韓國産業應用學會誌, 제5권, 제4호, 313-320, 2002.11
J. Korean Society of Industrial Application, Vol.5, No.4, 313-320, November, 2002

도로 터널내의 공기유동 양상을 예측하기 위한 수치해석
Numerical Analysis to Predict Air Flow Phenomena in a Road Tunnel

최인수*, 박병덕**, 윤일로***
In-Su Choi*, Byung-Duck Park**, Il-Ro Youn***

<Abstract>

A 2-dimensional k-ε numerical model was developed to explore the effects of vehicle movement, jet fan and wind speed for the ventilation of road tunnels. To consider the temperature distribution in the tunnel, the energy equation was solved with a source term of the energy exhausted from vehicles. Although the tunnel ventilation can be made by the piston effect of vehicle movement, an additional ventilation is necessary when a head wind is existing. Jet fans may assist the air flow in the tunnel. However, more efficient ventilation system should be necessary, because the exhaust gas from vehicles flow along the road surface and it cannot be diffused in the longitudinal tunnel.

Key Words : Tunnel, Ventilation, Numerical model, Jet Fan

1. 서 론

교통수요의 급격한 증가에 따라 고속도로 및 도시교통망 확충이 가속화되어 국내 터널의 건설 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 또한 터널들은 장대화 경향을 나타내고 있고, 통행량의 팽창으로 차량 배출가스에 대한 터널내부의 환기대책이 더욱 필요한 실정이다. 연장이 짧은 도로터널에서는 자연환기만으로도 터널내의 공기오염도를 충분히 낮출 수 있으나, 연장이 길고 교통량이 많은 터널에서는 기계적인 환기가 필요하게 된다.

터널내의 쾌적한 운전환경 및 각종 보수작업

기호설명

A	면적	(m^2)
C_v	항력계수	(-)
F	운동량 유속	(N)
T	공기온도	(K)
u	공기속도	(m/s)
V	차량속도	(m/s)
ρ	공기밀도	(kg/m^3)

하첨자

f	제트팬
v	차량
w	바람
t	터널

* 정회원, 상주대학교 기계공학부 교수, 工博
E-mail : ischoi@sangju.ac.kr
742-711 경북 상주시 가장동 386번지
** 정회원, 상주대학교 기계공학부 교수, 工博
E-mail : bdpark@sangju.ac.kr
*** 상주대학교 토목공학과 교수, 工博
E-mail : youn@sangju.ac.kr

* Professor, School of Mechanical Engineering
Sangju National University, Kyungbuk, 742-711, Korea
E-mail : ischoi@sangju.ac.kr
** Professor, School of Mechanical Engineering
E-mail : bdpark@sangju.ac.kr
*** Professor, Department of Civil Engineering
E-mail : youn@sangju.ac.kr

을 위한 환경을 확보하기 위하여 선진외국에서는 설계목표치를 점차 강화하고 있으며, 국내에서도 기준치[1]를 두고 있다. 하지만 효과적인 터널내의 환기를 위해서는 보다 구체적인 연구들이 수행되어야 할 것이다.

현재 터널의 환기량은 터널내의 공기유동을 1차원 덕트흐름으로 가정하여 산정하고 있으며,[2] 외국의 컴퓨터해석모델도 1차원유동에 기초하고 있다.[3],[4] 이러한 공기유동 모델의 장점은 교통양상 및 외부조건 등의 여러 가지 변화요소를 동시에 고려함과 아울러 계산속도가 빠르고 터널의 형상에 따른 환기장치의 용량선정이 유연하다는 것이다.

터널의 오염도를 지배하는 환경인자들로는 터널의 구조, 차량통과량, 차량통과속도 그리고 풍속 등이나,[5] 1차원모델은 이러한 요소들이 터널 내부유동에 미치는 영향을 구체적으로 고찰하기 곤란하다. 물론 보다 자세한 수치해석모델들[6],[7]도 발표되었으나, 차량배출가스의 환기목적보다는 터널내의 화재대책을 위한 것이다.

그러므로 본 연구에서는 종류식 환기장치의 제트팬(Jet fan), 차량속도, 외부 바람의 세기 등을 포함한 공기역학적 특성치의 해석을 위하여 2차원 수치해석모델을 개발하고, 이들 인자들이 터널내부의 공기유동양상에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 공기유동모델

터널내의 차량종류, 차량의 운행조건, 제트팬의 운전조건, 터널 외부의 풍속 및 풍향 등에 따라 공기 유동의 양상이 달라지지만, 본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 공기유동에 지배적인 역할을 하는 차량 속도, 차간거리, 제트팬의 풍량, 풍속을 주요 인자로 선정하였다.

수치해석모델은 유한체적법[8]을 사용하여 Fortran 언어로 프로그램하였고, 공기의 유동은 κ-ε난류모델[9]을 사용하였다.

터널내의 공기유동상태는 차량의 진행에 따라 지속적으로 변화하지만, 정상상태로 간주하고 한순간에서의 터널내부 상태를 모사하였다. 그러므로 정상상태에 있어서 기본방정식은 식

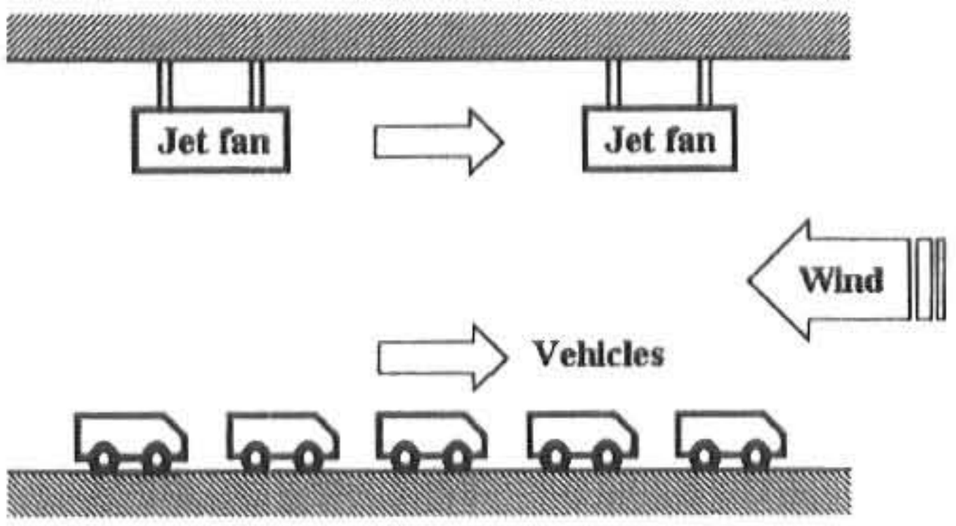


Fig. 1 Illustration of tunnel and vehicles

(1)과 같이 대류항, 확산항 그리고 원천항(S_ϕ)으로 나타낼 수 있다.

$$div\,(\rho u\phi) = div\,(\Gamma_\phi\, grad\,\phi) + S_\phi \qquad (1)$$

식 (1)을 공기유동의 2방향 속도성분 운동량, 에너지, 난류운동에너지 및 소멸율에 대하여 각각 SIMPLE[8]방법으로 연산하고, 차량운동, 제트팬의 환기 및 외풍의 영향력은 운동량 방정식의 원천항으로 처리하였다. 그리고 차량의 배출가스는 공기의 전체 유동량에 비하여 매우 적지만, 터널내의 온도 분포를 고려하기 위하여 배출가스의 에너지도 에너지방정식의 원천항으로 포함시켰다.

