

도로터널 제트팬 모형 실험

류 제 홍[†], 유 용 호, 김 진
인하대학교 환경토목공학부

The Jet-fan Model Test for a Road Tunnel Ventilation

Jae Hong Ryu[†], Yong Ho Yoo, Jin Kim

Division of the Environment & Geosystem Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received August 29, 2001; revision received May 26, 2003)

ABSTRACT: As tunnel ventilation has recently been playing a major role in the tunnel construction and maintenance, longitudinal ventilation systems with jet fans have been utilized a great deal because they are economical and effective. However, due to the length of tunnels and heavy traffic, it is hard to take the field measurements. In this study, therefore, the computer simulation and the model experiment of producing a wind tunnel were carried out simultaneously and the results were compared. The ultimate objective of this research was to interpret the air flow pattern inside the tunnel with a jet-fan was set up, and to offer the useful data for jet-fan installation and operation.

The experiment was carried out with varying the jet-fan diameters, location of installation, the discharge velocity. Result showed that as the initial static pressure came up with the negative pressure, the tunnel air flowed into the inside of tunnel from outside due to the entrainment-effect and the backflow-phenomenon by separation-effect was observed in the lower half part of the tunnel. As the jet-fan was getting closer to the tunnel wall, the entrainment-effect caused by the interaction with the wall was increased; however, the mixing distance and irregular flow section became longer, and also the air pressure loss generated by wall friction was large.

Key words: Jet-fan(제트팬), Road tunnel(도로터널), Longitudinal ventilation(종류식 환기), Entrainment-effect(포획효과), Backflow-phenomenon(역류현상)

기 호 설 명

A_0 : 제트팬 토출면적 [m^2]

D_h : 터널 대표직경 [m]

D_j : 제트팬 내경 [mm]

D_R : 터널 대 제트팬 내경비

F_p : 터널 내 제트팬 위치, F_z/D_h

F_z : 터널 내 제트팬 높이 [m]

M_p : 측정위치, Z/D_h

p : 정압(static pressure) [Pa]

P : 압력(total pressure) [Pa]

Q_e : 포획공기량 [m^3/s]

Q_j : 제트팬 토출량 [m^3/s]

Re_j : 제트팬 내 Reynolds 수, $U_j D_j / \nu$

Re_t : 터널 내 Reynolds 수, $U_t D_h / \nu$

[†] Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7558; fax: +82-32-862-3250

E-mail address: jhryu@orgio.net

- U_e : 포획속도 [m/s]
- U_j : 제트팬 토출속도 [m/s]
- U_t : 터널 내 종방향 평균 속도 [m/s]
- V : 체적(volume) [m³]
- X : 터널 종방향 거리 [mm]
- Z : 터널 횡방향 높이 [mm]

그리스 문자

- ρ : 공기밀도 [kg/m³]
- ν : 동점성계수 [m²/s]

1. 서론

최근 들어 차량의 폭발적인 증가로 인하여 새로운 도로건설의 수요와 함께 산악지역이 많은 국내의 현 실정 때문에 도로터널의 건설 및 필요성 또한 증가하고 있다. 이에 따른 도로터널의 이용차량 증가와 차량 평균 주행속도 감소로 인한 배기가스문제, 화재나 비상시의 터널 내에서의 안전성문제와 같은 터널 내의 환기문제가 관심의 대상이 되고 있다.

터널에 있어서 환기는 터널 내에 신선한 공기를 공급하고 차량에서 배출된 가스를 희석하며 오염된 공기를 터널 외부로 방출시켜 쾌적하고 안전한 주행환경을 유지하는 것은 물론, 화재시의 배연효과와 함께 비상시에 인명의 안전확보 및 유지관리를 위하여 오염물질의 농도를 기준치 이하로 낮추는 것이다. 따라서, 터널계획 및 건설시에는 반드시 적절한 환기대책이 요구되어진다.

도로터널의 터널환기방식은 크게 자연환기방식과 기계환기방식으로 구분된다. 일반적으로 터널 내를 주행하는 자동차의 피스톤 효과(piston effect) 등에 의해 자연환기가 가능한 터널은 약 500m 정도로 볼 수 있으나 최근에 건설되고 있는 터널들의 길이는 500m 이상인 장대터널이므로 기계환기방식으로 터널 내 환경을 일정수준 이상으로 유지시켜 주어야 한다. 기계환기방식 또한 종류식(longitudinal), 반횡류식(semi-transverse), 횡류식(transverse) 등으로 구분된다. 최근에는 비용이 적게 들고 효율이 높은 제트팬(jet fan)을 이용한 종류식 환기방식이 유럽, 일본 및 국내 등에서 많이 사용되어지고 있다.

제트팬을 사용한 종류식 환기방식은 터널을 따라 일정한 간격으로 고속의 축방향팬(axial fan)을 설치하여 팬에서 고속으로 가속된 공기를 토출(30m/s 이상)시켜 터널 내의 공기에 운동에너지를 전달한다. 이로 인해 발생된 고속의 공기흐름이 터널 내에 걸쳐 많은 양의 공기를 흐르게 하므로 터널 내에 환기효과를 가져오게 된다.⁽¹⁾ 반횡류식과 횡류식에 비해 터널단면을 축소시킬 수 있을 뿐만 아니라 개별 입, 배기갱구를 필요치 않으므로 건설비용과 운영비의 절감을 가져올 수 있고, 터널 내 화재시와 같은 긴급한 대응이 필요할 경우에는 효과가 비교적 떨어지지만 교통방향이 일방향으로 이루어지고 있을 경우에는 제트팬의 가동으로 입계환기속도를 유지함으로써 안전성을 확보할 수 있다.

