

터널형 지하공간에서의 자연환기력 현장연구

이창우, 조홍률, 박홍채 (동아대학교)

1. 서론

공간내로 자연적인 요인에 의하여 유입되는 기류를 일반적으로 자연환기라고 정의하며 이는 공간환기에 큰 도움을 주기도 하나 내외부 기상조건에 따라 변동폭이 큰 특성을 보이므로 정확한 제어를 위하여서는 정량적인 예측이 필요하다. 정상 환기시에는 공간 환기시스템의 용량 및 운전비용의 최소화를 위하여, 화재와 같은 비상시에는 안전한 대피로의 확보, 구조물 및 설비의 보호, 구난인력의 진입 및 화재진압을 위하여 자연적인 요인에 의하여 유입되는 기류의 방향 및 양에 대한 이해가 반드시 요구된다. 최근 전 세계의 이목이 집중되었던 일련의 도로 및 철도터널, 지하광산에서의 대규모 화재로 인한 인명사고의 발생, 국내 방폐장의 건설예정지의 확정에 따른 유해성이 최소화된 안전한 방사능 폐기물 저장공간 건설의 필요성 제기 등에 따라 이들 터널형 지하공간내의 경제성 및 안전성에 직접적인 영향을 미치게 되는 자연환기에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다.

본 연구에서는 국내 장대도로터널 3개소를 대상으로 자연환기력의 현장 연구를 통하여 자연환기력의 크기 및 영향인자에 대한 분석 및 자연환기력과 송풍기 효율 관계에 대한 연구를 목적으로 한다.

2. 국내외 관련연구 사례

지하공간에 작용하는 자연환기력은 외부바람에 의한 풍압 및 내외부 공기밀도차이에 의한 효과에 의하여 작용한다. 일반적으로 풍압에 의한 효과가 밀도차이에 의한 효과, 즉 굴뚝효과에 비하여 상대적으로 큰 편이다. 풍압은 갱구주위의 지형적 형태에 따라 좌우되나 건축구조물에 작용하는 풍압계수 연구결과와 같이 정형적인 분류가 어려운 지형적 특성으로 인하여 터널갱구에 작용하는 풍압효과에 대한 연구는 극히 제한적이다.

하저 또는 해저터널 갱구의 풍압계수 축소모형 연구인 Blendermann(1976), Maarsingh and Swart(1991)의 연구 결과 풍압계수는 최대 0.8정도이며 철도터널 현장연구인 West and Pope(1985)의 연구결과는 0.66~1.68범위의 풍압계수를 보이고 있다. 한편, 터널 주변 지형에 의한 자연환기력 추정 방법으로 기압장벽고(barometric barrier)의 개념을 Roche(1991)가 제안하고 있으며 이는 굴뚝효과를 제외한 자연환기력의 최대값의 의미를 가지며 0.4Pa/m를 장벽고에 따른 자연환기력으로 제시하고 있다. Casale(2006)은 몽블랑터널에서의 자연환기력이 이탈리아에서 프랑스쪽으로 부는 편현상의 영향으로 최대 1000Pa에 달하는 것으로 발표하였다. 국내에서는 김효규(1999)가 터널내 환기력의 이론식을 이용하여 도로터널에서의 자연환기력을 추정하고 있으며 이창우 등(2006)은 고속도로터널에서의 현장측정을 통하여 자연환기력이 최대 126Pa, 굴뚝효과에 의한 자연환기력은 최대 10Pa 정도라고 발표하였다.

자연환기력은 기상조건의 변화에 직접적인 영향을 받으므로 풍속뿐만 아니라

온습도가 현저히 달라지는 환경을 고려할 수 있는 년중 연구가 필요하나 국내외 연구 가운데 외부기상조건의 변화를 년중 관찰한 연구는 Casale(2006)연구가 유일하며 국내 현장연구는 5월에서 6월에 걸쳐 약 1달 정도에 불과하다.

3. 현장 연구

본 연구는 이창우 등(2006) 연구의 계속연구로 추진되었으며 연구대상 터널의 제원은 표 1과 같으며 임고4 및 고창터널에서는 터널 내부 및 양갱구 외부에서 풍향, 풍속, 기압, 온·습도를 측정하였으며 장성터널에서는 터널내부 풍향, 풍속은 터널내에 설치된 풍향·풍속계, 교통량은 TCS로 부터의 자료를 이용하였다. 모든 측정자료는 1분단위로 수집·분석하였으며 기압은 1Pa단위로 측정하였다. 터널 주위의 풍향, 풍속 분석을 위하여 터널에서 가장 근접된 기상관측소의 관측 자료를 동시에 이용하였으며 기상관측소의 위치는 표 1 에서와 같다.

표 1. 현장연구 터널제원

터널명	위치	길이 (m)	내공단면적 (m ²)	평균구배 (%)	환기방식	환기설비	인근 기상관측소	비고
임고4	대구-포항간 고속도로	1667	101.1	2.29	종류식	제트팬 (Φ1530) 8대	영천 기상관측소	
고창2	고창-담양간 고속도로	3820	76.05	0.5	미설치	미설치	고창 기상관측소	건설중
장성	고창-담양간 고속도로	3581	75.45	-0.5	종류식	제트팬 (Φ1030) 10대	장성 기상관측소	2006.12 개통

터널내외부 기압은 동일 고도 및 동일 공기밀도를 기준으로 보정된 경정기압으로 환산하여 비교·분석하였으며 경정기압의 계산은 국내 기상청에서 적용하는 다음식을 이용하였다.

$$P_r = P_0 \cdot \exp \left[\frac{g \cdot \Delta h}{R \cdot \left(273.15 + \frac{t(t + T\Delta h)}{2} + \epsilon_m \right)} \right]$$

P_r : 경정기압 P_0 : 원기압 Δh : 고도차
 R : 건조공기 기체상수 g : 현지 중력가속도 t : 온도
 T : 기온감율 ϵ_m : 수증기 영향보정치

3.1 임고 4터널 현장 연구

2006년도 5~6월 동안에 수행된 연구결과는 지구시스템공학회, 터널공학회 등 (2006)에 발표하였으며 주요 연구 결과는 다음과 같다. 자연환기력의 추정 방법 1은 교통환기력이 상대적으로 작은 시간대에 국한하여 양갱구에서 측정된 기압차이를 자연환기력으로 해석하는 방법이며, 방법 2는 터널내부의 여타 환기력에 의한 추정풍속을 배제한 잔여 풍속을 자연환기에 의한 풍속으로 해석하는 방법이다.

- (1) 추정된 자연환기력은 $-126.2\sim 109.6\text{Pa}$ 이다..
- (2) 굴뚝효과에 의한 자연환기력은 $-7\sim 10\text{Pa}$ 정도이며 총 자연환기력의 크기와는 상관관계를 전혀 보이지 않는다.
- (3) 기압 장벽고(H)에 따른 추정 자연환기력은 최대 106.4Pa 이며 측정된 최대값과 매우 유사하게 나타난다.

