 운전 없이 자연대류에 의해 배기구를 통하여 연기가 빠져나가는 것으로 나타났다. 특히 풍속을 5 m/s로 운전 할 경우 연기확산은 100 m 이내로 제한되어 안전함을 알 수 있다.

[Table 4] Soot distribution for inner velocity 1.0 m/s

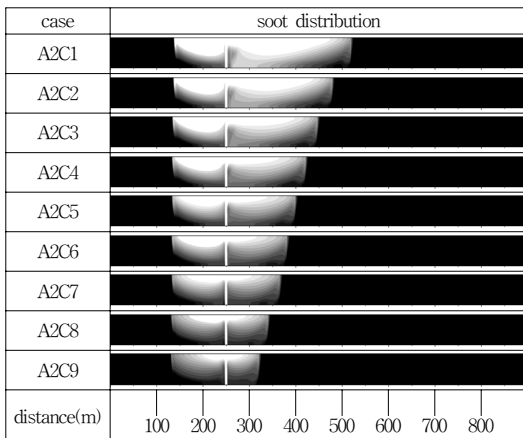


Table 4.에 터널 내부풍속이 1.0 m/s일 경우 제어풍속에 따른 연기의 분포를 나타내었다.

터널 내부풍속은 터널 입구(0 m)에서 출구(900 m)방향으로 공급되며 터널 단면에 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 화재는 250 m 지점에서 발생하는 것으로 가정하였다.

해석결과 터널 입구에서의 공기유입에 따라 출구방향으로 연기가 더 확산됨을 알 수 있으며 연기의 이동거리는 72 ~ 270 m로 나타났다.

또한 배기장치의 풍속을 0.5 m/s 이상으로 운전 할 경우 연기 이동거리가 250 m 이내로 유지되기 때문에 최소 제어풍속은 0.5 m/s 이상으로 설정해야 함을 알 수 있다.

[Table 5] Soot distribution for inner velocity 1.75 m/s

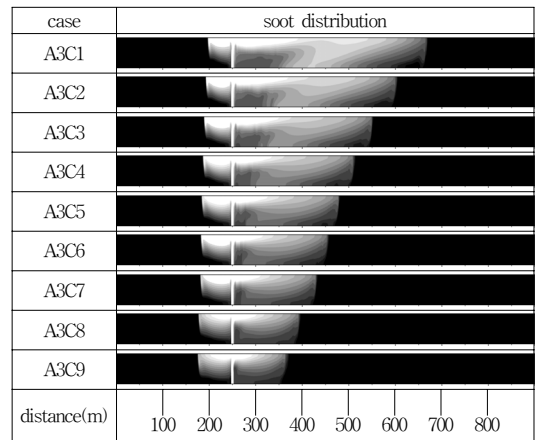


Table 5.에 터널 내부풍속이 1.75 m/s일 경우 제어 풍속에 따른 연기 분포를 나타내었다. 터널의 설정 조건은 터널 내부의 공급풍속 이외에 Table 4.와 모두 동일하게 설정하였다. 터널 입구의 풍속에 영향에 따라 터널 입구 방향으로의 연기 이동거리는 70 m 내외로 나타났으며 출구 방향으로의 연기 이동거리는 배연풍량에 따라 117 ~ 416 m로 나타났다. 제어풍속이 2.0 m/s 이상일 경우 연기 이동거리가 250 m 이내로 유지되는 것으로 분석되었으며 이에 따라 최소 제어풍속을 2.0 m/s 이상으로 설정해야 함을 알 수 있다.

Table 6.에 터널 내부풍속이 2.5 m/s일 경우 제어 풍속에 따른 연기 분포를 나타내었다. 터널의 내부풍속에 의해 터널 입구방향으로의 연기가동은 50 m 이내로 거의 이루어지지 않고 있으며 터널 출구방향으로 제어풍속에 따라 169 ~ 614.5 m의 연기의 이동이 나타났다. 따라서 제어풍속을 4.0 m/s 이상으로 설정하여 연기 이동거리를 250 m 이내로 유지시켜야 하는 것으로 나타났다.

[Table 6] Soot distribution for inner velocity 2.5 m/s

case	soot distribution							
A4C1								
A4C2								
A4C3								
A4C4								
A4C5								
A4C6								
A4C7								
A4C8								
A4C9								
distance(m)	100	200	300	400	500	600	700	800

Table 7.에 터널 내부풍속이 3.0 m/s일 경우 제어 풍속에 따른 연기 분포를 나타내었다. 이 경우 연기의 이동은 터널의 입구 방향으로 거의 이루어지지 않고 있으며 또한 제어풍속이 0.0 m/s일 경우 연기의 이동거리가 650 m를 넘어 터널 외부로 유출되는 것으로 나타났다. 제어 풍속 0.5 m/s 이상의 경우 연기의 이동거리는 202 ~ 644.5 m로 나타났으며 제어풍속이 4.0 m/s 이상일 경우 연기 이동거리가 250 m 이내로 유지되는 것으로 분석되었다.