차량에 의해 야기되는 공기의 운동량 유속은 차량이 주행시 받는 항력과 동일한 것으로 식(2)와 같이 결정하였다. 그리고 항력계수(C_v)의 값은 0.55로 선정하였고[10], 차량 측면의 저항은 없는 것으로 가정하였다.

$$F_v = C_v\,\rho\,\frac{(V-u)^2}{2} \qquad (2)$$

아울러 2차원 모델은 단위 폭(1m)으로 계산하므로, 터널의 폭에 대한 차량 폭의 비를 식(2)에 곱해주었다. 제트팬의 경우도 동일하게 터널폭과의 비를 고려하였고, 제트팬이 공기에 부가하는 운동량유속은 식(3)과 같이 제트팬의 동력(L_f), 단면적(A_f) 및 유량(Q_f)을 사용하여 계산하였다.

$$F_f = L_f\,\frac{A_f}{Q_f} = \frac{L_f}{u} \qquad (3)$$

그리고 터널 외부에서 부는 맞바람의 저항력은 식 (4)와 같이 계산하였고, 터널 벽면과 접하는 공기층은 정지상태로 가정하여 계산하였

으므로 터널벽면과 마찰에 의한 공기 운동량 손실은 고려하지 않았다.

$$F_w = \rho A_t u_w^2 \quad (4)$$

차량엔진의 공기소모량과 배출가스량도 원천항으로 처리하였고, 연료소모량은 공기소모량(m_a)의 1/15로 가정하였다. 차량의 운행상태, 흡기의 조성 및 흡기온도 등에 따라 배출가스의 상태도 달라지지만, 계산의 편의상 에너지방정식에 필요한 배기의 에너지는 연료 발열량의 40% 정도로 가정하였고, 식(5)와 같이 연료소비량과 연료의 저위발열량(H_l)으로 계산하였다.

$$Q = 0.4 H_l \frac{m_a}{15} \quad (5)$$

2.2 터널내의 교통흐름 구조

터널의 단면형상은 원통의 바닥을 일부 절단한 형상과 유사하나[2], 2차원 유동모델의 특성상 사각형 단면으로 가정하였다. 터널의 치수는 표 1에 요약한 바와 같이, 터널의 폭은 10m, 높이는 6.5m로, 일방향 2차로 도로터널 크기이다. 터널 길이는 300m에서 1500m 고려하였으며, 기울기는 없이 곧은 수평터널로 가정하였다.

차종에 따라 공기유동에 미치는 영향력이 달라지지만, 본 연구에서는 승용차와 상용차의 중간 형태인 승합차의 크기로 선정하였고, 길이는 5m, 폭 1.8m, 높이 1.8m이다. 그리고 지상고는 0.18m로 선정하였다. 또한 실제적인 교통조건과 유사하게 차속은 60km/h 그리고 차간거리는 50m[11],[12]를 기준으로 계산하였다.

터널의 환기장치로는 설비비가 적어 경제적인 제트팬을 이용한 종류식 환기장치가 많이 사용되고 있다. 팬을 역전시킴으로써 양방향으로 환기가 가능한 제트팬은 터널의 천정에 2개를 한쌍으로 설치하는 경우가 대부분이다. 그리고 구조는 원통구조이나, 본 연구에서는 2차원 해석에 적합하도록 제트팬의 풍량과 동력만을 고려하였고, 높이와 폭을 모두 1.3m로 하고 터널 천정에서 20cm 아래에 설치된 것으로 가정하였다.

2.3 계산조건

터널공간을 수만여개로 구획하여 계산하였고, 터널 벽면 및 물체 주변은 3cm로 다소 조밀하게하고 분할하여 고체면 주변의 유동 및 온도구배가 원활히 예측될 수 있도록 하였다. 하지만 계산시간의 단축을 위하여 다른 영역은 공기유동의 복잡 정도에 따라 0.3~0.5m로 거칠게 분할하였다. 터널길이 100m당 2만여개의 계산셀로 구성하였고, 터널벽면, 차량, 제트팬과 공기와의 열전달은 없는 것으로 가정하였다.

터널주변의 대기압은 101.3kPa 그리고 외기온도는 20℃로 조건을 선정하였다. 그리고 외풍은 터널길이 방향에 대하여 수직으로, 차량진행방향에 대하여 맞바람이 부는 상태로 가정하였다. 풍속은 6m/s까지 고려하였으며, 이는 풍력계급 4의 건들바람으로 작은 나뭇가지가 흔들거리고 먼지가 이는 정도의 바람세기이다.

Table 1. Specification of tunnel, vehicles and Jet fans.

	Length(m)	Width(m)	Height(m)
Tunnel	300~1500	10.0	6.5
Vehicles	6~30	1.8	1.8
Jet fans	2	1.3	1.3

3. 결과 및 고찰

3.1 터널길이의 영향

터널입구에서 25m 떨어진 지점부터 50m 간격으로 차량들이 주행하고 맞바람이 없을 때, 터널내의 공기유동양상을 살펴보았다. Fig. 2와 같이 동일한 단면을 갖는 터널이 300m에서 1500m까지 연장될 때, 차량의 피스톤효과에 의해 야기되는 공기의 질량유량은 14.6kg/s에서 17.6kg/s로 증가함을 보여준다. 터널의 단위길이당 운행차량 대수는 100m당 2대로 동일하지만, 유입공기유량(환기량)은 차량 대수에 비례하여 증가하지 않는다. 1500m의 경우 차량은 30대로, 300m의 경우보다 운행차량 대수가 5배 많지만, 환기량은 약 1.2배 증가함을 보여준다.