3.2 고창터널 현장 연구

고창터널은 실험당시(2007년 1~2월) 내부 바닥포장까지 완료되었고 조명 및 환기설비 공사가 진행 중이었으며 외부 도로공사는 골재보조기층 설치 이전단계에 있었다. 양갱구 외부 기상조건은 가급적 터널상부 지형에 의한 기압변화 가능성이 있는 영역을 피하기 위하여 갯구로부터 40m 및 100m 떨어진 지점에서 측정하였으며 터널내부 기압은 양갱구로부터 약 30m 안쪽에 위치한 2개 지점에서 측정하였다. 터널내부 풍속 및 풍향은 터널 중간지점의 터널 중심선 지상 2.0m 지점에서 온·습도와 동시에 계측되었다.

(1) 외부 풍향 및 풍속분포

양 갯구외부에서 측정된 자료와 장성방향 갯구로부터 직선거리 5.8km 떨어진 지점에 위치한 고창기상관측소에서 측정된 자료의 비교분석을 위하여 풍향분포를 그림 1에 풍속 분포를 그림 2에 도시하였다. 풍속은 터널 축방향으로 변환하여 비교하였다.

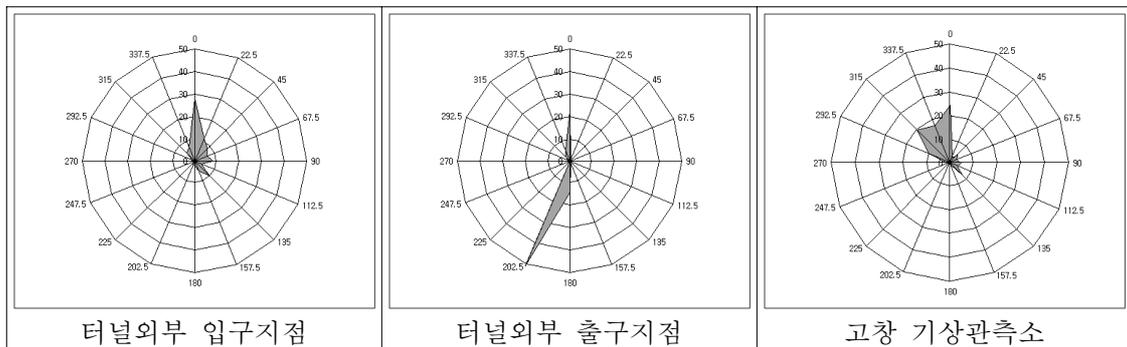


그림 1. 계측지점별 풍향분포(1/23 17:00~1/25 11:00)

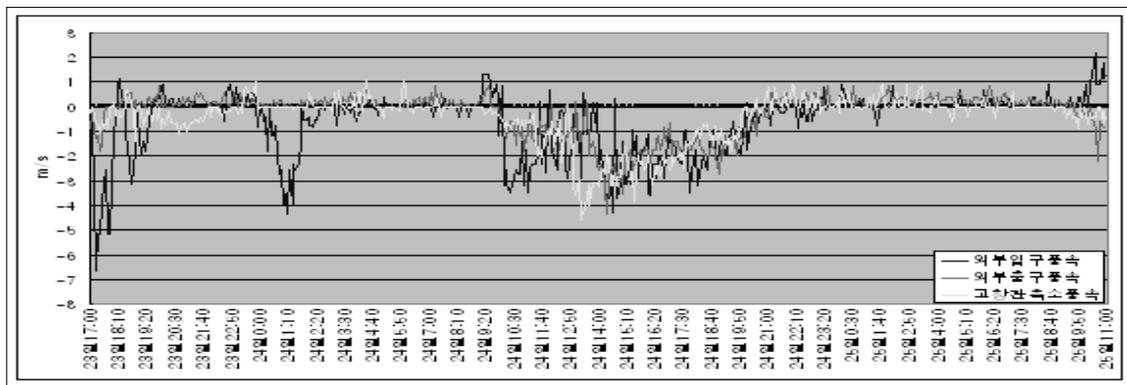


그림 2. 풍속비교분포(1/23 17:00~1/25 11:00)

외부 풍향 풍속분포의 주요 특징은 다음과 같다.

- 지형의 차이에 따라 터널 입출구의 풍향분포는 현저히 다르나 고창기상관측소의 풍향과 터널 출구개구 외부 풍향은 비교적 유사한 형태를 보인다.
- 터널 외부(입출,출구) 및 인근 기상관측소 측정 풍속은 매우 유사한 분포형태를 보인다. 한편 그림 3에 도시한 내부 풍속도 이와 유사한 분포를 보이고 있다.
- 내부풍속의 분포형태와의 유사도는 터널 입출구 외부, 고창기상관측소, 영천기상관측소의 순으로 나타나고 있다.
- 특히 풍속이 강하게 작용하는 경우 풍향이 일치하는 경우가 많으며 이때 풍향은 터널진행의 역방향으로 작용한다. 따라서 풍속이 크면 각 계측지점의 풍향의 유사도가 높아지고 풍향을 고려한 풍속의 유사도 또한 높아진다.

(2) 내부 풍속분포

터널 중간지점에 측정한 내부 풍속은 그림 3에 도시하였으며 역풍의 경우 0~3.6m/s, 순풍의 경우 0~2.7m/s 범위를 나타내고 있다.

