

# 제트팬 설치 간격과 재유입 현상 분석을 위한 모형실험

## Model Test for the Determination of Distances between Jet-fans and Analysis of Recirculation

권오상<sup>\*1</sup>, 윤찬훈<sup>2</sup>, 윤성욱<sup>3</sup>, 김진<sup>4</sup>

Kweon, Oh-Sang·Yoon, Chan-hoon·Yoon, Sung-Wook·Kim, jin

### Abstract

The domestic standards which used the standards of Road Association of Japan standards presents the distances of between jet-fans by the caliber of jet-fan. However, the Permanent International Association of Road Congress (PIARC) encourages it to be ten times a diameter of the tunnel. The distance of jet-fans installed in bases of two standards differs as much as two times, as so the proper basis after analysis of internal air current is needed since such difference can lead to disadvantage for selection of ventilation configuration.

Based on Froude modeling theory, 1/40 scale acrylic model of a tunnel (215mm in diameter and 6.9m in length) and jet-fan (26.3mm and 31.6mm in caliber) was made for the measurement of changes in pressure and velocity due to the extension of tunnel for analysis of internal air current. And we measured the changes in pressure of surroundings of a jet-fan for confirmation of recirculation due to the exterior airs when the jet-fan is on. The results of the model test show that internal air current was not influenced by the caliber of jet-fan and its changes in pressure and velocity were stable in the point where it was nine times of diameter of the tunnel. Also the recirculation when the jet-fan is on could be verified. According to such results, in the cases of installing jet-fan in tunnels, the distances between jet-fans needs to be more than nine times the diameter.

**Keywords :** Tunnel ventilation, jet-fan, analysis of air current, model test, recirculation

### 요 지

국내에서 제트팬 설치 간격 기준으로 사용되고 있는 일본도로공단 기준은 제트팬의 구경에 따라 설치간격을 제시하고 있지만 국제 상설도로 협회(PIARC)에서는 터널 직경에 10배를 유지할 것을 권장하고 있다. 이 기준들에 의해 결정된 설치 간격은 최대 약 2배 정도의 차이를 나타내고 있으며 이러한 설치 간격의 차이는 터널 환기 방식 선정에 불리한 요인으로 작용될 수 있기 때문에 터널 내부의 기류분석을 통한 적정 설치 간격 기준이 필요하다.

본 논문에서는 Froude 상사이론에 기초하여 아크릴 재질의 축소비 1/40의 모형 터널(직경 215mm, 연장 6.9m)과 모형 제트팬(구경 26.3mm, 31.6mm)을 제작하여 터널 내부에서의 기류분석을 위해 터널연장을 따라서 압력과 속도의 변화를 측정하였고, 제트팬 가동시 제트팬 주위에서 외부 공기의 영향으로 발생될 수 있는 재유입 현상을 확인하기 위해서 제트팬 주변에서 압력변화를 측정하였다. 모형실험 결과에서는 터널 내부기류는 제트팬

\*1 인하대학교 환경토목공학부 석사과정 (wef11@inhaian.net)

2 인하대학교 환경토목공학부, 박사과정

3 (주)GS건설 기술본부 연구개발팀 과장

4 정회원, 인하대학교 공과대학 환경토목공학부 부교수

구경에 영향을 받지 않고 터널직경에 약 9배 정도가 되는 지점에서 압력과 속도의 변화가 안정되는 것으로 나타났으며 제트팬이 가동되면서 발생하는 재유입 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 터널 내부에서의 제트팬 설치 시에는 터널 직경에 약 9배 이상을 확보해야 한다고 판단된다.

**주요어:** 터널환기, 제트팬, 기류분석, 모형실험, 재유입

## 1. 서론

최근 차량의 증가와 물류비 절감 등으로 인하여 도로 건설의 수요가 증가하고 있기 때문에 산악지역이 많은 국내 도로를 직선화하기 위한 노력으로 도로 터널의 신설이 급격히 증가되고 있다. 따라서 교통 공간의 활용을 높이기 위해 건설 예정 중인 고속도로 터널은 향후 5년 이내에 2.5배나 터널연장이 증가될 전망이다이며 이 중 장대 터널의 경우도 유사한 비율로 증가될 전망이다(임익현 외, 1997). 터널 연장의 증가로 인하여 차량의 배기가스를 터널 밖으로 배출시켜 터널 내 오염물질의 농도를 허용수준 이하로 유지하고 화재와 같은 유사시에 터널 내의 공기흐름을 원하는 방향으로 제어하는 환기시스템의 중요성이 부각되고 있다.

