

종류식 터널내 소요 환기량에 의한 터널환기 및 화재 시뮬레이션 연구 (임고 4 터널)

채 경 희

우송정보대학 빌딩/크린룸 설비 계열

Fire Simulation Study and Tunnel Ventilation of Requirement in the Longitudinal Tunnel. (In Yimgo-4th Tunnel)

Chae, Kyung - Hee

building/clean room equipment system, Woosong college, Daejeon 226, Korea

Abstract : This study is aimed to analyze the flow patterns and thermal characteristics by computer simulation under the variations of fire strength for Daegu-Pahang Yimgo-4th tunnel, from which flow and heat distributions are predicted in the longitudinal tunnel. Though the results of numerical computations, followings are found; one is that the volume flow rate is discontinuously increasing as closer to fire location, and the other is that a critical design to get faster flow rate is required because of existence of backlayer flow for the high fire strength in view of safety for the people in fire of the tunnel.

1. 서 론

터널화재의 특성은 입출구를 제외하고는 밀폐된 공간이라는 특수 상황이므로 화염이나 매연이 단시간 내에 터널전체로 확산되어 대피할 시간적 여유가 없이 큰 재해를 일으키게 된다. 따라서 터널 내 화재발생시 인명 등의 재해를 최소화하기 위해서는 화염과 연소가스의 거동을 정확히 예측하여 효율적으로 제어하는 것이 중요하나 차량을 포함한 여러 물질의 복잡한 연소반응을 정확하게 묘사하기는 현실적으로 불가능하므로 연소와 복사는 무시하였다. Biollay and Chasse는 Offenegg 터널화재 실험에 대한 결과를 수치해석한 결과 Reynolds수와 Froude수로 상상한 2차원 모델과 3차원 모델의 계산결과가 거의 일치함을 보였고, 복사열전달의 영향이 무시할 수 없을 만큼 크다고 하였다. Kumar and Cax와 Kumar는 Zwenberg 터널화재 실험에 대해 터널의 구배 정도가 자연화기시에 많은 영향

을 미치고 있음을 밝혔다. Karki and Patankar는 미국 웨스트 버지니아주의 메모리얼 터널에서 복사 열 전달 량을 화재발생량의 분율로 정의하고 화재발생량에서 복사 열전달 량을 제거하여 수치 해석한 결과 화염면 하류에서 비교적 정확한 결과를 얻었다.

종류식 터널 내 화재에 의한 열 및 기류분포의 정확한 예측을 위해 기존에 설치된 대구-포항간 임고4터널을 대상으로 화재강도를 경계조건으로 하여 온도로서 화재를 표현하였으며, 연소와 복사는 고려하지 않았다.

2. 이론해석

2-1. 자연환기량 계산

2.1 자연환기량 산정

1) 압력계산식

$$\Delta Pr = \Delta Pt - \Delta Pm$$

$$\Delta Pr : \text{통기저항(mmAq)}$$

ΔP_t : 교통환기력(mmAq)

ΔP_m : 저항자연풍(mmAq)

$$\frac{Ae}{Ar} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (Vt - Vr)^2 - (1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vr^2$$

가) 통기저항

$$\Delta P_r = (1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vr^2$$

ΔP_r : 통기저항(mmAq)

ξe : 터널입구 손실계수

λr : 터널벽면 마찰손실계수

Lr : 터널연장(m)

Dr : 터널대표직경(m)

ρ : 공기밀도(0.1224 kgf · s²/m⁴)

여기서, $K = \frac{Ae \cdot n}{Ar \cdot (1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr})}$ 로 바꾸면

$$Vr^2 = K(Vt - Vr)^2 - Vr^2 \text{ 으로 된다.}$$

나) 교통환기력

$$\Delta P_t = \frac{Ae}{Ar} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (Vt - Vr)^2$$

ΔP_t : 교통환기력(mmAq)

Ar : 터널 내공 단면적 (m²)

Ae : 자동차 등가저항면적 (m²)

ρ : 공기밀도(0.1224kgf · s²/m⁴)

n : 터널내 자동차 대수 (대)

Vt : 터널내 주행속도 (m/s)

Vr : 터널내 차도풍속 (m/s)

