

터널화재 제연방식의 비교

고경찬, 박외철*

부경대학교 대학원 안전공학과, 부경대학교 안전공학부*

Comparison of Smoke Control System for Tunnel Fires

Kyung-Chan Ko, Woe-Chul Park*

Graduate School, Pukyong National University,
School of Safety Engineering, Pukyong National University*

1. 서론

산악지형이 많은 국토의 효율적인 활용과 환경보존, 그리고 차량의 주행 편의 등을 위해 많은 터널이 건설되고 있다. 현재 국내 도로의 400여개 터널 중 75% 이상이 1990년대 이후 건설되었고, 길이 1km 이상의 장대터널 63개가 건설되었다. 도로의 총연장 대비 터널연장 비율도 점점 증가하는 추세이다.^{1,2)} 터널 및 지하차도는 협소한 공간으로 차량통행에 의한 위험, 화재발생시 피난과 연기유동 경로의 일치 등의 위험성이 있는 특수한 장소로서 대형사고가 일어날 수 있다. 특히 2005년 국회 건설교통위원회에 제출된 자료에 따르면 길이가 500m 이상인 125개의 철도터널 중 96.8%가 비상구가 없는 것으로 나타났다.

터널내에서는 태양으로부터 복사가 차단되어 있고, 개구부가 한정되어 있어 공기흐름이 제한을 받아 자동차로부터 배출되는 매연이나 가스 오염물질이 효과적으로 배출되지 않는다. 그리고 터널내의 CCTV도 연기의 빠른 확산 때문에 화재위치 파악과 같은 소방활동 상의 중요한 기능을 하지 못하게 된다.^{3,4)} 화재의 위치를 빨리 확인하고 이에 대한 피난 및 소방활동이 신속히 이뤄져야 인명피해를 최소화할 수 있다. 터널내 환기 방식은 크게 종류식과 반횡류식, 횡류식으로 나뉘지고, 이 중에서 국내 많은 터널이 종류식인 제트팬(jet fan)방식을 사용하고 있다. 제트팬방식은 교통환기력을 유효하게 이용하고 설치비가 경제적이어서 흔히 시공되고 있다. 그밖의 급기방식의 반횡류식과 급배기방식의 횡류식 환기방식이 있다. 일반 구조물 화재와 같이 터널내 화재에도 화염에 의한 피해보다는 연기질식에 의한 인명피해가 많기 때문에 공조시스템과 연동하는 제연시스템의 연구가 활발히 이뤄지고 있다.

강신형⁵⁾은 터널내 제트팬의 설치위치에 따른 환기성능을 수치해석으로 분석하였으며, 양판석 등⁶⁾은 종류식 환기방식을 채택한 장대터널에서 교통량에 따른 유해가스의 농도, 공기속도 분포 등을 측정하였다. Kurioka 등⁷⁾은 종류식 환기방식 터널의 공간형태에 따른 화재특성을 축소실험으로 조사하였다. Vauquelin와 Megret⁸⁾은 공기와 헬륨 가스를 이용한 실험으로 배개구의 위치와 모양, 열방출률의 변화에 따른 연기배출효율을 비교하였다. 민동호와 손봉세⁹⁾는 터널내 30MW 화재에 대한 열전달 및 연기거동의 특성과 피난에 대해 수치연구를 수행하였다.

터널내의 환기는 물론 화재시 제연의 중요성에 따라 따라 본 연구에서는 터널의 대표적인 환기방식인 종류식 제트팬방식과 횡류식 배기방식을 모델로 하여 화재시 연기 배출 효과를 전산유체역학 프로그램으로 분석하였다. 장대터널의 일부구간을 단순화한 공간에 제트팬을 이용한 제연방식과 배기구를 이용한 제연방식에 따라 공간내 온도변화, 일산화탄소, 가시거리 등의 변화를 비교분석하였다. 이를 통하여 터널환기 및 제연시스템의 개발과 효율성 제고를 위한 연구에 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치모사