도로 터널의 연장이 증가함에 따라 터널 연장에 제한적이고 차량의 피스톤 효과(piston) 등에 의존하는 자연환기방식보다는 터널 내 환기 설비를 설치하여 터널 내 환경을 일정 수준 이하로 유지시키는 기계환기방식에 대한 관심이 늘어나고 있다. 일반적으로 기계환기방식은 횡류식, 반횡류식, 종류식이 주로 사용되고 있으며, 이 중에서 종류식 환기방식은 다른 방식에 비해 시공면이나 유지 관리면에서 경제성이 우수하다. 종류식 환기 방식은 터널의 입구나 수직갱에서 신선한 공기가 유입되어 터널의 종방향으로 흐르는 공기가 오염물질의 농도를 희석시켜 외부로 배출시키며 이 때 사용되는 환기 설비는 축류송풍기인 제트팬이 주류를 이루고 있다(조용철 외, 1998).

제트팬은 송풍량 조절이 가능하고 소요환기력을 여러 개의 팬으로 분할 담당케 함으로써 소형화 할 수 있으며, 역회전이 가능하여 화재와 같은 유사시에 터널내 공기의 방향을 제어할 수 있다. 터널의 연장을 따라 설치되는 제트팬은 가동 시에 토출되는 제트기류의 분류효과를 통하여 터널 내 압력을 상승시켜 터널 내 소요환기량을 확보하게 된다. 제트팬에 의한 송압력을  $\Delta P_j$ 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \Delta P_j \cdot A_r \quad (1)$$

$$\Delta P_j = \rho \cdot U_j^2 \cdot \left( \frac{A_j}{A_r} \right) \cdot \left( 1 - \frac{U_r}{U_j} \right) \quad (2)$$

$\rho$  : 공기밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$A_j$  : 제트팬 단면적 [m<sup>2</sup>]

$A_r$  : 터널 단면적 [m<sup>2</sup>]

$U_j$  : 제트팬에서 토출되는 공기속도 [m/s]

$U_r$  : 터널 내의 공기속도 [m/s]

터널 내부의 제트팬 설치 기준은 터널 천장과의 이격거리와 제트팬의 설치간격을 제시하고 있다. 터널 천장과의 이격거리는 제트팬에 의한 송압력의 영향을 고려해서 일반적으로 0.5D(D=제트팬 직경) 이상의 간격을 유지하는 것을 기준으로 하고 있으며, 설치 간격 기준은 표 1과 같다(한국도로공사, 2002). 표 1에 나타난 국내 기준은 국제 상설 도로 협회(PIARC)에서 제시하고 있는 기준과는 차이를 보이고 있는데, PIARC에서는 제트기류의 분류효과가 충분히 소실되는 지점을 고려해서 터널 직경의 약 10배를 유지하도록 권장하고 있다. 현재 국내에서 사용되고 있는 기준은 일본도로공단에서 제시한 설계 기준으로 국내 터널들에 적용하여 PIARC 기준과 비교하면 최대 약 2배 정도의 차이를 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서는 국내와 PIARC에서 차이를 보이고 있는 제트팬 설치 간격 기준에 대한 적절한 기준을 제시하고자 한다.

터널 내부에서는 제트팬에 의한 공기 유동이 난류의 형태를 보이고 있기 때문에 공기 유동을 분석하기 위해서는 많은 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 모형터널을 제작하여 제트팬 가동 시에 터널 연장을 따라서 압력과 속도의 변화를 측정하여 터널 내 공기의 흐름을 분석하였다. 제트팬이 가동되면서 터널 내부에서는 압력이 상승되어 종방향으로 기류가 형성되지만 그림 1과 같이 제트팬 하부와 터널 노면 사이에서는 유출된 공기가 다시 제트팬으로 유입되는 재유

표 1. 제트팬 설치 간격 기준

영	구 경 [mm]	제트팬 분류 속도 [m/s]	갱구로부터의 거리 [m]	제트팬 설치 간격 [m]
600	630	30	80	80
1000	1030	30	140	140
1250	1250	30	160	160
1500	1530	30	180	180

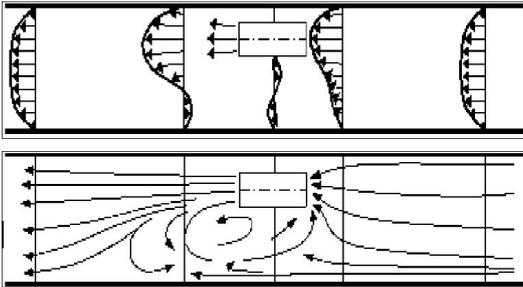


그림 1. 제트팬 주변의 재유입 현상

입(recirculation) 현상이 발생할 수 있다(Eck, 1973). 재유입 현상은 터널 내부의 기류에 영향을 줄 수 있기 때문에 제트팬 부근에서도 압력의 변화를 측정하였다.