2.2 수치해석방법

[Figure 1]은 본 터널의 모델링에 대한 계산격자를 도시한 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 본 연구의 해석을 위해 구성한 터널의 높이와 폭 및 종 방향 길이는 8.5m, 14.515m, 1690m로서 실제 스케일로 모델화하였다. 횡단면의 격자수는 1,188개이며 길이방향으로는 4,806개로 분할하였는데, 길이방향 분할에 있어서 구배가 클 것으로 예상되는 팬과 차량영역에서는 주위 격자보다 조밀하게 나누는 비 균등 분할을 적용하였다. 본 연구에서는 D. B. Spalding이 개발한 상용 CFD Code인 PHOENICS 프로그램으로서 주요 설계조건에 대해 프로그램의 Fortran coding을 수행하였고 수치해석 방법은 FVM(Finite Volume Method) 및 계산 수단으로는 hybrid scheme을 사용하였다.

다) 저항자연풍

$$\Delta P_m = (1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vr^2$$

ΔP_m : 저항자연풍(mmAq)

ξe : 터널입구 손실계수

λr : 터널벽면 마찰손실계수

Lr : 터널연장 (m)

Dr : 터널대표직경 (m)

ρ : 공기밀도 (0.1224 kgf · s²/m⁴) Vn :

자연풍에 의한 차도내 풍속(m/s)

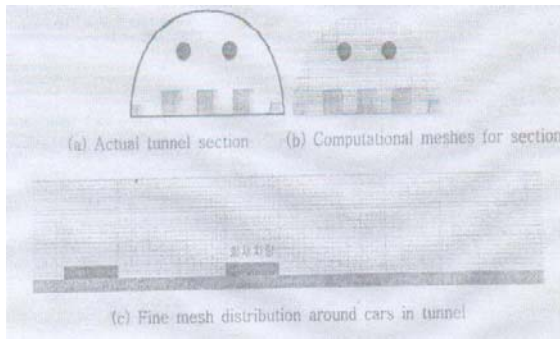
2) 자연환기량(Qn)

자연풍의 방향이 차도내 풍향 및 교통방향과 반대인 경우

$\Delta P_r = \Delta P_t - \Delta P_m$ 에 따라

$$(1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vr^2 =$$

[Figure 1] Layout of computational grids



Code	PHOENICS-VR3.5.1
Grids	44*27*1728
Algorithm	SIMPLEST
Scheme	Hybird
Convergence criteria	Until obtaining total residual less than 0.01% of reference residual
Iteration	12,000
Computer	P-IV 3.0 G
Computation time	more than 150 Hours in each Case

[Table 1] Numerical method used in this study

3. 소요환기량 및 장비용량 계산

3-1 소요환기량 계산

가. 매연(Smoke)에 대한 소요환기량

1) 적용식

$$Q_T = \sum_{\square \text{차종} \square} (q_0^T \cdot n) \cdot i \cdot \frac{f_{iv} \cdot f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{1}{K_{lim}} \quad [m^3/s \cdot km \cdot lane]$$

주) 한국도로공사 설계기준서 P.6

여기서, Q^T : 소요환기량 [$m^3/s \cdot km \cdot lane$]

q_0^T : 매연배출량 [$m^3/h \cdot 대$]

f_{iv} : 구배-속도 보정계수

f_H : 표고 보정계수

K_{lim} : 매연투과계수 [m^{-1}]

나. 일산화탄소(CO)에 대한 소요환기량

1) 적용식

$$Q_{CO} = \sum_{\square \text{차종} \square} (q_0^{CO}) \cdot i \cdot \frac{f_{iv} \cdot f_v \cdot f_h}{3600} \cdot \frac{10^6}{CO_{lim}} \quad [m^3/s \cdot km \cdot lane]$$

주) 한국도로공사 설계기준서 P.6

여기서, Q_{CO} : 오염물질에 대한 소요환기량 [$m^3/s \cdot km \cdot lane$]

q_0^{CO} : 오염물질에 대한 기준배출량 [$m^3/h \cdot 대$]

f_i : 구배보정계수

f_v : 속도보정계수

f_H : 표고 보정계수

CO_{lim} : 최대허용 CO 농도 [ppm]

다. 질소산화물(NOx)에 대한 소요환기량

1) 적용식

$$Q_{NOx} = \left\{ \sum_{\square \text{차종} \square} (q_0^{NOx}) \cdot i \right\}$$