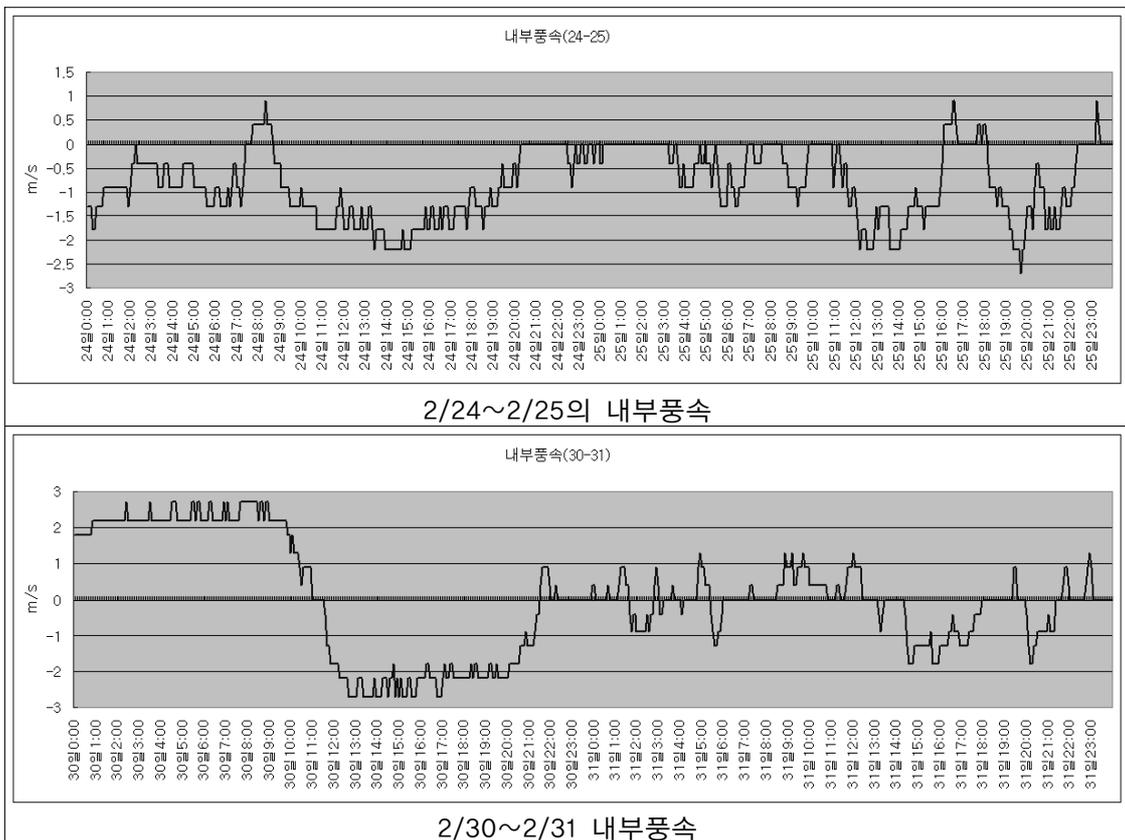


그림 3. 터널내부풍속분포

내부풍속분포의 특징은 다음과 같다.

- 역풍이 강한 경우(-2m/s이하)는 대부분 12:00~24:00 시간대이며 이때의 내부 풍속의 크기는 다양한 분포를 보인다.
- 순풍은 00:00~12:00시간대에 주로 분포하는 특징을 보이며 일별 분포형태는 유사한 형태를 보여주며 반복되고 있다.

(3) 자연환기력 추정

자연환기력은 터널 양갱구내부에서 측정한 경정기압 차로 구한 방법 1과 기압장벽고를 이용하여 구한 방법 2로 추정하였다. 한편 기압장벽고는 단면 즉 장벽의 상대적인 위치를 고려하고 있지 못하므로 각 단면의 상대적 위치를 그림 6에 도시하였다. 한편 기상관측소와 터널사이의 지형단면의 형태를 그림 7에 도시하였다. 굴뚝효과에 의한 자연환기력은 그림4에 경정기압차에 의한 자연환기력의 크기와 동시에 도시하였다.

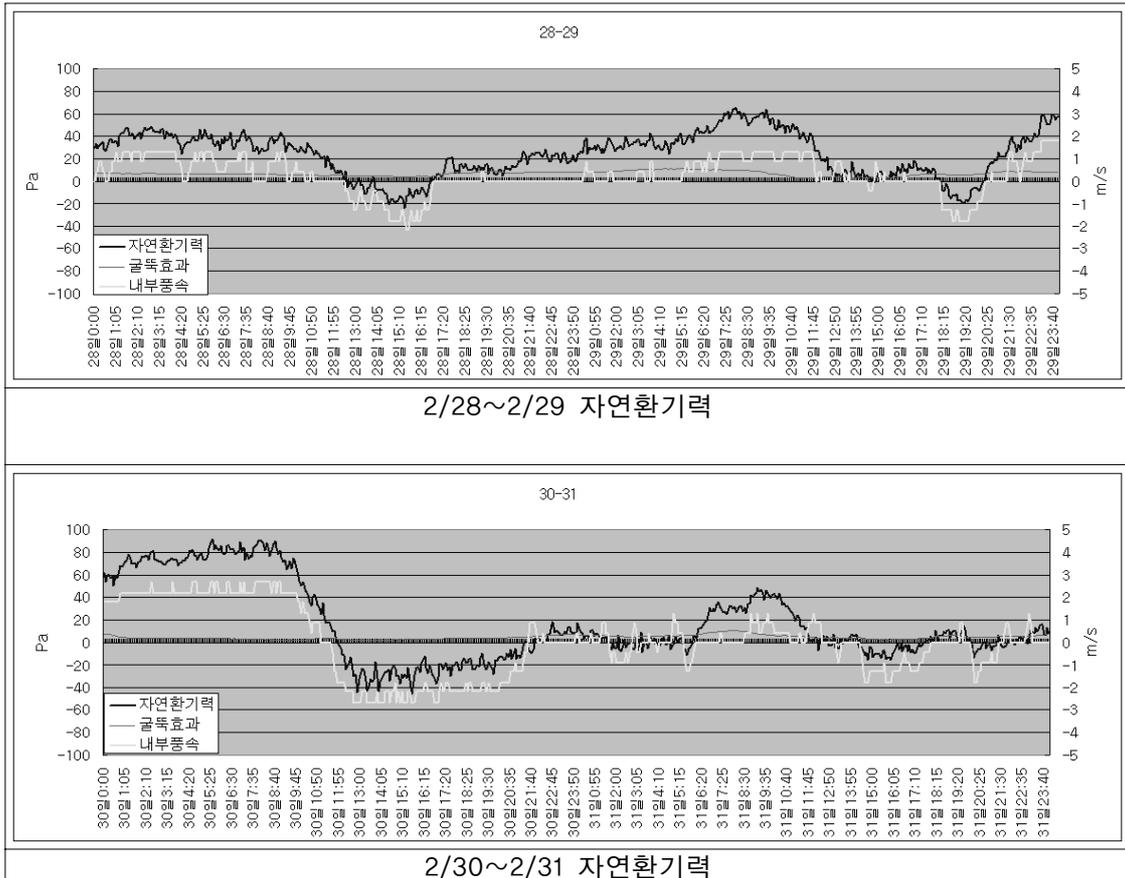
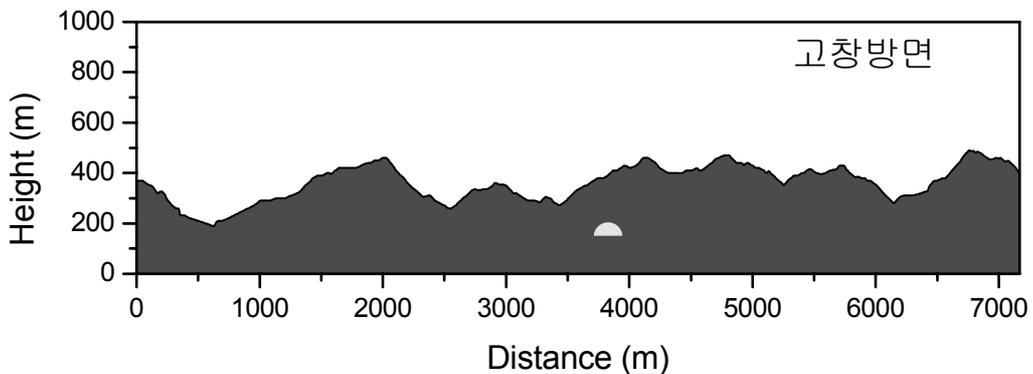