차량 주행에 따른 피스톤 효과는 식 (2)와 같이 차량과 주변공기의 상대속도의 제곱에 비례하므로, 차량 대수가 많을수록 차량당 피스톤 효과는 감소되는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 터널길이가 300m와 1,500m일 때의

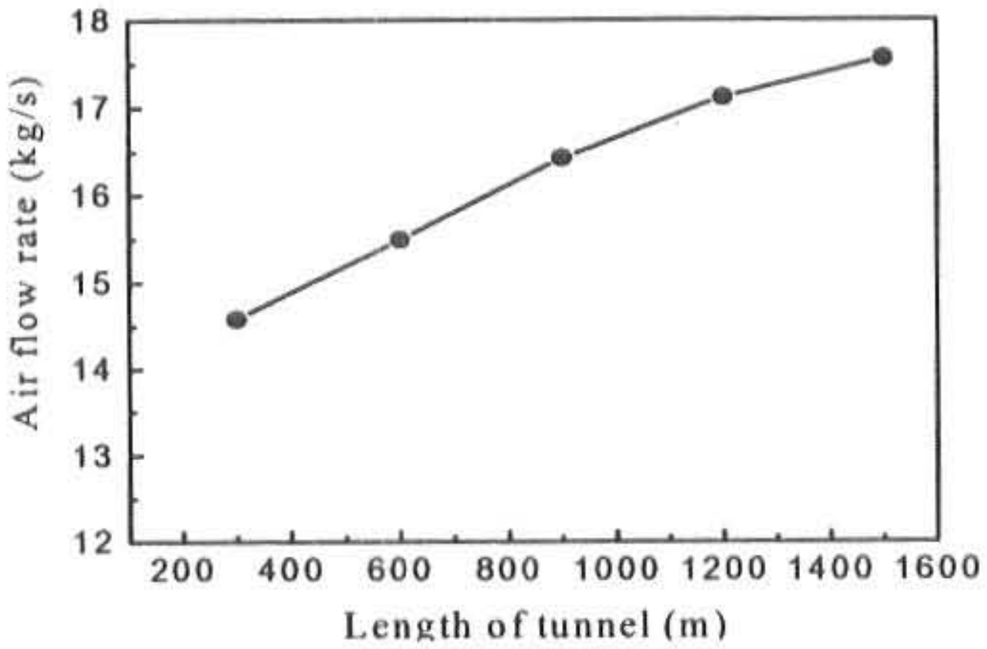
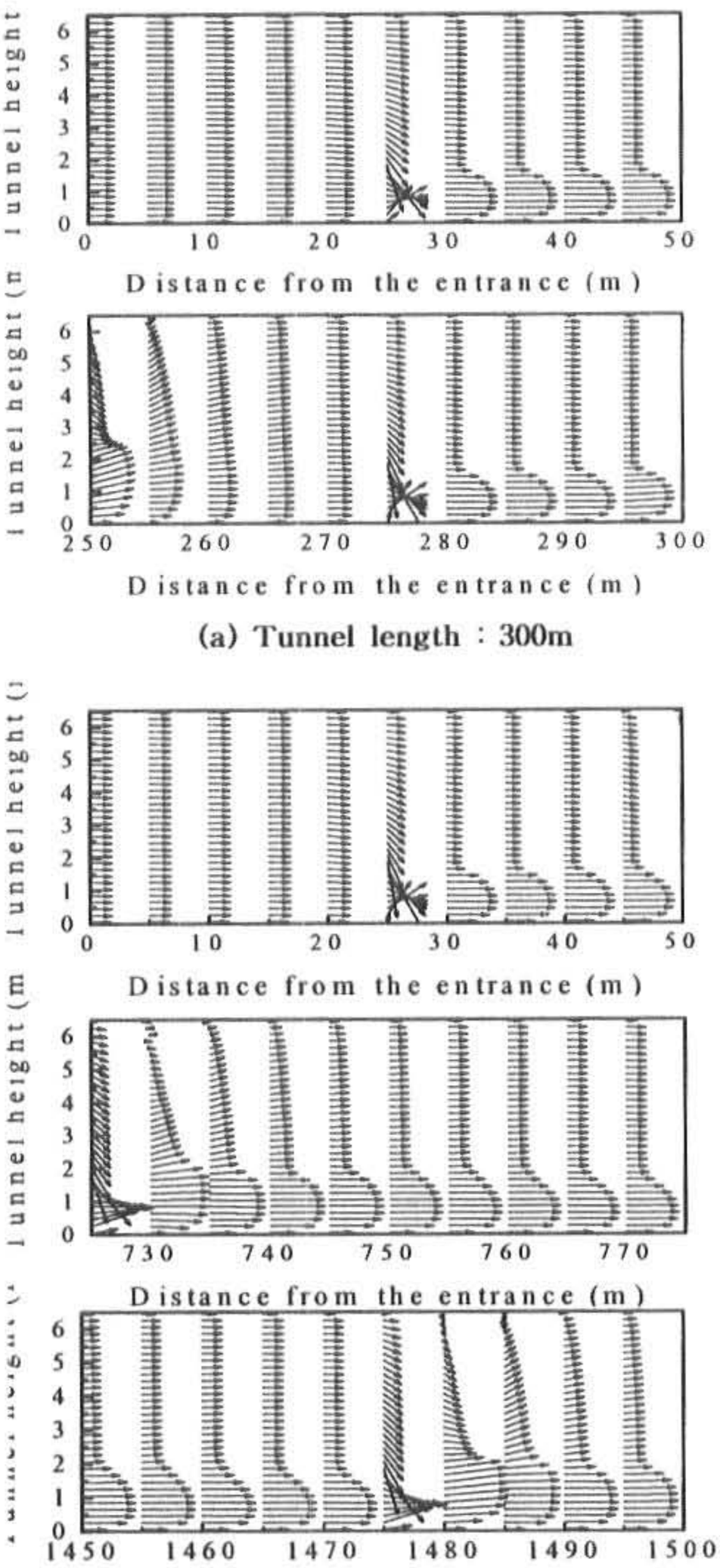