최근 들어 제트팬을 사용한 종류식 환기방식이 국내 다수의 터널에 적용되면서 터널 내의 오염물질농도, 환경평가 및 전산유체역학 프로그램을 사용한 공기유동특성에 대한 예측 등이 많이 진행되고 있지만 이를 검증할 터널 내의 공기유동에 대한 실험은 터널의 장대화과 차량통행 등으로 측정에 많은 장애를 받고 있다.⁽²⁻⁴⁾

Table 1 Specification of jet-fan

	Type	Description
Fan	Diameter (mm)	∅ 1030
	Size (mm)	1030×4900 L
	Flow rate (m ³ /s)	25
	Jet discharge velocity (m/s)	more than 30
	Operating temperature (°C)	-15~120
	Flow direction	bidirectional
Motor	Output (kW)	30
	Pole	4
	Insulation class	H-class
	Efficiency	more than 90%

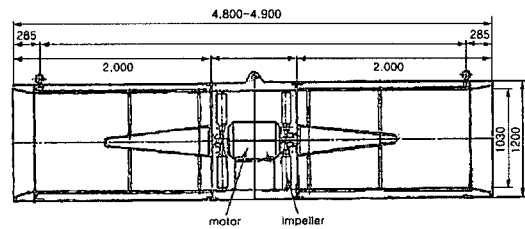


Fig. 1 Example of jet-fan structure and size (unit: mm).

따라서, 본 연구에서는 전산유체역학(computational fluid dynamics) 프로그램을 사용하여 터널 내의 공기유동을 예측하고 함께 모형터널을 제작하여 종류식 환기방식에서 제트팬 가동시의 공기유동과 특성을 분석하며, 제트팬 설치시 제트기류와 터널 벽면과의 마찰손실 및 공기유동을 분석하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

터널 내에서 제트팬에 의하여 송압된 공기유동은 난류 제트이론을 도입하여 해석하여 볼 수 있다.^(5,6) 또한, 터널 내에서의 공기유동은 주위가 폐쇄되어진 환경 하에서의 공기유동이므로 한정 제트(confined jet)시의 이론이 적용될 수 있다.

2.1 일반적 가정

제트는 유체 내에서 에너지(energy)와 운동량(momentum)의 근원으로서 일반적으로 다음의 가정 하에 적용된다.

- (1) 균질(homogeneous)하고 뉴턴(Newtonian) 유체이다.
- (2) 비압축성(incompressible) 유체이다(일반적으로 Mach 수는 0.3보다 작다고 가정된다).

2.2 제트(Jet)

제트의 질량과 운동량은 보존되며 다음과 같이 각각 나타내어질 수 있다.

질량 보존 :

$$U_o A_o + 2U_e A_s = \int_A u dA \quad (1)$$

운동량 보존 :

$$U_o^2 A_o = \int_A u^2 dA \quad (2)$$

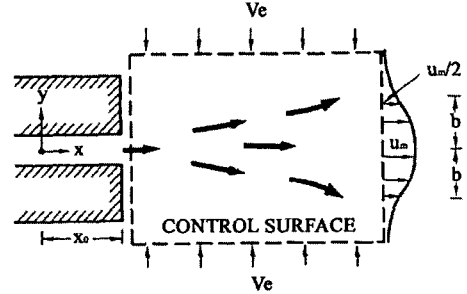


Fig. 2 Jet issuing into fluid reservoir.

여기서,

- U_o : 제트 토출속도(jet outlet velocity)
- A_s : 포획부 표면적(entrainment surface area)
- dA : 미세요소의 우측 단면적(element of the area of the right hand side)이다.

완전히 발달된 흐름의 선대칭 제트기류 하에서는 축방향 속도, u 와 제트중심속도, u_m 은 무차원화된 상수 r/x 의 비로 나타낼 수 있다. 여기서 r 은 제트기원으로부터의 거리, x 는 축방향 거리를 나타낸다.

2.3 한정 제트

한정 제트(confined jet)는 일반적으로 제트펌프, 파이프라인 확대, 연소기와 동맥질환 등의 해석에 적용되며 선대칭(axisymmetric), 평면(plane), 덕트(ducted) 모델로 각각 분류될 수 있다. 터널 내에서 제트기류의 거동은 한정 제트 중 덕트 모델로 적용될 수 있다. Fig.3에서 볼 수 있듯이 덕트 내에서의 제트기류의 발달과정은 크게 네 개의 과정으로 나눌 수 있다.

- I : 전단층에 의해 제트기류가 분리된다.
- II : 전단층이 덕트 벽면까지 확대되며 유체는 제트기류의 속도 자체를 줄이면서 빠르게 포획된다.

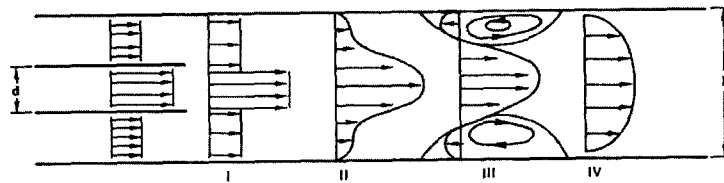


Fig. 3 Confined jet (ducted jet).

- Ⅲ : 덕트 벽면을 따라 소용돌이(eddy)와 재순환(recirculation)이 형성된다.
- Ⅳ : 충분히 발달된 유체의 일반적인 덕트 내에서 흐름을 나타낸다.