그림 4. 경정기압차 및 굴뚝효과에 의한 자연환기력



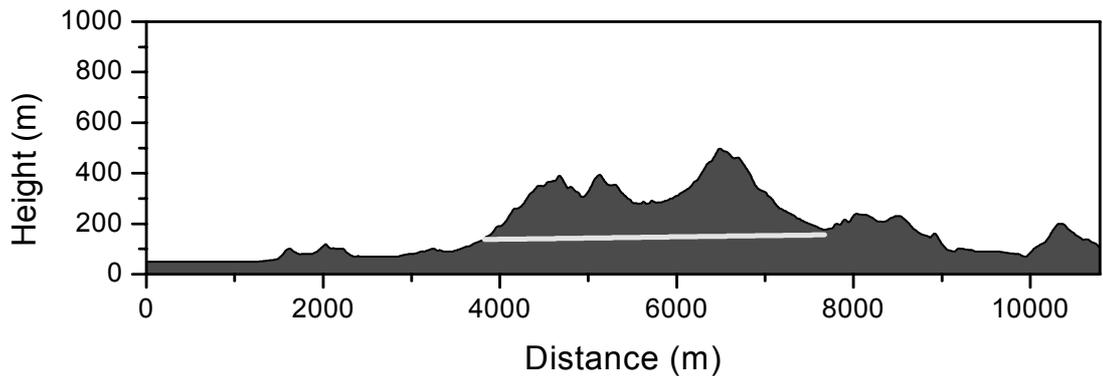
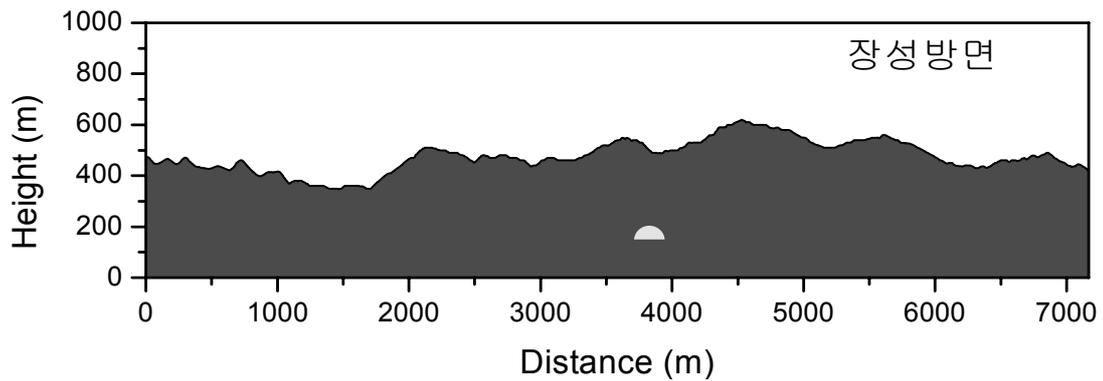


그림 5. 고창터널 기압장벽고 및 축방향 단면도

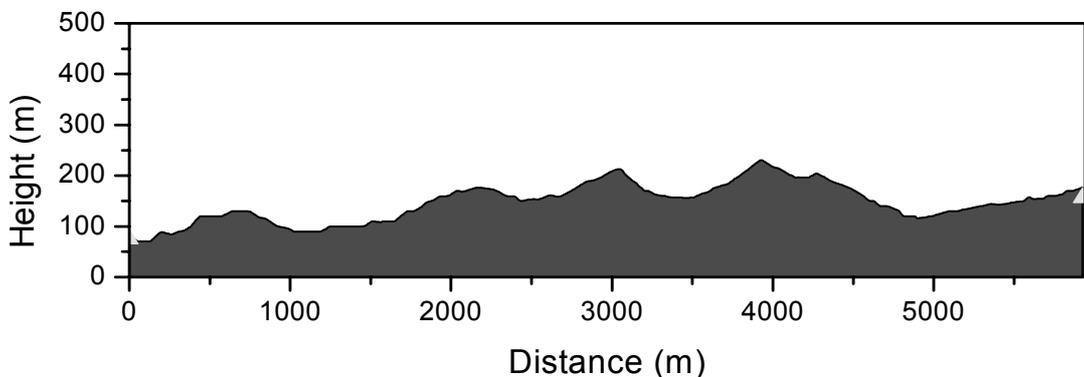


그림 6. 기상관측소와 터널사이의 단면도

고창2터널의 자연환기력의 특징 및 결론은 다음과 같다.

-방법1의 자연환기력의 경우 $-56.6\sim 91.2\text{Pa}$ 의 범위를 보이며 방법2에 따른 자연환기력은 $-128.9\sim 85.1\text{Pa}$ 의 범위를 보인다.

-굴뚝효과의 경우 자연환기력에 비하여 상대적으로 적은 $0.7\sim 11.4\text{Pa}$ 의 범위를 보인다.

-자연환기력의 터널내부 풍속분포와 같이 대부분 12:00~24:00 시간대에는 음으로 작용하며 00:00~12:00 시간대에는 양으로 작용하고 있다.

-방법1과 방법2의 경우 최대값은 유사하나 최소값의 경우 큰 차이를 보이고 있다. 이는 방법의 1의 경우 외부자연풍의 크기가 큰 영향요소이나, 방법 2의 경우 터널에 작용하는 외부자연풍의 크기와 관계없이 지형에 의해 작용하는 환기압의 최대값을 의미하기 때문이다.

-기압장벽고의 적용에 있어, 입체적인 지형요소의 반영을 위한 방안이 필요하다고 사료된다.

3.3 장성터널 현장연구

2006년 12월 개통되어 실험당시(2007년 1~2월)에 일 교통량이 약 200대, 분당 교통량은 최대 11대에 불과하였다. 제트팬의 환기효율과 자연환기력의 관계를 분석하기 위하여 야간 2회 주간 2회 매일 총4회에 걸쳐 20분간씩 가동하였다. 가동시간은 제트팬 가동에 따라 유입된 기류가 터널길이 전구간을 유동할 수 있는 시간을 고려하여 결정하였다. 터널에 설치된 풍속계는 초음파 풍속계로 터널단면상의 평균풍속 측정이 가능하며, 교통량은 TCS로부터 소형 및 대형 2개 차종으로 구분 측정하였다.

(1) 외부 풍향 및 풍속분포

대전방향 출구갱구로부터 직선거리 2.0km 떨어진 지점에 위치한 장성기상관측소에서 측정한 풍향 및 풍속을 각각 그림 7 과 그림 8에 도시하였다.

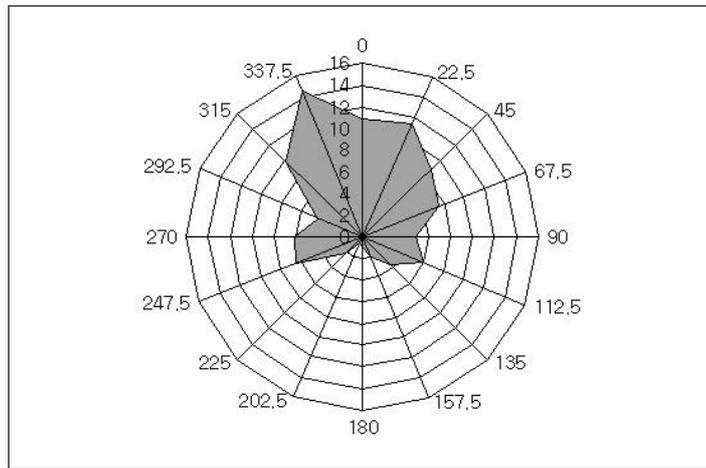


그림7. 장성기상관측소 풍향분포

장성터널의 위치가 331.2도 방향으로 진행하고 있으므로 그림 7에서 보는 바와 같이 장성기상관측소에서 측정한 풍향 중 가장 우세한 풍향이 직접적으로 장성터널에 영향을 미치고 있었다.