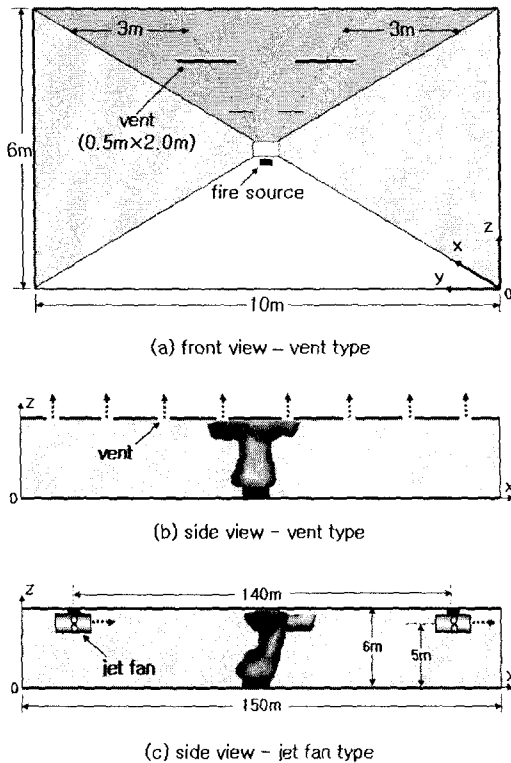


Fig. 1. Computational configurations

로 이를 16개의 배기구 전체 단면적으로 나눈 값인 3.13m/sec로 하였다.

화원은 터널 중앙 $x = 75m$, $y = 5.0m$ 에 위치하고, $3m \times 2m \times 1m$ 크기의 경유가 상부표면에서 연소하는 20MW의 풀(pool)화재로 하였다. 화재크기 20MW는 터널의 제연설비 설치기준(NFSC 501 제12조)에 명시된 제연용량의 산정에 따른 기준 화재강도에 따른 것이다. 터널내 초기공기온도와 외부에서 유입되는 공기의 온도는 $20^{\circ}C$ 로 하였다. 그리고 계산시간은 600초이며, FDS v. 4.0¹⁰⁾을 사용하였다. 화재시 차량정체를 고려하여 터널내의 초기 공기의 유동은 없는 것으로 가정하였다.

장대터널내 제트팬은 일반적으로 제트팬의 내경을 기준으로 1030mm는 140m, 1250mm는 160m, 1530mm는 180m의 간격으로 설치한다. 이에 따라 본 연구에서는 편의상 $1m \times 1m$ 의 정사각형 단면을 가진 제트팬이 140m 간격으로 설치된 것으로 가정하였다. 터널공간의 크기는 Fig. 1과 같이 $150m \times 10m \times 6m$ 로 하고, 격자수는 $300 \times 20 \times 12$ 로 하였다. 제연효과를 비교하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 배기구(vent)를 통한 제연방식과 Fig. 1(c)와 같은 제트팬을 이용한 제연방식으로 나누어 계산하였다. 배기방식은 터널천장에 16개(8개 \times 2열)의 배기구를 설치하고, 각 배기구를 통한 배기풍속을 3.13m/s로 하였다. 제트팬방식에서는 터널공간내 단면적이 $1m^2$ 인 제트팬이 $x = 5m$ 인 곳에 2개, $x = 145m$ 인 곳에 2개를 설치하고, 1개당 배기속도는 25m/s로 하였다. 제트팬의 중심축 높이는 바닥으로부터 5.0m이다.

Table 1은 배기구의 위치와 제트팬의 위치, 단면적 등 두가지 방식에 대한 세부 조건을 나타낸 것이다. 제트팬에서의 토출풍속은 양관석 등⁶⁾의 실험에 적용된 토출량 $25m^3/sec$ 를 기준으로 하여 25m/s로 하였다. 배기구에서의 배기속도는 제트팬방식에서 두 개의 제트팬이 $50m^3/sec$ 를 배출하