Fig. 2 Air mass flow rate at various tunnel lengths



(a) Tunnel length : 300m

(b) Tunnel length : 1,500m

Fig. 3 Velocity profiles at different tunnel lengths

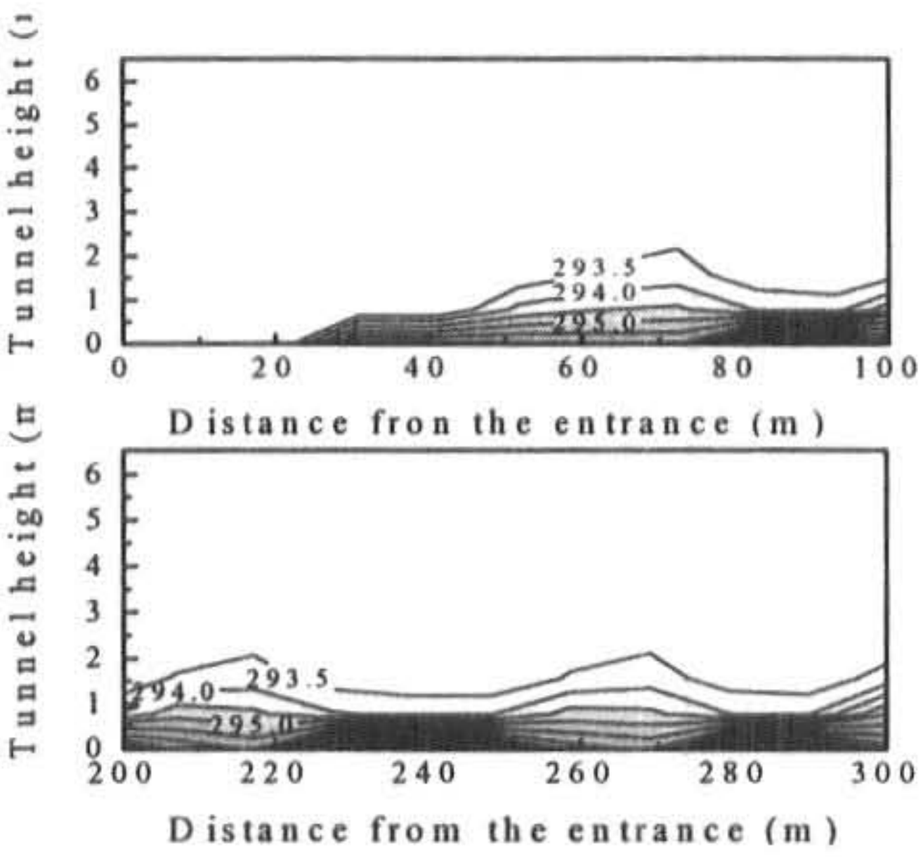
각 단면에서의 속도분포를 나타낸 그림이다. 터널입구에서 차량이 위치하는 25m 지점까지는 1차원 유동양상에 가까우나, 실제 상황에서는 에 차량이 계속적으로 반복 운행되므로 입구영역에서도 2차원 흐름일 것으로 예상된다. 전반적으로 차량의 바로 앞쪽에서는 차량 주행에 의한 공기충돌로 공기흐름이 급격히 변화하고 포물선 형태의 속도분포를 갖는다. 하지만 터널의 높이에 비하여 길이가 매우 길기 때문에, 그 후의 공기흐름은 속도분포가 고른 1차원 유동으로 바뀌어지고 다시 차량운동으로 인한 2차원 유동으로 변하는 현상이 반복된다. 터널길이가 길어지면 차량 총대수의 증가로 인하여 공기의 유동 속도는 다소 높아지지만, 전반적인 유동형태는 유사하게 나타난다.

Fig. 4는 터널내의 공기 온도분포를 나타낸 그림이다. Fig. 3의 속도분포로부터 예측할 수 있듯이, 차량높이 1.8m이상의 공기층 온도는 외기온도와 동일하고 차량들의 배기구가 위치하는 노면 상부만 높은 온도를 나타내고 있다. 차량들이 반복적으로 위치하는 부분의 온도가 높지만, 실제는 차량이 계속적으로 주행하면서 배기를 배출하므로 노면 상부의 온도는 터널길이에 대하여 고르게 나타날 것으로 예상된다.

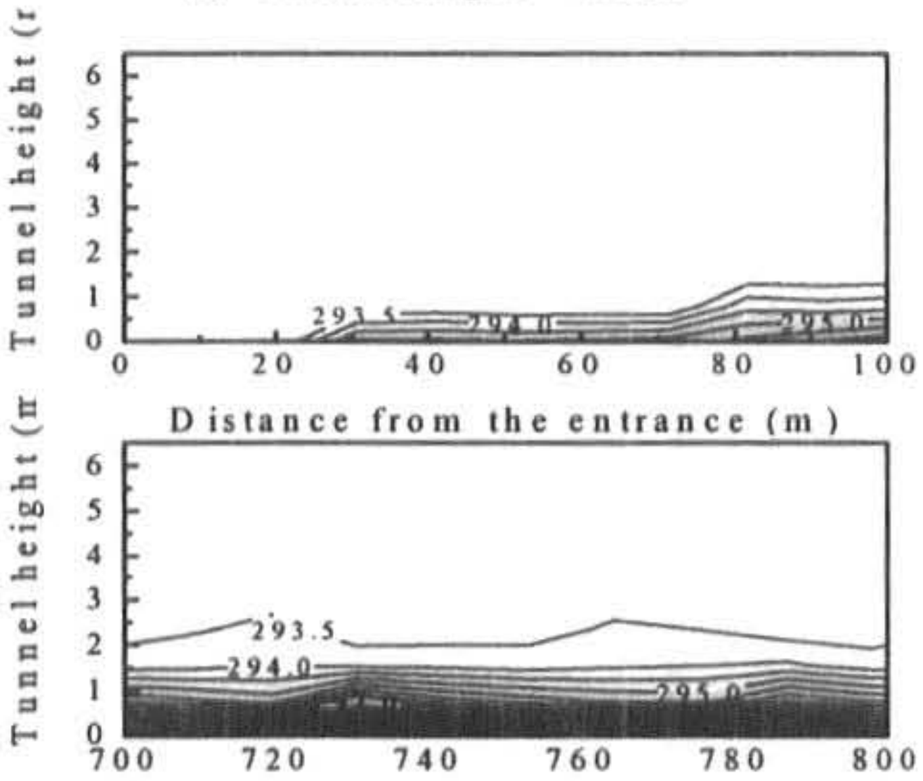
터널 입구에서 100m이내의 공기온도는 터널길이 1,500m의 경우가 300m의 경우보다 약간 낮게 나타났다. 이는 1,500m에서 차량에 의한 공기속도가 300m의 경우보다 상대적으로 높기 때문에 터널로 유입되는 공기량이 많아 입구측 온도는 낮다. 하지만 터널 출구측의 온도를 비교하면, 1,500m의 경우가 높은 온도를 보인다. 터널의 단위 길이당 차량 대수가 동일한 조건이므로, 총 배출가스의 에너지는 차량 대수에 비례한다. 그러나 공기질량유량은 Fig. 2에서와 같이 선형적으로 증가하지 않으므로 출구측 온도가 높을 것으로 사료된다.

3.2 외풍의 영향

Fig. 5는 터널길이가 600m이고 다른 조건은 3.1절과 동일할 때, 외풍의 속도에 따른 공기유입량의 변화를 나타낸 그림이다. 이 때 외풍은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 차량 진행방향과 반대이고, 터널의 출구쪽에서 맞바람이 부는 상태