## 2. 축소 모형 실험

실제 터널에서는 많은 제약조건으로 인해 제트팬에 의한 기류 분석 실험의 실행이 불가능하기 때문에 기류를 최대한 현실적으로 모사할 수 있는 축소모형 실험을 수행하였다. 실험실 실험에 적합한 스케일로 축소하여 터널 내 기류에 대한 연구를 수행하는 것은 정확한 정량적인 결과를 주지 못할 지라도 제트팬에 의한 공기의 거동과 메커니즘에 대한 통찰력을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

### 2.1 상사법칙

유동을 해석하기 위한 방법은 Froude 모델링과 압력 모델링(pressure modelling) 등이 있다. 본 실험에서 사

용한 Froude 모델링은 주위와 같은 상태에서 실험을 행할 수 있고 기하학적 형태가 보존되어야 하므로 차원분석을 통하여  $V/L^{1/2}$ 와  $Q/L^{2/5}$ 를 일정하게 유지시켜야 한다. Froude 모델링의 한계는 점착력이 매우 큰 경우이다. 하지만, 난류조건이 지배적인 경우 점착력은 무시될 수 있기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 가능하다. Froude 스케일링에서 모형터널과 실제터널의 환기 속도(유동속도)의 스케일링은 다음과 같다.

$$\frac{V_m}{V_r} = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2}, \quad \frac{V_m}{V_r} \sim 2.236 \times 10^{-1} \quad (3)$$

$\frac{L_m}{L_r}$  : 모형비

$V_r$  : 실제속도[m/s]

$V_m$  : 실험속도[m/s]

식의 하첨자 'm'은 축소모형에서 스케일 된 값이며, 'r'은 실제터널에서의 값을 나타낸다(유용호 외, 2005).

### 2.2 모형 터널

모형터널은 그림 2에서와 같이 Froude 모델링 상사법칙을 적용하여 실제 터널 단면을 약 1/40로 축소하였다. 길이 6.9m, 내경 219mm의 아크릴 원관에 노면에 해당하는 아크릴판을 삽입하여 그 단면을 실제 터널 단면의 형상과 유사하게 제작하였다. 모형터널에서는 흡입과 취출이 가능한 링 블로워(ring blower)를 사용하여 그림 3에서와 같이 모형 제트팬(내경 26.3mm, 31.6mm)을 제작하였고, 표 2에 나타낸 것처럼 국내 도로 터널에서 사용하고 있는 토출속도(30m/s)로 고정하였다. 제트팬

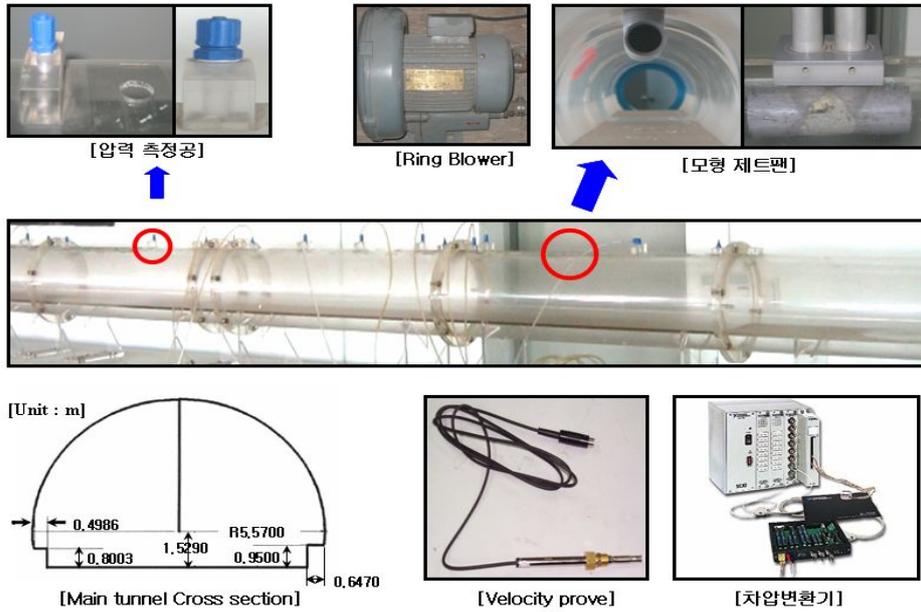


그림 2. 축소 모형 실험 장치

표 2. 모형 제트팬

	제 원
제트팬 토출 속도	30m/s
제트팬 내경	Φ1250mm (Φ31.6mm) Φ1030mm (Φ26.3mm)
제트팬 위치	터널 상부에서 0.5D로 이격 (D= Jet Fan 내경)

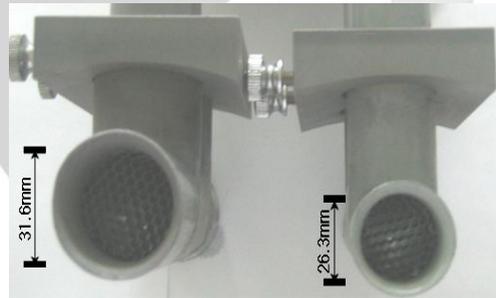


그림 3. 모형 제트팬

의 천장과의 이격거리는 제트팬의 승압력에 영향을 미치기 때문에 보편적으로 사용되는 0.5D(D=제트팬 내경)의 간격을 유지하였다. 정압 측정을 위한 정압 측정공(hole)과 압력을 측정하기 위한 피토 튜브(pitot tube)와 속도를 측정하기 위한 Testo 열선 유속 프로브(probe)의 접근을 위한 공들을 터널의 연장을 따라서 설치하였다. 터널 천정부에 설치되어 있는 측정공을 통하여 얻어진 정압은 차압변환기(differential pressure transducer)를 통해 전기적 신호로 변환되고 데이터 획득(data acquisition) 시스템의 연결부를 지나 G 프로그래밍 언어로 코딩되어진 Labview 프로그램에 의해 실

