국내 도로터널내 자연환기력 기초 연구

이창우[1] · 김효규[2] · 강재근[3] · 윤철욱[4]

A Fundamental Study on the Natural Ventilation in Local Vehicle Tunnels

Chang-Woo Lee, Hyo-Gyu Kim, Jae-Geun Kang and Chul-Uk Yoon

1. 서 론

현재 정부는 사회간접자본 확충을 통한 물류비용의 절감이라는 궁극적 목표를 위하여 도로터널의 확충 노력을 적극 경주하고 있으며 터널의 규모 또한 급격히 장대화하고 있다. 또한 환경 및 안전 측면에서의 규제 강화로 인하여 터널환기 시스템이 점점 복잡해져 가고 있는 추세이다. 환기관련 주요 설비는 제트팬, 축류팬, 집진기, 수갱 등으로 대형화 및 자동화에 따라 운영 비용 역시 급격히 증가하고 있으며 운영 비용 중의 대부분은 현재 일반전기로 분류되어 있는 환기설비에 소요되는 전력비로, 장대터널의 경우 km 당 1 MW를 훨씬 초과하는 경우도 많아 SOC (사회간접자본)사업으로 추진되는 도로터널의 건설 및 운영상의 문제점으로 지적되고 있다.

터널에 작용하는 자연 환기력, 기계 환기력, 교통 환기력 중 현재 정량화가 되지 않은 자연 환기력은 입출구 고도차, 내외부 온도차이, 외부풍압 등에 의한 환기력이며 기상의 계절적 변동이 크며 산악지형이 많은 국내의 경우 자연환기력에 의한 영향이 상당히 큰 편으로 추정되며 한국도로공사 환기설비 설계기준에도 최악의 기상 조건시의 자연 환기력에 의한 터널내 환기속도를 2.5 m/s로 가정하고 있다. 그러나 자연 환기력의 중요성에도 불구하고 정량화의 어려움으로 인하여 국내에서는 아직 현장조사가 전무한 실정이다.

본 연구에서는 자연환기력을 연구하여 궁극적으로는 정량화 및 모델화를 통하여 환기설비의 운영에 활용하므로써 환기시스템의 운영 비용을 최소화하려는 목적으로 기초연구를 수행하였다.

2. 자연 환기압 측정

본 연구에서는 경기도 용인군에 위치한 영동 고속도로 상의 마성터널 상 · 하행 터널과 대구 광역시 달성군에 위치한 구마고속도로 상의 달성 1호 터널 상 · 하행 터널을 조사 대상으로 하였으며 1998년 8월 17일~9월 14일 사이에 각 터널별로 5일 이상에 걸쳐 조사하였다. 측정은 월요일부터 금요일 사이는 오전 6:00~11:00, 오후 16:00~22:00에, 토요일은 06:00~18:00에, 일요일은 11:00~23:00에 진행하였다.

2.1 자연 환기압의 정의

터널내에서의 unsteady flow equation은 다음과 같으며 교통 환기압($\triangle P_v$), 환기설비 환기압($\triangle P_F$), 자연 환기압($\triangle P_{MT}$), 입출구 및 내부손실($\triangle P_L$)이 환기력을 결정하고 있음을 알 수 있다. 자연환기압은 (1)고도차에 의한 압력차($\triangle P_H$), (2)온도차에 의한 압력차($\triangle P_{Temp}$), (3)갱구면에 작용하는 풍압($\triangle P_{Wind}$)에 의한 환기압으로 구분된다.

1) 정회원, 동아대학교 자원공학과 교수
2) 학생회원, 동아대학교 자원공학과
3) 선진엔지니어링
4) 한국도로공사

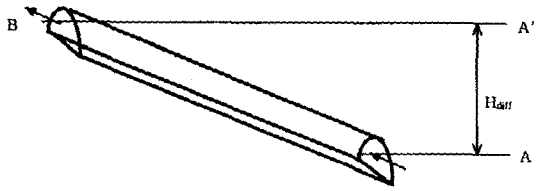

Fig. 1. Natural ventilation head by elevation and temperature differences

$$\triangle P_{temp} = H_{diff} \times \left(\frac{\rho_{A'} + \rho_A}{2} - \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \right) \quad \text{(단위 : mmAq)}$$

