

도로터널 방재팬 운전효율과 자연환기력 관계연구

박홍채, 조홍률, 이창우
동아대학교

Emergency Fan Efficiency and Natural Ventilation in Road Tunnel

Hongchae Park, Hongryool Cho, Changwoo Lee
Dong-A University

1. 서 론

도로터널내 비상시 방재팬 운전에 따른 입계풍속의 확보는 인명피해의 최소화를 위하여 반드시 필요한 사항이다. 최근 일부 장대터널에서의 소방훈련시 제기되는 자연환기력(NVF)에 의한 입계풍속 확보상의 어려움이 대두되고 있어 NVF에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. NVF는 터널 내외부 기상조건, 터널주변의 지형, 터널 자체의 구조 특성들에 따라 좌우되며 특히 터널 외부의 풍향/풍속/온·습도의 변화에 따라 NVF는 방향과 크기가 순간적으로 변하며 변화폭도 큰 편이다. 지형 및 터널 구조적 특성에 따른 영향은 정량화가 어려워 국내의 관련 연구가 극히 제한적이며 NVF의 정량화 연구는 전무한 실정이다.

본 논문에서는 국내 장대터널에서의 NVF와 방재팬의 운전효율을 측정함으로써 NVF가 운전효율에 미치는 영향을 분석함을 목적으로 한다. 따라서 궁극적으로는 NVF의 예측방안 마련을 통한 방재시스템의 최적화라는 목표를 가지고 연구를 수행하였다.

2. 국내 방재팬 설계기준 및 문제점

국내유일의 도로터널내 방재팬 설계용량 결정에 관한 기준을 제정하고 있는 한국도로공사의 기준에 따르면 방재팬은 차량진행방향과 반대방향으로 2.5m/s(일방통행) 또는 1.5m/s(대면통행)의 NVF에 의한 풍속이 형성되는 시나리오하에서 입계속도를 유지하기 위한 최소용량을 방재팬 용량으로 결정하고 있다. 그러나 이와 같은 팬 용량 결정 방법에는 다음과 같은 NVF에 관련된 심각한 문제가 제기된다.

- 방재팬 가동 후에 입계풍속 확보까지의 소요시간에 대한 기준미비에 따른 문제,
- 방재팬 가동 초기의 터널내 풍향/풍속에 따른 방재팬 가동의 차이에 대한 점을 고려하고 있지 않아서 역풍시에 심각한 문제발생이 우려,
- 방재팬 가동시의 NVF 변동에 따른 영향을 고려하지 않은 문제.

따라서 NVF가 방재팬 가동이 요구되는 대피방향과 반대방향으로 작용하는 경우, 입계속도 확보에 과도한 시간이 소요될 뿐만 아니라 입계속도를 확보할 수 있다는 보장도 없다.

3. 자연환기력의 현황과 문제점

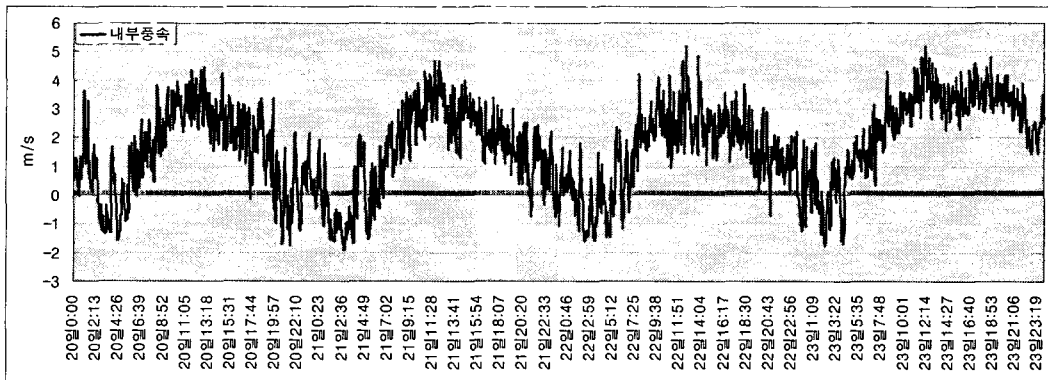
3.1 현황

터널의 실제 작용하는 NVF의 측정을 위하여, 1.6~3.8Km 길이의 국내 터널 세 곳에서 현장 측정 기상데이터 및 주변지형에 기초한 NVF의 크기는 <표1> 과 같다. NVF 계산은 첫째, 터널내부 입·출구 내부 150m 지점에서 측정한 기압을 경정기압으로 변환하여 구하는 방법과, 둘째, 터널내부 풍속과 기타 환기력을 고려하여 구하는 방법을 적용하였다. 세 터널 모두 최대 90Pa 이상의 크기를 보이고 있으며, 특히 임고4터널, 장성터널의 경우 NVF가 -100Pa 이상의 크기를 보인다. NVF중 터널의 내외부 밀도 차이에 의한 굴뚝효과는 대략 10Pa 내외의 값을 보인다.