3. 시뮬레이션

모형실험에 앞서 널리 사용되는 상용 CFD(computational fluid dynamics) 유체유동 시뮬레이션 프로그램인 Phoenics를 사용하여 터널 내에서 제트팬의 사양 및 설치위치를 변경하며 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 위해 실제 터널 설계도를 사용하고 실제 터널에서 많이 사용되는 내경 1,250 mm(D_j)의 제트팬을 설정하여 제트팬과 벽면과의 거리를 변화시키며 시뮬레이션을 실시하였다.

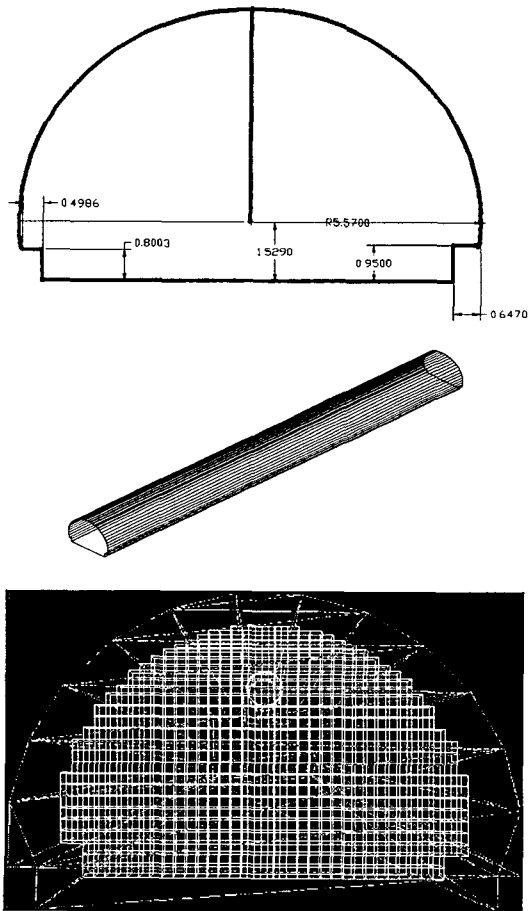
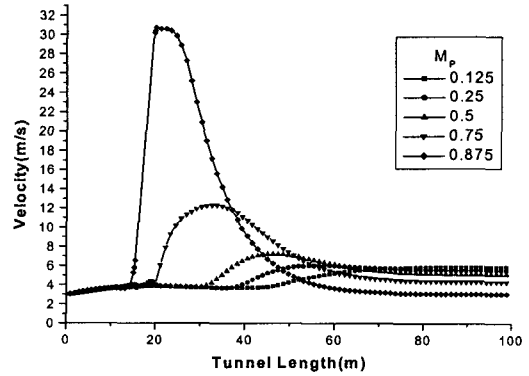
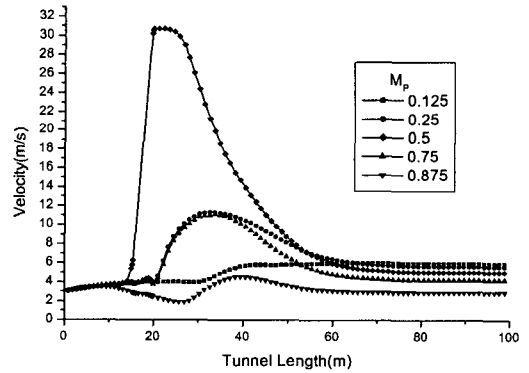


Fig. 4 Tunnel cross-section, geometry and grid.

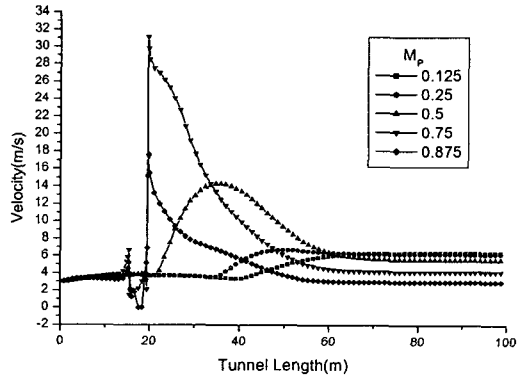
시뮬레이션의 대상이 된 터널은 단면적 63.3m², 둘레길이 31.2m, 대표직경 8.1m로서 시뮬레이션에서 사용된 터널 단면 및 기하학적 형상과 격자



(a) $D_R=0.15, F_p=0.16$



(b) $D_R=0.15, F_p=0.50$



(c) $D_R=0.15, F_p=0.16, 5^\circ$ tilt

Fig. 5 Velocity for the each position of jet fan within wind tunnel model ($Re_t : 3.16 \times 10^6, Re_j : 1.61 \times 10^6$).

생성은 Fig. 4에서 보이는 바와 같으며 총 $34 \times 28 \times 100$ 개의 격자들로 구성되어 있다.

시뮬레이션시 유체는 20°C 공기로 가정하였으며 이때의 동점성계수(ν)는 $1.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

시뮬레이션 결과를 비교하여 보면 터널 상부 벽면에 제트팬이 근접한 경우인 Fig. 5(a)와 제트팬이 터널 중앙에 위치한 경우의 Fig. 5(b)를 비교할 때 전자의 경우 터널 벽면과의 마찰로 인한 제트기류의 손실로 터널 상부 측정에서의 속도가 급격히 감소할 뿐만 아니라 이에 따라 제트기류가 터널 중앙에 도달하기 이전에 상당량이 소진되어 터널 내 공기유동의 정상화 거리 또한 길게 나타났으며, 공기유동의 정상화 이후에도 각 측정에서의 속도 및 터널 내 평균 속도 또한 작게 측정되었다. 또한 터널 벽면에 근접한 제트팬 상부를 약 5° 가량 하향화시켜 벽면마찰을 최소화하였을 경우의 Fig. 5(c)에는 터널 상부 지점에서의 손실완화로 터널 중앙과 상, 하부 전체 측정에서 속도가 상대적으로 빠르게 증가하여 결과적으로 터널 내 공기유동의 정상화 거리와 함께 터

