

장대도로터널의 자연환기력 예측 사례연구

이창우¹, 김상현^{2*}, 길세원², 조우철³

A case study for prediction of the natural ventilation force in a local long vehicle tunnel

Chang-Woo Lee, Sang-Hyun Kim, Se-Won Gil, Woo-Chul Cho

Abstract One of the key design factors for the ventilation and safety system at extra long tunnel is the airflow velocity induced by the natural ventilation force. Despite of the importance, it has not been widely studied due to the complicated influencing variables and the relationship among them is difficult to quantify. At this moment none of the countries in the world defines its specific value on verified ground. It is also the case in Korea. The recent worldwide disasters by tunnel fires and demands for better air quality inside tunnel by users require the optimization of the tunnel ventilation system. This indicates why the natural ventilation force is necessary to be thoroughly studied. This paper aims at predicting the natural ventilation force at a 11 km-long tunnel which is in the stage of detailed design and will be the longest vehicle tunnel in Korea. The concept of barometric barrier which can provide the maximum possible natural ventilation force generated by the topographic effect on the external wind is applied to estimate the effect of wind pressure and the chimney effect caused by the in and outside temperature difference is also analyzed.

Keywords: Long vehicle tunnel, natural ventilation force, barometric barrier, chimney effect, wind pressure

요 지 장대터널의 환기 및 방재시스템 설계시 주요한 요소설계인자 중 하나인 자연환기력은 그 중요성에도 불구하고 관련 영향변수들의 상호관계는 정량화가 매우 복잡하여, 자연환기력에 의한 유입 자연풍에 관한 설계기준을 정량적 근거하에서 제시하고 있지 못하다. 최근 발생한 터널화재에 의한 문제 및 터널 이용자에 의한 보다 나은 공기질에 대한 요구 등으로 터널 환기시스템의 최적화가 시급히 필요하며, 따라서 최적화의 주요 설계인자인 자연환기력에 대한 연구가 절실히 요구된다. 본 연구에서는 국내 최장대 도로터널로 계획된 인제터널(연장 10.9 km)을 대상으로 자연환기력의 예측을 목적으로 하였다. 지형적 요인에 의한 외부풍의 풍압에 기인하는 자연환기력의 최대 가능수준을 예측할 수 있는 기압장벽고의 개념을 적용하여 외부풍에 의한 자연환기력을 추정하고 터널내외부 공기 밀도차로 인한 굴뚝효과에 따른 자연환기력을 동시에 분석하였다.

주요어: 장대도로터널, 자연환기력, 기압장벽고, 굴뚝효과, 풍압

1. 서 론

자연환기력이란 터널내외부 기상 변수만에 의하여 터널내에 작용하는 환기력으로, 외부풍에 의하여 갱구에 작용하는 풍압에 의한 환기력과, 터널 내외부의 온도차에 의한 공기밀도차에 기인하는 일명 굴뚝효과 불리우는 환기효과로 구성된다. 외부풍에 의한 환기력은 갱구 주변의 지형적 특성 즉, 기류 유동 장애물(barometric barrier) 형태 및 높이에 따라 큰 영향을 받으며 동시에 외부풍 자체가 정상류 유동이 아니라 순간 풍향 및 풍속

의 순간변동이 심한 유동 특성을 가지고 있어 자연환기력의 정량화는 어려운 문제이다.

국내 도로터널 설계기준(한국도로공사, 2002)에서는 일반지형터널에서는 일방통행터널의 경우 자연환기력에 의한 유도풍속을 최대 2.5 m/s를 가정하며, 특수지형 조건에서는 터널별 설계조건을 고려하여 설계한다. 그러나 일부 국내장대터널에서 관찰된 자연환기풍이 4-5 m/s 이상의 크기를 보이기도 하나 특수지형조건하에서 자연환기력을 정량화할 수 있는 방법에 대한 국내외 연구도 극히 제한적이므로, 최근 점증하고 있는 장대터널의 환기 및 방재시스템의 최적화를 위하여 자연환기력에 대한 연구가 시급히 요구되는 상황이다(오세준 등, 2008; 최태희 등, 2002).

본 연구에서는 금년중 착공 예정인 국내 최장대 고속

¹동아대학교 에너지자원공학과 교수

²동아대학교 에너지자원공학과 석사과정

³(주)나우이엔지 전무이사

*교신저자: 김상현 (E-mail: sanghyunrang@hanmail.net)

도로 터널인 인제터널(10.9 km)에서의 자연환기력을 예 측하여 환기 및 방재시스템의 최적화를 위한 기초자료를 제공함을 목적으로 하였다.