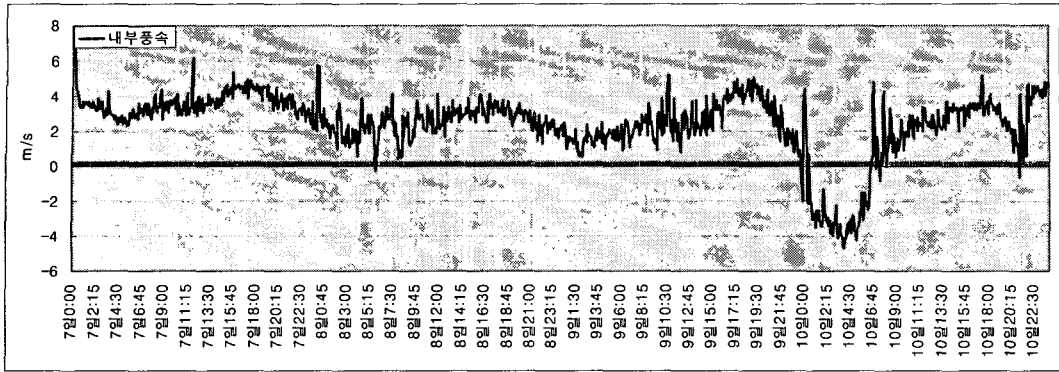
<표1> 현장실험 자연환기력

	위치	길이(m)	평균고도(m)	차선수(lane)	자연환기력(Pa)	굴뚝효과(Pa)
임고4터널	대구-포항 고속도로	1,667	222.3	3	-126.2~109.6	-7.0~10.0
고창터널	고창-담양 고속도로	3,820	148.5	2	-56.6~91.2	0.7~11.4
장성터널	고창-담양 고속도로	3,581	114.7	2	-98.6~54.7	

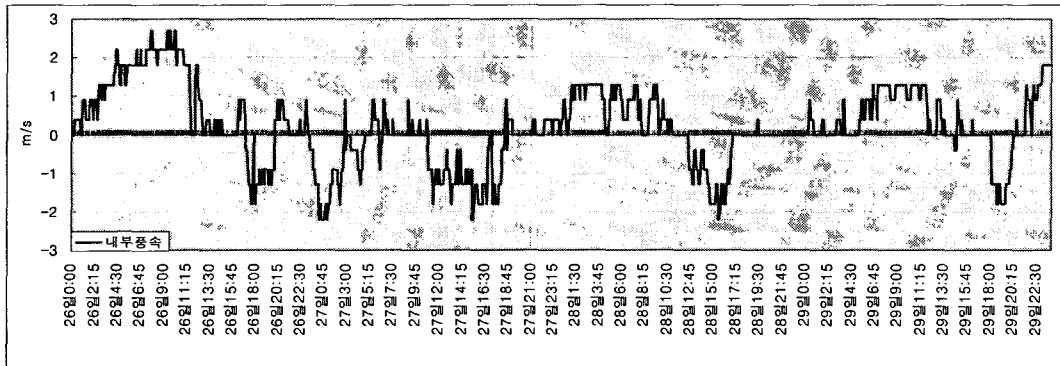
<그림 1, 2, 3> 은 장성, 임고4, 고창터널의 시간에 따른 내부풍속의 전형적인 분포 형태를 나타낸다. 세터널 모두 자연환기력의 영향을 뚜렷하게 보여주는 형태의 속도분포가 24시간을 주기로 하여 반복되고 있다. 교통량이 상대적으로 많은 임고4터널의 경우 역풍발생이 빈번하지 않지만 교통량이 극히 적은 장성터널과 개통전인 고창터널의 경우, 장성은 00:00-06:00 사이에, 고창터널은 11:00-23:00에 역풍이 발생하는 매우 규칙적인 분포를 보이고 있다.



<그림 1> 장성터널 내부풍속



<그림 2> 임고4터널 내부풍속



<그림 3> 고창터널 내부풍속

터널내부 풍속의 주기성과 순풍 및 역풍시의 최대 풍속은 <표 2>와 같다.