Table 1. Specifications of vent system and jet fan system

system	specification
vent	vent size : $1\text{m}^2(0.5\text{m}\times 2.0\text{m})$ no. of vents : 16 exhaust velocity : 3.13m/s locations : $x= 5\text{m}, 25\text{m}, 45\text{m}, 65\text{m}, 85\text{m}, 105\text{m}, 125\text{m}, 145\text{m}$ ($y= 3.0\text{m}, 7.0\text{m}$)
jet fan	exhaust area : 1m^2 no. of jet fans : 4 exhaust velocity : 25m/s locations : $x= 5\text{m}, 145\text{m}(y= 4.0\text{m}, 6.0\text{m})$

3. 결과 및 분석

터널공간 폭방향 중앙지점($y=5.0\text{m}$)이고 바닥면에서의 높이 1.5m 인 수평선상의 평균 온도는 Fig. 2과 같이 나타났다. 화재성장과 화원에서 제트팬의 영향이 정상상태가 된 이후를 비교하기 위하여 계산 시작후 100초에서 600초사이의 온도를 평균한 값이다. 배기방식에서 연기의 이동은 화원을 중심으로 입구쪽과 출구쪽의 값이 같고, 제트팬방식은 팬에서 토출된 바람의 영향으로 출구쪽으로만 배출되므로 그림과 같이 화원위치 $x=75\text{m}$ 에서 출구쪽 125m 까지의 값을 비교하였다. 배기방식에서 $z=1.5\text{m}$ 인 곳의 온도는 화원부근을 제외하고는 약 20°C 로 계산 초기온도와 거의 같게 나타났다. 이는 화원쪽으로 신선한 공기가 계속 유입되고 있음을 의미한다. 제트팬방식에서 $z=1.5\text{m}$ 인 곳에서의 평균온도는 제트팬의 영향으로 터널중앙($x=75\text{m}$)이 아닌 $x=80\text{m}$ 에서 가장 높게 나타났으며, 화염의 영향부를 제외하고는 약 50°C 로 배기방식에 비해 높게 나타났다. Fig. 3은 $y=5.0\text{m}, z=1.5\text{m}$ 인 높이에서의 평균가시거리를 타나낸 것이다. 배기방식은 Fig.2와 같이 화원부근을 제외하고는 가시거리가 30m 로 매우 양호함을 알 수 있다. 이는 연기층이 1.5m 높이까지 내려오지 않았다는 것을 의미한다. 그러나 제트팬방식은 $z=1.5\text{m}$ 인 곳의 가시거리가 약 10m 로 배기방식에 비해 가시거리가 훨씬 더 짧게 나타났다.

