

## 제트 팬 방식 환기시스템을 사용하는 터널의 환기량에 영향을 주는 인자에 대한 수치해석 검토

김 사 량<sup>†</sup>, 김 기 정<sup>\*</sup>, 허 남 권<sup>\*\*</sup>, 김 영 일<sup>\*\*\*</sup>

강릉대학교 정밀기계공학과, <sup>\*</sup>서강대학교 대학원 기계공학과,  
<sup>\*\*</sup>서강대학교 기계공학과, <sup>\*\*\*</sup>한국과학기술연구원 열유동제어센터

### A Numerical Analysis on the Effect of Parameters for the Flow Rate through the Tunnel with Jet Fan Ventilating System

Sa-Ryang Kim<sup>†</sup>, Ki-Jung Kim<sup>\*</sup>, Nahmkeon Hur<sup>\*\*</sup>, Yung-Il Kim<sup>\*\*\*</sup>

*Department of Precision Mechanical Engineering, Kangnung National University, Kangnung 210-702, Korea*  
*<sup>\*</sup>Graduate School, Sogang University, Seoul 121-742, Korea*

*<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea*

*<sup>\*\*\*</sup>Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea*

(Received August 16, 2001; revision received June 2, 2002)

**ABSTRACT:** In the present study, ventilation flow rates and pressure rises through a road tunnel are simulated numerically using CFD with the various conditions such as roughness height, swirl angle of jet fan, entrance and exit effect and hub to tip ratio. By using a modified wall function, friction factor can be predicted under 10% of error with respect to the Moody chart for the circular pipe flow and 15%, for the present tunnel. For more precise design, the effects of the swirl angle and hub to tip ratio of jet fan, which is not included in the theoretical equation of pressure rise by jet fan are necessary to be considered.

**Key words:** Road tunnel(도로터널), Ventilation(환기), CFD(전산유체역학), Jet fan(제트 팬), Roughness height(조도)

#### 기 호 설 명

$A_j$  : 제트 팬의 토출면적 [ $m^2$ ]  
 $A_m$  : 차량의 등가저항면적 [ $m^2$ ]  
 $A_r$  : 터널의 단면적 [ $m^2$ ]  
 $C_\mu$  : 난류모델상수, 0.09  
 $D$  : 배제두께 [m]  
 $D_f$  : 제트 팬의 직경, 1.25 [m]

$D_r$  : 터널직경, 8.69 [m]  
 $k$  : 난류운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]  
 $M$  : 터널 내 차량 대수  
 $N$  : 제트 팬의 대수  
 $\Delta P_j$  : 제트 팬 1대의 송압력 [Pa]  
 $\Delta P_m$  : 차량에 의한 송압력 [Pa]  
 $\Delta P_{MTW}$  : 자연풍에 의한 환기저항 [Pa]  
 $\Delta P_r$  : 터널의 마찰저항 [Pa]  
 $Q_j$  : 제트 팬의 토출량 [ $m^3/s$ ]  
 $U_j$  : 제트 팬의 토출유속 [m/s]  
 $U_r$  : 터널의 환기속도 [m/s]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-33-640-2395; fax: +82-33-640-2244

E-mail address: dearksr@kangnung.ac.kr

- $U_n$  : 터널을 통과해서 부는 자연풍의 속도 [m/s]
- $u^+$  : 무차원 속도,  $(u - u_{wall})/u_\tau$
- $u_\tau$  : 벽면마찰속도 [m/s]
- $V_t$  : 차량의 속도 [m/s]
- $y^+$  : 무차원 거리,  $\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y/\mu$
- $y_0$  : 거칠기, 조도 [m]

**그리스 문자**

- $\lambda_r$  : 터널의 마찰손실계수
- $\kappa$  : Von Karman 상수, 0.42
- $\mu$  : 점도 [kg/(m · s)]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\eta_1$  : 제트 팬의 성능인자, 0.9
- $\eta_2$  : 벽면 마찰인자, 0.8
- $\eta_3$  : 길이방향 거리인자, 1.0
- $\zeta_e$  : 입구 손실계수, 0.6

**1. 서 론**

도로터널의 경우 그 특성상 차량의 배기가스에 의한 터널 내부의 대기오염은 상당하다. 길이가 짧은 도로터널의 경우는 차량의 진행에 의한 교통환기를 통해서도 충분히 환기가 가능하나, 터널의 길이가 상대적으로 긴 터널의 경우의 터널 환기는 교통환기만으로는 충분하지 못하다. 따라서 많은 터널의 경우 터널 내부의 환기를 위하여 제트 팬을 사용한 중류식 환기방식을 채택하고 있다.