<표 2> 터널의 주기표

터널명	주기	순풍시		역풍시	
		시간대	최대풍속 (m/s)	시간대	최대풍속 (m/s)
임고4	24시간	06:00-24:00	6.8	00:00-06:00	-4.7
고창	24시간	23:00-11:00	2.7	11:00-23:00	-3.6
장성	24시간	06:00-24:00	5.3	00:00-06:00	-4.55

3.2 문제점

기존의 이론식을 내부 자연풍속이 3m/s의 3Km길이 터널에 적용한 경우, 여타 환기력의 작용이 없는 경우, NVF는 약 40Pa정도이다. 그러나 Casale(2006)은 11km의 몽블랑터널에서의 자연환기력이 이탈리아에서 프랑스쪽으로 부는 편향상의 영향으로 최대 1000Pa에 달하는 것으로 발표하였으며 국내 현장실험(이창우 등, 2007)에서도 100Pa 이상의 NVF가 계측되었다. 터널내에서의 100Pa 환기력은 환기팬 10대의 환기력에 상당하는 크기이다. 따라서 NVF가 통행방향과 반대로 작용하는 경우, 화재시 제연상의 문제로 인하여 안전한 대피경로의 확보가 어려워지는 문제가 제기된다.

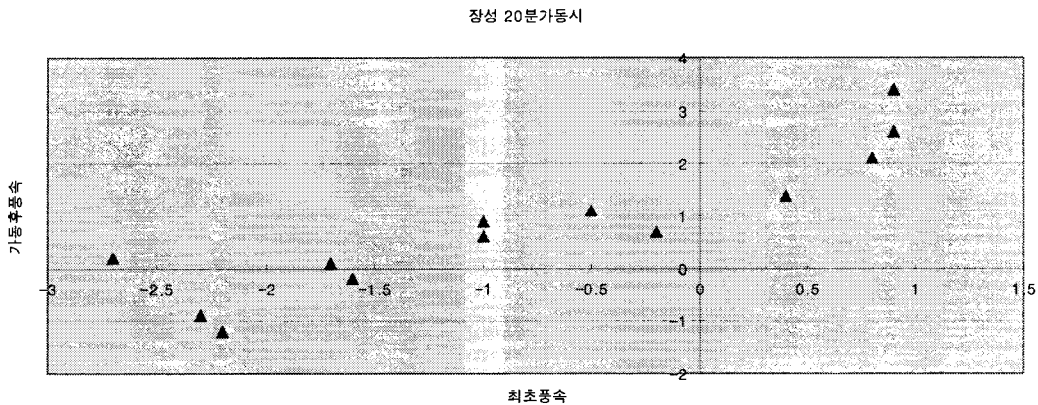
4. 방재팬 운전효율 결정에 자연환기력의 영향

4.1 방재팬 가동효율

장성터널을 대상으로 교통환기력이 최소화 되는 00:00-06:00시 사이에 $\Phi 1030$ 제트팬 10대를 모두 가동하여 제트팬 환기효율 실험을 하였으며 터널외부풍속과 교통환기력, 제트팬 가동에 따른 풍속변화를 분석하였다.

- 풍속증가폭

현 설계기준에 따라 결정된 방재팬 용량의 적정성을 분석하기 위하여 팬 가동후의 최종 풍속의 크기를 분석하였다. 장성터널에서의 제트팬 가동시 터널내부의 풍속이 뚜렷하게 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며, 제트팬 가동에 따른 증가폭이 최소 0.9m/s 최대 3.8m/s로 평균 1.7m/s의 증가폭을 보였다. <그림 4>는 제트팬을 20분 가동한 경우, 가동 전·후의 풍속관계를 도시한 그림이다.