2. 자연환기력의 정의

터널과 같은 지하공간내에 작용하는 자연환기력을 측정하기 위하여서는 터널내의 주요 지점에서의 단순한 기압의 측정만으로는 해석이 용이하지 않다. 이는 그림 1에서 보는 바와 같이 기류의 유동과정에서 고도차에 의한 압력 및 비체적의 변화를 동시에 수반하기 때문이다. 따라서 모든 측정지점 또는 추정지점에서의 기압을 동일 고도상의 기압으로 보정(경정기압보정)한 후에 비교함으로써 두 지점사이의 환기압 차이를 계산할 수 있다. 그러나 이와 같은 방법은 터널 굴착 후에 적용 가능하며, 굴착전의 예상 자연환기력의 추정방법으로는 적합하지 않다. 또한 자연환기력은 터널 내외부 기상변수의 순간적인 변화에 따라 지속적으로 변화하는 특징을 가지고 있어 직접적인 측정을 더욱 어렵게 하고 있다. 그림 2는

국내터널에서 측정한 자연환기력의 시간별 변화형태를 보여주고 있으며 외부풍의 영향에 따라 큰 분산의 특징을 보여주고 있다.

자연환기력의 가장 큰 형성원인은 터널 입·출구 주변에 작용하는 자연풍이다. 자연풍은 풍속 및 풍향의 순간적인 변동이 심하고 터널의 입·출구로 접근함에 따라 주변 지형과의 충격으로 인해 심한 와류가 형성되는 특징을 가지고 있으므로, 자연환기력 또한 방향 및 크기의 순간적인 변동이 크다. 자연풍으로 의하여 형성되는 터널 입·출구의 압력의 크기는 자연풍의 풍속과 풍향뿐만 아니라 터널 입·출구의 형태 및 주변지형 특성이 영향을 미치며 다음과 같이 식 (1)로 표현가능하다(Casale 등, 2006).

$$\Delta P_{wind} = K \frac{\rho_e}{2} (V_e \cos \theta) (V_e \cos \theta) \quad \text{식 (1)}$$

K : 풍압계수

ρ_e : 외부공기밀도

V_e : 외부자연풍 풍속

θ : 외부자연풍의 터널 입사각

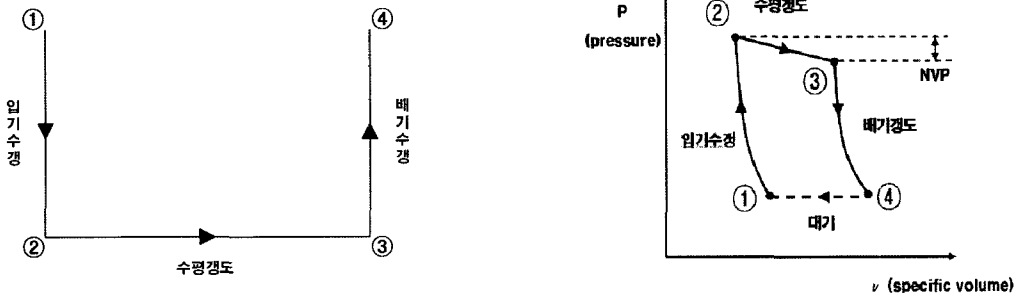


그림 1. 입배기수갱 배치 예 및 P-v Diagram상의 자연환기력(NVP)의 정의

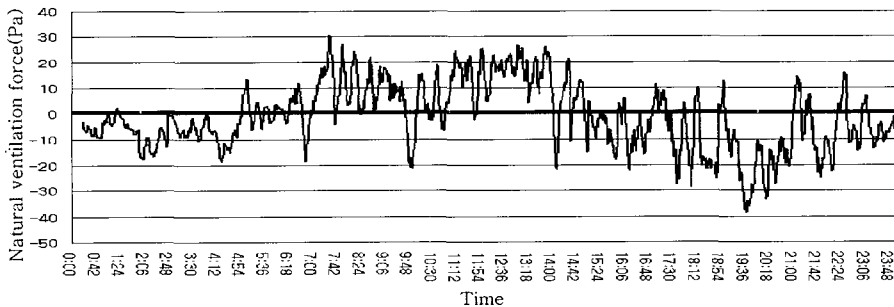


그림 2. 자연환기력의 변화

굴뚝효과는 터널내외부 공기밀도차이에 의한 효과를 의미한다. 일반적으로 밀도변화는 압력에 의한 영향보다 온도의 차이에 의한 영향이 훨씬 크다. Hartman 등(1997)에 따르면 대기압을 100 kPa로 가정할 경우, 400~500 m이상의 고도차가 있는 터널의 경우에는 유동 기류를 압축성 유체로 처리하는 것이 일반적이며 반드시 상당 수준의 굴뚝효과를 감안하여야 한다.