주) 한국도로공사 설계기준서 P.6

여기서, Q_{NOx} : 오염물질에 대한 소요환기량 [$m^3/s \cdot km \cdot lane$]

q_0^{NOx} : 오염물질에 대한 기준배출량 [$m^3/h \cdot 대$]

f_i : 구배보정계수

f_v : 속도보정계수

f_H : 표고 보정계수

NOx_{lim} : NOx의 허용농도 [ppm]

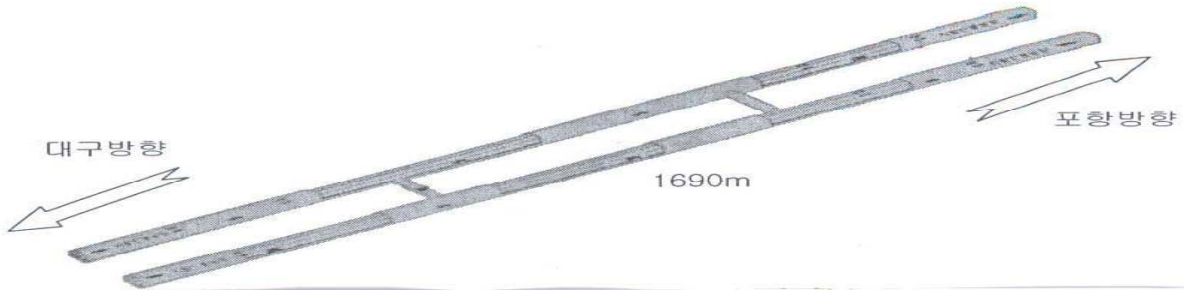
4. 터널환기 시뮬레이션

4.1 환기 시뮬레이션 개요

본 터널환기 시뮬레이션은 대구-포항 7공구 고속도로 건설공사 중 기계터널이 설계목적에 포함되어 원활한 터널환기와 방재시스템이 구축될

수 있도록 시뮬레이션을 통해 예상 가능한 문제 점을 도출하고 이를 사업 및 시행 주체자에게 통보함으로써 이를 개선, 보완하는 자료로 활용 함에 그 목적이 있다.

■ 터널제원



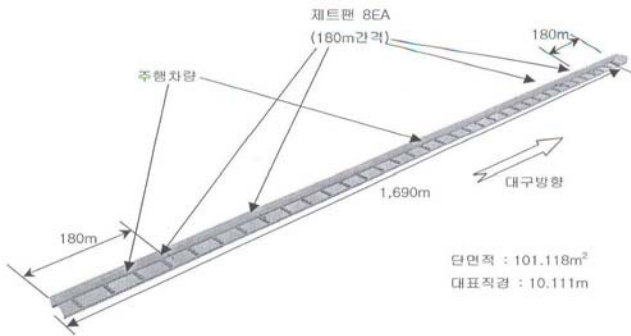
■ 해석모델

구분	대구방향			포항방향			비고	
터널연장	1,690							meter
	417.72	1265.62	6.66	26.66	1333.34	330		
종 단 구 배 [%]	3.412	2	0.09	-0.09	-2	-3.412		
차선수	편도3차선			편도3차선				
차도단면적	101.118m ²			101.101m ²			Ar	
대표직경	10.111m			10.114m			Dr	
지형구분	평지							
설계속도	100km/h							
평균표고	218m							
대형차 혼입률	33.9%							
일일교통량	82,722대/일							2021년

■ 해석모델

해석모델 개요

- ☞ 오르막 구배로서 환기에 불리한 조건인 대구방향을 해석모델로 채택
- ☞ 전체해석영역크기 : 15m×8.5m×1690m
- ☞ 제트팬
 - 터널 입출구로부터 180m 이격되어 180m 간격으로 설치
 - 2개씩 1set를 구성하여 4set 설치
- ☞ 관심오염물질 : 매연, CO, NOx



[주행속도별 매연기준 필요환기량]

	터널연장[km]			차선 수 [Lane]	K _{lim} [m ⁻¹]
	구간 1	구간 2	구간 3		
10km/h	-	-	-	-	-
20km/h	-	-	-	-	-
30km/h	-	-	-	-	-
40km/h	-	-	-	-	-
50km/h	-	-	-	-	-
60km/h	-	-	-	-	-
70km/h	-	-	-	-	-
80km/h	-	-	-	-	-
10km/h	-	-	-	-	-
20km/h	-	-	-	-	-
30km/h	-	-	-	-	-
40km/h	-	-	-	-	-
50km/h	-	-	-	-	-
60km/h	0.42	1.27	0.0067	3	0.006
70km/h	0.42	1.27	0.0067	3	0.006
80km/h	0.42	1.27	0.0067	3	0.006

