도로터널 반횡류식 환기방식의 최적배연 풍량산정에 관한 연구
- 균일배기의 경우 -

이동호† · 유지오* · 신현준**
인천대학교 안전공학과 · *신흥대학 건축설비과 · **한국건설기술연구원 화재설비연구부
(2005. 4. 9. 접수 / 2006. 2. 27. 채택)

A Study on the Effective Smoke Exhaust Amount of Load-Tunnel with Semi-Transverse Ventilation
- Balanced Exhaust Case -

Dong-Ho Rie† · Ji Oh Yoo* · Hyun Jun Shin**
Department of Safety Engineering, University of Incheon
*Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung College
**Fire and Engineering Service Research Department, Korea Institute of Construction Technology
(Received April 9, 2005 / Accepted February 27, 2006)

Abstract : The smoke exhaust system is one of the effective systems to save lives when fire occurs underground. This study presents a complete analysis of effective smoke exhaust and smoke characteristics for a fire occurring with a transverse ventilation system use as a smoke exhaust system. The performance of the smoke management system was studied by computer modeling using FDS version 3.1. A fire size of 20MW was used for tunnel with balanced exhaust transverse ventilation. The smoke management design and the procedure as simulated in this study are also compliant to the tunnel construction and fire codes of Korea.
Key Words : tunnel fire, balanced transverse smoke exhaust system

1. 서 론

도로터널의 증가와 함께 평상시 환기 뿐만 아니라 화재시 안전성 확보를 위한 각종 방재시설에 대한 우려와 관심이 증가하고 있는 실정이다.

터널이나 지하철과 같은 지하공간에서 화재가 발생하는 경우, 화재에 직면한 승객은 초기에 대피를 위한 정확한 상황판단을 내리기 어렵기 때문에 일반적으로 차량 내부에 체류하는 것이 외부보다 안전하다고 판단하여 신속히 차량을 버리고 대피하는데 많은 시간이 소요되는 것으로 보고되고 있으며, 이와 같은 경향은 대구지하철 및 몽브랑터널의 화재사고시 대부분의 승객이 차량 및 차량의 근접거리에서 사망하였다는 사실이 뒷받침하고 있다.

따라서, 터널화재에 대한 방재계획시 초기에 신속한 대피명령의 전파 및 안전한 대피환경의 확보가 가장 중요한 요소로 평가되고 있다.

몽브랑 터널이나 Channel 터널, 대구지하철 화재사고 및 홍지문터널의 화재사고의 교훈을 통해 알 수 있는 바와 같이 지하공간이나 터널에서 화재가 발생하는 경우, 초기대피환경을 효과적으로 확보하기 수단으로 제연설비가 강조되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 도로터널의 대표적인 환기방식인 균일 배기 반횡류 환기방식에 대한 최적 배연량 산정을 위해 각국의 기준상에 제시되어 있는 반횡류 방식의 배연풍량에 대한 조사와 수치시뮬레이션을 수행하여 화재시 안전성확보가 가능한 배연풍량에 대한 도출을 목표로 한다.

2. 도로터널의 배연방식

도로터널에서 화재가 발생하는 경우, 연기의 제어

† To whom correspondence should be addressed.
riedh@incheon.ac.kr

및 배연은 상시 운영되고 있는 환기설비를 이용하여서 수행된다. 도로터널의 제연방식은 연기를 화재공간에서 완전히 제거하는 배연(smoke exhaust)과 대피반대방향으로 기류를 제어하는 제연(smoke control) 개념의 환기시스템으로 구분할 수 있다. 전자는 횡류식 또는 반횡류식, 후자는 종류식 환기시스템이라 한다.

횡류환기방식은 화재지점의 연기를 덕트를 통해서 직접 배연함으로서 화재지점으로부터 연기를 제거하는 적극적인 수단이나 연기류의 방향성에 대한 제어가 곤란한 단점이 있다. 또한 종류환기방식은 화재지역으로부터 직접적인 배연은 불가능하나 대피자의 대피방향과 반대방향으로 연기류 방향을 제어하여 대피의 안전을 확보하는 환기방식이다.

따라서 종류환기방식은 대피자가 화재지점을 기준으로 한쪽방향(화재상류지점)에만 존재할 가능성이 높은 터널, 즉 차량의 정체빈도가 낮은 일방통행 터널에서 효과적으로 제연을 수행할 수 있는 경제적인 시스템이나, 대면통행 터널이나 차량정체가 빈번하여 화재지점의 상하류에 대피자가 존재할 가능성이 많은 터널에서는 제연방향의 선정이 불가능하여 이와 같은 터널의 적용은 부적절하다.