일반적으로 지형적 효과와 풍압에 의한 경우가 굴뚝 효과에 비하여 상대적으로 우세하다.

3. 외부풍에 의한 자연환기력의 예측

3.1 기압장벽고의 정의

지형적 요인이란 터널 입·출구의 형태와 터널 주변 지형에 의한 요인을 의미한다. 터널 주변지형은 터널의 진행방향으로 부는 외부자연풍에 대하여 기류유동장애벽면이 되어, 자연풍과 충돌하게 되고 자연풍의 유동에너지 중 일부는 충격과 마찰에 의해 손실되며 일부는 정압으로 작용한다. 위와 같은 현상을 풍압효과라 하며, 자연풍의 속도압과 작용하는 정압의 비를 풍압계수라 정의한다. 풍압계수는 풍압효과의 발생요인인 주변지형의 형태 및 크기에 의해 결정되며, 터널 주변에 같은 자연풍이 작용하더라도 터널의 입구와 출구의 주변지형이 다를 경우, 작용하는 정압도 다르다(임용준 등, 2004). 이러한 입·출구의 기압차로 인하여 터널내부에 기류유동이 발생하며, 이를 풍압효과에 의한 자연환기라 한다.

기류의 유동장애벽면인 터널의 주변지형 크기가 클수록 터널에 작용하는 자연환기력은 증가하게 된다. 이때

대기에 유동하는 자연풍의 크기는 일반적으로 최대한계가 있으며, 따라서 터널 입·출구에 작용하는 자연환기력의 최대값은 기류유동장애벽면의 크기와 비례하게 되고, 터널 입·출구 주변지형을 이용하여 풍압계수를 결정하는 장애벽면크기를 정량화한 것이 기압장벽고이다.

Roche(1991)는 기류유동장애벽면의 크기를 기압장벽고(barometric barrier)개념으로 정의하고, 지형과 풍압에 의한 자연환기력의 최대값을 추정하는 방법을 제안하였다. 이러한 기압장벽고의 개념은 산악터널이 많은 국내 상황과 터널의 주변지형을 이용하여 터널 굴착이전에 자연환기력을 예상할 수 있다는 점에서 넓은 적용 범위를 가진다.

그러나 Roche의 기압장벽고의 정의는 입·출구부근의 지형에 국한되어 있으며 터널축에 직각인 면의 고도의 평균값과 최저고도만을 이용함으로써 3차원적으로 다양한 모양을 가지는 장애벽면 크기를 대표하기에는 부적절하다. 또한 적용 범위를 터널진행방향의 수직방향으로 터널 연장의 2배로 정의하고 있지만 터널진행방향으로는 적용 범위를 정의하고 있지 않다. 따라서 고려대상 범위에 대한 차이 및 입·출구로부터 거리에 따른 지형의 변화 영향을 반영하지 못하고 있다는 문제점을 보인다.

이창우 등(2006)은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 그림 3에서와 같이 장애벽면의 총면적을 터널 입·출구지점에서부터 갱구좌우로 터널길이만큼의 범위내의 모든 횡단면의 중합된 투영면적으로 정의하고, 그림 4에서와 같이 입·출구로부터 터널 축방향으로 투영거리를 증대시켜가면서 기압장벽고를 계산하는 방법을 제시하였다. 일반적으로 그림 5에서 보는 바와 같이 일반적인