터널내 환기에 대한 연구로는, 터널에 장착되는 제트 팬의 장착효율과 제트 팬에 의한 터널 내부의 승압에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 터널 벽면과 제트 팬의 이격거리가 승압효율에 가장 큰 영향을 미치는 것이 알려져 있으나, Martegani et al.<sup>(1)</sup>은 제트 팬의 장착효율에 대한 실험결과 제트의 선회각과 제트 팬의 허브와 팁의 반경비가 승압효율에 큰 영향을 미친다고 하였다. 또한, Saika et al.<sup>(2)</sup>은 실제 터널에서 터널 내부 유속과 제트 팬의 속도를 측정하는 실험을 통하여 제트 팬의 장착에 따른 터널의 승압에 관한 이론식을 고찰하였으며, 그 결과 이론

식의 적절함을 보였다.

최근 전산유체역학의 발달에 힘입어 터널의 내부 유동에 관한 많은 수치해석적 연구<sup>(3-6)</sup>가 진행되고 있다. CFD를 통한 유동해석에 있어서 경계조건 및 제트 팬의 설치조건 등을 적절히 선정하지 못하면 해석결과 환기유량은 많은 차이를 보일 수 있다. 특히 터널 벽면의 조도, 입구 손실 및 출구에서의 저항에 따라 환기량이 상당히 달라지며, 또한 제트 팬 출구유동의 선회각, 허브와 팁의 반경비 등 제트 팬의 특성에 따라서도 환기량은 달라진다. 따라서, 정량적으로 타당한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 위에 나열한 각각의 인자들이 환기량에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 터널의 환기 유량변화에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 변수인 벽면의 거칠기, 제트 팬의 선회각, 그리고 허브와 팁의 반경비, 입구 및 출구의 영향 등의 여러 가지 조건에 관하여 수치해석을 수행하고 수치해석을 통해 예측된 환기량과 설계유량과의 비교를 통하여 수치해석의 적절성을 파악하고자 한다.

**2. 수치해석방법**

연구대상 터널은, 단면적은 75.5m<sup>2</sup>이고, 길이는 2.05 km인 2차선 직선 터널이다. 환기에 사용되는 제트 팬은 직경 1,250 mm, 토출유속 30 m/s이며,

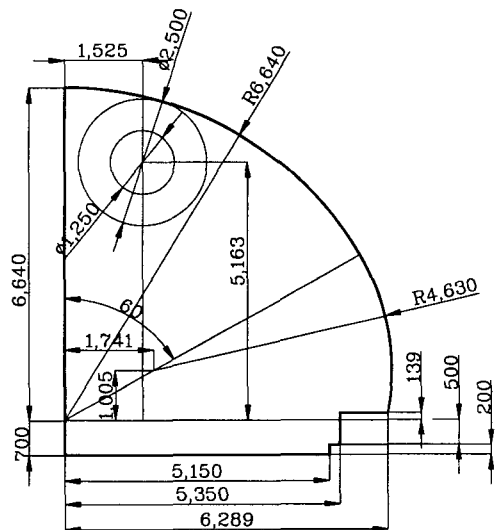


Fig. 1 Cross-sectional view of tunnel.

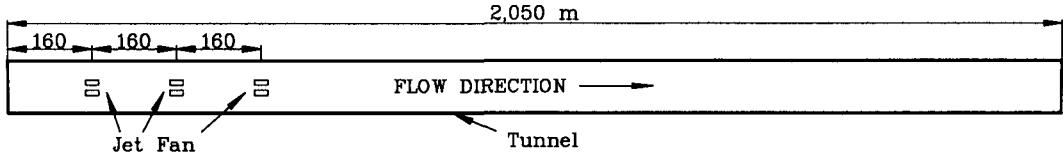


Fig. 2 Planar view of tunnel and installed jet fans by pair.

Table 1 Simulation cases for road tunnel ventilation with jet fans

Case	Roughness height										Swirl angle				Hub/tip ratio		Exit condition		Entrance loss	Exit loss
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	S1	S1F	S2	S2F	H1	H2	B1	B2	E1	E2
Roughness height (mm)	0	1	2	5	10	20	30	35	37	40	37				37		37		37	37
Swirl Angle	0°										17°	30°			0°		0°		0°	0°
$R_{hub}/R_{tip}$	0										0		0.18	0.40	0		0	0		
Exit B.C.	$P_{atm}$										$P_{atm}$		$P_{atm}$	$\Delta P_{MTW}$	$\frac{\rho U_n^2}{2}$	$P_{atm}$	$P_{atm}$ at far field			
Entrance B.C.	$P_{atm}$										$P_{atm}$		$P_{atm}$		$P_{atm}$		$P_{atm}$ at far field	$P_{atm}$		

총 6대가 2열로 설치되어 작동된다. 제트 팬은 길이방향으로 160 m 간격으로 설치되어 있으며, 각 설치단면에서는 제트 팬의 중심이 터널 중심 단면에서  $1.22 D_f$ , 터널 천정에서  $1 D_f$ 만큼 떨어진 위치에 설치되어 있다. Fig. 1과 Fig. 2에 터널의 단면과 평면의 개략도를 나타내었다.

