

터널 입출구 주위의 유동장과 배기가스 재순환

서용권¹⁾ · 이창우²⁾ · 최윤환³⁾

Flow Field and Exhaust Gas Recirculation around a Tunnel Entrance and Exit

Yong Kweon Suh, Changwoo Lee and Yoon-Hwan Choi

ABSTRACT In this study, the flow field and the recirculation phenomena are investigated numerically for the model around a tunnel entrance and exit. It turns out that the air entering to the tunnel entrance comes mostly from the upper region of the entrance implying that maintaining the air clear in that region is important for the inside-tunnel ventilation. We also found that the recirculation of the exhaust gas from the exit to the entrance has a maximum effect when the flow velocity at the exit is somewhat lower than that of the entrance.

1. 서 론

차량용 터널을 구조상의 차이로 나누어 보면 크게 두 가지의 형태로 나눌 수 있다. 즉 상하행선이 공존하는 대면(對面)터널과 그것이 분리된 일방향터널이 그것이다. 전자는 상하행선의 교통량이 비슷할 때 터널내 배기가스가 정체되어 있을 가능성이 많으나 건설비용이 저렴하므로 주로 단거리의 터널용으로 많이 채용된다. 따라서 환기문제가 중요하게 대두되는 긴 터널의 경우에는 건설비용이 더 많이 들더라도 후자를 택할 수 밖에 없다. 일방향터널의 경우에 자연환기가 가능한 조건은 일반적으로

$$L:N = 2000 \quad (1)$$

이다. 여기서 L은 터널의 길이[m], N은 단위시간당의 교통량[대/hr]이다. 이 식은 터널길이, 구배, 교통량 등이 그렇게 크지 않은 평균적인 터널에서의 자연환기에 대한 지표이다. 후자의 경우에 있어서 터널내 압력강하나 배기가스 확산 등의 문제는 주로 1차원 문제로하여 많이 다루어 지고 있다(예; 이창우¹⁾). 그러나, 터널의 입구와 출구가 공존하는 외부지역의 유동장 해석 및 배기

가스 재순환문제 등에 대해서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있다. 일방향 터널에 있어서 출구에서는 차량이 계속 빠져 나오고 있으므로 기체가 주로 배출되며, 그 배출기체는 제트형태로 유지되며 확산한다고 볼 수 있다. 이 제트형태의 기체는 터널 내에서 차량들이 배출한 배기가스가 많이 혼합된 것으로 볼 수 있다. 한편, 입구를 통해서 차량들이 계속 진입해 들어가므로 기체가 유입된다. 따라서, 출구를 통해 배출된 혼합기체가 다시 입구를 통해 재유입된다면 터널내의 공기는 더욱 나쁜 상태를 유지할 수 밖에 없게 된다. 지금까지 터널외부의 유동은 출구주위에 국한하여 주로 수치해석에 의존하여 연구되어 왔다. Chow & Chan²⁾은 높이가 50 m, 길이가 300 m인 2차원 모델을 사용하여 일산화탄소의 확산에 대한 연구를 하였다. Chow³⁾는 Chow & Chan의 연구에서 사용한 모델을 이용하여 CO의 확산에 대해 난류모델을 이용하여 수치해석을 하였다. 또한 Chow⁴⁾는 길이 300 m, 폭 100 m, 높이 50 m로 터널외부를 모델링하여 바람의 영향에 따른 CO의 확산에

1) 동아대학교 기계공학과 교수

2) 정회원, 동아대학교 자원공학과 교수

3) 동아대학교 기계공학과 대학원 과정

대한 연구를 하였다. 앞에서의 연구들은 주로 터널출구만을 한정하여 연구했으나 본 연구에서는 터널 입·출구를 동시에 고려하여 입·출구 사이의 거리가 주위 유동에 미치는 영향 그리고 배출가스의 재순환 효과를 파악함으로써 터널 설계의 기초자료로 삼고자 한다.