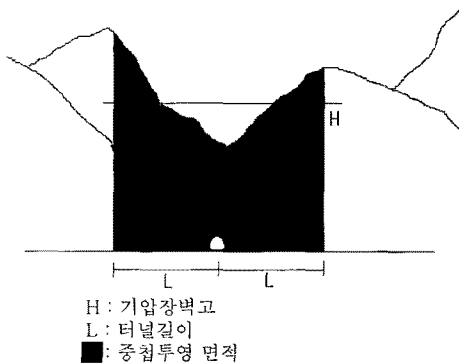


그림 3. 신개념의 기압장벽고 정의

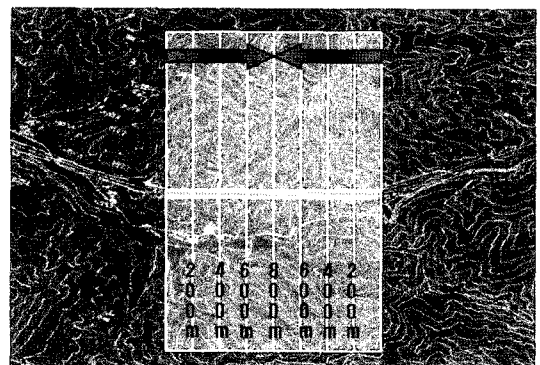


그림 4. 기압장벽고 분석 범위(예)

로 투영기준거리를 증대시킴에 따라 투영된 면적은 증가하다가 일정한 크기로 수렴하는 특징을 보인다.

3.2 기압장벽고의 적용

그림 5는 분석대상 터널의 선형 및 고도분포 특성을 그림 6은 지형도상의 기압장벽고 투영범위를 보여주고 있다. 춘천방향 갱구로부터 총 5400 m를 양양방향 갱구로부터 총 5400 m 거리를 200 m 단위로 중합 투영하였다.

그림 7은 터널의 종단면상의 지형을 도시한 지형도이며 그림 8은 투영방향 및 범위를 보여주고 있다. 한편 그림 9는 춘천방향 갱구로부터 600 m 단위로 중합투영된 투영면적을 보여 주고 있다.

3.3 기압장벽고에 의한 자연환기력 및 자연풍속 추정

표 1은 국내 주요터널에서 측정한 자연환기력의 범위이다. 이를 기준으로 추정한 기압장벽고와 자연환기력

의 최대값의 관계는 식 (2)와 같다. 즉, 기압장벽고 1 m 증가하는 경우 자연환기력의 최대값은 0.45 Pa 정도 증가한다.

$$P_{Nmax} = 0.45 \cdot H \quad (2)$$

P_{Nmax} : 지형 및 풍압에 의한 자연환기력의 최대값(Pa)

H : 기압장벽고(m)

그림 10은 대상터널의 춘천 및 양양방향 갱구로부터 투영된 기압장벽고를 투영거리별로 도시하고 있다. 춘천방향 갱구로부터 투영된 기압장벽고는 750 m 수준에 수렴하나, 양양방향 갱구로부터는 지형적 특성에 따라 지속적으로 증가하여 터널 중간부근에서 640 m 정도를 보이고 있다. 이를 기준으로 추정한 외부풍에 의한 자연환기력의 최대값은 춘천방향이 337 Pa, 양양방향이 288 Pa 정도이며 춘천방향이 상대적으로 크게 작용하고 있다.

최근의 연구결과(이창우 등, 2007)에 따르면 차량이 통행하는 국내 도로터널 내에서의 굴뚝효과의 최대값은 10 Pa 정도인 것으로 알려져 있다. 이를 기초로 하여 추정한 대상터널에서의 최대자연환기력은 표 2와 같이 각각 347 Pa, 298 Pa로 나타났다.