본 연구에서는 이러한 터널에 대하여 ① 벽면 거칠기의 영향, ② 제트 팬 출구의 선회각의 영향, ③ 제트 팬의 허브/팁 반경 비, ④ 터널 출구에서 역풍이 2.5 m/s로 부는 경우, ⑤ 입구영역 및 출구영역을 고려한 경우에 대하여 계산하였으며, Table 1에 각각의 경우에 대하여, 각 변수값과 경계조건에 대하여 나타내었다.

먼저, 벽면의 거칠기를 계산에 고려하기 위하여, 식(1)과 같은 수정된 대수 벽법칙<sup>(7)</sup>을 사용하였다.

$$u^+ = A + \frac{1}{x} \log \frac{y^+ - D^+}{B + CR^+} \quad (1)$$

여기서,  $D^+ = \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} D / \mu$ ,  $R^+ = \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y_0 / \mu$ 이며,  $A, B, C$ 는 상수이고, 조도  $y_0$ 를 0에서 40 mm까지 변화시켜 가면서 10가지 경우에 대하여 계산하였다.

선회각의 영향에 대해서는 Martegani et al.<sup>(1)</sup>

의 실험에서 측정한 선회각 17°와 30°의 두 가지에 대하여 제트 팬의 회전방향이 같은 경우(S1F, S2F)와 반대 경우(S1, S2)를 해석하여 비교하였다. 제트 팬 출구 경계면에서 축방향 속도와 원주방향 속도의 합벡터가 축과 이루는 각도가 각각 17°와 30°가 되도록 속도경계조건을 주었다.

허브/팁 반경비의 영향에 대한 계산은, 역시 Martegani et al.<sup>(1)</sup>이 실험을 하였던  $R_{hub}/R_{tip} = 0.18$ 과 0.40에 대하여 수행하였다(Fig. 3).

터널 출구 역풍의 영향에 대해서는, 도로터널 설계시 적용되는 출구에서 약 2.5 m/s의 자연풍의 저항이 있다는 상황을 가정하였으며, 이때 2.5 m/s의 자연풍을 모사하기 위하여 설계에서와 같이 터널 내부를 2.5 m/s의 역풍이 통과하는 경우(B1)와 터널 출구부분에 2.5 m/s에 해당하는 동압을 경계조건으로 준 경우(B2)에 대하여 해석하여 비교하였다.

마지막으로, 입구 및 출구 경계의 위치의 영향

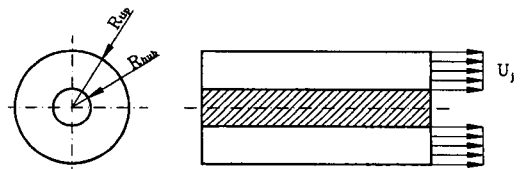


Fig. 3 Definition of hub and tip radius.

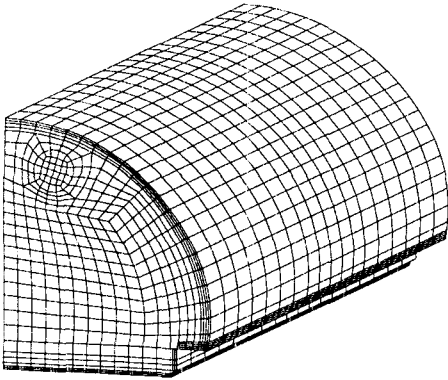


Fig. 4 Part of meshes for tunnel with jet fan.

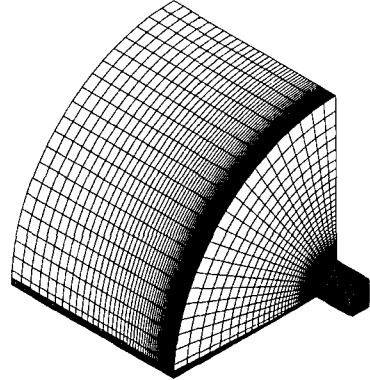


Fig. 5 Meshes for entrance of tunnel.