[Table 7] Soot distribution for inner velocity 3.0 m/s

case	soot distribution							
A5C1								
A5C2								
A5C3								
A5C4								
A5C5								
A5C6								
A5C7								
A5C8								
A5C9								
distance(m)	100	200	300	400	500	600	700	800

대심도 터널 내 화재해석 결과를 토대로 내부 풍속에 따른 제어풍속 결과를 Table 8.에 나타내었다. 해석 결과, 터널내부 풍속이 무풍일 경우 제어풍속(V_c)이 0.0 m/s에서도 연기이동거리가 250 m이내로 유지되었으나, 내부

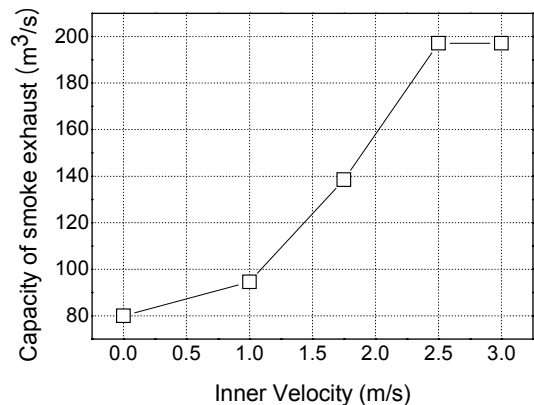
풍속(V_A)이 3.0 m/s일 경우 제어풍속(V_c)이 4.0 m/s 이상으로 설정되어야 함을 알 수 있다. 또한 식 (1)을 이용하여 본 연구에서 채택한 대심도 터널의 배연용량을 산정하면 Table 9.와 같으며 이를 정리하여 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같이 도시할 수 있다.

[Table 8] Result of simulation (soot distance) (m)

$V_c(m/s) \backslash V_A(m/s)$	0	1	1.75	2.5	3
0	182	270	416	614.5	-
0.5	168	229	351	497	644.5
1	156.5	198	298.5	424.5	517
1.5	144.5	172	260.5	368.5	445.5
2	135	150.5	226.5	323.5	390
2.5	127	132.5	203.5	282.5	348.5
3	119	117	178.5	252.5	308
4	106	91.5	142.5	204	246.5
5	95	72	117	169	202

[Table 9] Capacity of smoke exhaust according to inner velocity

$V_A(m/s)$	0	1	1.75	2.5	3
$Q_e(m^3/s)$	80	94.6	138.5	197.1	197.1



[Fig. 2] Capacity of smoke exhaust according to inner velocity

결과에 나타나는 바와 같이 터널 내부에 풍속이 존재하지 않는 경우 연기발생량인 80 m³/s의 배연용량을 설정하여 운전하여도 연기의 이동거리가 250 m 이내로 유지되지만 터널내부에 풍속이 3 m/s의 경우 배연용량은 197.1 m³/s 가 되어 약 2.5배의 배연용량이 필요한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 대심도 터널에서 화재발생 시 균일배기방식의 경우에 대하여 최적의 배연용량 산정을 실시하였다.

화재해석 결과 연기는 터널 입구의 풍속에 영향을 받으며 입구 풍속의 증가에 따라 이동거리가 현저히 증가함을 알 수 있었다. 터널내부 풍속이 무풍일 경우 제어풍속 없이도 연기이동거리가 250 m 이내로 유지되었으나, 내부풍속이 3.0 m/s일 경우 제어풍속이 4.0 m/s 이상으로 설정되어야 연기 이동거리가 250 m 이내로 유지됨을 알 수 있었다. 또한 이 결과에 따라 배연용량을 산정한 결과 내부풍속이 무풍인 경우 연기발생량인 80 m³/s만을 터널에서 배연함으로서 연기를 제한할 수 있지만 내부풍속이 3 m/s로 다소 강한 경우 배연량을 약 2.5배인 197.1 m³/s만큼 늘려야 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

References

- [1] Kevin McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide", National Institute of Standards and Technology, USA, 2010.
- [2] Kevin McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", National Institute of Standards and Technology, USA, 2010.
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "The Road-Design Guideline(chapter of Tunnel)", Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010.
- [4] M. H. Salley, "Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Application. (NUREG-1824)", U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA, 2007.
- [5] P.J. DiNunno, editor. "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, USA, 4th edition, 2008.

김 종 윤(Jong-Yoon Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 인천대학교 인천대학원 안전공학과 (석사)
- 2007년 8월 : 인하대학교 인하대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 서정대학교 소방안전관리과 교수

<관심분야>
화재, 기계공학

임 경 범(Kyung-Bum Lim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 인하대학교 인하대학원 전기공학과 (석사)
- 2002년 2월 : 인하대학교 인하대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 대전과학기술대학교 소방안전관리과 교수

<관심분야>
화재, 전기공학

전 용 한(Yong-Han Jeon)

[정회원]



- 2004년 2월 : 인하대학교 인하대학원 기계공학과 (석사)
- 2008년 8월 : 인하대학교 인하대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 상지영서대학교 소방안전과 교수

<관심분야>
화재, 기계공학