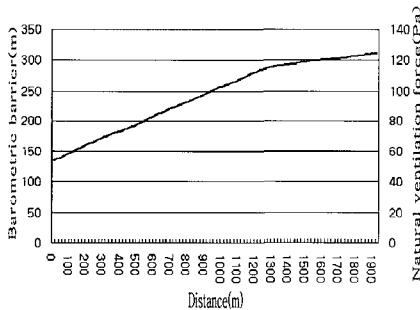


그림 5. 투영기준거리 증대에 따른 기압장벽고 변화

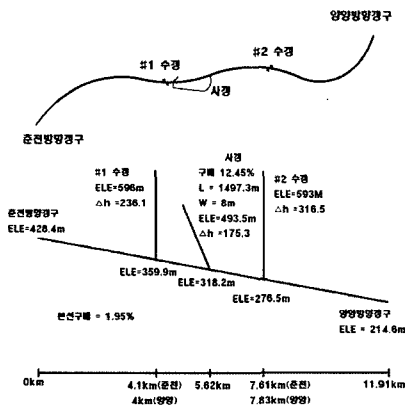


그림 6. 대상터널 선형 및 고도특성도

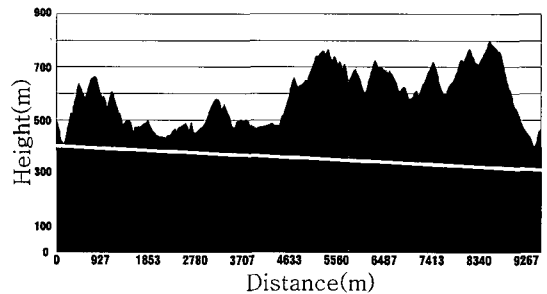


그림 7. 대상터널 종단면상의 지형도

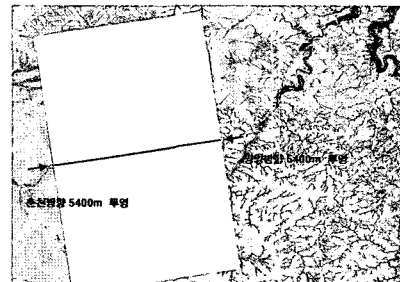


그림 8. 투영방향 및 투영범위

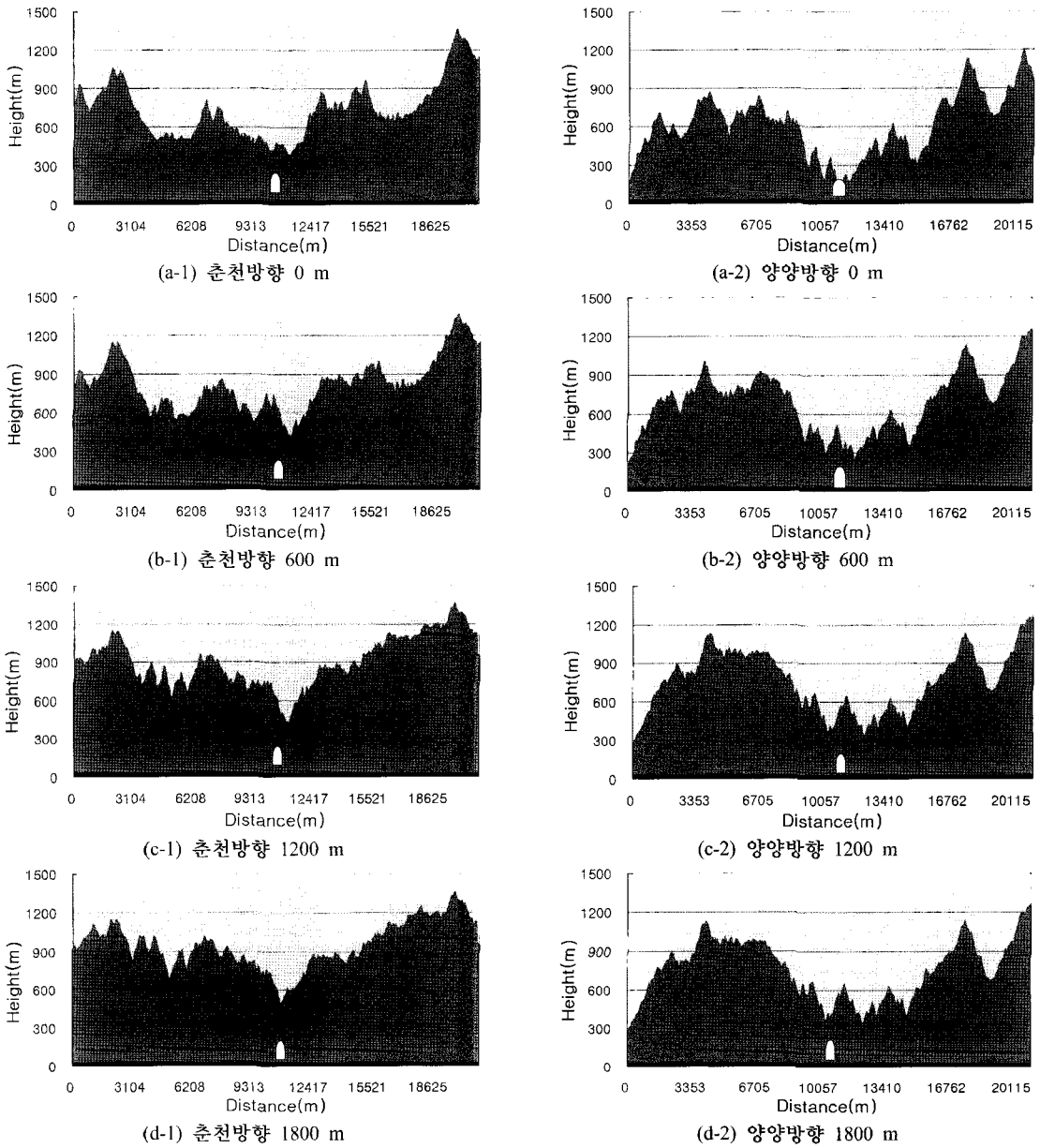
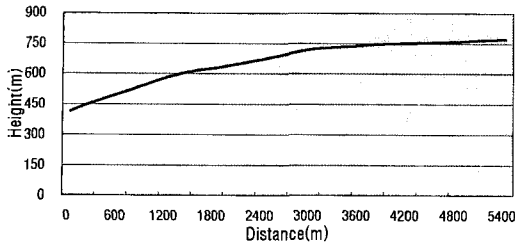