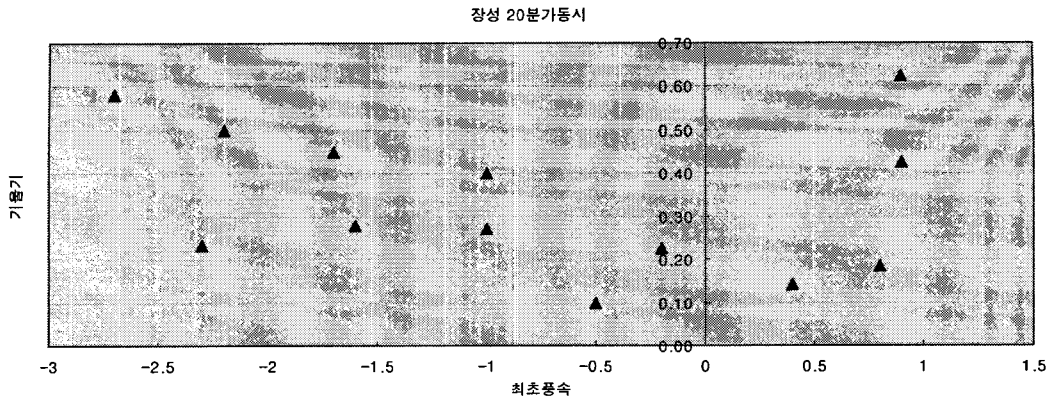


<그림 4> 제트팬 가동전 풍속과 가동후 최대풍속관계

<그림4>에서 볼 수 있듯이 제트팬 가동 전·후의 풍속관계는 뚜렷한 선형관계를 보이고 있으며 $V_{final} = 0.93 V_{initial} + 1.56$ ($R^2: 0.81$)로 나타났다. 또한 2007.2.9-2007.2.13일 사이에 총13회 걸쳐 수행한 20분 가동 실험결과 팬 가동시 풍속증가폭은 2.9m/s 이었으며 가동후의 풍속이 2m/s를 상회하는 경우는 23%에 불과하였다. 따라서 이와 같은 NVF 하에서 화재발생시 방재팬 가동만으로는 임계풍속을 확보할 수 없는 문제가 발생할 가능성이 있다.

- 풍속증가율

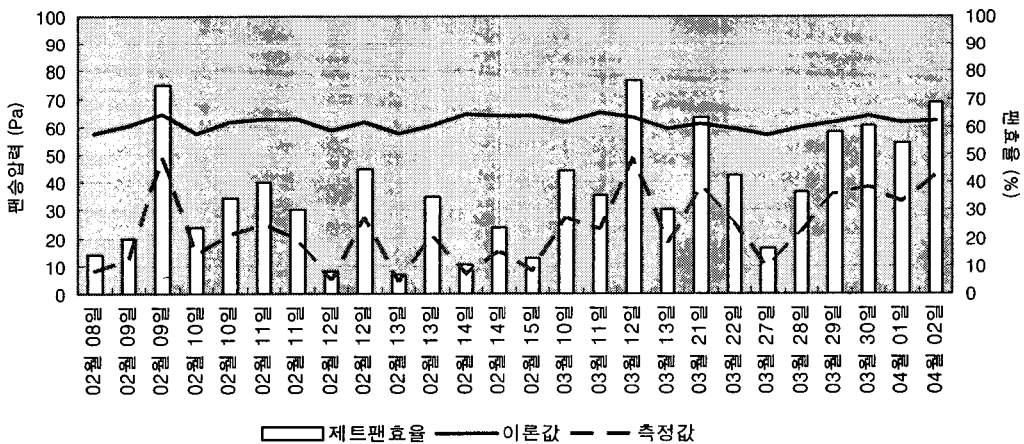
임계풍속의 확보에 소요되는 시간을 알기위하여 팬 가동후의 풍속증가율에 대한 분석을 수행하였다. 가동후 초기 풍속 상승율과 풍속의 관계는 <그림 5> 와 같다. 터널 내부 풍속이 역방향으로 클 경우, 최대증가율이 -2.7이었으며 풍속이 0에 가까워질수록 증가율은 낮아지고 있다. 이와 같은 경향은 순풍일 경우에도 동일하여 최대 0.9의 증가율을 보였다. 또한 제트팬을 30분 가동한 실험 결과도 위의 경우과 비슷한 결과를 나타내었다



<그림 5> 장성터널 20분 제트팬 가동시 풍속 상승 기류기와 풍속

- 방재팬 운전효율

현장실험을 통하여 구한 제트팬 환기력과 이론치와의 관계를 <그림 6>에 도시하였다. 제트팬의 이론적 승압력은 57.1Pa-65.0Pa로 추정되었으나 실제 측정된 승압력은 3.8Pa-48.6Pa로 효율은 6.7%~76.6%였다. 터널내 기류의 관성력과 NVF의 방향/크기와의 상호관계의 영향을 가장 많이 받은 결과이며, 제트팬 주위 난류유동에 따른 에너지손실 또한 제트팬 환기효율의 감소를 초래하였다고 판단된다.