을 알아보기 위하여 터널 입구 또는 출구에 넓은 영역을 만들어 계산하였다.

터널의 형상은 좌우 대칭이므로 모든 경우에 터널의 반쪽만을 계산영역으로 하여 격자를 제작하였다. 전체 격자의 개수는 터널 본선의 경우 약 39만개의 격자를 사용하였으며, 입구의 영향 계산을 위한 격자의 개수는 약 9만개 정도를 사용하였다. 계산에 사용된 터널 격자의 부분확대 형상을 Fig. 4에, 입구영역의 격자를 Fig. 5에 나타내었다. 수치해석에는 STAR-CD<sup>(7)</sup> V3.1을 사용하였으며, 컴퓨터는 리눅스 클러스터(Dual Pentium III 850 Mhz CPU, 7node, 512 MB RAM/node)를 사용하였다. 각각의 경우는 하나의 CPU를 사용하여 계산하였으며, 한가지 경우에 약 7일의 계산시간이 소요되었다. 계산격자의 적합성을 확인하기 위하여 동일 형상에 대하여 약 78만개의 격자를 사용하여 계산한 결과 유량은 약 2% 정도의 차이밖에 나지 않은 관계로 모든 경우에 대하여 약 39만개의 격자를 가지고 계산을 수행하였다. 또한, 선회각의 영향에 대한 계산시에는 터널 전체에 대하여 격자를 작성(S1F, S2F)하여 대칭으로 계산한 것과 비교하였다.

### 3. 결과 및 검토

터널에 장착된 제트 팬의 역할은 터널 내부로 일정한 환기유량을 유입시키는 데 있다. 이러한 환기유량의 유입은 제트 팬에서 나온 제트의 모멘텀에 의해 유인되는 유동과 제트유동의 속도가 줄어들면서 압력이 회복되는 터널 내부의 압력상승에 의해 이루어진다. 이러한 터널 내부의 압력

변화를 Fig. 6에 나타내었다. 압력선도의 터널 출구쪽의 직선부를 연장(그림의 점선)하여 수직축에서의 압력차를 구하여 제트 팬에 의한 승압량을 구하였다.<sup>(8)</sup> 또한, 환기량은 터널 단면에서의 각 격자의 속도에 면적을 곱하여 적분하여 구하였다. 마찰계수는 압력선도의 직선부의 기울기를 이용하여 구하였다.

수치해석을 통하여 예측된 환기유량의 적정성을 검토하기 위하여, 실제 도로터널 설계시 사용되는 설계식을 통하여 설계유량을 구한 다음 수치해석으로 예측한 환기유량과 비교하였다. 본 연구에서 설계환기량을 계산하기 위한 이론식<sup>(9)</sup>은 다음과 같다.

$$\Delta P_{MTW} + \Delta P_r - \Delta P_m \leq N \times \Delta P_j \quad (2)$$

여기서,  $\Delta P_{MTW}$ 는 자연풍에 의한 환기저항,  $\Delta P_r$ ,

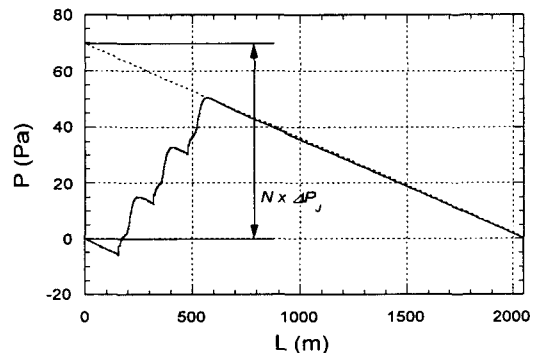


Fig. 6 Pressure distribution along the center of the tunnel.