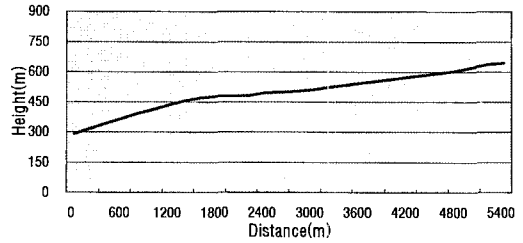
그림 9. 갱구로부터 600 m 단위로 중합투영된 투영면적

표 1. 주요터널 자연환기력

터널	방법	자연환기력(Pa)		측정시기
		총 환기력	굴뚝효과	
임고4 (대구방향)	현장측정	-126.2~109.6	-7.0~10.0	2006.5~6.
고창 (고창방향)	현장측정	-56.6~91.2	0.7~11.4	2007.1~2.
장성 (대전방향)	현장측정	-98.6~54.7	n.a.	2007.2~4.
피반령 (정월방향)	현장측정	-15.1~76.8	n.a.	2008.3.



(a) 춘천방향 갱구기준



(b) 양양방향 갱구기준

그림 10. 기압장벽고 변화 추이

표 2. 대상터널의 추정 자연환기력 및 추정 터널내부 풍속

구분	기압장벽고 (m)	자연환기력(Pa)			자연풍속(m/s)	
		외부풍 효과	굴뚝효과	총 자연환기력	벽면 마찰계수	
					0.025	0.015
춘천방향 갱구 기준	750	337	10	347	4.10	5.22
양양방향 갱구 기준	640	288	10	298	3.88	4.94

터널 준공시 예상되는 터널내 자연풍의 예상 풍속을 다음 식 (3)에서와 같이 터널내 작용 환기력이 자연환기력이 동일한 경우를 가정하여 추정하였으며, 압력손실은 터널내 설치 설비에 의한 영향을 고려한 벽면마찰손실과 양갱구의 충격 손실을 고려하였다. 현재의 국내 도로터널 환기시설 설계기준상 벽면마찰계수인 0.025와 최근의 국내터널을 대상으로 수행한 연구결과 나타난 제트팬 종류식 환기방식을 채택한 고속도로터널의 벽면마찰계수 0.015를 적용 비교 검토하였다.

$$NVF = (1 + \xi + \lambda \frac{L}{D}) \frac{\rho}{2} V_{natural} \quad (3)$$

- NVF : 자연환기력(ρ_n)
- D : 터널대표직경(m)
- ξ : 갱구입구손실계수
- ρ : 공기밀도(km/m^3)
- λ : 벽면마찰계수
- V : 자연풍속(m/s)
- L : 터널연장(m)

추정 자연환기력에 기초한 터널내 유동풍속의 예상값의 계산결과는 표 2에서와 같이 벽면마찰계수 0.025의 경우, 춘천방향으로부터 유입되는 기류는 4.10 m/s, 양양방향으로부터는 3.88 m/s 이나 0.015를 적용하는 경

우에는 자연풍속도가 각각 5.22 m/s, 4.94 m/s 정도로 차이는 각각 1.12 m/s 및 1.06 m/s로 상당한 수준에 이른다.