(a) Tunnel length : 300m



(b) Tunnel length : 1,500m

Fig. 4 Temperature variation in different tunnels

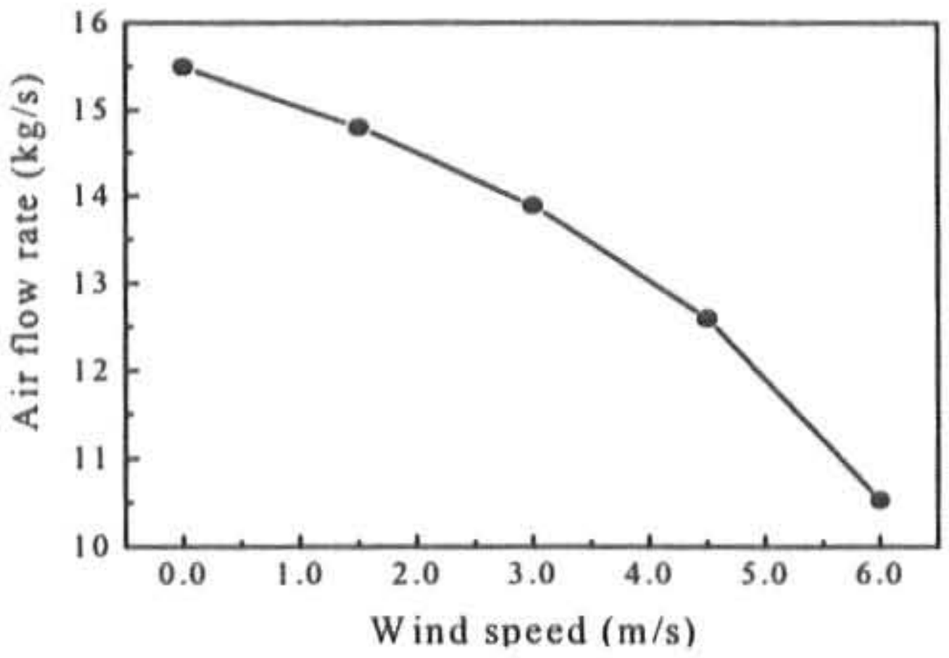
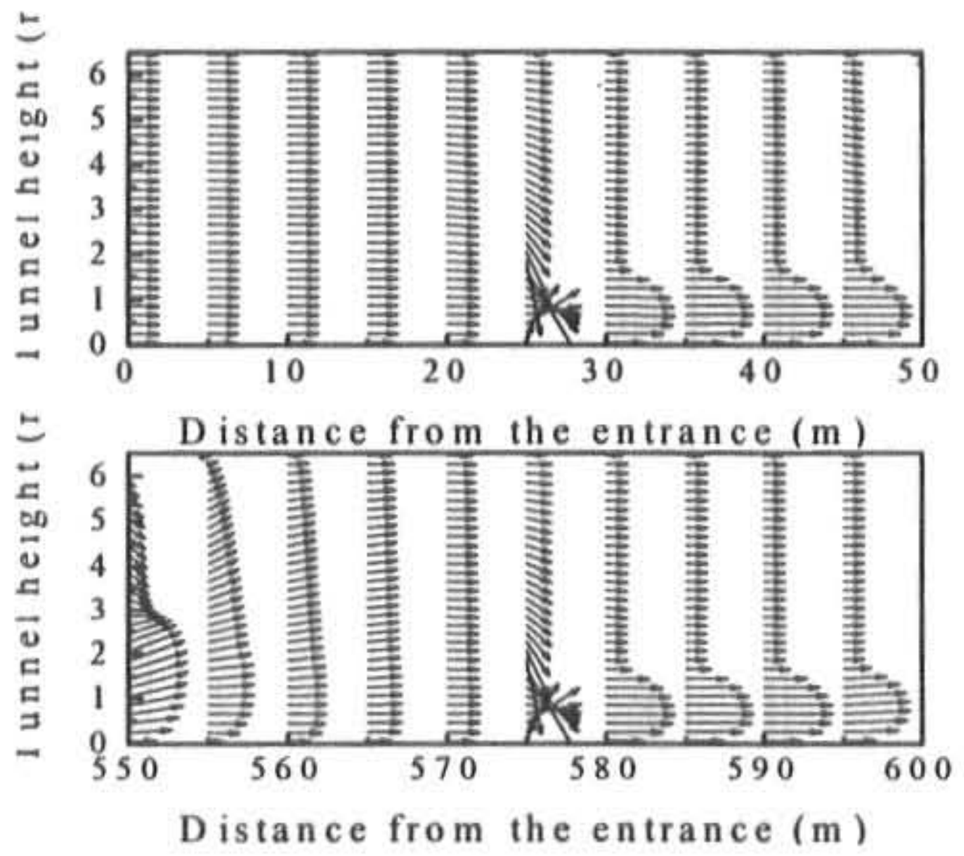
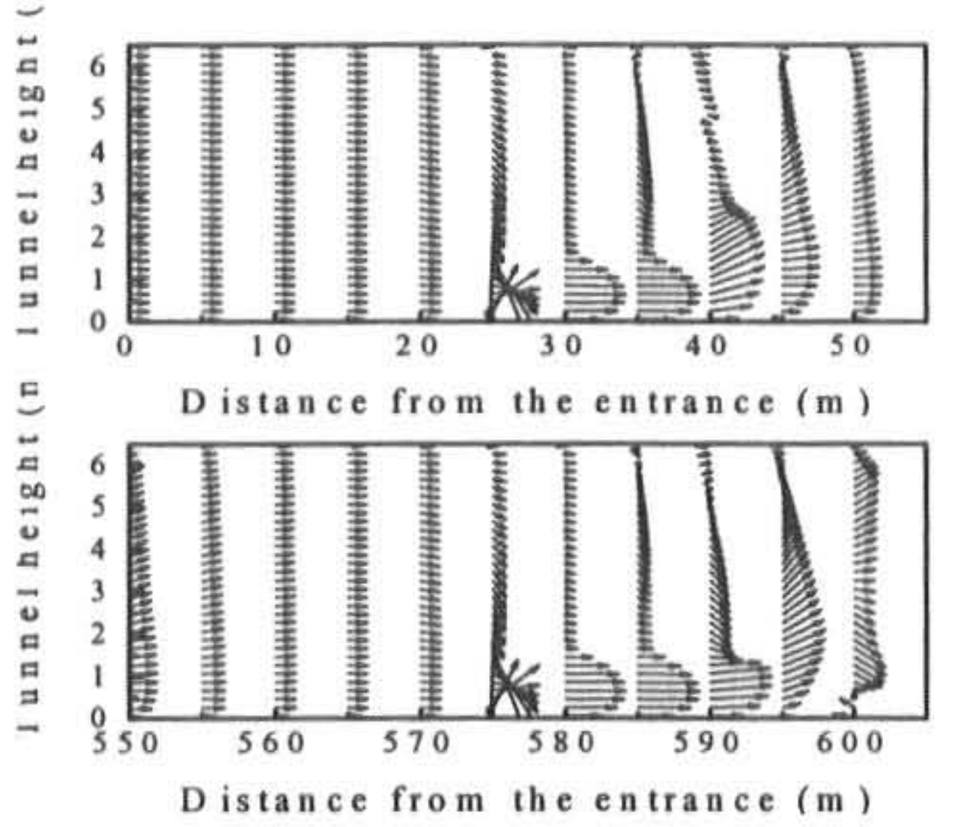


Fig. 5 Air mass flow rate at various head wind speeds (tunnel length : 600m)



