대한설비공학회 2006하계학술발표대회 논문집 pp. 1209~1212

06-R-003

종류식 터널내에서 화재에 의한 열 및 기류분포 예측에 관한 연구

채 경 희*
우송공업대학교 인텔리전트설비계열

A Study of Thermal and Air Distribution Forcast by Firing in the Longitudinal Tunnel (In Yimgo - 4th Tunnel)

Kyung-Hee Chae

ABSTRACT : This study is aimed to analyze the floe 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

사회간접자본 확충을 통한 물류비용절감을 위해 최근 국내 고속도로망 및 도시교통망 신· 증설이 가속화됨에 따라 터널 개소의 증가는 물론 장대화 되고 있으며, 특히 고속도로망 확충에 따른 수요는 가히 혁명적이라 할 수 있다. 환기방식은 자연화기와 기계 환기로 대별되는데, 도로상황(일반도로, 도시간 고속도로, 도시고속도로)과 교통량, 대형차 혼입율, 입지조건, 터널연장 등을 고려하여 선정되며, 터널환기방식의 세계적 추세는 교통환기력을 유효하게 이용하여 특히 산악터널의 경우 공사비 및 유지비를 절감할 수 있는 제트팬이 장착된 종류(longitudinal)식 환기방식을 지향하고 있다.

터널화재의 특성은 입출구를 제외하고는 밀폐된 공간이라는 특수 상황이므로 화염이나 매연이 단시간 내에 터널전체로 확산되어 대피할 시간적 여유가 없이 큰 재해를 일으키게 되다. 다라서 터널 내 화재발생시 인명 등의 재해를 최소화하기 위해서는 화염과 연소가스의 거동을 정확히 예측하여 효율적으로 제어하는 것이 중요하나 차량을 포함한 여러 물질의 복잡한 연소반응을 정확하게 모사하기는 현실적으로 불가능하므로 연소와 복사는 무시하였다. Biollay and Chasse는 Offenegg 터널화재 실험에 대한 결과를 수치해석한 결과 Reynolds 수와 Froude수로 상사한 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 구배정도가 자연화기시에 많은 영향을 미치고 있음을 밝혔다. Karki and Patankar는 미국 웨스트 버지니아주의 메모리얼 터널에서 복사 열전달 량을 화재발생량의 분율로 정의하고 화재발생량에서 복사 열전달 량을 제거하여 수치해석한 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.

* 우송공업대학교 인텔리전트설비계열 cghee@wst.ac.kr

2. 이 론 해 석

2.1 자연환기량 계산

가. 자연환기량 산정

1) 압력계산식

$\triangle Pr = \triangle Pt - \triangle Pm$

$\triangle Pr$: 통기저항 (mmAq)

$\triangle Pt$: 교통환기력 (mmAq)

$\triangle Pm$: 저항자연풍 (mmAq)

가) 통기저항

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

$\triangle Pr$: 통기저항 (mmAq)

ξe : 터널입구 손실계수

λr : 터널벽면 마찰손실계수

Lr : 터널연장 (m)

Dr : 터널대표직경 (m)

ρ : 공기밀도 (o.1224 kgf · s^2/m^4)

나) 교통환기력

$$\triangle Pt = \frac{Ae}{Ar} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (Vt - Vr)^2 \quad (2)$$

$\triangle Pt$: 교통환기력 (mmAq)

Ar : 터널 내공 단면적 (m^2)

Ae : 자동차 등가저항면적 (m^2)

ρ : 공기밀도 (o.1224 kgf · s^2/m^4)

n : 터널내 자동차 대수 (대)

Vt : 터널내 주행속도 (m/s)

Vr : 터널내 차도풍속 (m/s)

다) 저항자연풍

$$\triangle Pm = (1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vn^2 \quad (3)$$

$\triangle Pm$: 저항자연풍 (mmAq)

ξe : 터널입구 손실계수

λr : 터널벽면 마찰손실계수

Lr : 터널연장 (m)

Dr : 터널대표직경 (m)

ρ : 공기밀도 (o.1224 kgf · s^2/m^4)

Vn : 자연풍에 의한 차도내 풍속 (m/s)

2) 자연환기량(Qn)

자연풍의 방향이 차도내 풍향 및 교통방향과 반대인 경우

$\triangle Pr = \triangle Pt - \triangle Pm$ 에 따라

$$(1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vr^2 = \frac{Ae}{Ar} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n \cdot (Vt - Vr)^2 - (1 + \xi e + \lambda r \cdot \frac{Lr}{Dr}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Vn^2 \quad (4)$$

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

$Vr^2 = K(Vt - Vr)^2 - Vn^2$ 으로 된다.