[주행속도별 CO기준 필요환기량]

	터널연장[km]			차선수 [Lane]	허용농도 [PPM]
	구간1	구간2	구간3		
10km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
20km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
30km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
40km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
50km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
60km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
70km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100
80km/h	0.42	1.27	0.0067	3	100

구간1	f _{iv}		f _v	f _H	요구환기량 [m ³ /s]
	구간2	구간3			
1.28	1.17	1.01	0.80	1.22	286
1.28	1.17	1.01	0.84	1.22	229
1.28	1.17	1.01	0.88	1.22	191
1.28	1.17	1.01	0.92	1.22	161
1.28	1.17	1.01	0.96	1.22	139
1.28	1.17	1.01	1.00	1.22	117
1.28	1.17	1.01	1.07	1.22	107
1.28	1.17	1.01	1.13	1.22	99

구간1	f _{iv}		f _v	f _H	요구환기량 [m ³ /s]
	구간2	구간3			
1.28	1.17	1.01	0.80	1.22	286
1.28	1.17	1.01	0.84	1.22	229
1.28	1.17	1.01	0.88	1.22	191
1.28	1.17	1.01	0.92	1.22	161
1.28	1.17	1.01	0.96	1.22	139
1.28	1.17	1.01	1.00	1.22	117
1.28	1.17	1.01	1.07	1.22	107
1.28	1.17	1.01	1.13	1.22	99

(주행속도별 NOx기준 필요환기량)

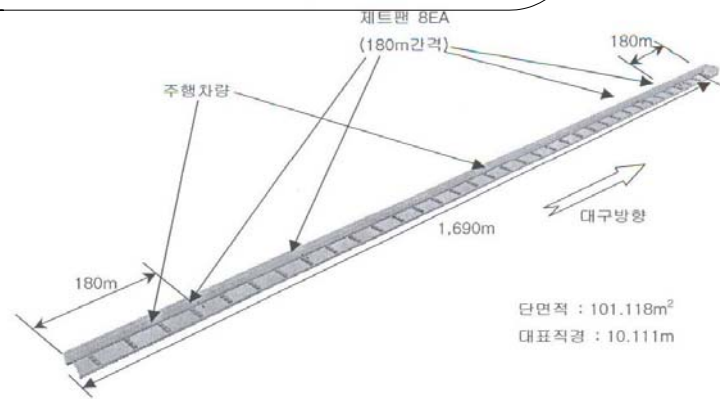
구간1	f _{iv}		f _v	f _H	요구환기량 [m ³ /s]
	구간2	구간3			
1.28	1.17	1.01	0.80	1.22	286
1.28	1.17	1.01	0.84	1.22	229
1.28	1.17	1.01	0.88	1.22	191
1.28	1.17	1.01	0.92	1.22	161
1.28	1.17	1.01	0.96	1.22	139
1.28	1.17	1.01	1.00	1.22	117
1.28	1.17	1.01	1.07	1.22	107
1.28	1.17	1.01	1.13	1.22	99

			0		
1.28	1.17	1.01	1.07	1.22	107
1.28	1.17	1.01	1.13	1.22	99

f _{iv}			fv	f _H	요구환기 량 [m ³ /s]
구간 1	구간 2	구간 3			
1.57	1.33	1.01	0.17	1.00	179
1.57	1.33	1.01	0.33	1.00	265
1.57	1.33	1.01	0.50	1.00	319
1.57	1.33	1.01	0.67	1.00	343
1.57	1.33	1.01	0.83	1.00	353
1.57	1.33	1.01	1.00	1.00	343
1.57	1.33	1.01	1.50	1.00	441
1.57	1.33	1.01	2.00	1.00	514

해석모델 개요

- ☞ 대구방향1420m에 화재발생 가정 :20MW
- ☞ 전체해석영역크기 : 15m×8.5m×1690m
- ☞ 가동제트팬:5EA
 - 터널 입구부3EA
 - 터널 출구부 2EA
- ☞ 과심유독물 :CO,Smoke



제5 장 화재 시뮬레이션

5.1 화재 시뮬레이션 개요

■ 해석모델

20MW급 화재 발생시에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써.