(a) Wind speed : 0 m/s



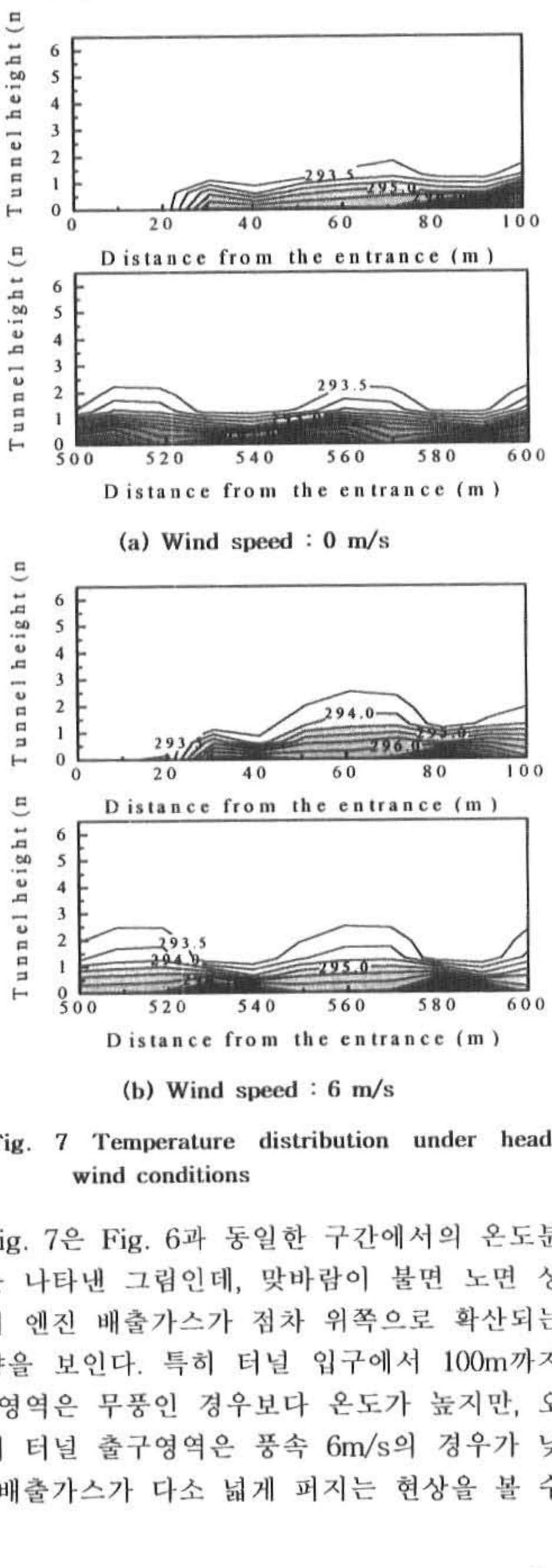
(b) Wind speed : 6 m/s

Fig. 6 Velocity profiles under head wind conditions

만 고려하였다. 차량들이 50m 간격을 두고 60km/h의 일정 속도로 주행할 때, 차량운동에 의한 공기유입량은 풍속이 높아짐에 따라 뚜렷하게 줄어든다. 맞바람에 의한 저항력은 식 (4)와 같이 풍속의 제곱에 비례하므로 환기량도 그와 같은 경향으로 감소한다.

Fig. 6 (a)는 외풍이 없고, (b)는 6m/s의 맞바람이 부는 상태에서 터널내부의 공기 속도분포를 나타낸 그림이다. 외풍이 없을 때는 3.1절에서 기술한 바와 같이 차량운동에 의한 증속현상이 반복되지만, 맞바람이 불 때는 공기 속도도 떨어지고 차량 전면의 터널 상부에서 공기

가 재순환하는 현상을 보이고 있다. 그러므로 차량이 계속적으로 주행하는 실제 조건에서는 이러한 재순환영역도 차량 진행과 함께 이동할 것으로 보인다. 그리고 맞바람의 속도가 높아질수록 재순환영역은 더욱 커질 것이며, 어느 한 계속도 이상에서는 터널상부에서 공기유동 방향이 완전히 역전될 것으로 사료된다.



(a) Wind speed : 0 m/s

(b) Wind speed : 6 m/s

Fig. 7 Temperature distribution under head wind conditions

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 구간에서의 온도분포를 나타낸 그림인데, 맞바람이 불면 노면 상부의 엔진 배출가스가 점차 위쪽으로 확산되는 경향을 보인다. 특히 터널 입구에서 100m까지의 영역은 무풍인 경우보다 온도가 높지만, 오히려 터널 출구영역은 풍속 6m/s의 경우가 낮고 배출가스가 다소 넓게 퍼지는 현상을 볼 수 있다. 이는 맞바람의 영향으로 엔진 배출가스가 무풍일 때만큼 원활히 터널 밖으로 배출되지 못함을 의미하고, 터널 내부에는 상대적으로 많은 배출가스가 존재하여 공기는 혼탁해질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 차량의 절대속도가 일정하고 공기 및 연료의 소비량도 일정하다고 가정하였지만, 실제는 외부 공기저항을 받으며 일정 차속을 유지하기 위해서는 차량의 연료소비량과 더불어 엔진의 배출가스 에너지도 증가하게 된다. 또한 배출가스는 대부분 노면 상부 영역에 집중되어 있으므로 엔진에서 흡입하는 공기의 온도가 외기보다 높고 산소농도는 낮으므로, 배출가스의 온도는 더 높아지고 일산화탄소나 탄화수소물과 같은 배출가스의 유해성분은 정상상태보다 증가할 것으로 예상된다. 그러므로 무풍일 때보다는 맞바람의 존재시 적절한 터널환기장치가 가동되어야 할 것이다.

3.3 제트팬의 영향

Fig. 8은 터널길이가 600m이고 6m/s의 맞바람이 불 때 제트팬의 동력에 대한 환기량 변화를 나타낸 그림이다. 이 때 제트팬은 터널의 중심부과 출구 15m이전 지점의 터널 천장에 설치되었고, 2대의 크기 및 용량은 동일한 것으로 간주하였다.