널 내 평균 유속이 제트팬 상부를 하향화시키지 않은 경우인 Fig. 5(a)와 비교하여 우수한 결과가 나타났다. 따라서 이에 대한 검증작업과 함께 보다 자세한 제트기류의 거동과 터널 내 공기유동을 조사하고자 실험장치를 제작하여 모형실험을 실시하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

실험장치의 개요를 Figs. 6, 7에 나타내었다. 터널부분은 실제 터널 단면에 비해 약 1/4로 축소했으며 길이 690 mm, 내경 238 mm의 아크릴원관에 노면에 상당하는 아크릴판을 삽입함에 따라 그 단면을 실제의 터널 단면 형상과 거의 동일하게 하였다.

모형터널 내의 유동은 모형제트팬과 입구의 팬에 의하여 발생되고, 와이어 메쉬(wire mesh)에 의해 정류되어 거의 발달한 관내 난류가 얻어지고, 관내를 통과하는 유량은 출구의 오리피스(orifice)로부터 측정되어 구해진다.⁽⁷⁾ 터널 내의 제트팬을

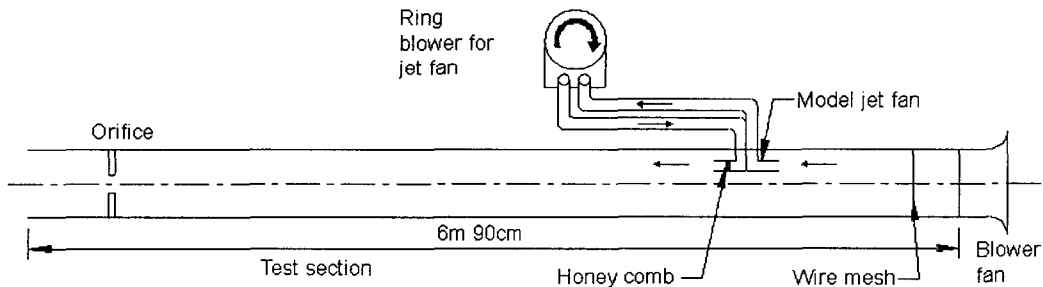


Fig. 6 Schematic of the wind tunnel.

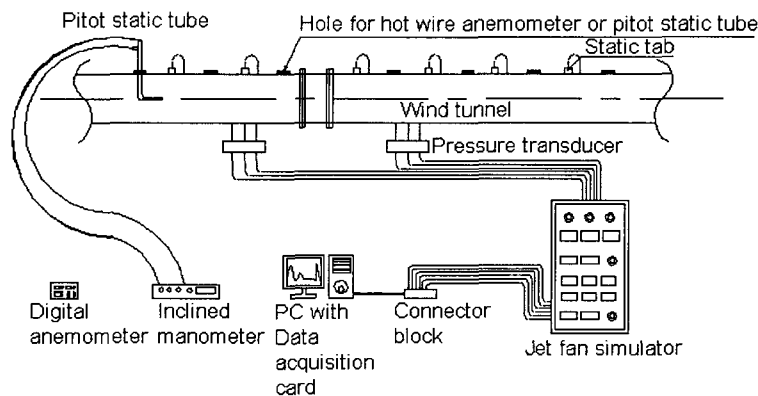


Fig. 7 Schematic of the test section.

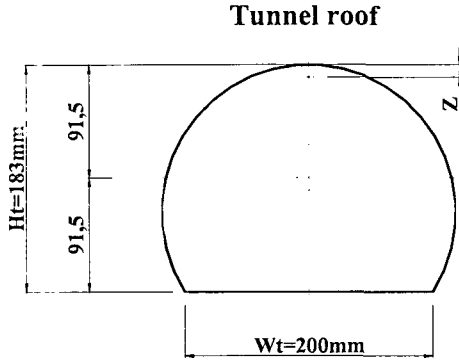


Fig. 8 Jet-fan transverse for the test.

위해서는 흡입과 취출이 가능한 링 블로워(ring blower)를 사용하여 모형제트팬(내경 $\varnothing 26.3$ mm, $\varnothing 31.6$ mm)을 제작하고, 모형제트팬은 터널 중심부에서 터널 천장 부위 사이를 이동이 가능하므로, 터널 내에서 제트팬의 이동에 따른 압력 및 속도를 측정할 수 있도록 하였다.⁽⁸⁾

관 상부에는 정압측정을 위한 정압측정 공(hole)과 속도 및 압력측정을 위한 디지털 열선유속계(digital hot-wire anemometer)와 피토투브(pitot tube)의 접근을 위한 공들이 만들어져 있다.^(9,10) 이때 정압측정부(static tap)를 통하여 얻어진 정압은 차압변환기(differential pressure transducer)를 통해 전기적 신호로 변환되고 제트팬 시뮬레이터와 데이터 취합(data acquisition) 시스템의 연결부(connector block)을 거쳐 Figs. 9, 10에서 보이듯이 G 프로그래밍 언어로 코딩되어진 Labview 프로그램에 의해 실시간으로 컴퓨터에 기록되며,⁽¹¹⁾ 속도는 디지털 열선유속계의 내장버퍼에 저장되어 다시 컴퓨터에 입력된다.