Table 2 Results of ventilation flow rates, friction factor, pressure rises

		Roughness height (mm)									
Case		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
Values		0	1	2	5	10	20	30	35	37	40
Relative Roughness		0	0.000115	0.000230	0.000575	0.00115	0.00230	0.00345	0.00403	0.00423	0.00460
Flowrate (cms)	CFD	546	487	459	421	390	360	342	335	332	330
	Design	301									
Friction factor	CFD	0.00896	0.0113	0.0130	0.0156	0.0180	0.0214	0.0237	0.0247	0.0251	0.0256
	Design	0.025									
Pressure rise by a jet fan (Pa)	CFD	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.6
	Eq. (6)	9.63	9.96	10.1	10.3	10.5	10.7	10.8	10.8	10.8	10.8
	Design	11.0									
		Swirl angle				Hub/tip ratio		Exit condition		Entrance region	Exit region
Case		S1	S1F	S2	S2F	H1	H2	B1	B2	E1	E2
Values		17°		30°		0.18	0.40	-	-	-	-
Flowrate (cms)	CFD	328	326	317	315	338	363	267	320	297	332
	Design	301				301		234		290	301
Friction factor	CFD	0.0251	0.0249	0.0251	0.0247	0.0251	0.0251	0.0261	0.0261	0.0251	0.0251
	Design	0.025									
Pressure rise by a jet fan (Pa)	CFD	11.2	11.0	10.4	10.2	12.0	13.8	12.4	11.7	11.9	11.6
	Eq. (6)	10.9	10.9	10.9	10.9	11.5	15.5	11.2	10.9	11.0	10.8
	Design	11.0				11.0		11.4		11.0	11.0

은 터널의 마찰저항,  $\Delta P_m$ 은 차량의 주행에 의한 승압력,  $\Delta P_j$ 는 제트 팬 1대의 승압력이며, 각각의 항은 다음과 같다.

$$\Delta P_{MTW} = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \frac{L_r}{D_r}\right) \frac{\rho}{2} U_n^2 \quad (3)$$

$$\Delta P_r = \left(1 + \zeta_e + \lambda_r \frac{L_r}{D_r}\right) \frac{\rho}{2} U_r^2 \quad (4)$$

$$\Delta P_m = \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} M (V_t - U_r)^2 \quad (5)$$

$$\Delta P_j = \rho Q_j (U_j - U_r) \eta_1 \eta_2 \eta_3 \frac{1}{A_r} \quad (6)$$

본 연구에서는 차량의 주행에 의한 환기력은 고려하지 않았으므로 설계 유량 계산시 차량에 의한 승압력은 무시하였다. 차량에 의한 압력상승을 제외한 나머지 식(3), (4), (6)을 식(1)에 대입하여 전개하면 터널 내부의 평균 유속,  $U_r$ 에 관한 2차식이 된다. 이 식으로부터 터널 내부의 평균 유속을 구하여 터널의 단면적을 곱하면 설계 환기량을 구할 수 있다.

Table 2에 각각의 계산 경우에 대한 환기량,

마찰계수, 제트 팬의 승압력에 대한 수치계산결과를 이론식에 의한 값과 비교하여 나타내었다.

### 3.1 수정된 벽법칙에 대한 검증

수정된 벽법칙인 식(1)에 대한 검토를 위하여 먼저 터널 내의 유동과 비슷하게  $Re$  수가  $2 \times 10^6$  일 때의 원형 파이프 유동에 대하여 계산하여, 조도에 따른 마찰계수의 관계를 Moody<sup>(10)</sup> 차트의 값 및 Colebrook<sup>(10)</sup>의 보간식과 비교하여 Fig. 7

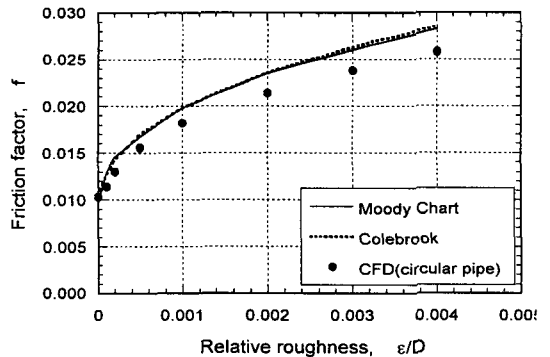


Fig. 7 Comparison of friction factor from CFD with conventional data ( $Re_D = 2 \times 10^6$ ).

에 그래프로 나타내었다. Moody 차트와 Colebrook의 보간식에 비해 계산결과가 약 10% 정도 작은 값을 예측하나 경향이 잘 일치하므로, 식(1)을 적용해도 무리가 없을 것으로 판단하여, 본 연구의 다른 모든 경우의 계산에 사용하였다.