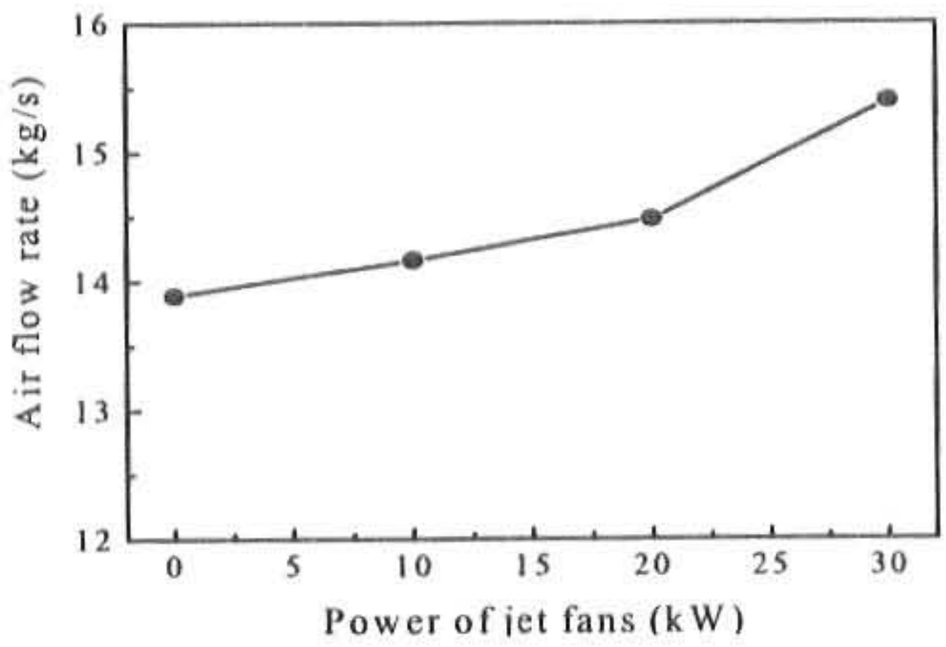


Fig. 8 Air mass flow rate at various powers of jet fans (head wind speed : 6m/s)

제트팬 2대의 출력이 20kW(각각 10kW)까지는 환기량이 거의 선형적으로 증가하지만 그 절대값이 크지 않다. 30kW의 경우에서는 환기량이 다소 많아지고, 무풍상태에서 차량운동만으로 이루어지는 터널의 공기유입량과 비슷하

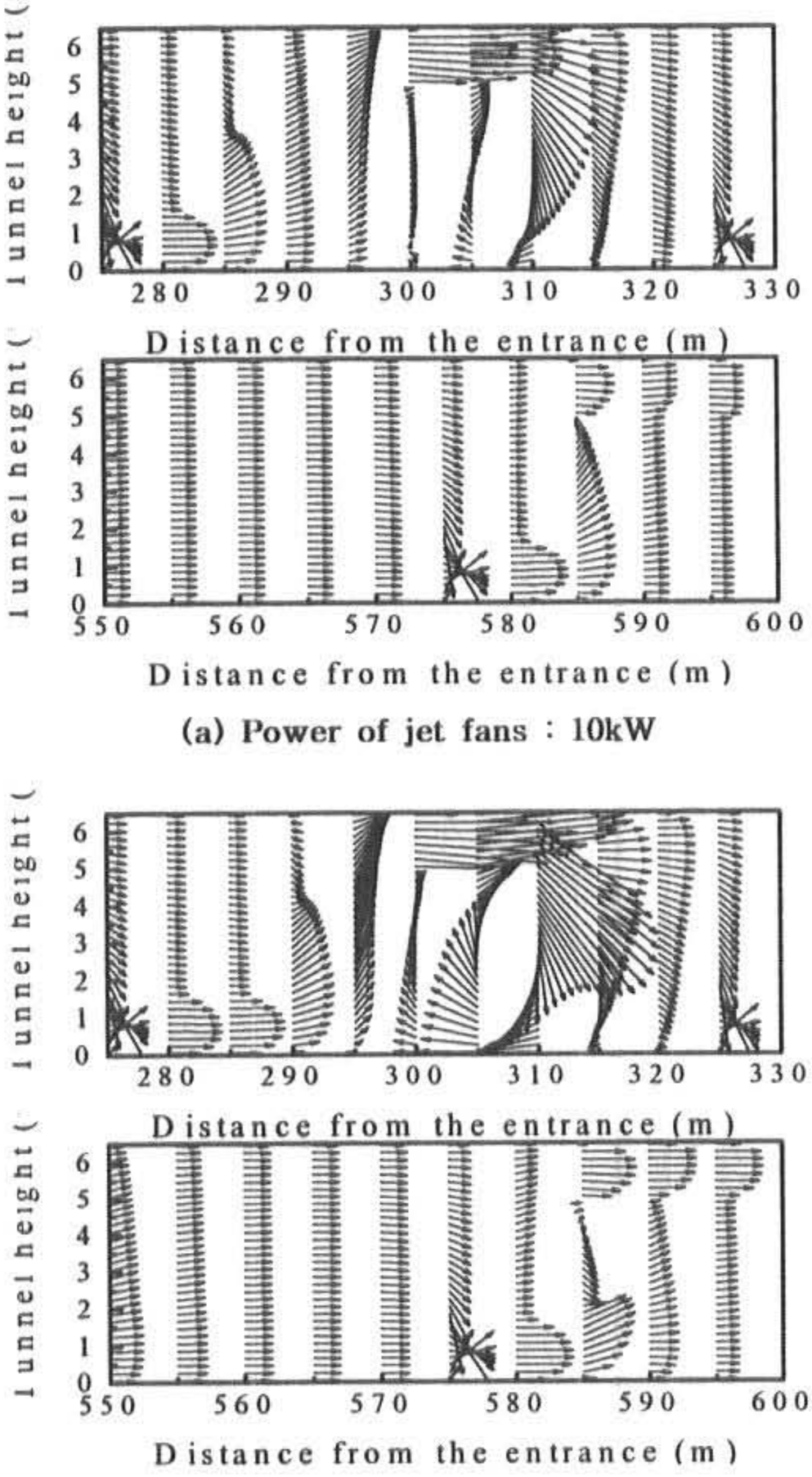


Fig. 9 Velocity profiles when jet fans are operated (head wind speed : 6m/s)

다. 그러나 단순하게 터널 환기량만 고려하여 제트팬을 사용하면 교통상황이나 주변 조건에 따라 터널의 환기가 원활하지 않을 수 있다.

Fig. 9는 2대의 제트팬을 구동하는 총동력이 10kW와 30kW일 때 터널내부의 기류상태를 나타낸다. 터널 입구부에서는 Fig. 6 (b)의 제트팬이 없을 때와 유사하지만, 제트팬이 위치하는 터널 중심부와 출구 부위는 전혀 다른 양상이다. 터널 출구측에 위치한 제트팬의 전방부에서는 비록 유속은 낮지만 외풍의 저항을 상쇄시키며 매끄러운 공기흐름을 보여준다. 그러나 중앙부에서는 유동상태가 복잡해지고 재순환영역도 터널 전체높이에 걸쳐 형성됨을 알 수 있다. 터널 출구부는 맞바람의 저항에 의해 속도가 낮은 상태이고, 터널 중심부에서는 제트팬의 작용으로 터널 상층부 기류의 속도는 높고 하부의 속도는 낮은 상태로 흐른다. 그런데 터널 출구에서 바람의 저항이 있으므로 상층부 기류는 계속 동일하게 나아가지 못하고 일부 역류하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 터널내 온도분포를 나타낸 그림인데, 30kW의 경우가 10kW보다 터널입구 영역에서 온도가 다소 낮고, 출구에서는 높게 나타났다. Fig. 7 (b)의 제트팬이 없을 때와 비교하면 약간 낮은 온도분포를 보인다. 하지만 터널 중앙부에서는 기류의 역전현상으로 온도분포가 고르지 않다. 기류의 불안정상태는 차량운전에 방해가 될 것이며, 터널내의 공기속도는 보통 최대 10m/s로 제한하나 30kW의 경우 약 14m/s의 최대속도를 나타냈다. 결국 제트팬을 사용하면 환기에는 도움이 되나, 터널내의 기류상태는 복잡해질 수 있으므로 터널의 여러 곳에 설치된 제트팬들의 조건을 개별적으로 선택하여 작동시킬 필요가 있다고 본다.