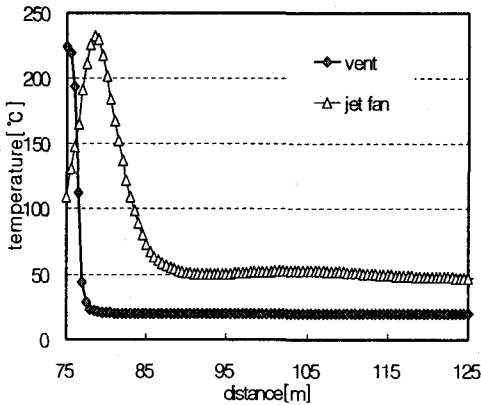


Fig. 2. Comparison of average temperature at $y=5.0\text{m}, z=1.5\text{m}$

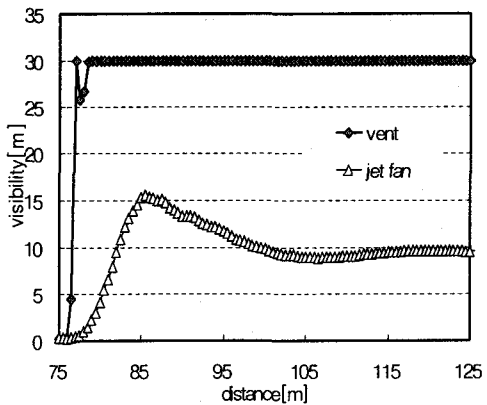


Fig. 3. Comparison of visibility at $y=5.0\text{m}, z=1.5\text{m}$

터널내 $y=5.0\text{m}$ 인 곳의 높이에 따른 온도와 가시거리를 비교하기 위하여 Fig. 4에 평균온도와 평균가시거리를 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3과 같이 100초에서 600초사이의 값으로부터 시간에 대한 평균값을 구하고, 화염의 영향을 받는 부분을 제외하기 위하여 $x=85\text{m}$ 에서 125m 까지의 값을 평균하였다. Fig. 4(a)에서 배기방식의 평균온도는 $z=3\text{m}$ 이하에서는 약 20°C 이고, 4m 에서 천장까지 열이 집중되어 있음을 알 수 있다. 그리고 제트팬방식에서는 $z=2.0\text{m}$ 에서 60°C 를 초과하고, 온도가 바닥면부터 전체적으로 배기방식보다 높다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서의 평균가시거리도 배기방식에서는 연기층이 바닥에서부터의 높이가 3m 이상인 곳에 형성되어 있음을 알 수 있다. 반면 제트팬방식에서는 높이에 상관없이 가시거리가 10m 이하로 연기가 바닥에도 형성되어 있음을 알 수 있다.

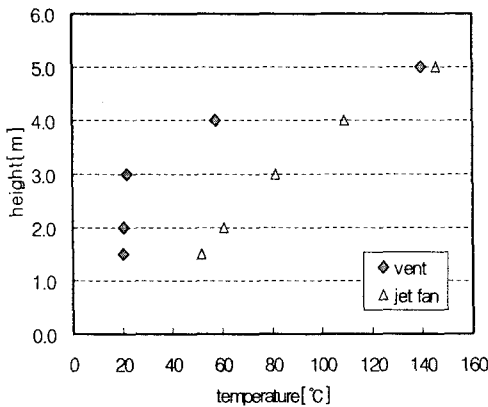


Fig. 4(a). Average temperature for the height

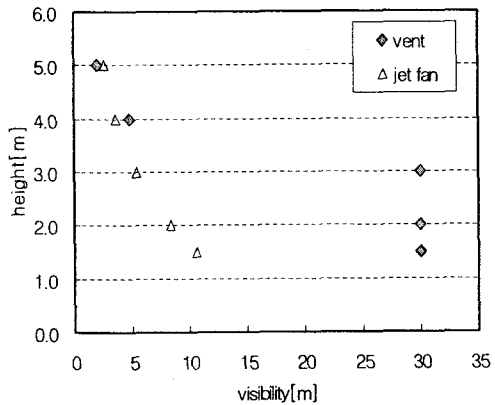


Fig. 4(b). Average visibility for the height

Fig. 5는 x 방향의 거리 75m 에서 125m 사이에서 $y=5.0\text{m}$, $z=1.5\text{m}$ 인 곳의 평균 일산화탄소(CO)의 체적분율을 나타낸 것이다. 화염의 영향부인 곳을 제외하고 85m 이후를 비교한다면 배기방식은 평균온도와 평균가시거리의 그림에서 알 수 있듯이 연기층이 $z=1.5\text{m}$ 까지 내려오지 않고 천장부근에서만 이동과 배출이 이뤄져서 일산화탄소 체적분율이 '0'에 가깝다. 제트팬방식은 약 15ppm 으로 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 수치는 터널상황에 따른 허용농도³⁾에 미달되는 수치지만 화재발생과 동시에 차량정체가 발생한다고 가정한다면 일산화탄소의 수치가 전체적으로 상승할 것이다. 이와 더불어 장대터널내 피난에 소요되는 시간이 길어진다면 일산화탄소에 대한 인체위험이 생길 수 있다.

화재발생 후 시간에 따른 터널공간내 매연(soot)의 양은 Fig. 6와 같이 나타났다. $x=75\text{m}$ 에서 150m 사이 즉 화원중심에서 출구쪽공간에서의 잔류된 매연양의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 100초이후 배기방식은 약 0.35kg , 제트팬방식은 약 0.48kg 으로 나타나 매연의 배출도 배기방식이 우수함을 알 수 있다. 그러나 제트팬방식은 입구쪽의 매연이 거의 없는 것과 배기방식은 입구쪽으로 같은 양의 매연이 잔류하는 것을 염두에 두어야 할 것이다.