2. 유동모델 및 수치해석 방법

Fig. 1은 본 연구의 유동모델을 스케치한 것이다. Fig. 1에서 터널은 좌측(outlet)에 있다고 볼 수 있다. 그리고 해칭(hatching)으로 표시한 벽(wall)은 고체벽면을 나타내며 해칭되지 않은 면은 개방면을 나타낸다. 다만, 바닥은 고체벽면이지만 혼란을 피하기 위하여 해칭하지 않았다. 본 연구에서는 S이외의 모든 치수들은 Fig. 1과 같이 고정시켰으며, S를 0.3[m], 0.5[m], 0.7[m], 0.9[m]의 4가지 경우로 바꾸어 가면서 유동장을 조사하였다. 입구를 통해 유입되는 기체의 속도 V_i 는 35[m/s]로 고정하였다. 실제의 터널은 이보다 몇 배 더 크다고 볼 수 있다. 그러나, 이 조건하에서는 수렴된 해를 얻을 수가 없어 실제보다 작은 터널을 택한 것이다. 터널입구에서의 기체의 속도는 실제의 속도와 비슷하다고 볼 수 있다. 본 유동문제는 레이놀즈 상사칙만 만족하면 되므로, 터널의 크기를 실제보다 작게 하고 기체의 속도를 같이 하는 것은 터널의 크기를 실제대로 하고 기체의 속도를 그만큼 작게 하는 것과 같은 효과를 가진다. 기체를 25°C하의 공기(동점성계수 $1.56 \times 10^{-5} [m^2/s]$)로 하여 유입속도 35[m/s]와 터널크기

0.5[m]를 기준으로 하여 계산한 레이놀즈수 Re 는

$$Re = 1.1 \times 10^6 \tag{2}$$

이다.

입구에서의 유입속도를 35[m/s]로 고정시킨 반면 출구를 통해 배출되는 기체의 속도 V_0 는 35[m/s], 20[m/s], 10[m/s]로 바꾸어 보았다. 출구에서의 속도가 입구에서의 그것보다 작은 경우는 터널을 통해 유입되는 차량의 속도가 더 작다든지 또는 교통량이 더 작을 때의 경우에 해당하며, 이 때 배출가스의 재순환 정도는 어떠한지가 궁금하다. Table 1은 수치해석시 사용된 조건들을 제시한 것이다. 한편, 입구에서의 속도가 출구에서의 속도보다 작은 경우는 출구에서의 제트류가 상대적으로 강하여 터널입구로 재순환되는 효과는 더 작다고 판단되어 수치해석시 고려하지 않았다. 본 연구에서 x, y, 및 z방향으로의 격자수는 각각 50, 5, 16이다.

위에서 제시한 레이놀즈 수에서의 유동은 다분히 난류이며, 따라서 유동장을 해석하기 위해서는 난류모델이 필요하다. 최근, DNS(Direct Numerical Simulation), LES(Large Eddy Simulation)와 같은 보다 직접적인 수치해석 방법을 난류유동에 대해 적용하려는 시도가 많이 이루어 지고 있으나, 아직까지는 계산기의 용량이나 처리속도 등의 면에서 복잡하고 스케일이 큰 난류는 k-ε등과 같은 표준 난류모델⁵⁾을 사용한 수치해석 방법을 즐겨 쓰고 있다. 본 연구에서는 3차원, 비압축성, 정상, 난류유동에 대해 상용프로그램인 PHOENICS를 사용하여 수치해석하였다. 본 소프

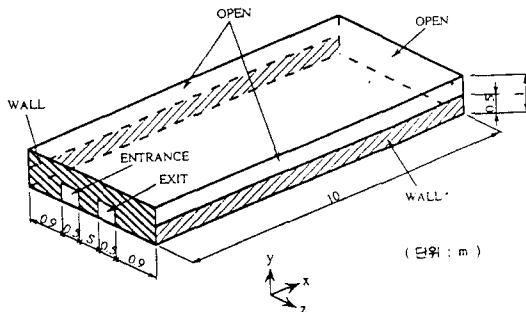


Fig. 1. Geometry of the computational domain for the model of turbulent flows in the external region of tunnel with an entrance and exit. Here, the entrance and exit openings are of square shape with a sidel length 0.5 [m].

Table 1. Four cases for the numerical studies. Here S denotes the distance between the entrance and exit. In addition, f denotes the fraction of fluid particles among 50 emitted from the tunnel outlet and entering the tunnel inlet. Further, g denotes the fraction of the fluid particles counted at the inlet which came from the tunnel outlet.