4. 결 론

국내 대다수 터널의 환기시설은 제트팬에 의존하고 있는 실정이다. 그러므로 터널내의 공기유동양상을 파악할 수 있는 수치해석모델을 개발하고, 주요 교통환경요소들이 터널 내부의 공기유동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

터널을 통과하는 차량의 간격이 동일할 때, 차량운동의 피스톤 효과에 의한 터널로 유입되는 공기량은 차량 대수에 선형적으로 비례하여 증가하지 않는다. 그러므로 터널이 길어질수록 터널출구에서의 공기의 온도는 상승하고, 기계적인 환기시설이 필요하게 된다.

아울러 터널의 출구에서 차량의 진행방향에 대하여 맞바람이 불면 터널내의 환기상태는 불량해지고 공기온도도 더욱 상승하며, 차량운동에 의한 환기량은 풍속의 제곱에 비례하여 감소한다.

터널내의 환기를 위하여 터널 천장에 제트팬을 설치하여 구동하여도 차량의 배출가스는 터널의 노면을 따라 흐르고, 터널 내부에서 넓게 확산되지 않는다. 물론 제트팬의 영향으로 환기

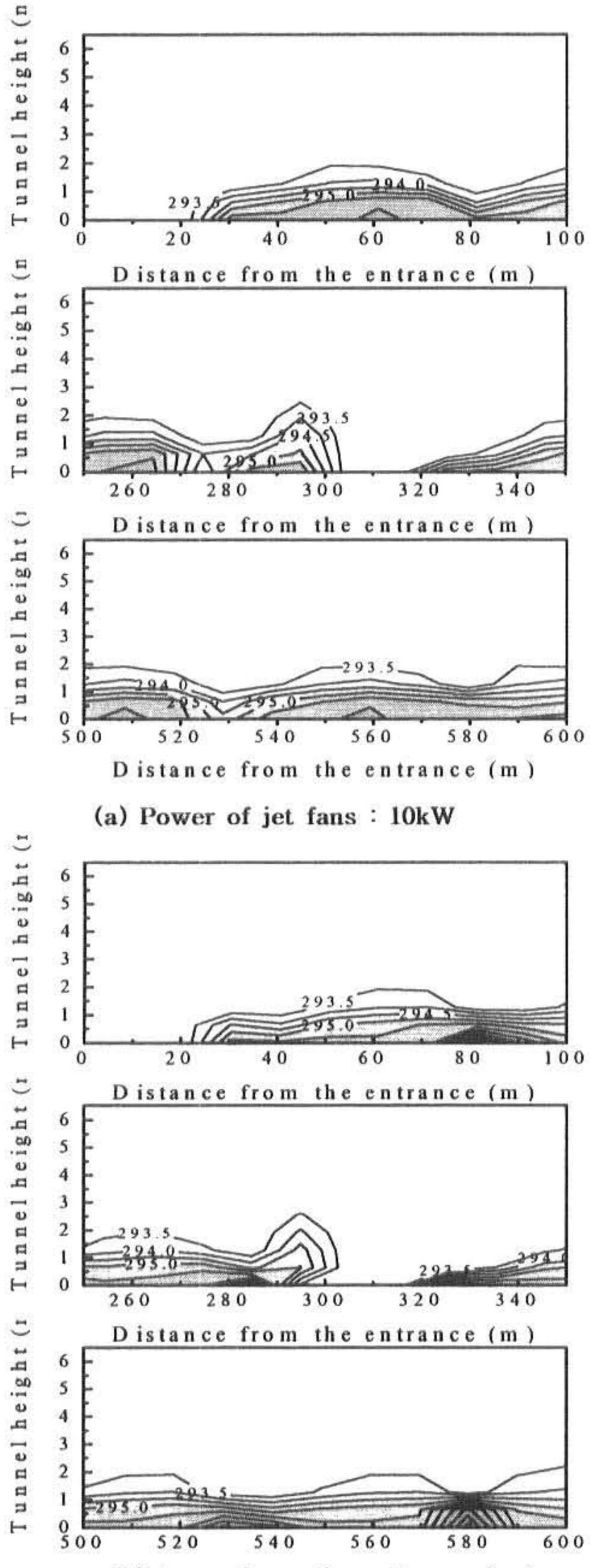


Fig. 10 Temperature distribution when jet fans are operated (head wind speed : 6m/s)

량은 증가하지만, 맞바람이 불때는 터널내부의 공기유동양상이 불안정해질 수 있다. 그러므로 보다 효율적인 환기시스템의 개발과 제어프로그램이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1) 건설교통부 : 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙, 건설교통부령 제206호, (1999. 8)
2) 최신 터널공법총기술, 도서출판 과학기술, pp.953-962, (1994)
3) A. Bring, T.-G. Malmström and C. A. Boman : Simulation and measurement of road tunnel ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 3, pp.417-424, (1997)
4) G. Lotsberg : Measurement of the wall friction factor and the installation efficiency of jet fans, The 9th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Italy, (1997)
5) 정장표, 김광수 : 터널오염도와 그 영향인자에 관한 연구, 환경연구, 제2권, 제1호, pp.45-56, (1992)
6) K. C. Karki, S. V. Patankar, E. M. Rosenbluth and S. S. Levy : CFD model for jet fan ventilation systems, The 10th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, USA, (2000)
7) J. P. Kunsch : Simple method for control of fire gases in a ventilated tunnel, Fire Safety Journal, Vol. 37, pp.67-81, (2002)
8) S. V. Patankar : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Co., (1980)
9) B. E. Launder and D. B. Spalding : The numerical computation of turbulent flow, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp.269-289, (1994)
10) 김재휘 : 자동차세시, pp.505~518, 중원사, (1996)
11) 장현봉, 장덕형 : 터널부 교통류 특성 및 용량산정에 관한 연구, 대한교통학회지, 제16권, 제3호, pp.15-24, (1998)
12) 장현봉, 이 범규 : 4차로 고속도로 터널구간의 교통류 특성에 관한 연구, 건축·도시환경연구, 제8집, pp.93-104, (2000)

(2002년 7월 26일 접수, 2002년 11월 18일 채택)