위에 식에서 Vr , Vn 의 방향에 의하여 다음과 같이 형태로 한다.

Vr , Vn은 자동차의 진행방향과 같은 경우 (+) 반대인 경우 (-) 부호로 표기한다.

$$Vr = \frac{-k \cdot Vt + \sqrt{K \cdot Vt^2 - (1 - K) \cdot Vn^2}}{1 - K} \quad (5)$$

이상에서 각 기호에 있어서의 각 수치를 다음과 같이 정해진 K, Vr로 각각 산정한다.

가) $Ae = (1 - \gamma L) * Ap * \xi p + \gamma L * At * \xi t$ (6)

· Ae : 자동차 등가저항면적 (m^2)

· γL : 설계 대형차 혼입율 : 33.9 %

· Ap : 소형차의 전면 투영 면적 : 2.31 m^2

· ξp : 소형차의 터널내 저항 계수 : 0.53

· At : 대형차의 전면 투영 면적 : 7.11 m^2

· ξt : 대형차의 터널내 저항 계수 : 0.91

$Ae = (1-0.339) * 2.31 * 0.53 + 0.339 * 7.11 * 0.91 = 3.0026[m^2]$ (7)

나) 터널단면적 : 대구방향, $Ar=101.118[m^2]$, 포항방향, $Ar=101.101[m^2]$

다) 터널 둘레길이 : 대구방향, Lp=40.004[m], 포항방향, Lp=39.9854[m]

라) 터널 대표직경:

대구방향 :

Dr=4*Ar/Lp=4*101.118/40.0042=10.111[m]

포항방향 :

Dr=4*Ar/Lp=4*101.101/39.985=10.114 [m]

마) n(터널내 자동차 대수)

$$n = \frac{N \cdot Lr}{Vt} \quad (8)$$

여기서, N : 시간당 교통량 (대/시)

Vt : 차도내 주행속도 (m/s) 대구방향 : 60km/h = 16.67m/s

2.2 방재용 젯트팬 계산

가. 임계속도 선정

1) 임계속도의 산출을 위하여 Kennedy식을 적용

2) 주어진 수식

$$Uc = Kg \cdot Fc^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A_r \cdot T_f}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A_r \cdot U_c} + T_\infty \quad (10)$$

vek : find(V1 , Vf)

$$V_{crit} := |(vek^T)^{\langle 1 \rangle}| \quad (11)$$

= 2.2m/s (터널 단면적에서의 임계속도)

2.3 수치해석방법

Fig. 1은 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 hybird scheme을 사용하였다.

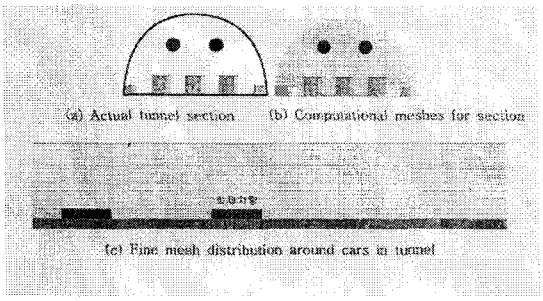

Fig. 1 Layout of computational grids

Table 1 Numerical method used in this study

Code	PHOENICS-VR 3.5.1
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

3. 결과 및 고찰

3.1 터널내 유동 분포

Fig. 2는 화재발생 이전영역에서의 제트팬 부근 영역 속도분포이다. 세 가지 영우 모두 제트팬 주변에서 원활한 우동분포를 나타내었다. 바닥면과 터널 천정 사이에서 포물선에 가까운 속도벡터분포를 나타내었다. 이는 정체차량 후미에서는 예상할 수 있듯이 상대적으로 정체된 흐름을 볼 수 있다.