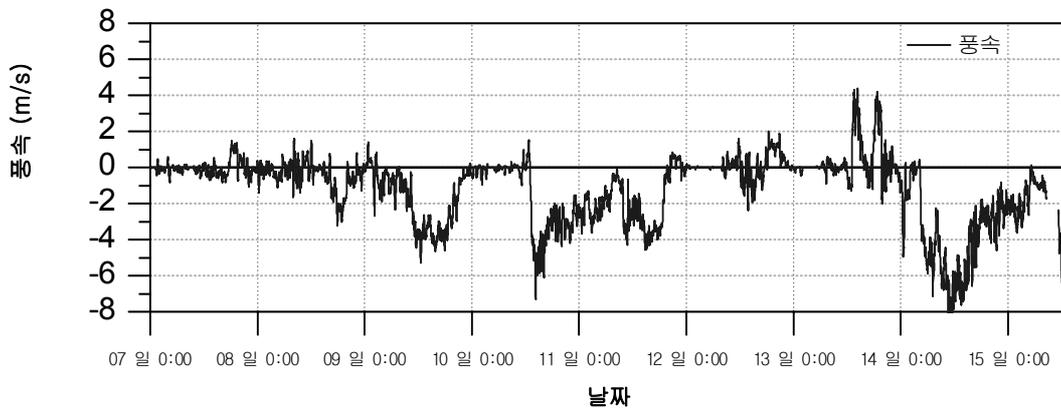


그림 8. 장성기상관측소 풍속 분포(터널 축방향 변환 풍속기준)

장성기상관측소에서 측정된 풍속에 대하여 터널 축방향으로 미치는 풍속을 추정해본 결과 최대 4.4m/s 최소 -10.1m/s 로 붙었다.

(2) 내부 풍속분포

터널 내부의 풍속은 차량통행에 따른 풍속 증가폭이 크므로 15분 및 25분 이동 평균값으로 나타내었으며 15분 및 25분 이동평균값 분포와 실험기간 전체기간동안의 풍속을 그림 9에 도시하였다.

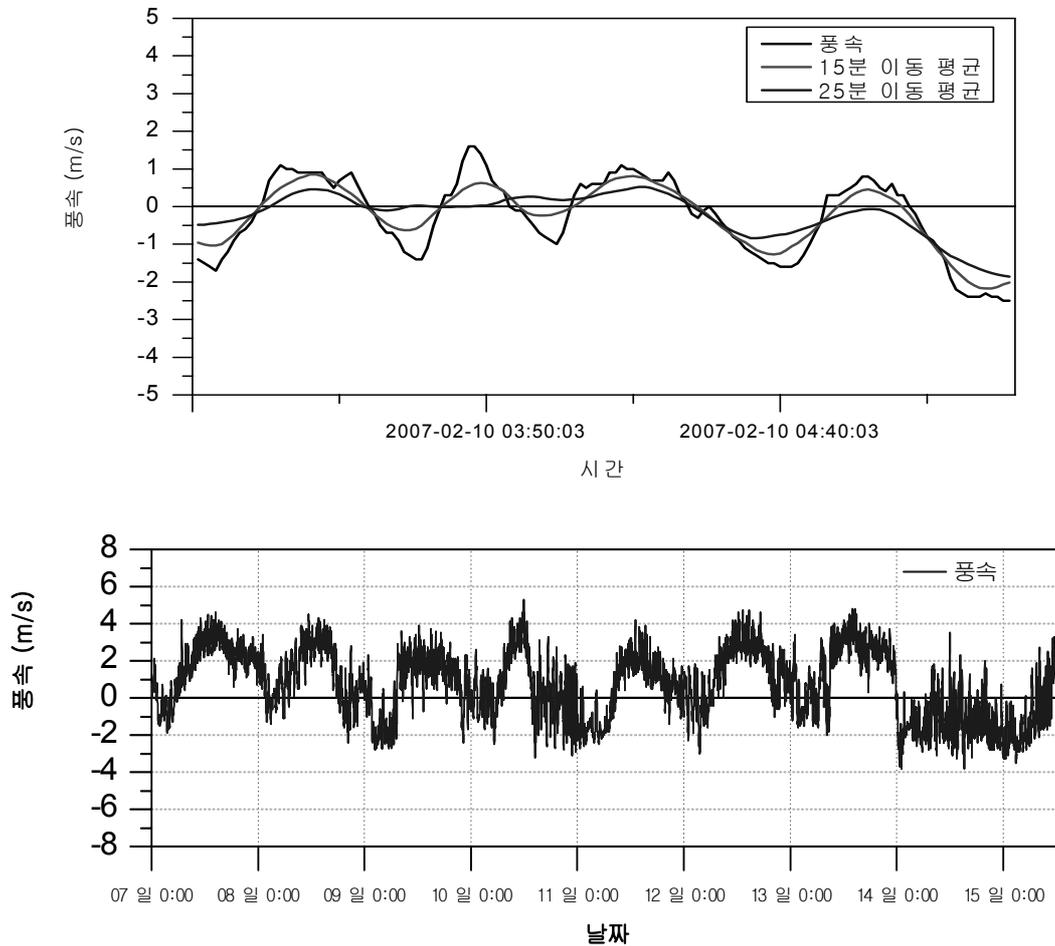


그림 9. 터널내부 풍속

실험기간 동안 터널내부의 풍속은 최대 5.3m/s였으며 최소풍속은 -4m/s로 나타났으며 하루 중 교통량이 많은 낮 시간대에는 차량진행방향과 같은 방향으로 기류가 유동하였으며 비교적 교통량이 적은 새벽시간대에는 차량진행방향과 풍향이 다른 역풍이 관측되었다.

(3) 자연환기력 추정

자연환기력은 터널 내부풍속으로 추정한 총환기력에서 교통환기력을 제외한 환기력으로 추정하였으며 동시에 기압장벽고에 따른 자연환기력과 비교 검토하였다. 그림 11은 기압장벽고의 형태와 기압장벽고의 축방향 위치를 보여주는 단면도를 나타내고 있으며 기상관측소와 터널사이의 지형단면의 형태를 그림 12에 도시하였다. 한편 차량통행에 따른 교통환기력의 정확한 정량화가 어려운 문제임으로 장성터널의 자연환기력은 차량통행이 비교적 적은 00:00시부터 06:00까지 추정하였다.