실험시에 사용된 모형제트팬은 제트팬과 터널 내경의 비(D_R)가 0.13, 0.15를 사용하였으며 Fig. 8에서처럼 터널 내 제트팬의 위치(F_p)는 0.09, 0.11, 0.16, 0.25, 0.34, 0.41, 0.50로 각각 고정되어 실행되었다. 또한, 제트팬의 토출속도는 일반적 제트팬의 토출속도 범위인 20, 30, 40 m/s로 고정하여 측정이 실시되었으며 터널 내 차량주행 가정시는 주 팬을 제트팬과 함께 가동하여 압력과 속도를 측정하였다.

제트팬에 의한 불규칙한 난류의 발생과 함께 터널 내 지배적인 무차원수인 레이놀즈수를 맞추기 위하여서는 비실용적인 높은 속도의 공기속도

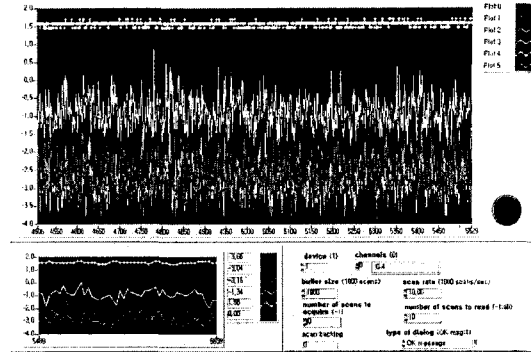


Fig. 9 Indicators and control panel of Labview in computer.

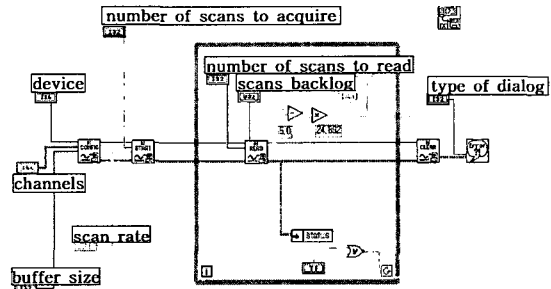


Fig. 10 Diagram of Labview program.

가 요구되어 상사를 맞추기는 불가능하였지만 모형실험에서 실험결과를 검토하여 터널 내에서 제트팬의 이동에 따른 압력변동 및 포획효과 등 터널 벽면에 의한 영향을 파악한다는 점에서는 큰 무리가 없다고 사료된다.

5. 실험결과 및 고찰

실험에서는 제트팬의 위치($F_p=0.09, 0.11, 0.16, 0.25, 0.34, 0.41, 0.50$) 및 구경($D_R=0.13, 0.15$) 토출속도($U_j=20, 30, 40$ m/s)에 따른 벽면과의 영향과 포획(entrainment) 현상에 따른 속도와 정압의 변화를 측정하였다.

측정된 데이터는 비교를 위하여 정압(static pressure)은 분출되어진 제트분류의 동압으로 무차원(normalization)화하여 나타내고, 속도는 제트 토출속도(U_j)로, 종방향 거리(X)는 제트팬 내경(D_j)으로 각각 무차원화하여 나타내었다.

5.1 압력변화

Figs. 11, 12에서 보이는 바와 같이 제트팬으로부터 약 $10\sim 20 D_j$ 까지 정압은 천천히 감소하며 음압(negative pressure)을 나타내었으며,⁽¹²⁾ $10\sim 20 D_j$ 이후부터 급격하게 증가하기 시작한 정압은 $30\sim 40 D_j$ 에서 양압을 나타내기 시작하여 터널 내 제트팬 위치(F_p)에 따라 약 $40\sim 80 D_j$ 에서 최고치를 나타내고 서서히 감소하기 시작하였다.

Fig. 11은 터널의 벽면에 가까울수록($F_p=0.09$, 0.11) 제트분류(1차 유체)에 의한 음압의 발생은 더욱 크게 발생하였으며, 이는 벽면과의 상호작용으로 흡입효과가 증가하는 것으로 추측되며 바로 터널 외부공기(2차 유체)의 유입을 증가시키는 포획효과에 의한 주 요인이 된다.

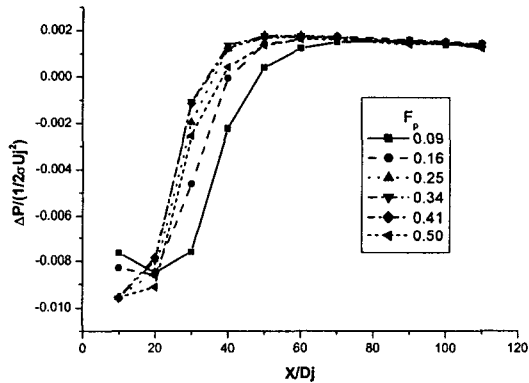


Fig. 11 Static pressure variation as jet position ($D_R=0.13$, $U_j=30$ m/s).

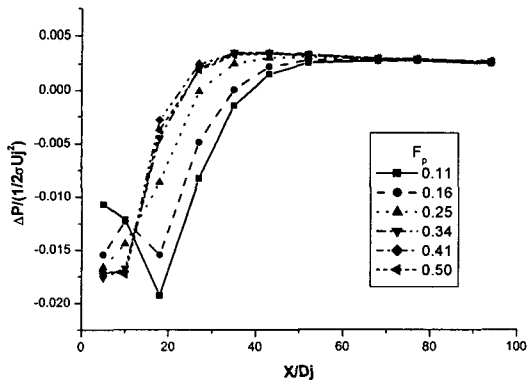


Fig. 12 Static pressure variation as jet position ($D_R=0.15$, $U_j=30$ m/s).

포획효과에 의해 유입된 공기에 의해 음압과 제트의 속도는 급격히 감소되고 유입되어진 2차 유체와 1차 유체가 혼합되면서 정압은 터널 벽면마찰에 의해 감소될 때까지 계속 증가하게 된다. 이때 1차 유체와 2차 유체가 완전히 혼합되어 벽면에 도달한 경우 정압은 최고치를 나타내게 된다.