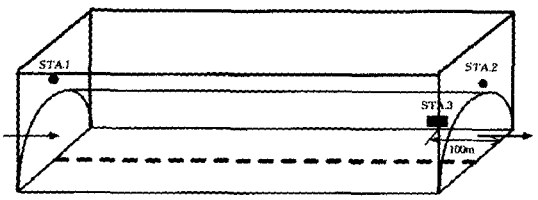

Fig. 2. Measurement layout

$$\rho L \frac{du}{dt} = \triangle P_v + \triangle P_F - \triangle P_L - \Delta P_{MT}$$

ρ : 터널내부 공기밀도, u : 환기속도

고도 및 내외부 온도차이에 의한 자연 환기압의 경우, 평균 온도를 기준으로 한 밀도에 따라 Fig. 1에서와 같이 계산 가능하나 외풍압의 경우 압력손실계수(K)는 외풍의 유동 패턴이 일정할 경우 K가 일정하지만 실제로 외풍의 유동은 순간적인 변동폭이 큼에 따라 항상 변화하게 되므로 갱구면의 형태에 따라 큰 차이를 보이는 것이 일반적이다.

$$\triangle P_H + \triangle P_{Temp} = H_{diff} * (\rho_{out} - \rho_{in})$$

$$\triangle P_{Wind} = K \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$\triangle P_{Wind} = \left(1 + \zeta_{ent} + \lambda \frac{L}{D_h} \right) \frac{1}{2} \rho V_n^2$$

H_{diff} : 터널 갱구간 고도차, V : 갱구면에 수직방향인 외부 풍속(free stream velocity)

L : 터널 길이, D_h : 터널 대표직경, K : 압력 손실계수

ζ_{ent} : 입구 shape factor, λ : 내부마찰 계수, V_n : 내부 풍속

2.2 측정 대상터널

본 연구의 측정대상인 마성 및 달성 1호 터널은 국내 고속도로 터널 중 가장 많은 환기설비(제트팬)가 설치된 터널로 환기설비의 가동 효율성 문제가 대두되고 있는 현장으로 관심의 대상이 되고 있다. 환기방식은 제트팬을 이용한 종류식을 채택하고 있으며 마성터널의 경우 시간대에 따라 교통정체를 경험하고 있어 환기설비의 제어에 많은 문제가 제기되고 있다.

2.3 측정방법

터널 입출구 갱구면 직상부에 기상 자동 측정 모니터를 설치하여 풍향, 풍속, 기압, 온도, 습도 등을 1분 간격으로 측정 기록하여 갱구면에 직각방향으로 작용하는 풍속을 계산하였다. 터널 내부 온도의 경우 내부 온도 분포의 특성을 고려하여 출구로부터 약 100 m 점에서 sling psychrometer를 이용하여 풍속, 기압과 동시에 측정하였다.

<마성터널>

구 분	상 행	하 행
연장(m)	1,450	1,450
차선수	2차선	2차선
통행방식	일방향	일방향
구배(%)	+0.62	-0.62
내공단면적(m^2)	60.4	60.4
대표직경(m)	8.05	8.05
평균표고(m)	100	100

<달성 1호 터널>

구 분	상 행	하 행
연장(m)	1,380	1,360
차선수	2차선	2차선
통행방식	일방향	일방향
구배(%)	-1.8	+1.8
내공단면적(m^2)	60	60
대표직경(m)	8.0	8.0
평균표고(m)	180	180