시간으로 컴퓨터에 기록되며, Testo 열선 유속계 probe에서 측정된 속도는 Testo comfort software에 의해 실시간으로 컴퓨터에 기록된다.

그림 4는 압력과 속도를 측정하는 구간을 나타내고 있다. 압력은 그림 4.c 에서의 측정공과 제트팬의 재유입 현상을 파악하기 위해서 그림 4.b 에서의 위치에서 측정하였고, 속도는 그림 4.c 에서의 측정공의 위치마다 그림 4.a 와 같이 터널의 높이에 따라서 측정하였다. 재유

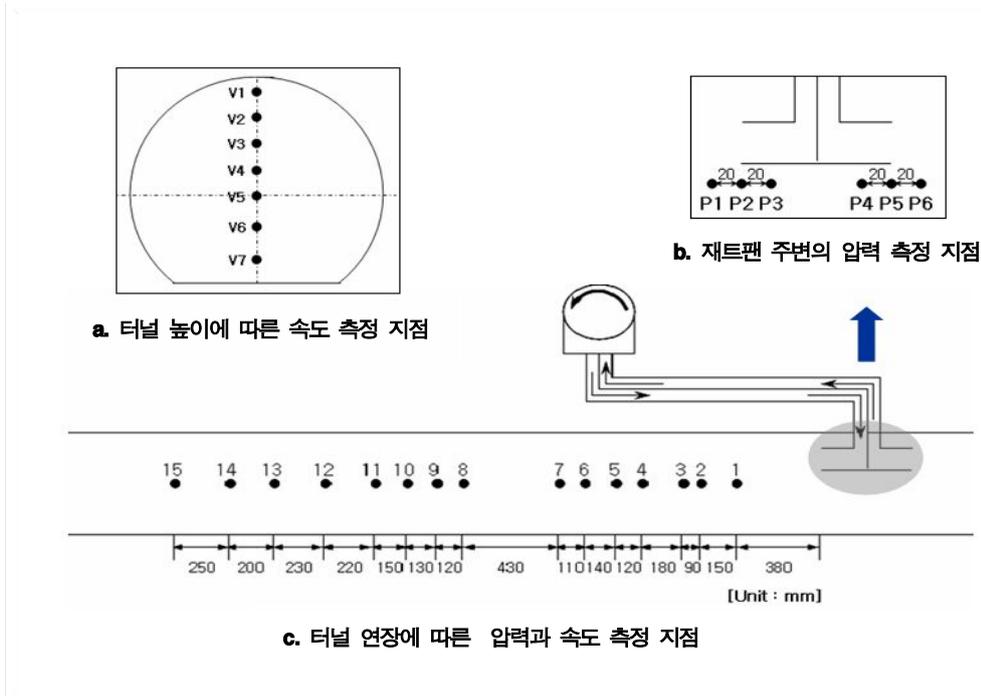


그림 4. 측정 구간의 개략도

입 현상을 파악하기 위해서 제트팬과 터널 천정부와의 이격거리를 0.2D와 0.5D로 설정하고 토출속도를 30 m/s와 40m/s로 설정하여 제트팬 부근에서의 압력 변화를 측정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 압력변화

그림 5에서처럼 제트팬 가동 초기에 발생하는 제트 기류의 영향으로 음압(negative pressure)을 나타내는 압력은 제트팬 가동 전의 터널 내 공기 유속과 벽면마찰 등의 상호 작용으로 인하여 20m지점까지 서서히 감소하게 된다. 압력이 감소하던 기류는 20m 지점을 지나면서 외부의 공기들과 혼합되고 분류에너지에 의한 효과가 나타나면서 증가하기 시작한 후 40m 지점에서부터 양압을 나타낸다. 제트팬 근처에서 발생하는 음압의 발생은 터