Case No.	S[m]	entrance velocity V_i [m/s]	exit velocity V_0 [m/s]	f	g
1	0.9	35	35	0	0
2	0.7	35	35	0	0
3	0.5	35	35	0	0
4	0.3	35	35	0.06	0.060
5	0.3	35	20	0.20	0.114
6	0.3	35	10	0.26	0.074

트웨어에는 몇가지 난류모델을 선택할 수 있도록 옵션을 두고 있으나 본 연구에서는 표준 k-ε 모델을 택하였다.

3. 수치해석 결과

터널 입,출구 주위를 모델링하여, Table 1에서의 조건에 따라 해석한 결과를 시간평균 유동장, 난류특성, 재순환 효과의 순으로 검토한다.

3.1 시간평균 유동장

터널출구로부터의 유출유동장은 제트유동의 특성을 갖는다. 즉, 하류로 갈수록 운동량은 감소하지만 유동 방향은 거의 주유동방향으로 유지되며, 또한 주위의 기체를 끌어들이는 효과(entrainment effect)를 지닌다. 한편, 터널 입구로 들어가는 유입유동장은 유동의 sink와 같은 특징을 보인다. 즉, 유입되는 기체는 모든 방향으로부터 방사선 모양으로 유입된다. Fig. 2는 $S=0.5$ [m], $V_0=35$ [m/s]의 경우에 대해 터널입구를 통한 유선을 보여주고 있다. 터널입구로 유입되는 기체는 대부분 상부로부터 공급되며, 터널출구로부터 재순환되어 들어오는 기체는 없다. 이는, 출구로부터의 제트유동이 180°만큼 방향전환을 하여 터널입구로 유입되기 보다는 정지되고 구속이 없는 상부의 공기가 유입되는 것이 더 쉬울 것이라는 원리로부터 이해할 수 있다. 한편, V_0 가 작은 경우에는 재순환이 존재하며 이는 3.3절에서 자세히 검토하기로 한다. 한편, Fig. 2에 의하면 터널출구로부터의 유출유동은 하류로 갈수록 입구쪽으로 접근하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 입구에서의 흡

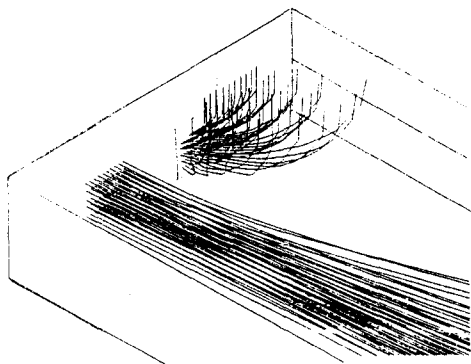


Fig. 2. Streamlines passing through the entrance and exit for $S=0.5$ [m] and $V_0=35$ [m/s].

입효과에 기인한다. 그리고 Fig. 2에서 유선이 존재하지 않는 지역에서는 유출유동의 끌어들이м 효과에 의해 유동장이 형성됨을 짐작할 수 있다. Fig. 3은 같은 조건에서 $y=0.25$ [m]에서의 y-단면(즉, y축에 수직인 단면)상의 속도벡터를 보여주고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 출구로부터 직접 유출되는 유동 및 입구로 직접 유입되는 유동 외에 끌어들이м 효과로 인한 유동이 넓게 형성되어 있음을 알 수 있다.

끌어들이м 효과는 매우 넓은 범위에 걸쳐 나타난다. Fig. 4는 세개의 z-단면 상에서 속도벡터를 그린것이다. $z=1.16$ [m]는 터널 입구단면의 중앙을 통과하며 $z=1.55$ [m]는 터널입구와 출구 사이에 해당하고 $z=2.13$ [m]는 터널출구단면의 중앙을 통과한다. 터널입구 근처를 제외하면 거의 모든 지역에서 끌어들이м 효과가 강하게 작용함을 알 수 있다. 한편, 터널입구 근처에서의 속

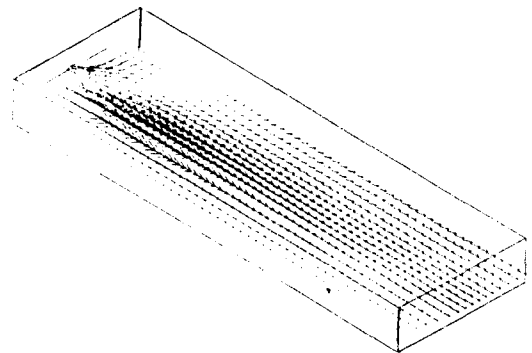


Fig. 3. Velocity vectors on the y-surface at $y=0.25$ [m] for the same condition as Fig. 2.