Table 1. Measured natural ventilation head at Masung and Dalsung 1 Tunnels

터널	날짜	시간	외부 평균				내부 평균				자연 환기압(mmAq)		
			기압 (KPa)	건구 온도 (℃)	습구 온도 (℃)	밀도 (kg/m^3)	기압 (KPa)	건구 온도 (℃)	습구 온도 (℃)	밀도 (kg/m^3)	$\triangle P_{Temp} + \triangle P_H$	$\triangle P_{Wind}$	$\triangle P_{MT}$
마성상행	8/18	17:30~19:00	98.71	28	25	1.120	99.24	30.5	25.8	1.126	-0.1566	0.0495	-0.1516
마성상행	8/19	18:30~19:00	98.81	27	24	1.135	99.46	30	25	1.131	0.1044	-0.0003	0.1041
마성상행	8/20	19:00~20:00	99.03	26.4	23.8	1.140	99.58	29.5	25	1.134	0.1566	0.0280	0.1846
마성상행	8/21	19:00~20:00	99.23	22.5	21	1.159	99.80	27	23.5	1.147	0.3132	0.6174	0.9300
마성상행	8/22	13:00~14:00	99.25	27.8	25	1.136	99.81	29	25	1.138	-0.0522	0	-0.0522
마성상행	8/23	19:00~20:00	98.59	23.1	22.5	1.148	99.07	28	25	1.113	0.3915	-0.2520	0.1395
마성하행	8/27	18:30~19:30	98.64	23	23	1.148	99.13	25.5	24	1.144	0.1044	0	0.1044
마성하행	8/29	16:00~17:00	98.63	25.2	21	1.142	99.26	27	22	1.142	0	0	0
마성하행	8/30	12:00~13:00	98.95	30.9	23	1.124	99.49	28	22.9	1.140	0.4205	0	0.4205
마성하행	8/31	07:00~08:00	99.36	20.2	19	1.171	99.73	23.5	20.5	1.162	-0.2365	-0.0032	-0.2397
달성1 하행	9/4	07:30~08:00	99.11	18.7	17.8	1.173	99.21	22	18.5	1.163	0.0843	0.0085	0.0928
달성1 하행	9/4	17:00~17:30	98.43	29.2	22	1.125	98.93	27.8	21.9	1.136	-0.0928	0	-0.0928
달성1 하행	9/5	07:30~08:30	98.74	20.8	19.8	1.160	98.97	26	22.5	1.142	0.1602	0.0164	0.1766
달성1 하행	9/6	12:00~12:30	98.48	29.3	24	1.123	98.76	26.5	21.9	1.139	-0.1349	0.0030	-0.1319
달성1 하행	9/7	07:30~08:00	98.52	19.7	19.2	1.162	98.78	23.7	20.9	1.149	0.1096	0	0.1096
달성1 상행	9/11	10:00~10:30	99.09	28	24.2	1.134	99.82	29	24	1.140	0.0513	0	0.0513
달성1 상행	9/12	12:00~12:30	99.11	32	24.5	1.120	99.75	30	23.5	1.136	0.1369	-0.0756	0.0613
달성1 상행	9/13	12:00~12:30	99.48	29.8	24.8	1.132	99.93	28	22.6	1.146	0.1198	-0.0030	0.1166

2.4 측정 결과

다음의 Table 1은 각 터널별 주요 시간대(외부 풍속의 크기 기준)의 자연 환기압 계산결과를 보여주고 있다.

3. 결과 고찰

마성 및 달성 1호 터널의 입출구 고도차이는 9~24.8 m에 불과하여 고도차이에 의한 자연 환기압은 거의 "0"이며, 내외부 온도차이에 의한 부양효과(buoyant effect)도 최대 0.42 mmAq에 지나지 않음을 알 수 있다. 갱구면에 작용하는 풍압에 의한 자연 환기압은 0.62 mmAq 이하 범위를 나타냄에 따라 터널내에 작용하는 총 자연환기압은 -0.24~0.93 mmAq로 교통 환기압 및 환기설비 환기압에 비교하여 상대적으로 낮은 환기압으로 분석되었다. 총 자연 환기압의 최대값 0.93 mmAq는 1142.5 m 길이의 오스트리아의 Mitterberg 터널에서 측정된 최대 1.22 mmAq에 비하여 약간 작은 수치이다.

4. 결 론

국내 도로터널을 대상으로 최초로 자연 환기압을 측정한 본 연구를 통하여 태풍 등의 영향을 받지 않는 기상조건

하에서의 자연 환기압은 비교적 작은 최대 0.93 mmAq 이하의 범위를 나타내었다. 도로터널내에 작용하는 환기압 중 정량화가 가장 어려운 자연 환기압은 교통 환기압과 환설비 환기압에 비하여 외부 기상조건의 변화에 따라 크기 및 방향의 순간적인 변동 폭이 큰 편이므로 도로터널 환기설비의 최적 운영을 위하여 반드시 체계적으로 연구되어야 할 분야이다.

참 고 문 헌

1. Roche, L., 1991, "Meteorological influence on tunnel ventilation; three new field experiments," proceedings of the 7th aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Brighton, UK, pp. 513-544.
2. Maarsingh, R.A. and L. Swart, 1991, "Wind-tunnel experiments on wind effects at tunnel portals," proceedings of the 7th aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Brighton, UK, pp. 545-562.
3. Brun. A.C. de and R.A. Maarsingh, 1997, "New attempts to solve an old problem : aerodynamic measurements in new vehicle tunnels," proceedings of the 9th aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Aosta Valley, Italy, pp. 3-23.
4. 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," proceedings of the 9th aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels, Aosta Valley, Italy, pp. 25-41.
5. 이창우 등, 1998, 터널환기시설 현장조사 및 분석, 한국도로공사.