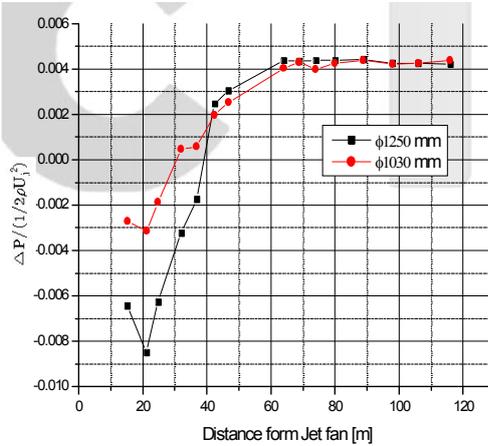
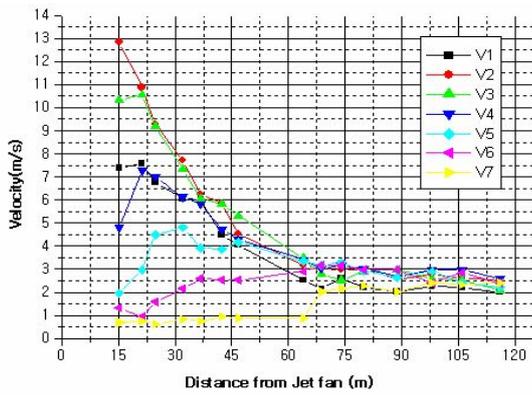
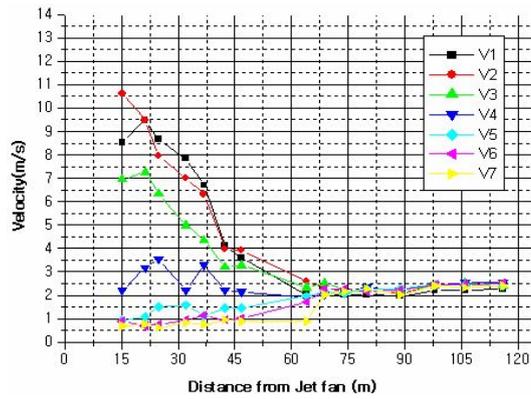


그림 5. Static pressure variation

널 하부에 있는 기류의 역류현상과 포획효과에 의해서 기류의 속도를 감소시키는 원인이 되고 이 때 발생하는 포획효과에 의해 터널 외부 공기의 유입을 증가시킨다.



a.  $\Phi 1030\text{mm}$



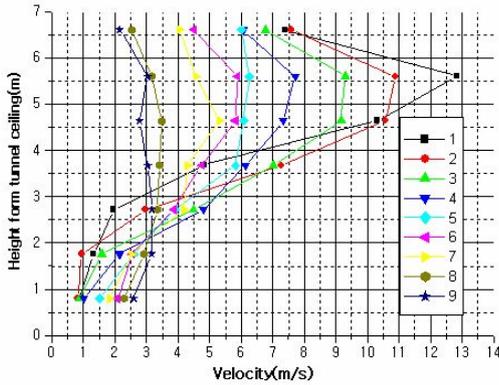
b.  $\Phi 1250\text{mm}$

그림 6. 터널 연장에 대한 속도 변화( $\Phi 1030\text{mm}$ )

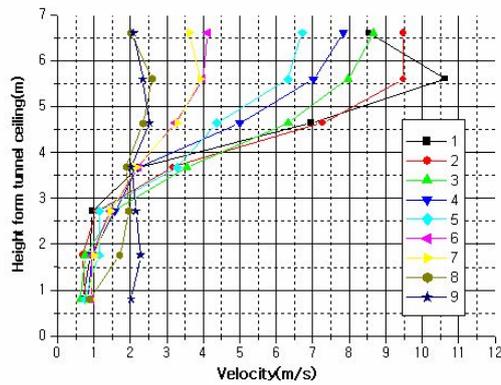
양압을 나타내기 시작한 압력은 기류가 발달되면서 터널 내부의 환기력을 확보하게 되고 이 후 70m 지점을 지나면서 최고치를 나타낸다. 기류가 발달되는 이 구간에서는 앞서 음압을 나타내던 구간과는 다르게 제트팬의 구경에 대해서는 영향을 받지 않는 것으로 나타난다. 최고치를 지난 압력은 서서히 감소하기 시작하여 결국 제트 기류에 의한 분류에너지가 소실되게 되지만, 본 실험에서는 분류에너지가 소실되는 가장 큰 요인인 벽면마찰을 고려하지 못하였기 때문에 소실되는 현상이 자세히 나타나지 않는다. 실제 터널 내부에서는 모형 터널보다 많은 벽면 마찰의 영향이 존재하기 때문에 압력 감소를 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 제트팬 구경에 따른 터널 내 압력 변화를 분석해 본 결과 제트팬 구경은 제트 기류에 의한 분류에너지가 소실되는 지점에는 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 제트팬 가동시 제트팬 직경이 1250mm 인 제트팬은 1030mm인 제트팬 보다 제트 기류의 토출 면적을 증가시키기 때문에 음압이 발생되는 40m 구간까지 더 큰 음압을 나타낸다. 하지만 본격적으로 제트 기류에 의한 분류에너지가 양압을 나타내면서 발달되는 40m 이후 구간에서부터는 기류에 별다른 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