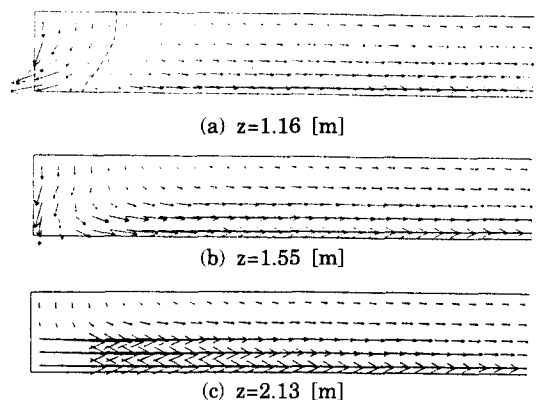


Fig. 4. Velocity vectors at three y-surfaces for $S=0.3$ [m], $V_0=35$ [m/s].

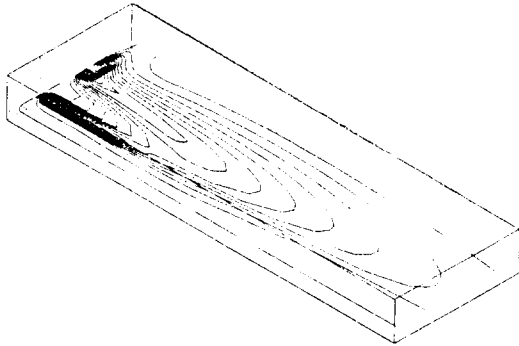


Fig. 5. Distribution of the turbulent kinematic energy k at $y=0.25$ [m] for $S=0.5$ [m], $V_0=35$ [m/s].

도벡터를 보면, 터널입구 약 1[m] 이내 지역(점선으로 표시)에서의 기체만이 상부로부터 터널입구로 유입됨을 알 수 있으며, 이는 터널입구 바로 상부 지역의 공기를 맑게 유지해 두는 것이 터널내 환기에 중요함을 의미한다.

3.2 난류특성

Fig. 5는 $y=0.25$ [m] 단면에서의 난류운동에너지 k 의 분포를 보여주고 있다. 터널출구부에서 입구와 반대쪽의 전단층에서 매우 강한 난류성분이 길게 존재하며, 터널입구 가까운 지역에서도 다소 강한 난류성분이 존재함을 알 수 있다. 특이한 것은, 터널 출구부에서 입구쪽에 형성된 전단층에서는 난류성분이 약한데, 그 이유는 현재로서는 알 수 없다. 한편, 난류소산율 ε 은 k 와 매우 유사한 분포를 보이고 있다. 이는, 난류성분이 큰 지역에서 역시 난류 소산율도 비례하여 크다는 것을 의미한다.

3.3 배출가스 재순환

터널출구로부터 유출되는 기체는 대부분 터널내의 차량들이 배출한 공해물질(CO , NO_x 등)이 함유되어 있다. 따라서 이 혼합기체가 다시 터널입구로 재순환되어 들어간다면 터널내부의 환기 측면에서 좋지 않다. 유출기체의 재순환은 평균유동장에 의해 직접 터널입구로 유입되는 경우와 전단층등에서의 난류확산을 통해 유입되는 경우로 나눌 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 후자의 효과는 무시하고 전자의 경우만 고려하였다.

Fig. 6은 $S=0.3$ [m], $V_0=20$ [m/s]에 대해 출구에서 출발한 50개의 유체입자가 평균 유동장에 의해 그리는

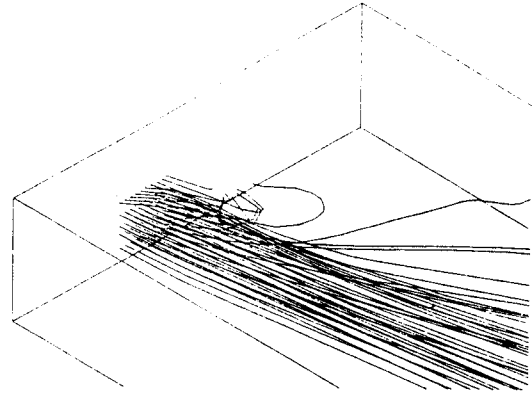


Fig. 6. Streamline patterns near the tunnel entrance and exit for $S=0.3$ [m], $V_0=20$ [m/s] Number of streamlines are 50, and some of them are shown to enter the entrance (recirculation).