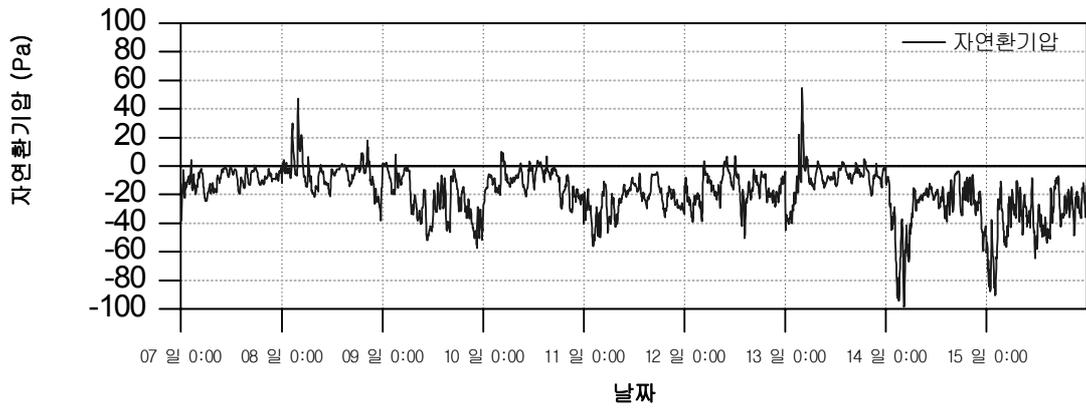


그림 10. 추정 자연환기력

총환기력은 자연환기력과 교통환기력, 기기환기력의 합으로 나타낼 수 있다. 이에 총환기력에서 교통환기력과 제트팬 송압력을 뺀 차이를 자연환기력으로 추정하였다.

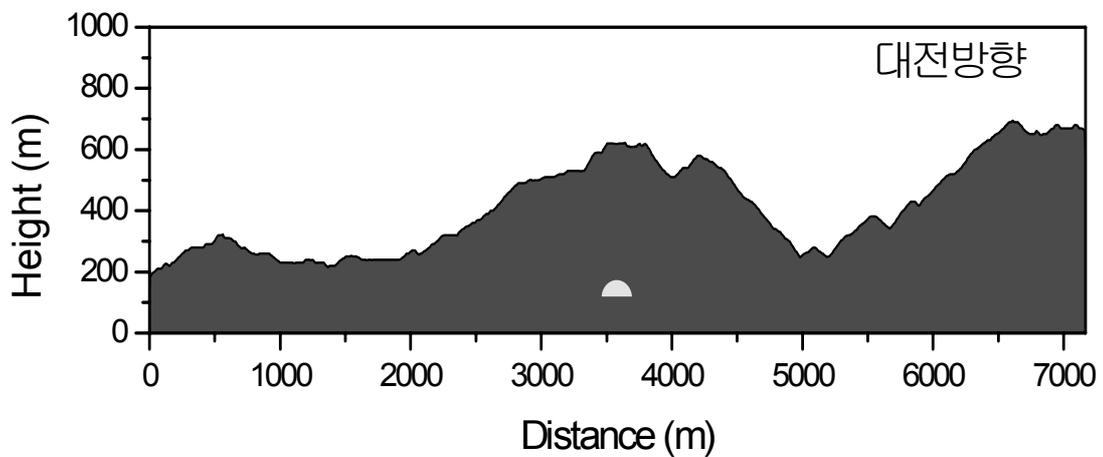
-터널 내부의 교통량이 최소화 되는 00시부터 06시 사이의 자연환기력을 추정해 본 결과 최대 54.67 Pa 최소 -98.60 Pa로 추정되었다.

-기압장벽고로 나타낸 최대 자연환기력은 117.3Pa, 최소 -119.9Pa 이었다.

-그림 5와 11에서 보는바와 같이 터널상부의 지형이 구배가 고창터널의 경우가 장성터널에 비하여 상대적으로 크므로 풍압계수가 고창터널의 경우가 클 것으로 예상되나 기압장벽고의 개념에는 이와 같은 구배의 영향을 고려하고 있지 않으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

-추정 자연환기력이 기압장벽고로 추정한 최대치에 비해 낮게 나타나는 점은 교통환기력의 영향을 제외시키기 위하여 자연환기력이 양의 방향으로 나타나는 낮 시간대를 고려대상에서 제외한데도 기인한다.

-그림 6과 12에 나타난 기상관측소와 터널갱구사이의 지형 단면형태는 장애지형이 별로 없는 장성터널의 경우가 기상관측소 기상자료의 이용가능성이 상대적으로 큼을 나타내고 있다.



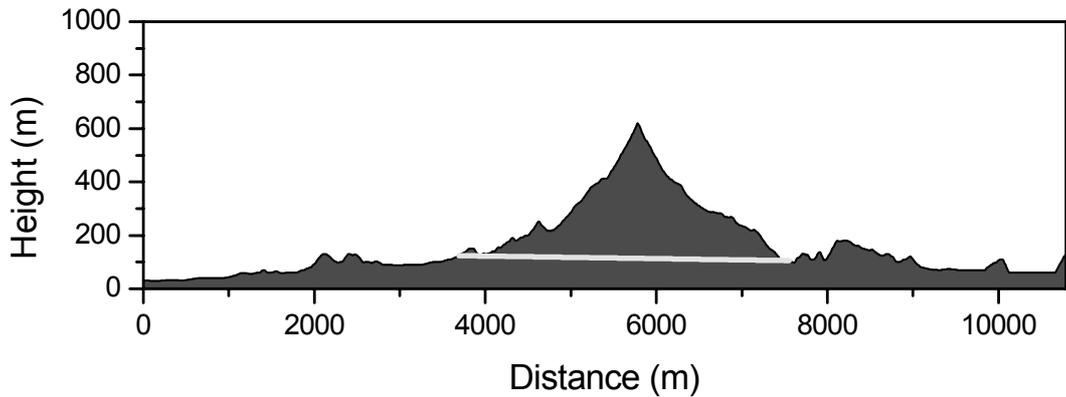
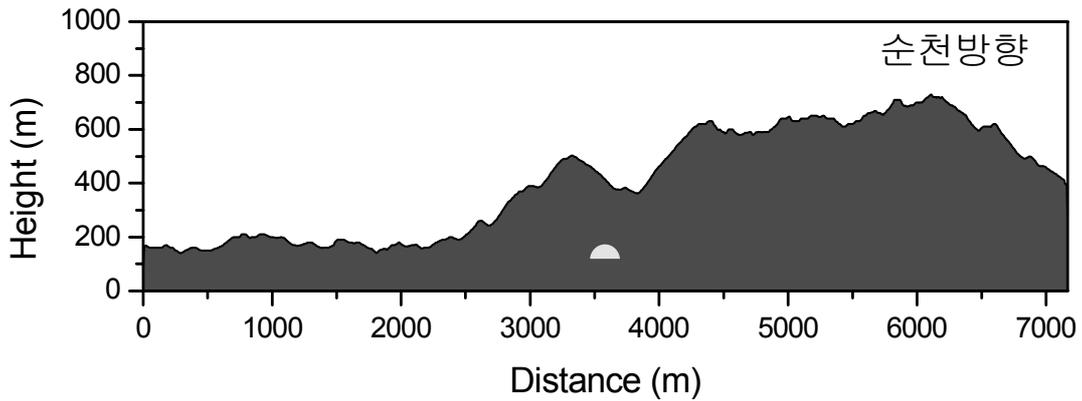