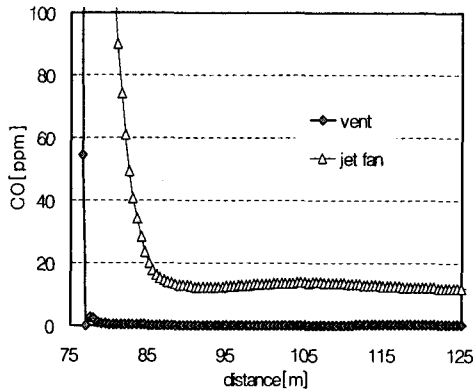


Fig. 5. Comparison of variation of CO-volume fraction at $y = 5.0m$, $z = 1.5m$

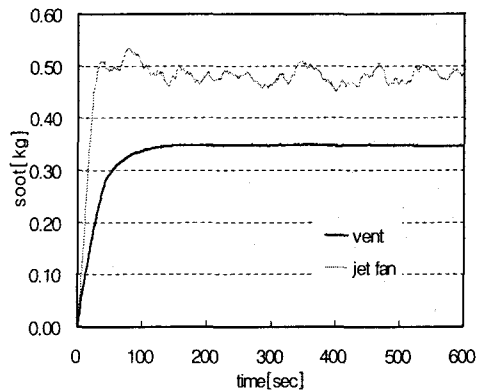


Fig. 6. Comparison of time variation of soot in the tunnel

Fig. 7은 출구방향의 한 지점 $x = 125m$, $y = 5.0m$ 인 곳의 100초에서 600초사이의 높이에 따른 평균온도와 가시거리, 매연농도를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 평균온도는 바닥면부터 천장까지 배기방식이 제트팬 방식이 보다 낮게 나타났다. Fig. 7(b)에서는 제트팬방식의 가시거리가 바닥면에서 약 15m이고 $z = 5.0m$ 까지는 배기방식에 비해 가시거리가 짧음을 알 수 있다. 배기방식에서는 $z = 3m$ 까지는 초기값 30m를 유지하다 $z > 3m$ 에서 가시거리가 급격히 짧아짐을 알 수 있다. Fig. 7(c)의 매연농도 변화에서도 배기방식은 $z > 3m$ 에서 매연농도 값이 증가하는데 비해 제트팬방식에서는 바닥에서부터 매연이 분포되어 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 4, 7, 8에서 알 수 있듯이 천장부근에서의 평균온도와 가시거리와 매연의 농도 등은 배기방식과 제트팬방식이 거의 같게 나타났다.

이상의 결과로부터 배기방식은 제연효율이 높아 바닥에서부터 높이 3m까지는 화재의 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 화원을 중심으로 양방향 피난과 화재진압활동이 가능하다. 그러나 제트팬방식의 경우, 배기방식에 비해 가시거리 짧고, 온도와 일산화탄소농도를 고려할 때 연기로 인해 피난과 화재진압활동에 지장을 줄 것으로 예측된다.