### 3.2 환기량 및 마찰계수에 대한 검토

터널에 대하여 조도의 변화에 따른 환기량과 마찰계수의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 마찰계수가 0.025일 때 식(2)에 의한 설계환기량은 약 301 m<sup>3</sup>/s이다. 매끈한 벽면인 경우에 환기량은 설계환기량보다 80% 정도 크게 예측되며, 조도가 37 mm(상대조도는 0.043)인 경우에는 마찰계수가 약 0.0251로서 설계식에서 사용하는 0.025와 거의 일치하고, 그때의 환기량은 10% 정도의 오차를 보인다. 따라서, 수치계산시에 반드시 적절한 조도를 고려해야 할 것이다. 또한, 마찰계수에 대해서는 Moody 차트의 값보다 15% 정도 작게 예측한다. 원형 파이프의 경우보다 더 오차가 큰데, 그 주된 원인은 터널 단면이 원형이 아니며 유동이 편심되어 있기 때문으로 생각된다. 따라서, 수치계산시 조도를 적절히 고려해 주면 유량 및 마찰계수의 오차가 10~15% 내의 범위에서 터널 내의 유동을 예측할 수 있을 것이다. 현재로서는 터널의 실제조도를 알 수 없으므로 나머지 계산에서는 마찰계수가 가장 잘 일치하는 경우인 조도가 37 mm인 경우에 대하여 해석하였다.

Fig. 9는 선회각의 변화에 대한 결과이다. 선회각이 존재하는 경우에, 2대의 제트 팬의 회전방향이 반대라면 대칭으로 가정하여 반쪽만 해석해

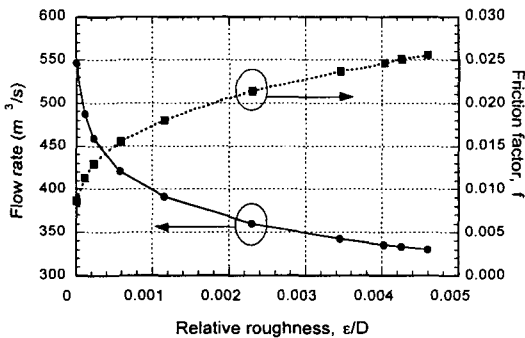


Fig. 8 Comparison of flow rates and friction factors of the tunnel for various relative roughness.

도 되지만, 대개의 경우는 회전방향이 동일할 것이며 이런 경우에는 터널 내부유동의 대칭성이 파괴되므로 전체 유동장을 계산해야 한다. 그러므로, Table 1에서 S1과 S2는 대칭의 경우를 S1F와 S2F는 비대칭의 경우를 해석한 것이다. 선회각이 커짐에 따라 마찰계수는 큰 변화가 없으나 환기량은 5%까지 조금씩 작아지는데, 이는 선회각에 의한 원주방향의 속도성분이 터널 단면 내의 2차 유동을 활성화시켜서 전체적인 손실을 증가시키기 때문으로 생각된다. 제트 팬의 회전방향은 마찰계수나 유량에 거의 영향을 미치지 않는데, 이는 두 제트 팬 사이의 거리가 충분히 멀어서 큰 영향을 받지 않기 때문으로 생각된다. 따라서, 선회류의 영향을 자세히 알기 위해서는 제트 팬의 간격 등의 인자에 대한 영향도 고려하여 더 세밀한 연구가 필요하며, 터널 설계시 이에 대한 영향을 고려할 필요가 있다.

Fig. 10은 제트 팬의 허브/팁 반경비의 영향에 대한 그림이다. 반경비가 클수록 제트 팬의 유효 단면적이 줄어들기 때문에 유량이 같은 경우에 제트 팬의 출구유속은 빨라진다. 따라서, 환기량도 커질 것으로 예측된다. 계산결과 마찰계수는 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있으며, 유량은 예측대로 반경비가 커지면 약 10%까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 실제로는 제트 팬의 허브의 축방향 길이가 제트 팬 전체 길이보다 짧으므로 그동안 전단층이 발달하여 출구속도가 Fig. 3과 같이 계단형태는 아니겠지만, 제트 팬의 출구속도 분포가 터널 내 환기량에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 그러므로, 수치계산시 적절한 조건을 주어야 할 것이다.

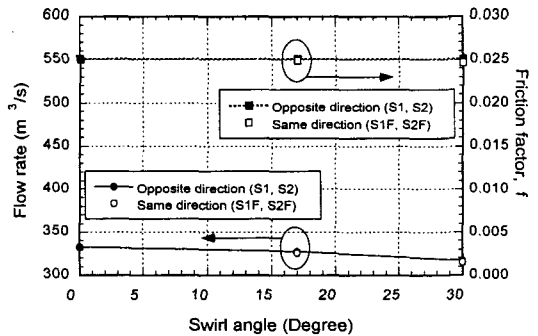


Fig. 9 Comparison of flow rate and friction factor for various swirl angle.