그림 11. 장성터널 기압장벽고 및 축방향 단면도

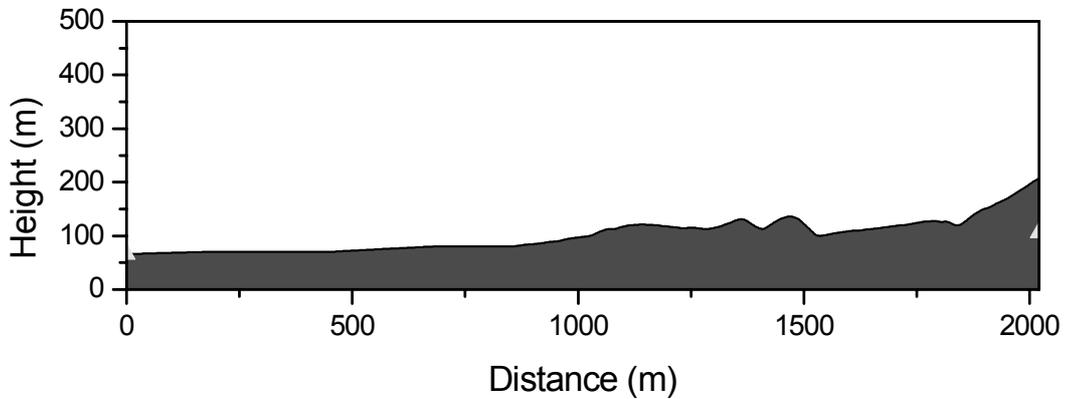


그림 12. 기상관측소와 터널사이의 단면도

(4) 제트팬 환기효율과 자연환기력

정상 환기시보다 비상시 인명, 설비 및 구조물의 피해를 최소화하기 위하여 제트팬의 가동최기의 기류유동 특성에 대한 이해가 필요하다. 본 연구동안 제트팬 가동시 역풍이 부는 경우가 많이 관찰되어 제트팬 가동에 따른 기류의 역진 유동에 소요되는 시간을 분석하였으며 자연환기력의 작용크기에 따른 제트팬 환기효율을 비교분석하였다. 임고4터널에서 수행한 제트팬 환기효율연구(이창우 등, 2006)는 $\phi 1530$ 제트팬 6대의 가동을 통하여 수행되었으며 연구결과는 운행중인 터널에서 제트팬으로 유입되는 기류는 심한 난류와 제트팬의 노후화에 따른 기계적 효율의 감소 등에 따라 팬효율은 이론적 효율의 9.4~107.9%로 나타나고 있다.

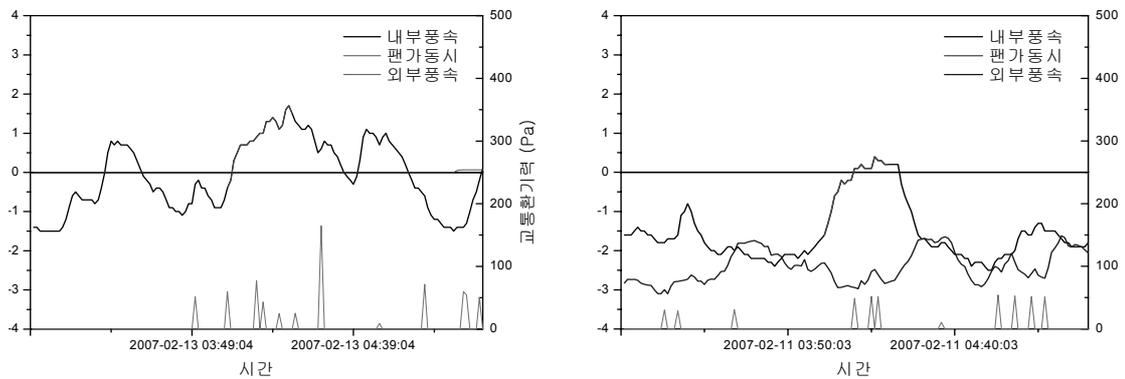


그림 13. 제트팬 가동에 따른 풍속변화

장성터널에서는 00시부터 06시 사이 교통환기력이 최소화 되는 시간대에 제트팬을 가동하여 제트팬 환기효율 실험을 하였으며 그림 13에서처럼 터널외부 풍속과 내부풍속 교통환기력과 제트팬 가동에 따른 풍속 증가를 확인할 수 있었다. $\phi 1030$ 제트팬 10대를 가동한 경우의 제트팬 환기효율과 작용 자연환기력의 크기 관계를 표 2에 정리하였다.

-제트팬 가동시간동안의 이론적인 제트팬 승압력은 최소 55.2 Pa 최대 64.8 Pa로 추정되었으나 실제로 측정된 제트팬 승압력은 최소 3.8 Pa 최대 48.6 Pa로 효율은 6.7%~74.9% 이다. 이는 임고4터널에서와 마찬가지로 극히 낮은 효율임을 알 수 있었다.

-그림 14에서 보는 바와 같이 자연환기력의 변화에 따른 제트팬 승압력은 통계적 관련성이 없음을 알 수 있었다. 따라서 제트팬의 환기효율 결정에 자연환기력은 직접적인 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

-터널 내부 풍속이 역풍일 경우 제트팬 가동에 따라 풍향이 역전되기까지의 소요시간은 2분~5분이었다. 그러나 터널 내부 풍속이 -2.2 m/s 이상이며 자연환기력이 역으로 작용하고 있고 교통량이 적은 시간에는 제트팬 승압력 만으로는 내부기류가 역전되지 않고 있어 이에 대한 연구가 피난, 구난 및 소방전략의 수립시에 반드시 필요하다.

표 2. 자연환기력과 제트팬 효율

가동시간	터널내 풍속 (가동시작시)	교통량 (대/min)	제트팬 환기력(Pa)			자연환기력 (Pa)
			이론값(A)	측정값(B)	효율 (B/A*100%)	
2007-02-08 04:57:03	0.9	0.24	57.6	8.0	13.9	-0.01
2007-02-10 01:01:01	0.9	0.23	57.5	13.7	23.8	-18.3
2007-02-12 00:02:00	0.4	0.31	58.8	4.7	8.1	-15.4
2007-02-13 00:57:02	0.9	0.31	57.6	3.8	6.7	-9.2
2007-02-09 01:10:01	-0.5	0.1	60.6	12.1	20.0	-20.8
2007-02-09 04:02:03	-2.7	0.36	64.8	48.6	74.9	-40.1
2007-02-10 04:01:03	-0.9	0	61.4	20.9	34.1	-15.3
2007-02-11 01:00:01	-1.7	0.33	62.9	25.1	39.9	-27.1
2007-02-11 04:01:03	-1.6	0.15	62.7	19.0	30.3	-13.4
2007-02-12 03:58:03	-1.0	0.31	61.4	27.3	44.5	-17.6
2007-02-13 04:00:04	-0.4	0.28	60.3	20.9	34.7	-9.2
2007-02-14 00:52:02	-2.6	0.75	64.5	6.8	10.6	-85.5
2007-02-14 04:02:04	-2.3	0.10	64.0	15.4	24.0	-32.3
2007-02-15 04:01:04	-2.2	0.18	63.8	8.0	12.6	-81.1