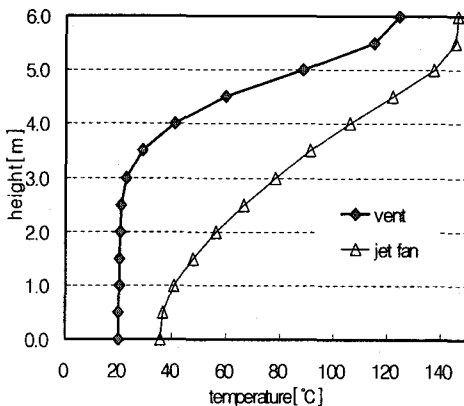


Fig. 7(a). Comparison of variation of temperature at $x = 125m$, $y = 5.0m$

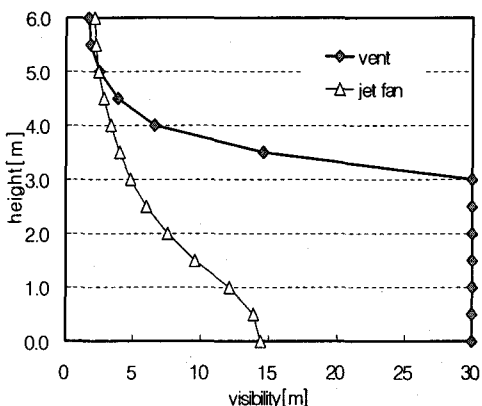


Fig. 7(b). Comparison of variation of visibility at $x = 125m$, $y = 5.0m$

4. 결론

장대터널의 제연방식에 대한 제연효과를 알아보기 위하여 천정 배기구를 통한 배연의 경우와 제트팬을 이용한 경우로 나누어 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 터널 중앙에서 20MW의 화재가 발생했을 때 공간내의 평균온도와 가시거리, 일산화탄소의 농도를 계산하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배기방식은 연기의 이동 및 배출이 천장에서 이뤄짐에 따라 제연효과가 높아 $z=1.5\text{m}$ 의 높이에서 평균온도와 가시거리, 일산화탄소 농도에 대한 화재의 영향은 거의 없었다.
- 2) 제트팬방식은 배기방식에 비해 온도가 높고, 가시거리가 짧으며 일산화탄소의 농도가 훨씬 더 높게 나타나 피난과 소방 활동에 지장을 주는 것으로 나타났다.
- 3) 제트팬방식은 배기방식에 비해 제연효율이 낮아 터널화재에서 배기방식이 더 안전함을 알 수 있었다.

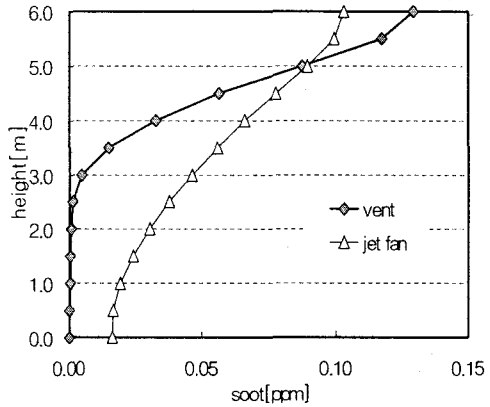


Fig. 7(c). Comparison of variation of soot volume fraction at $x=125\text{m}$, $y=5.0\text{m}$

참고문헌

1. 한국개발연구원, '공공투자사업 예산관리의 효율화 방안(II): 국도 건설비관리의 합리화 방안' 2002.
2. 한국토지공사, "터널·지하차도의 조명 및 방재시설 개선방안 연구", 2003.
3. 한국소방안전협회, "화재원인조사 및 사례분석집", 2002.
4. 한국건설기술원, "고속도로 터널 환기시설 설계기준", 1997.
5. 강신형, "터널내의 제트팬 설치 위치에 따른 환기 성능에 관한 연구", 건양대학교 산학기술협력연구 논문집, 제4권, 2001.
6. 양판석, 조영진, 이재현, "중류식 도로터널내에서의 환기거동에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B, 제22권, 제8호, pp.1091~1106, 1998.
7. H. Kurioka, Y. Oka, H. Satoh, O. Sugawa, "Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels", Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 319~340, 2003.
8. O. Vauquelin, O. Megret, "Smoke extraction experiments in case of fire in tunnel", Fire Safety Journal, Vol. 37, pp. 525~533, 2002.
9. 민동호, 손봉세, "도로터널내부 화재시 열전달 및 연기거동에 따른 피난안전성 평가에 관한 수치적 연구", 한국화재소방학회 논문지, 제19권, 제1호, pp. 87~92, 2005.
10. K. McGrattan, ed., Fire Dynamics Simulator (version 4) Technical Reference Guide, NIST, U.S.A., 2005.