### 3.2 속도 변화

그림 6에서는 터널의 천장부와 바닥부에 이르는 측정 위치가 연장을 따라서 변하는 속도를 측정하였다. 제트팬에서 15m 떨어진 위치에서 측정된 속도는 터널의 천장부(V1)와 바닥부(V7)를 제외하고 대부분의 위치에서 속도의 증가를 확인 할 수 있다. 터널 천장부에서는 제트팬에 의해 발생된 제트 기류와 벽면과의 마찰로 인하여 감소하게 되고 바닥부에서는 제트팬 가동 전에 터널 내부의 공기 유속과의 상호 작용으로 인하여 감소하는 것으로 판단된다. 이 후 20m 지점의 터널 천장부와 중앙부(V4) 위치에서의 속도는 앞서 압력 변화에서 분석한 결과와 같은 포획효과 등에 의한 속도 감소가 빠르게 진행되고 V5~V7 지점에서는 점차적으로 제트 기류에 의한 분류에너지와 터널 내부의 기류가 혼합이 이루어지면서 속도가 증가하기 시작한다. 20m 지점 이후 터널 측정 위치에 따라 감소되고 증가하던 속도는 40m 지점에 도달해서는 기류가 혼합되면서 점차 발달된 유동의 형태를 형성하기 시작하여 70m 지점에서 관내 발달된 유동의 형태를 나타낸다. 제트팬 구경에 따른 속도 변화는 구경이 1030mm인 제트팬이 가동 초기 제트 기류에 의한 음압이 구경이 1250mm 인 제트팬에 비해 작게 발생하기 때문에 초기 속도가 더 높지만, 이 역시 압력과 유사하게 제트팬 구경이 터널 내 기류에 발달에 영향을 주

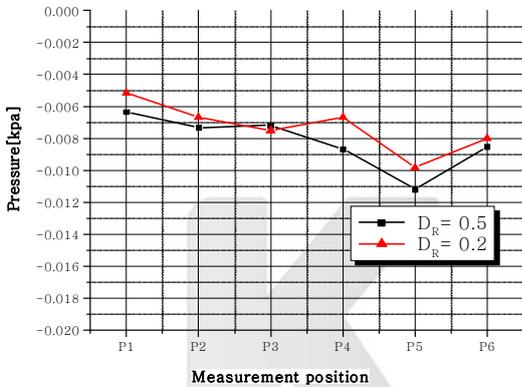


a. Φ1030mm

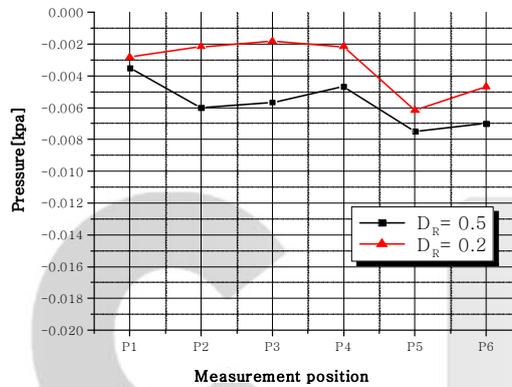


b. Φ1250mm

그림 7. 터널 연장에 대한 속도 변화(Φ1030mm)



a. Φ1030mm



b. Φ1250mm

그림 8. 제트팬 위치에 따른 재유입 현상(  $U_j = 30\text{m/s}$  )

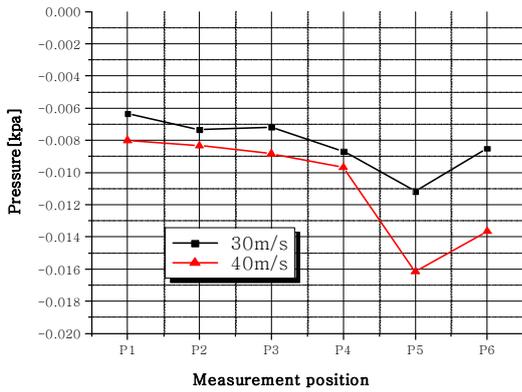
지 못하는 것으로 판단된다.

기류의 속도 변화 과정을 보다 쉽게 알아보기 위해 그림 7과 같이 속도 등고선의 형태로 나타내었다. 터널 측정 위치에서 발달된 관내 유동의 형태를 나타내기 전까지의 속도 변화가 가장 많이 일어나는 곳은 터널의 천장부와 제트 기류가 토출되는 지점이다. 이 지점들에서 제트 기류에 의한 분류에너지는 터널 바닥부 근처에서의 기류와 혼합되어 터널 내 기류가 측정 위치 별로 속도가 같아지는 완전 발달 영역으로 진행되고 있다. 실험에서 제트팬 토출 속도를 30m/s로 고정한 점을 고려하여 본 결과 제트팬 구경에 따른 발달영역 내 공기 속도는

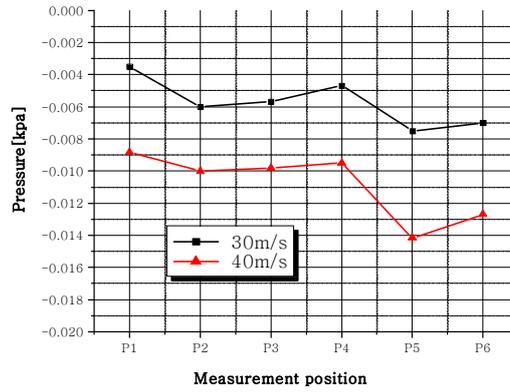
2~3.5m/s로 판단된다.