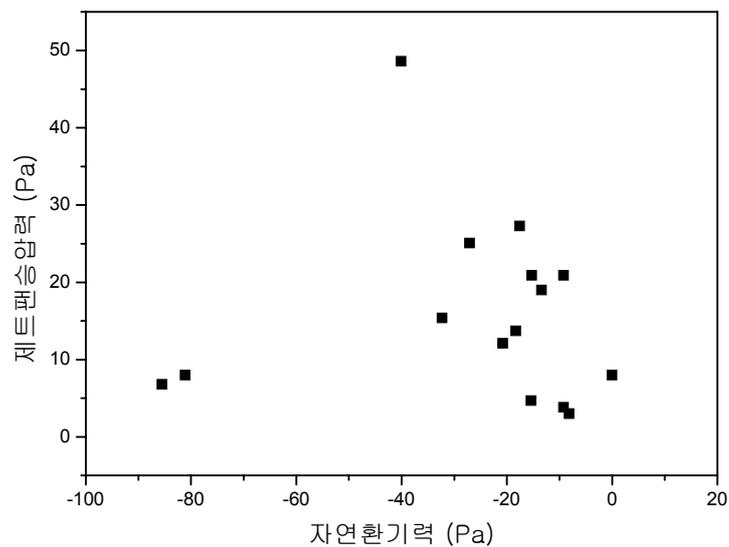


그림 14. 제트팬승압력과 자연환기력

표 3. 제트팬 가동에 따른 풍속변화

가동시간	터널내 풍속(m/s)			순풍으로 역전에 소요되는 시간(min)	제트팬 승압력(Pa)
	가동시작시	가동중단	최대풍속증가		
2007-02-08 01:02:01	2.1	2.4	0.8	순풍	3.0
2007-02-08 04:57:03	0.9	2.1	1.3	순풍	8.0
2007-02-10 01:01:01	0.9	1.7	1.7	순풍	13.7
2007-02-12 00:02:00	0.4	1.1	1	순풍	4.7
2007-02-13 00:57:02	0.9	1.8	0.9	순풍	3.8
2007-02-09 01:10:01	-0.5	1.1	1.6	2	12.1
2007-02-09 04:02:03	-2.7	-1.2	3.2	5	48.6
2007-02-10 04:01:03	-0.9	0.7	2.1	3	20.9
2007-02-11 01:00:01	-1.7	0	2.3	3	25.1
2007-02-11 04:01:03	-1.6	0.4	2	4	19.0
2007-02-12 03:58:03	-1	0.8	2.4	4	27.3
2007-02-13 04:00:04	-0.4	1.5	2.1	2	20.9
2007-02-14 00:52:02	-2.6	-1.8	1.2	역전되지않음	6.8
2007-02-14 04:02:04	-2.3	-0.6	1.8	역전되지않음	15.4
2007-02-15 04:01:04	-2.2	-1.4	1.3	역전되지않음	8.0

표 4. 추정 자연환기력

	추정방법	자연환기력(Pa)	비고
임고4터널	현장측정	-126.2~109.6	굴뚝효과: -7.0~10.0Pa
	기압장벽고	-71.6~106.4	
고창터널	현장측정	-56.6~91.2	굴뚝효과: 0.7~11.4Pa
	기압장벽고	-128.9~85.1	
장성터널	현장측정	-98.6~54.7	
	기압장벽고	-119.9~117.3	

3. 결 론

터널형 지하공간의 대표적인 형태인 도로터널 현장에서 수행한 자연환기력 관련연구의 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 임고 4터널에서의 추정 자연환기력은 -126.2~109.6Pa, 굴뚝효과는 -7~10Pa 정도로 나타났다. 한편 기압 장벽고에 따른 추정 자연환기력은 -71.6~106.4Pa이다.

(2) 고창터널의 경우, 현장 측정에 의한 추정 자연환기력은 -56.6~91.2Pa, 기압 장벽고에 의한 환기력은 -128.9~85.1Pa의 범위를 보인다.

굴뚝효과는 상대적은 적은 0.7~11.4Pa로 나타났다.

(3) 장성터널 내부의 교통량이 최소화 되는 00시부터 06시 사이의 자연환기력은 $-98.60\sim 54.67\text{Pa}$ 로 추정되었다. 한편, 기압장벽고로 나타낸 최대 자연환기력은 $-119.9\sim 117.3\text{Pa}$ 이었다.

(4) 임고4터널에서 수행한 제트팬 환기효율 연구결과 팬효율은 이론적 효율의 9.4~107.9%로 나타났으며 교통량이 극히 적은 장성터널에서는 6.7%~74.9%로 추정되었다. 임고터널의 경우는 차량통행 및 제트팬 가동에 의한 난기류의 영향과 제트팬의 노후화에 따른 기계적 효율의 감소 등이 주요 원인으로 추정되며 교통량이 작은 시간대를 분석대상으로 한 장성터널에서는 기류의 역전에 따른 에너지 손실이 가장 큰 영향으로 판단된다.

(5) 임고4 터널은 00:00~06:00, 고창터널은 12:00~24:00, 장성터널의 경우는 00:00~07:00 사이에 터널내 풍속이 역풍이 되는 현상을 반복하는 특징을 보이며 이와 같은 분포의 원인은 자연환기력이다.

(6) 본 연구대상 3개 터널에서의 추정 자연환기력의 최대값은 기압장벽고로 추정된 자연환기력으로 상당히 근접하게 유추가 가능하다, 그러나 기압장벽고는 개구상부의 지형적인 요인에 의한 풍압의 효과를 고려하는 개념으로 제안되었으나 상부지형의 구배를 고려하고 있지 않는 치명적인 결함이 있으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 건설교통부 산학연 중점연구사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업 -도로터널 환기시스템연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Blendermann, W., 1976, "On a probabilistic approach to the influence of a wind on the longitudinal ventilation of road tunnels", proceedings of 2nd AVVT, pp. B1-1-24
2. Weiss, H.H. and K. Dolejsky, 1985, "An investigation of atmospheric pressure differences affecting the longitudinal ventilation of roof tunnels", 12th AVVT, pp. 189-203
3. Roche, L., 1991 "Meteorological influence on tunnel ventilation: three new field experiment", proceedings of 7th AVVT, pp. 513-544.
4. Lepage, M.F., and G.D. Schuyler, 1991, "Re-entrainment of exhaust gases in a longitudinally ventilated tunnel", proceedings of 7th AVVT, pp. 563-582
5. Maarsingh, R.A. and L. Swart, 1991, "Wind-tunnel experiment on wind effect at tunnel portals", proceedings of 7th AVVT, pp. 545-562
6. 김효규, 1999, 국내도로터널내 자연환기력 분석연구, 동아대학교 대학원 석사논문
7. Casale, E. et al., 2006, "Influence of the natural ventilation on the transverse ventilation conditions", 12th AVVT, pp. 479-494
8. 이창우, 박홍채, 조홍률, 2006, 도로터널내 자연환기력 영향분석, 한국터널공학회 2006년 제7차 터널기계화 시공기술 심포지움 논문집, pp. 113-125
9. 이창우, 조홍률, 박홍채, 2006, 도로터널 제트팬 환기효과 현장연구, 한국지구시스템공학회 제87회 추계학술발표회 논문집, pp.21~28