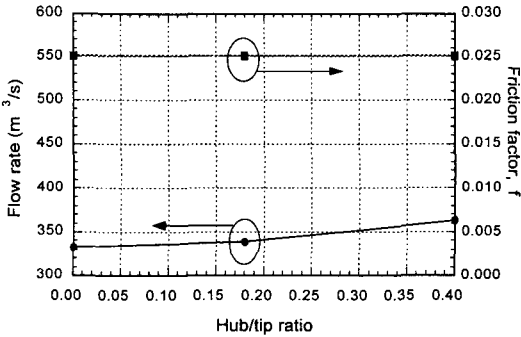


Fig. 10 Ventilation flow rate and friction factor by hub to tip radius ratio.

Fig. 11에는 출구에서 2.5 m/s의 저항풍을 고려한 경우에 대하여 환기량과 마찰계수를 나타내었다. 출구의 저항으로 인하여 환기량은 출구저항이 없을 때보다 5~20%까지 상당히 줄어들며, 마찰계수는 약간 증가한 것을 볼 수 있다. 출구저항풍을 고려한 경우에 설계환기량에 대하여 수치계산결과는 15% 이상의 오차를 가짐을 보여준다. 그림에서 B1은 식(3)에 나타낸 것과 같이 출구저항풍이 터널을 역으로 통과하는 경우에 생기는 저항을 모두 고려한 경우이다. 그러나, 실제의 경우에 차량이 주행하고, 제트 팬이 작동한다면 이런 경우는 생기지 않을 것으로 생각된다. 따라서, B2의 경우와 같이 출구의 저항풍은 터널 출구에만 동압에 해당하는 압력저항으로 작용할 것으로 가정하여 식(3)의 첫번째 항만을 고려하는 것이 더 타당한 조건으로 생각되며, 현재의 설계식은 다소 많은 필요 환기력을 요구하는 것으로 보인다. 그러므로, 정확한 환기유량의 예측을 위해서는 설계식과 수치해석상의 경계조건에 관한 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

입구경계의 위치로 인한 터널 입구에서의 손실을 고려한 경우의 계산결과 환기량은, 다른 계산결과의 환기량이 설계환기량보다 10% 정도 크게 예측하는 데 반해, 설계환기량과 상당히 잘 일치하는 결과를 보이고 있다(Table 2). 이는 수치계산결과가 입구에서의 손실을 설계식보다 더 크게 예측하기 때문이다. 따라서, 향후 터널 환기에 대한 수치계산을 수행할 경우 터널 입구 형상에 따른 적절한 입구손실을 고려하여 계산영역을 설정해야 타당한 계산결과를 얻을 수 있을 것이다. 터널의 길이가 길어질수록 입구손실에 대한 영향은 작아지지만 본 연구대상 터널의 경우는 터널

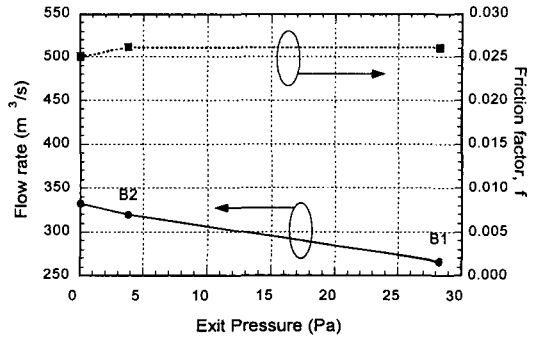


Fig. 11 Ventilation flow rate and friction factor by backward flow.

내의 마찰저항의 약 10%를 차지하므로, 설계식에 사용하는 입구손실계수의 크기에 대해서는 좀더 연구해 볼 필요가 있다고 생각한다.

출구경계의 위치는 환기량이나 마찰계수에 거의 영향을 미치지 않는다(Table 2). 따라서, 출구에서의 경계조건은 터널 출구에 바로 적용하면 될 것이다.

### 3.3 제트 팬 승압력 비교 검토

터널의 환기에 필요한 제트 팬의 대수를 구하기 위해서는 식(6)의 좌변에 있는 필요 환기력뿐만 아니라, 우변에 있는 제트 팬 1대당의 승압력도 정확히 계산할 필요가 있다. 수치계산결과로부터 얻은 터널 중심에서의 길이방향 압력분포의 기울기로부터 구한 승압력(Fig. 6), 수치계산으로부터 얻은 환기량을 식(6)에 대입하여 구한 승압력, 그리고 설계식(식(2))에 의한 승압력을 각각 비교하여 Table 2에 나타내었다.

조도변화에 대한 경우에 승압력은 계산방법에 따른 차이는 크지 않으며, 수치계산결과 환기량을 식(6)에 대입하여 구한 승압력이 다른 방법으로 구한 것보다 작는데, 이는 수치계산결과의 환기량이 비교적 크게 예측되기 때문이다.