궤적(즉 유선)을 보여주고 있는데, 이 경우에는 그 중 10개의 입자가 터널입구로 유입되고 있다. 이와같은 재순환 효과는 터널의 입출구 사이의 간격 S 뿐만 아니라 V_0 와 V_i 의 차이에 의해서도 달라진다. Table 1에는 재순환 정도를 정량화한 f 와 g 값을 각 경우에 대해 구한 결과가 제시되어 있다. 여기서, f 는 터널 출구에서 출발한 50개의 유체입자 중 터널입구로 유입되는 갯수를 50으로 나눈 값이고, g 는 $g=f V_0/V_i$ 로 계산한 양이다. 터널출구에서 출발하는 유체입자의 속도는 출발시 V_0 이나 터널입구를 통과하여 들어갈 때는 V_i 가 되며 $V_0 < V_i$ 이므로, 터널출구에서 출발할 때 전체면적의 f 만 한 비율을 차지하던 입자들은 따라서 터널입구를 지날 때는 그만큼 작아진다. g 는 이 효과를 고려한 것이다. Table을 보면, $V_0=V_i$ 의 경우에는 S 의 감소에 따라 $f=0$ 을 유지하다가 $S=0.3$ 에서 0.06의 값을 보인다. 한편, 터널출구에서의 유속 V_0 가 감소함에 따라 f 는 크게 증가한다. f 가 단조증가하는 반면 g 는 $V_0=20$ [m/s]에서 최대값을 보이고 $V_0=10$ [m/s]에서는 오히려 감소한다. 이것은 $V_0=20$ [m/s] 이하에서는 터널출구에서 입구로 들어가는 유선갯수의 증가가 V_0 의 감소만큼 심하지 않음을 의미한다. 이와같이 터널출구에서의 유속이 입구에서의 유속보다 어느정도 작을 때 최대의 재순환 효과를 보인다는 사실은 중요한 의미를 지닌다. 이것은, 터널출구를 통한 유출 교통량의 터널입구를 통한 유입 교통량에 대한 비가 1이하의 어느 값에서 재순환 효과가 최대가 됨을 의미하기 때문이다.

4. 결 론

터널입출구 주위의 유동장과 재순환 효과에 대한 수치해석적 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 터널 출구에서 유출된 기체는 대부분의 경우 제트 형태로 하류지역으로 발달하려는 경향이 강하며, 입출구간의 거리가 작고 유출속도가 유입속도보다 작을 때는 재순환이 일어난다.

2) 터널입구로 유입되는 공기는 주로 상부로부터 공급되며, 따라서 실제 터널의 입구상부의 관리는 터널내 환기에 중요하다.

3) 입출구간의 거리가 0.3 [m]이고 유입속도가 35 [m/s]일 때 재순환 효과는 유출속도가 20 [m/s]일 때 최대가 되며, 35 [m/s], 10 [m/s]일 때는 이보다 작다.

참 고 문 헌

1. 이창우, 1993, "갱내 디젤차량 배기물질 확산모델링

방법간 비교연구", 한국자원공학회지, 제30권, pp. 220-227.

2. Chow, W. K. and Chan, W. T., 1988, "Environmental Justification of a Vehicular Tunnel Constructed in Residential Area", 6th Int. Symp. Aerodyn. Ventilation Vehicle Tunnels, pp. 165-177.
3. Chow, W. K., 1989, "Dispersion of Carbon Monoxide from a Vehicular Tunnel with the Exit Located along a Hillside", Tunneling and Underground Space Technol., Vol. 4, pp. 231-234.
4. Chow, W. K., 1991, "Prediction of CO Level near Vehicular Tunnel with Waiting Queue", J. Environ. Engrng ASCE, Vol. 117, Paper No. 25488.
5. Spalding, D. B., Launder, B. E., 1972, "Mathematical Models of Turbulence", Academic Press.