제트팬 분류의 벽면마찰로 인한 압력손실과 벽면에 의한 제트분류 발달의 불균형으로 제트팬이 터널 벽면에 근접하게 위치할 수록 정압이 최고치를 나타내는 구간의 거리는 길어졌으며 최고치의 수치도 감소하였다. 이는 제트분류가 벽면에 의한 영향으로 압력손실이 크게 발생하며 1차 유체와 2차 유체의 혼합거리가 더 길게 발생하여 터널 내 불규칙한 유동구간이 더 오래 발생하게 됨을 추정할 수 있다.

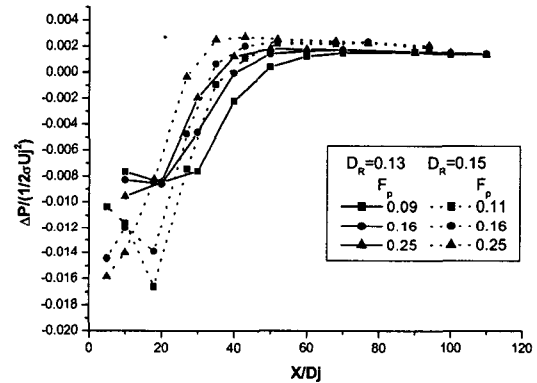


Fig. 13 Static pressure variation as jet fan diameter ratio (D_R).

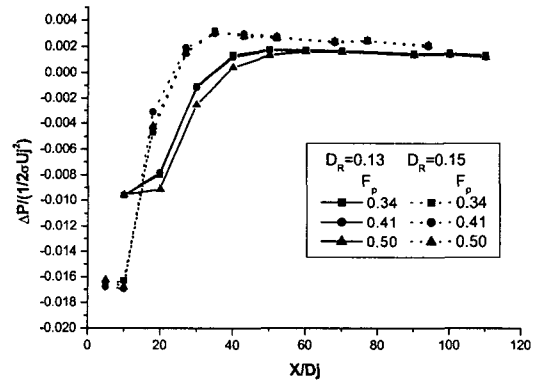


Fig. 14 Static pressure variation as jet fan diameter ratio (D_R).

Figs. 11, 12에서는 제트팬이 벽면에 근접($F_p = 0.09, 0.11, 0.16$)한 경우 $10D_j$ 부근에서 정압의 비정상적인 증가를 관측할 수 있는데 이는 제트분류가 터널 벽면에 도달하면서 발생하는 일시적인 정압의 증가로 제트분류가 벽면에 굴절되면서 이후 다시 정압이 감소된다.

동일한 위치에 제트팬($F_p=0.16, 0.34$)을 고정시킨 후 제트 토출속도(20, 30, 40 m/s)를 변화시키며 정압을 측정한 결과 Figs. 13, 14과 같이 제트팬 토출속도보다는 제트팬의 터널 내 위치에 따라 변화하며 제트팬의 위치에 따라 동일한 경향을 나타내며 정압은 측정되었다. 따라서, 터널 내 정압은 제트팬 토출속도 또는 제트팬 레이놀즈수보다는 제트팬의 위치에 따라 벽면에 의한 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

Figs. 13, 14에서는 제트팬 구경에 따른 영향을 파악하기 위하여 제트팬 토출에 의한 공기량이 유사한 $D_R=0.13$ 일 경우의 제트팬 토출속도 30 m/s 와 $D_R=0.15$ 일 경우의 20 m/s를 비교하여 보았다. 터널 내 제트팬 내경비가 클 경우에는 터널 내 제트팬 위치에 상관없이 전반적으로 음압이 크게 발생할 뿐만 아니라 정압변화가 보다 빠르게 급격하게 일어나 작은 구경의 제트팬보다 크게 정압의 최고치에 도달했다. 이 현상은 제트팬이 터널 벽면으로부터 멀어질수록 더욱 증가한다. 따라서, 같은 조건 하에서는 제트팬의 내경이 더 클 경우 터널 내에서 보다 효과적일 것으로 판단된다.

5.2 속도변화

제트팬이 터널 벽면 가까이 설치($F_p=0.09, 0.11$)되어 있을 경우 터널 상부 벽면에서 마찰손실에 의한 속도 감소가 현저하게 나타났으며, 제트팬으로부터 약 $50D_j$ 이상에서 터널 내 공기유동이 점점 정상화되기 시작하여 $80D_j$ 이상에서는 일반적인 관내 유동의 형태를 나타내었다. Fig. 15, 16과 같이 터널 하반부에서는 제트분류의 발달과정에서 역압력구배(adverse pressure gradient, $dp/dx > 0$)로 인한 박리(separation)현상⁽¹³⁾이 발생하여 터널 하반부 벽면 부근에서부터 속도가 줄어들기 시작하다가 약 $15\sim 30D_j$ 부근에서 터널 하반부에서 역류(backflow)현상이 발생하였다.

역류현상은 제트팬의 위치가 $0.25F_p$ 까지 계속 발생하였으며 제트팬이 터널 벽면에 가깝게 위치할수록 제트팬이 중앙에 위치한 경우와 비교하여 터널 내 공기유동의 정상화에 더욱 긴 거리가 요구되어졌다. 또한, 제트팬에 의해 토출된 제트분류의 확산과정을 보다 쉽게 알아보기 위해 속도 등고선으로 나타내 본 결과 제트팬이 터널 벽면에 근접하게 설치된 경우에는 중앙에 위치한 경우와 비교하여 벽면마찰과 터널 하반부의 역류현상의 발달에 의해 제트분류는 보다 천천히 확산되는 것을 관측할 수 있었다. Fig. 18의 제트가 하향으로 치우치게 나타나는 이유는 터널의 형상에 따른 영향으로 판단된다.