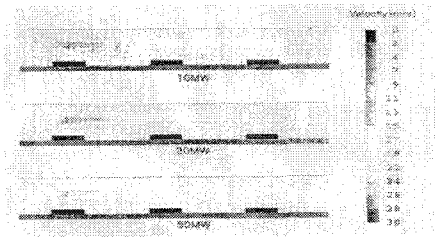

Fig. 2 Distributions of velocity vector around the jet fans

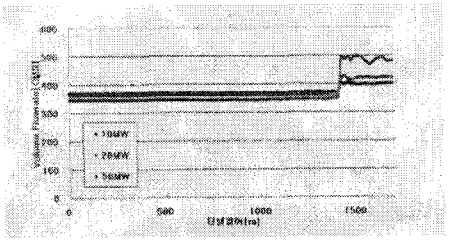

Fig. 3 Volume flow rate to the longitudinal direction in the tunnel

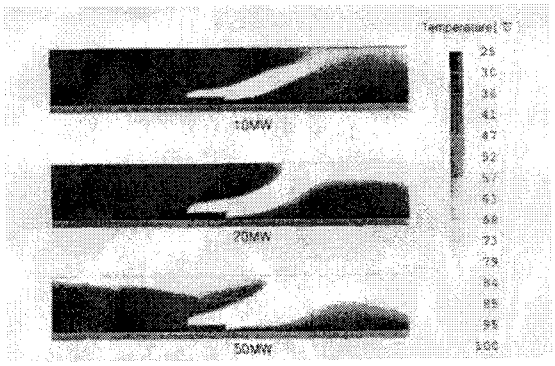

Fig. 4 Isotherms for each fire strength in the fire

Fig. 3 으로부터 화재발생 위치에 이르러 풍량이 불연속적으로 증가하는 분포를 나타내며 화재강도가 커질수록 더욱 뚜렷하다. 터널 풍량이 일정하지 않은 것은 정체중인 차량들이 존재하기 때문에 나타나는 현상이다. 질량보존의 법칙이 잘 적용되었음을 알 수 있다. 화재위치 이전영역에서는 화재강도가 작을수록 풍량이 큰 것을 알 수 있다. 이는 화재로 인한 부력효과를 유동저항으로 간주할 때에 화재강도가 클수록 저항이 더 커짐을 알 수 있다.

3.2 화재 온도 분포

Fig. 4로부터 터널 내 화재 시 화재차량 상부로부터 터널천정방향으로 부력에 의한 상승기류가 뚜렷하다. 고온의 공기가 화재차량 상부로부터 터널천정으로 유동하

며, 화재강도가 커질수록 그 영역이 더욱 크고 뚜렷해진다. 10MW와 20MW의 경우 화재차량으로부터 발생한 고온공기가 모두 터널출구방향으로 원활하게 배기되는 반면, 50MW의 경우 심한 역류(backlaer)가 발생한다. 즉, 제트팬을 이용한 재연풍이 50MW에 이를 때에는 고온공기의 부력을 극복하지 못한다는 의미이다.

Fig. 5에서 화재발생 위치에 이르러 불연속적으로 증가하는 온도분포를 나타낸다. 이는 화재강도가 커질수록 더욱 뚜렷하다. 10MW와 20MW의 경우 화재발생 지점 이전에는 온도분포의 변화가 전혀 없었으나, 50MW의 경우 화재지점 이전에 상승하는 온도분포를 확인 할 수 있다. 터널내 공기의 역류 존재는 화재 시 인명의 안전에 치명적인 문제를 야기할 수 있기 때문에 반드시 임계속도보다 빠른 풍속을 얻도록 설계를 해야 할 것이다.

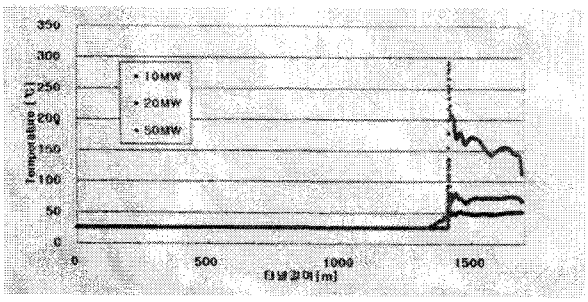

Fig. 5 Temperature distributions for each fire strength in the fire

4. 결 론

종류식 터널 내 화재에 의한 열 및 기류분포의 정확한 예측을 위해 대구-포항간 임고4터널을 대상으로 화재강도를 경계조건으로 하여 컴퓨터 수치해석을 수행하였다.

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

2. 화재차량을 기준으로 터널출구방향으로만 고온의 공기와 유독 물질이 유동하였다. 이는 그래프를 통해서도 잘 나타났다. 따라서, 임계풍속 이상의 풍속을 얻음으로써 Backing Layer를 방지할 수 있으리라 예상된다.

3. 주행속도 10km/hr의 경우 CO와 NOx의 최대농도는 터널 출구부에서 나타내지만 각각의 허용농도 100ppm과 25ppm에 비하여 낮은 농도로서 3개의 제트팬으로써 원활한 기계환기가 가능하리라 판단된다.

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

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

참고문헌

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 firs 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 Roda and Rail Tunnel, pp.379~393.
5. Karki, K.C. and Patankar, S.V., 2000, CFD model or jet han ventilation systems, Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, BHR group conference series publication, No.43,pp., pp. 355~374.
6. Software Manual, PHOENICS-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