선회각이 커짐에 따라 압력선도로부터 구한 승압력이 점점 작아지는데, 환기량으로 구한 승압력은 거의 변화가 없다. 이는 선회각의 존재로 인하여 압력이 변화하는 영향이 식(6)에는 고려되지 않았기 때문으로 생각된다.

허브/팁 반경비를 고려한 경우에는 환기량 증가에 의한 영향보다 제트 출구속도의 증가가 더 큰 영향을 미쳐서 설계식보다 더 큰 승압력을 나

타내는 것을 볼 수 있다.

자연풍의 저항을 고려한 경우에는 경계조건에 따라 오차가 10% 정도 변동하는 것을 볼 수 있다.

입구경계의 위치에 대한 결과는 환기량이 거의 일치하기 때문에 설계식에 의한 승압력과 잘 일치하지만, 압력선도에 의한 값과는 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 출구경계의 위치에 의한 영향은 거의 없는 것을 볼 수 있다.

따라서, 승압력을 조금 더 정확히 계산하기 위해서는 제트 팬 특성에 관한 여러 가지 인자에 대한 연구가 진행되어 그 영향이 설계식에 더 포함되어야 할 필요가 있으며, 수치계산결과 승압력을 구하는 방법에 대한 검토도 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 제트 팬에 의한 터널 환기량에 대하여 여러 인자의 변화에 따라 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수정된 벽법칙을 이용하여 상대조도에 따른 벽면마찰계수를 원형 파이프 내의 유동에서는 오차 10% 이내로, 터널 내부유동에서는 오차 15% 이내로 예측할 수 있었다.

(2) 터널 내의 벽면마찰계수를 설계값에 일치시켜 계산한 결과 설계 환기량보다 약 10% 크게 환기량을 예측하였다. 따라서, 타당한 유량과 마찰계수를 얻기 위해서는 터널 벽면에 적절한 조도를 주어 수치계산을 수행하여야 한다.

(3) 수치계산시 입구경계의 영향은 반드시 고려하여 넓은 입구영역을 포함하여 계산하여야 하며, 수치계산결과는 입구손실을 설계식에서 보다 더 크게 예측하였다. 터널 입구형상과 손실계수에 대한 연구가 더 필요하다.

(4) 출구에서의 저항풍을 고려하기 위하여 수치해석시 사용된 2.5 m/s의 동압조건은 적용방법에 따라서 환기량 및 승압력이 설계식과 큰 차이를 보인다. 따라서, 좀더 타당한 출구저항풍에 대한 경계조건에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

(5) 정확한 제트 팬의 환기량이나 승압력 예측을 위하여는 선회각이나 허브/팁 반경비와 같은 제트 팬의 특성을 예측할 적절한 인자에 대한 추가적인 고려가 필요하다.

#### 참고문헌

1. Martegani, A.D., Pavesi, G. and Barbetta, C., 2000, Experimental investigation of interaction of plain jet fans mounted in series, 10th International Symposium on aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, BHR group, pp. 1055-1078.
2. Saika, T., Nakajima, K. and Setoyama, S., 2000, Jet fan thrust performance evaluation installed in Road Tunnel, 10th International Symposium on aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, BHR group, pp. 1079-1088.
3. Hur, N., 1999, Ventilation simulation in the long rail tunnel of Young-dong line, Report of Dae-Yang Air Conditioning Co. Ltd., SGI-19997012, Industrial Technology Research Center, Sogang Univ.
4. Mizuno, A., Nakajima, K. and Kanoh, T., 1999, Study on the installation Interval of Jet Fans for Road tunnel Ventilation, Proceedings of Sixth STAR-CD Users' Seminar, CD-adapco-Japan, pp. 13-15.
5. Lim, J.-S. and Shin, D.-S., 2001, Numerical Simulation of Fluid Field Around a Road Tunnel, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 1079-1083.
6. Yang, P.-S., Cho, Y.-J. and Lee, J.-H., 1998, A study on the ventilation in a long road tunnel, KSME J.(B), Vol. 22, No. 8, pp. 1091-1100.
7. STAR-CD Verion 3.1 Manual, 1999, Computational Dynamics Limited.
8. Diaz, J., Kramesberge, F. and Gaehler, 1991, Optimized jet fan installation, 7th International Symposium on aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnel, BHR group, Brington, UK, pp. 821-826.
9. Technology of Tunnel Ventilation, 2000, Bumchang Engineering, pp. 62-76.
10. Cho, K.R., Yoo, J.Y. and Kang, S.H. (Translated), 2000, Fluid Mechanics, 4th ed., McGraw-Hill KOREA, pp. 350-351.