### 3.3 재유입 효과

제트팬 가동시에 발생하는 포획효과와 소용돌이(eddy) 등으로 인하여 제트 기류의 초기 진행 단계에서의 압력은 음압을 나타내게 되고 이 음압은 터널 바닥부에 있는 기류를 역류시키는 원인이 된다. 역류된 기류는 다시 제트팬 흡입구와의 압력차로 인하여 다시 제트팬으로 유입되어진다. 이러한 현상을 재유입(recirculation)이라고 하며, 이 재유입 현상은 터널 내에서 제트팬 가동



a. Φ1030mm



b. Φ1250mm

그림 9. 제트팬 토출속도에 따른 재유입 현상

효율을 감소시키는 원인으로 작용할 수 있다.

그림 8은 터널 천장부와 제트팬의 이격거리에 따른 재유입 현상과 제트팬 가동시 제트팬 부근에서의 음압 발생을 나타내고 있다. 제트팬 토출 지점(P2)와 기류의 진행 초기 지점(P1) 사이의 압력차이는 기류의 역행을 보여주고 있다. P2 지점과 P3 지점 사이에서는 현재 국내에서 기준으로 제시하고 있는 이격거리( $D_R=0.5$ )에서 터널 천장부와 근접한 이격거리( $D_R=0.2$ )보다 더 큰 압력 차이가 발생하여 기류의 역류현상이 심화되는 것을 나타내고 있다. 터널 천장부와 근접한 이격거리( $D_R=0.2$ )는 토출시 벽면 마찰의 의한 압력손실이 더 크게 발생하기 때문에 오히려 국내에서 기준으로 제시하고 있는 이격거리( $D_R=0.5$ )보다 기류가 역류되지 않는 것으로 판단된다. 이후 역행하는 기류는 제트팬 흡입부(P5) 근처에서 제트팬 흡입구에서 크게 발생하는 음압으로 인하여 다시 제트팬으로 유입된다. P6 지점에서의 압력차이는 터널 내부의 기류가 제트팬으로 흡입되는 모습을 나타내고 있다. 제트팬의 구경이 증가하였을 경우에도 이와 유사하게 나타내었지만, 터널 천장부와 근접한 이격거리( $D_R=0.2$ )에서는 발생하는 역류현상은 나타나고 있지 않았다. 이것은 터널 천장부와 근접할수록 기류의 역류가 발생하지 않는다고보다는 벽면마찰에 의한 압력손실이 증가로 인하여 제트 기류에 의한 분류에너지가 많이 소실되었기 때문에 역류현상을 발생하지 않는 것으로 판단된다.

그림 9는 제트팬 토출속도 변화에 따른 재유입 현상을 나타내고 있다. 제트팬 토출 속도가 40m/s 일 경우에 제트팬 토출 부근에서 기류가 역행하는 현상이 자세히 나타나지 않았지만 제트팬 흡입구로 기류가 재유입되는 현상은 30m/s 일 때보다 더 크게 나타났다. 제트팬 토출 속도로 인해서 제트팬 근처보다는 터널의 바닥부 근처에서 기류가 역행을 하고 토출속도에 의한 제트팬에 자체에 걸리는 압력이 더 증가하기 때문에 유입구에서 더 큰 압력차이가 발생한다고 판단된다. 제트팬 구경이 1250mm일 경우에서의 재유입 현상이 가장 뚜렷하고 제트팬 토출 속도에 따라 발생하는 음압과 제트팬에서 발생한 기류가 압력의 차이로 인하여 역행하게 되어 다시 제트팬으로 유입되는 재유입 현상도 확인할 수 있다. P1 지점과 P2 지점에서의 압력은 구경이 1030mm 인 경우와 비슷하게 40m/s 일 때 보다 30m/s 일 때 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

국내 다수의 도로 터널에서는 제트팬을 사용한 종류식 환기방식이 사용되고 있지만 제트팬 가동 시 터널 내에서 발생하는 기류에 대한 연구가 미흡하여 터널 설계 시 제트팬 적정 설치 간격에 대한 기준이 확립되어 있지 않