☞ 임계속도 이상의 풍속을 얻을 수 있는 방재설비인지를 판단하고자 함.

☞ 이때 Back layer의 발생여부를 예측하고자함.

■ Governing Equations

Continuity equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j) = 0$$

Momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

Thermal Energy Equation(For Temperature)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S$$

Turbulent Kinetic energy equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u + \frac{u_t}{\sigma} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - p \epsilon$$

Turbulent Kinetic energy dissipation equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 p \epsilon) - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{p \epsilon^2}{k}$$

Concentration equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{s_c}) \frac{\partial C}{\partial x_j} + S_C$$

where

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial x}) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G = 2\mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \eta = s \frac{\epsilon}{k}$$

$C_1 = 1.42, C_2 = 1.68, C_\mu = 0.085,$
 $\sigma_k = 0.719, \sigma_\epsilon = 0.719, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012$ using standard $k-\epsilon$ Model

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}), \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_c = \text{Schmidt number}$$

■ Boundary Conditions

터널입구	압력 : 대기압+ 차량풍
	CO농도 : 0.0ppm
	smoke 농도 : 0.0ppm
	가시거리 : 1,690m로 가정
터널출구	압력 : 자연풍 2.5m/s에 의한 풍압
	압력을 제외한 변수 : $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$
터널진입 차량수	327대로 가정
화재차량 열발생량	20MW
화재차량 CO발생량	0.0326kg/s
화재차량 smoke발생량	0.23895kg/s

5. 결론

1. 제트팬 5EA를 가동함으로써 Kennedy 식을 이용하여 계산한 임계속도는 2.5m/s보다 큰 풍속을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

2. 화재 차량을 기준으로 터널 출구 방향으로만 고온의 공기와 유독 물질이 유동하였다. 이는 그 그래프를 통해서도 잘 나타났다. 따라서, 임계풍속 이상의 풍속을 얻음으로써 Backing Layer를 방지할 수 있으리라 예상된다.

3. 주행속도 10km/hr의 경우 CO와 NOx의 최

대농도는 터널 출구부에서 나타내지만

각각의 허용농도 100ppm과 25ppm에 비하여 낮은 농도로서 3개의 제트팬으로써 원활한 기계 환기가 가능하리라 판단된다.

4. 주행속도 60km/hr의 경우 CO와 NOx의 최대농도는 터널 출구부에서 나타내지만 각각의 허용농도 100ppm과 25ppm에 비하여 낮은 농도로서 8개의 제트팬으로써 원활한 기계 환기가 가능하리라 판단된다.

5. 따라서 주행속도 10km/hr 및 60km/hr에 대한 전산해석 결과로부터 설치된 제트팬이 적정함을 알 수 있다.

본 연구에서는 대구-포항간 고속도로 건설공사 제 7공구 터널에 화재가 발생할 경우 대하여 환기량을 경계 조건으로 하여 컴퓨터 수치해석을 수행 하였다.

1. the ministry of Government Administration and Home Affairs, 1999. Annual Statistics of Fire
2. Biollay, H and Chasse, P, 1995, Validating and Optimizing 2D and 3D computer simulations for the Offenegg tunnel fire tests, 9th international symposium BHRA, pp.357~382
3. Kumar, s., and Cox, G., 1985, Mathematical modeling of Fires in road tunnels, the 5th international symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Lille, France, 20-24, May
4. Kumar, s., 1995, Fire development and smoke spread in tunnels-some modeling

- considerations, Safety in Road and Rail Tunnel, pp.379~393.
- 5.Karki, K. C. and Patankar, S. V., 2000, CFD model for jet fan ventilation systems, Aerodynamics And Ventilation Of Vehicle Tunnels, BHR group conference series publication, No.43,pp.,pp.355~374.
 - 6.Software Manual, Phoenix-Vr Ver.3.5.1,User Manual, Cham,2004
 - 7.Schlichting, H., 1980, Boundary -Layer Theory, mcGraw-Hill, 7th ed.,pp.328~329
 - 8.Chow, W. K., 1996,Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model, Tunneling and underground Space Technology, Vol.11,No.2,pp.221~236
 9. Chow, W. K.,1998, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No.3, pp.271~275.
 - 10.Babrauskas, V., 1998, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering ,U.S.A.
 - 11.Megret, O. And Vauquelin, O., 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal, Vol.34,No.4,pp.393~401