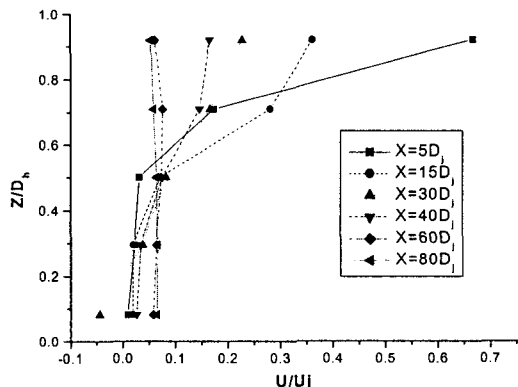


Fig. 15 Velocity profiles for the each position of jet fan within wind tunnel model ($F_p=0.09, D_R=0.13, U_j=30$ m/s).

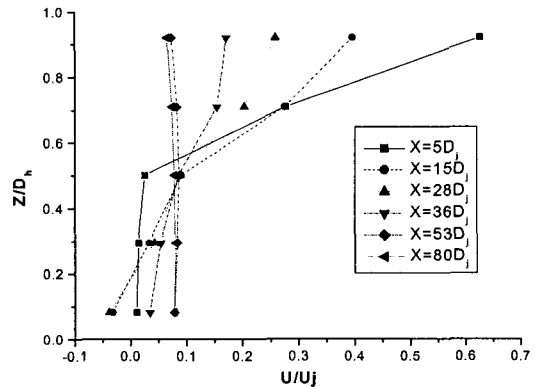


Fig. 16 Velocity profiles for the each position of jet fan within wind tunnel model ($F_p=0.11, D_R=0.15, U_j=30$ m/s).

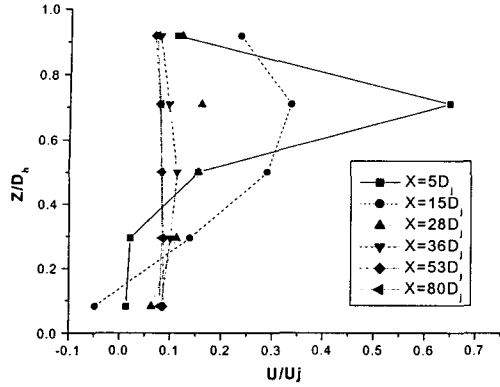


Fig. 17 Velocity profile for the each position of jet fan within wind tunnel model ($F_p=0.25$, $D_R=0.15$, $U_j=30$ m/s).

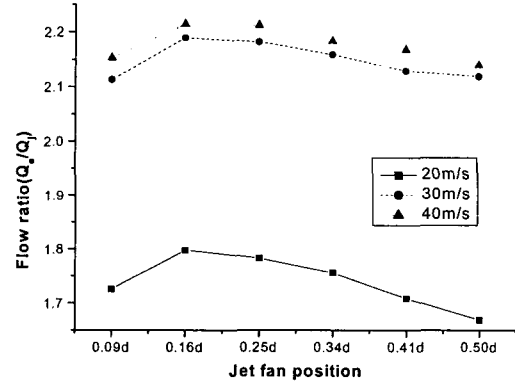


Fig. 19 Flow ratio as jet position and jet discharge velocity ($D_R=0.13$).

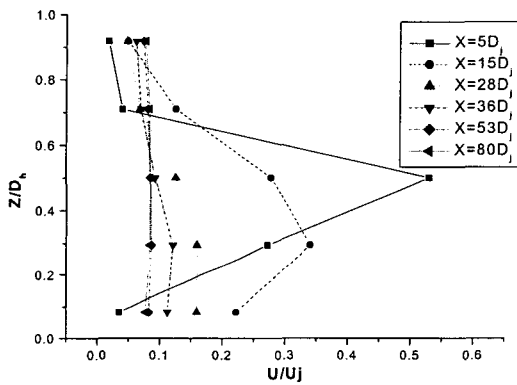


Fig. 18 Velocity profile for the each position of jet fan within wind tunnel model ($F_p=0.50$, $D_R=0.15$, $U_j=30$ m/s).

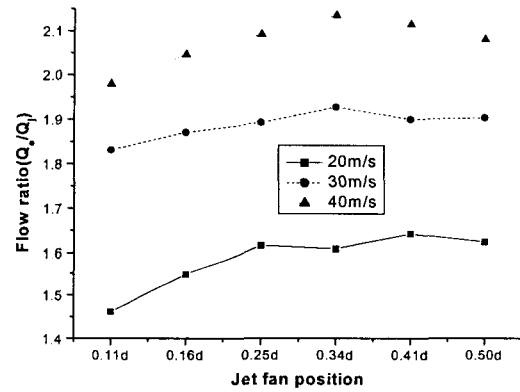


Fig. 20 Flow ratio as jet position and jet discharge velocity ($D_R=0.15$).

5.3 포획효과

Figs. 19, 20에서처럼 제트분류의 발달 초기과정에서 발생하는 음압의 영향으로 터널 외부의 공기가 터널 내로 유입되는 포획효과가 발생되어진다. 포획효과에 의한 터널 내 공기량의 증가를 알아보기 위하여 풍동 하부에 설치된 오리피스(orifice)를 사용하여 터널 내 제트팬 위치별 공기량의 변화를 측정하여 보았다.