다. 따라서 본 연구에서는 제트팬 설치 시 제트기류와 공기유동을 분석하기 위하여 실제터널의 1/40의 축소모형을 제작하여 모형 터널 내 압력과 속도의 변화를 측정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 제트팬 가동시의 압력은 제트팬 가동 전의 터널 내 공기 유속과 벽면마찰 등의 상호 작용으로 인하여 음압을 나타내면서 20m지점까지 서서히 감소하게 된다. 20m 지점을 지나면서 외부의 공기들과 혼합되고 분류에너지에 의한 효과가 나타나면서 압력이 증가하기 시작한 후 40m 지점에서부터 양압을 나타낸다. 양압을 나타내기 시작한 압력은 기류가 발달되면서 터널 내부의 환기력을 확보하게 되고 이후 70m 지점을 지나면서 최고치를 나타낸다.
2. 제트팬에서 15m 떨어진 위치에서 측정한 속도는 터널의 천장부(V1)와 바닥부(V2)를 제외하고 대부분의 위치에서 속도의 증가를 확인 할 수 있다. 이후 20m 지점의 터널 천장부와 중앙부(V4) 위치에서의 속도는 빠르게 감소하고 V5~V7 지점에서 점차적으로 제트 기류에 의한 분류에너지와 터널 내부의 기류가 혼합이 이루어지면서 속도가 증가하기 시작한다. 40m 지점에 도달해서는 기류가 혼합되면서 점차 발달된 유동의 형태를 형성하기 시작하여 70m 지점에서 관내 발달된 유동의 형태를 나타낸다.
3. 제트팬 가동시에 발생하는 포획효과와 소용돌이(eddy) 등으로 인하여 제트 기류의 초기 진행 단계에서 발생하는 음압의 영향으로 제트팬 토출 지점에서 역류하는 기류가 제트팬으로 재유입되는 현상을 확인할 수 있었다. 재유입 현상은 천장부와 이격거리가  $D_R=0.5$  인 지점에서 크게 발생하였고, 제트팬 부근에서 기류가 역행하는 현상은 토출 속도가 30m/s에서 크게 나타났지만, 제트팬 유입부로 재유입되는 현상은 40m/s에서 더 크게 나타내었다.
4. 현재 국내에서 제시하고 있는 제트팬 설치 간격기준을 본 실험 모델에 적용하면 구경이 1030mm 인 경우 140m, 1250mm 인 경우 160m 정도를 제시되고 국제 상설 도로 협회(PIARC)의 기준을 적용하면 터널의 직경에 의해 그 기준은 약 80m가 된

다. 실험 결과에 의해서는 기류는 분류에너지가 약 70m 지점에서 최고로 발달되고 그 이후에 소실되는 것으로 나타났으며 제트팬 구경에 따른 차이점은 크게 나타나지 않았다. 따라서 본 연구의 결과 제트팬 적정 설치 간격은 터널 직경의 약 9배 이상을 확보해야 한다고 판단된다.

5. 제트팬이 가동되면서 차량의 피스톤효과에 의한 교통 환기력 등과 같은 여러 인자들과 함께 터널 내부에서의 환기력을 확보하게 되지만 본 논문에서는 터널 내에서의 제트팬에 의한 영향만을 검토하기 위해서 교통 환기력과 같은 다른 인자들을 고려하지 않았다. 향후 효율적인 제트팬의 설치 및 운용방안을 도출하기 위해서는 교통 환기력과 같은 여러 인자들을 함께 고려한 포괄적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 사사

본 연구는 GS건설(주) “장대터널 환기시스템 최적화 연구” 용역의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 류재홍, 유용호, 김 진 (2003), “도로터널 제트팬 모형 실험”, 설비공학논문집, Vol. 8, No. 15, pp. 630-640.
2. 유용호, 윤성욱, 김진, 윤찬훈 (2005), “장대 교통터널의 피난연락개 설치 간격에 관한 실험적 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 15, No. 1, pp. 61-70.
3. 임익현, 홍희택, 정태섭 (1997), “도로터널 환기시스템에 대한 연구” 전북대학교 공학연구원, Vol. 27, pp. 123-132.
4. 조용철, 유지오, 남창호 (1998), “도로터널의 환기(II)”, 공기조화 냉동공학, Vol. 27, No. 1, pp. 4.
5. 한국도로공사(2002), “도로설계요령”, pp. 265-267.
6. Davies, J. T. (1972) Turbulence Phenomena, Academic Press, New York, pp. 14-17.
7. Eck, B. (1973) Fans, Pergamon Press, pp.

---

267-268.

8. 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, June, pp. 379-384.
9. Lotsberg, G. (1997), "Investigation of the wall-friction, pressure distribution, and the effectiveness of big jet fans with deflection blades in

the Fodnes tunnel in Norway", Proc. of the 9th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, October, pp. 25-41.

10. Schlaug, R. N. and Carlin, T. J. (1979), "Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels", Federal Highway Administration, USA, pp. 2.49-2.51.



**권오상**

인하대학교 환경토목공학부 석사과정  
wef11@inhaian.net



**윤찬훈**

인하대학교 환경토목공학부 박사과정  
yoon0940@hanmail.net



**윤성욱**

(주)GS건설 기술본부 연구개발팀 과장  
yoonsw@lgenc.co.kr



**김진**

인하대학교 환경토목공학부 부교수  
jinkim@inha.ac.kr

---