4. 결 론

현재 국내 최장대 도로터널로 계획된 인제터널을 대상으로 기압장벽고 방법을 적용하여 외부풍압에 의한 최대가능 자연환기력을 예측하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 외부풍압의 크기를 정량화할 수 있는 기준으로서 기압장벽고는 춘천 및 양양방향 각각 750 m, 640 m 정도이며, 이에 따른 자연환기력의 최대값은 각각 337 Pa, 288 Pa로 춘천방향 갱구쪽이 상대적으로 크게 나타났다. 대상터널과 유사한 국내터널에서 최근 측정된 굴뚝효과는 10 Pa 이내이므로 굴뚝효과 및 외부풍에 의한 총 자연환기력은 춘천 및 양양방향 각각 347 Pa, 298 Pa 정도이다.
2. 자연환기력에 의하여 유입되는 터널내 자연풍의 속도는 기존 국내설계기준상의 벽면마찰계수 0.025를 적용하는 경우, 춘천쪽 갱구로부터 4.10 m/s, 양양의 경우 3.88 m/s로 약 4.0 m/s 정도로 나타났다. 그러나 최근 국내 종류식 도로터널에서 측정된 벽면마찰계수의 평균값인 0.015정도를 적용할 경우에는 자연풍

- 속도가 각각 5.22 m/s, 4.94 m/s 정도로 1.12 m/s 및 1.06 m/s 크게 나타난다. 따라서 기존 설계기준인 2.5 m/s 의 약 2배에 달하는 약 5 m/s의 자연풍을 고려한 환기 및 방재설비 용량의 검토가 요구된다.
3. 국내 일부 장대터널에서 설계풍속보다 과다한 자연풍이 측정되고 있으므로, 환기 및 방재시스템 설계 및 운영의 최적화를 위하여, 자연환기력의 추정 방안의 제시가 시급한 실정이다.

감사의 글

본 논문은 2008년도 국토해양부 첨단도시개발사업 “지하공간 환경개선 및 방재기술연구-도로터널 환기시스템개발”으로 수행되었으며 (주)대우건설의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 오세준 등 (2008), “대심도·장대 철도터널의 방재 및 환기계획”, 한국터널공학회지, 제10권, 제4호, pp. 41-51.
2. 이창우, 조홍률, 박홍채 (2007), “터널형 지하공간에서의 자연환기력 현장연구”, 2007 춘계암반공학회 학술발표회, 서울대학교 호암컨벤션센터, pp. 358-371.
3. 이창우, 박홍채, 최판규 (2007), “자연환기력(NVF)이 제트팬 운전효율에 미치는 영향분석 연구”, 한국지구시스템공학회 제 89회 추계학술발표회 논문집, 라마다프라자 제주호텔, pp. 209-296.
4. 이창우, 조홍률, 박홍채 (2006), “도로터널내 자연환기력 영향분석”, 한국터널공학회 2006년 제 7차 터널기계화 시공기술 심포지움, 한국교원단체 총연합회, pp. 113-125.
5. 이창우, 서기윤, 김정욱 (2006), “터널의 기하학적 형태 및 캐노피 설치가 터널 환기 및 화재확산에 미치는 영향 분석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 325-334.
6. 임용준, 강현욱, 이호석(2004), “도로터널 환기설계시 외부자연풍 영향에 대한 연구”, 터널공학회 2004 정기학술발표회논문집, pp. 3-11.
7. 최태희 등 (2002), “도로터널내 화재시 온도분포 및 연기유동 분석 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 37-43.
8. 한국도로공사 (2002), 국내 도로터널 설계기준.
9. Casale, E. et al. (2006), “Influence of the natural ventilation on the transverse ventilation conditions”, 12th AVVT, pp. 479-494.
10. Hartman, H.L. et al., (1997), Mine ventilation and air conditioning, 3rd Ed., John Wiley & Sons Inc.
11. Lee, C., Park, H. and Cho, H. (2007), “On the natural ventilation in local road tunnels: effects of the natural ventilation on the jet fan performance”, Proceedings of the 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, Jeju, Korea, No. AICFM9-215.
12. Roche, L. (1991), “Meteorological influence on tunnel ventilation: three new field experiment”, proceedings of 7th AVVT, pp. 513-544.

접수일(2009.6.11), 수정일(2009.9.11), 게재확정일(2009.9.15)