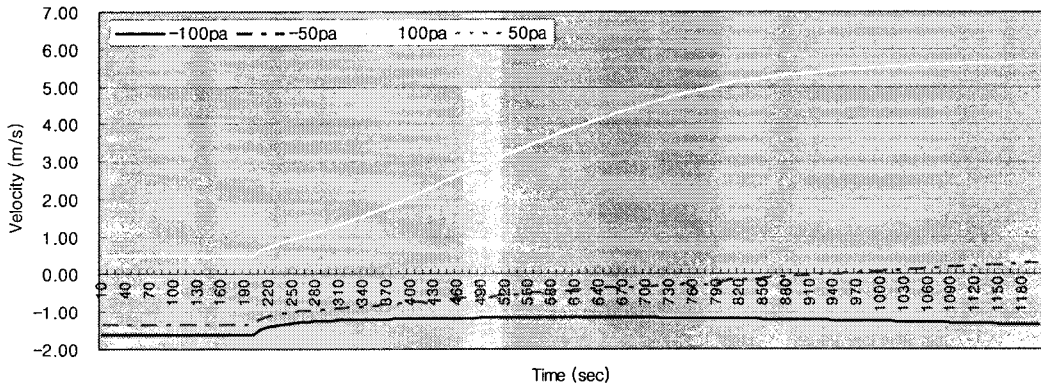


<그림 6> 제트팬 환기효율과 자연환기력

- 방재팬 가동시의 자연환기력의 영향 CFD 분석

자연환기력의 CFD분석을 위하여 미국 Memorial tunnel 실험실실험을 통하여 개발된 SOVENT을 이용하여 길이 1880m, 2차선, 구배 1.28%의 가상터널에 작용하는 NVF의 크기가 -100Pa, -50Pa, +50Pa, +100Pa일 경우, 추력 920N의 제트팬 8대를 가동한 후의 1200초동안의 풍속변화를 분석하여 <그림 7>에 도시하였다. NVF가 역으로 작용하는 상황에서는 실제 팬가동실험에서와 마찬가지로 -100Pa 일때 -50Pa 보다 풍속증가율이 상대적으로 크게 나타났으며 NVF가 순방향일때는 100Pa일때가 50Pa 일때보다 증가율

이 크게 분석되었다. 또한 NVF가 -100Pa 일 경우에는 제트팬 가동 후에도 기류방향의 역전이 불가능하였으며 NVF가 -50Pa 경우에도 기류방향의 역전에 이는 방재팬 가동 후 임계풍속 확보까지 소요되는 시간에 대한 기준마련을 위하여 중요한 자료이다.



<그림 7> 자연환기력과 제트팬 가동에 따른 내부 풍속변화

4.2 문제점

장성터널 현장실험에서 나타난 바와 같이 NVF의 영향에 의하여 제트팬의 운전효율이 이론치에 비하여 상대적으로 낮게 난 문제점과, 국내 설계기준에 따라 결정된 방재팬의 가동시에도 임계속도를 확보할 수 없었던 문제점 등은 향후 NVF의 측정 및 영향에 따른 문제의 이해와 해결방안장구에 대한 노력이 반드시 필요함을 보여주고 있다.

5. 결론

- 국내 3개 장대터널을 대상으로 수행한 NVF관련 연구결과를 정리하면 다음과 같다.
- NVF는 순방향 최대 109Pa, 역방향 최대 126Pa 정도이었으며 NVF의 영향에 따라 터널내부 풍속은 24시간 주기의 분명한 분포형태를 보였다.
- 방재팬 가동시에 따른 풍속증가폭이 0.9m/s-3.8m/s(평균 1.7m/s)이었으며 가동전·후의 풍속은 뚜렷한 선형관계를 보이고 있다.
- 방재팬 가동시 초기풍속 증가율은 초기풍향에 관계 없이 풍속이 클 경우가 작은 경우에 비하여 상대적으로 크게 나타나 역방향 초기 풍향일 경우, 최대 -2.7, 순방향의 경우에는 최대 0.9의 증가율을 보였다.
- 승압력의 측정값과 이론값의 비율로 정의한 방재팬 운전효율은 6.7%~76.6%에 불과하였다.

6. 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 석사
 7. S J Patal, 2003, "Jet fan ventilation systems for the St .Louis MetroLink Light Rail System" 11th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp309~322
 8. K C Karki and S V Patankar, 2000, "CFD model for jet fan ventilation systems" 10th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.355~380
 9. M Kogaku, 2000, "Appropriate JF installation interval obtained by booster capacity measurements" 10th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp431~446
 10. 한국도로공사, 2001, "도로설계요령 제 4권 터널", pp. 234~267
 11. Casale, E., et al., 2006, "Influence of the natural ventilation on the transverse ventilation," 12th AVVT, pp. 479-494
 12. 이창우, 조홍률, 박홍채, 2007, 터널형 지하공간에서의 자연환기력 현장연구, 2007 춘계 암반공학회 학술발표회, pp.358~371