Fig. 19에서 보이듯이 제트팬 토출속도(or Velocity pressure)가 너무 낮으면 포획효과가 많이 떨어지게 나타난다. 따라서 제트속도가 30 m/s 이상일 때 터널 내에서 적절한 포획효과를 기대할

수 있을 것이다. 또한 터널 벽면에 제트팬의 위치가 근접할수록 음압이 크게 발생하여 포획효과도 크게 발생할 것으로 예측하였으나 제트팬 단면적이 큰 경우는 포획효과보다는 터널 상반의 벽면마찰에 의한 압력손실이 단면적이 작은 경우보다 더욱 크게 나타난다. 따라서 벽면과 어느 정도 이격된 지점, 즉 약 0.34 d에서 벽면마찰효과가 어느 정도 감소하면서 포획효과가 최대로 나타난다. 단면적이 적은 Fig. 19에서도 차이는 하지만 음압이 가장 크게 발생하는 0.09 d보다는 벽면에서 이격되어 벽면마찰이 감소한 0.16 d에서 최대 포획효율이 나타난다.

측정결과 제트팬 토출량의 약 1.5배에서 2.5배

의 공기량이 터널 외부에서 포획효과에 의해 유입되므로 상당히 많은 양의 공기가 포획효과에 의해 유입되어지는 것을 알 수 있었다. 터널 벽면에 제트팬의 위치가 근접할수록 음압이 크게 발생하여 포획효과도 크게 발생할 것으로 예측하였으나 벽면과의 마찰로 인해 포획효과 또한 감소되는 것으로 판단되어진다. 이러한 감소효과는 터널 내 제트팬의 내경비(D_R)가 클 경우 더욱 크게 발생하였으며, 제트팬 토출량이 충분하지 않은 경우에도 포획효과는 크게 감소하였다.

6. 결 론

(1) 시뮬레이션 결과 터널 천장 부위에 제트팬이 가깝게 위치할수록 벽면마찰에 의해 제트분류의 손실이 크게 발생하며, 터널 벽면에 근접한 제트팬의 상부를 약 5° 가량 하향화시켜 벽면에 의한 손실을 최소화하였을 경우에는 제트팬이 중앙에 위치했을 때와 유사한 좋은 효율을 나타내었다.

(2) 터널에서 제트팬 가동시 초기 정압은 음압을 나타내며 이 현상은 포획효과에 의해 터널 외부의 공기를 터널 내로 유입시키는 역할을 한다. 이후 제트분류(1차 유체)와 외부에서 유입되어진 공기(2차 유체)가 혼합되면서 정압은 터널 벽면마찰에 의해 감소될 때까지 증가하게 된다.

(3) 제트팬이 터널 벽면에 가까울수록 음압은 크게 발생하며 터널 내 공기의 혼합거리와 불규칙한 유동구간이 길어진다.

(4) 터널 내 제트팬의 설치위치는 마찰손실과 터널 내의 건축개선을 고려할 경우 현재의 일반적 설치위치($0.5 D_j$ 이격) 외에는 고려될 수 없으며, 모델실험에서는 이 위치($0.5 D_j$ 또는 $F_p = 0.16$)로부터 토출속도에 상관없이 축방향으로 $70 \sim 80 D_j$ 에서 제트분류가 터널 내 공기와 완전히 혼합되어 터널 벽면에 도달하여 승압력이 최고치를 나타내었다.

(5) 제트팬이 벽면에 근접할수록 음압의 큰 감소로 인한 예상되었던 터널 외부의 공기의 유입에 의한 포획효과의 증가는 벽면마찰로 인하여 감소되어지며, 터널 내 제트팬 내경비(D_R)가 커질수록 감소율은 증가한다.

(6) 제트팬의 효율을 높이기 위하여 터널 천장

부위에서의 마찰손실을 줄이고 또한, 터널 하반부에서의 역류현상을 줄일 수 있는 제트팬 자체의 개선이 필요하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 2000년도 인하대학교 서해연안 환경연구센터(RRC)의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Schlaug, R. N. and Carlin, T. J., 1979, Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels, Federal Highway Administration, USA, pp. 2.49-2.56.
- Yoon, C. W., 1999, Design and maintenance art of long tunnel, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 476-483.
- Shin, H. J. and Kim, H. Y., 1996, A computational study on the longitudinal tunnel ventilation system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, pp. 381-386.
- Ann, J. H., Kim, J. S., Kang, S. H. and Lee, J. H., 2001, Ventilation analysis according to jet fan location in long tunnel, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, pp. 577-581.
- Rajaratnam, N., 1976, Turbulent Jets, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, pp. 148-159.
- Blevins, R. D., 1984, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, USA, pp. 229-274.
- Roberson, J. A. and Crowe, C. T., 1997, Engineering Fluid Mechanics, 6th ed., John Willy & Sons, New York, USA, pp. 531-538.
- Martegani, A. D., Pavesl, G. and Barbetta, C., 1994, An experimental study on the longitudinal ventilation system, 8th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 3-15.

9. Tien, J. C., 1988, Shock Losses Around Underground Overcast, University of Missouri-Rolla, USA, pp. 44-52.
10. Mutama, K. R. and Hall, A. E., 1995, The entrainment pressure and flow process of a jet fan modeled in a square section wind tunnel, Proceedings of 7th US Mine Ventilation Symposium, pp. 379-384.
11. Jang, H. O., 1998, Understanding of the Lab-view Graphic Program, ADC System, pp 8.1-8.72
12. Bleier, F. P., 1997, Fan Handbook, McGraw-Hill, New York, USA, pp. 1.9-1.17.
13. Shin, S. C., 2000, Basic Fluid Mechanics Gumin, Seoul, pp. 330-339.