본 연구의 대상인 반횡류 환기방식은 배기 반횡류식과 급기 반횡류식으로 구분하며, 배기 반횡류식은 터널내부에 풍속이 0m/s가 되는 중성점이 발생할 수 있고 일반적으로 환기효율이 저하하는 단점이 있어 환기측면에서 급기 반횡류식의 채택이 많다. 그러나 급기 반횡류식의 경우, 화재시 연기를 배기하기 위해서 송풍기를 역회전하여야 하며, 역회전을 위해서 상당한 시간지연이 요구되기 때문에 초기대응에 문제점을 안고 있는 것으로 보고되고 있다.

또한, 반횡류 환기방식은 급기 또는 배기구의 개폐가 불가능한 균일배기방식과 급·배기구에 개폐를 위한 댐퍼를 설치하여 선택적으로 배기할 수 있도록 하는 선택 대배기구 방식으로 구분된다.

Fig. 1은 균일배기 방식의 반횡류 방식을 나타낸 것으로 일반적으로 터널의 상부에 덕트를 설치하고 일정간격(5~20m)으로 배기구를 설치하여 터널전체에 단위길이당 풍량을 균일하게 하여 배기하도록 하는 방식이며, Fig. 2는 선택 대배기구 방식의 개념도를 나타낸 것으로 배기구면적이 균일배기 방식보다 상대적으로 큰 배기구를 50~200m의 간격으로 설치하여 화재시 화재에 인접한 지역의 배기구만을 개방하여 집중 배기할 수 있도록 하는 방식이다.

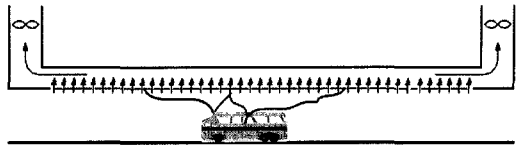

Fig. 1. Semi-transverse ventilation with valanced exhaust.

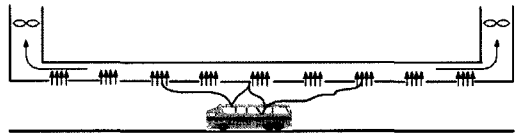

Fig. 2. Semi-transverse ventilation with single point exhaust.

3. 각국 기준 및 연구결과 비교

반횡류 환기방식에 대한 적정 배연풍량은 메모리얼 터널의 실험결과를 근거로 하는 NFPA 502기준[1] 과 독일의 RABT 02[2], 프랑스의 CETU 02[3], 오스트리아 기준[4] 등에 제시되어 있으며, Vauquelin연구[5,6] 와 김명배[7]의 실험적인 연구결과 등이 보고되고 있다. 이들 연구에 의하면 배연풍량은 터널의 연장 및 배연구간의 길이, 화재강도, 터널 내 풍속에 의해 영향을 받는 것으로 나타나고 있으며, 현재까지 적정 배연풍량 산출을 위한 명확한 설계자료는 제시되지 못하고 있는 실정이다. Table 1은 각국의 기준 및 연구결과를 정리하여 나타낸 것으로, 표에 의하면 독일과 프랑스의 경우, 연기발생량외에 터널내 기류의 제어 및 신선공기의 유입을 고려한 부가적인 풍량을 배연풍량으로 정하고 있으며, 오스트리아나 스위스는 일반적으로 알려진 30MW의 화재강도에서의 연기발생량($80m^3/s$)을 배연풍량으로 정하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Standard exhaust air rate comparison with various countries

국 가	배 연 풍 량	비 고
미 국	균일배기방식 $0.155m^3/s \cdot lane \cdot m$	600 m 기준 배연풍량 : $186m^3/s$
독일 (RABT 02)	$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_s$	$V_r = 3.0m/s$ 600 m 기준 배연풍량 : $215.6m^3/s$
프랑스 (CETU 02)	$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_s$	$V_r = 1.5m/s$ 몽브랑 터널 : $150m^3/s \cdot 600m$ $= 80 + 45.2 \times 1.5 = 147.8m^3/s$
오스트리아	$\geq 80m^3/s \cdot$ fire zone	$80m^3/s$
스위스	$\geq 80m^3/s \cdot km$	$80m^3/s$
김등	$0.17m^3/s \cdot m$	600m 기준 배연풍량 : $102m^3/s$

또한 독일이나 프랑스의 기준에서 고려하고 있는 부가적인 배연량은 화재시 종방향 기류의 형성을 통한 연기류의 제어능력 향상과 신선공기의 유입을 고려한 것으로 목표로 하는 종방향 풍속(V_r)과 터널단면적(A_r)으로 곱($V_r \cdot A_r$)으로 나타내고 있으며, 독일의 경우 V_r을 3.0m/s, 프랑스의 경우는 1.5m/s를 고려하고 있다.

이와 같이 반횡류 방식의 배연풍량은 각국의 기준이 상당한 차이를 보이고 있으며, 최근의 경향은 독일 및 프랑스 기준에서 제시한 바와 같이 종방향 기류의 제어를 위해서 부가적인 풍량을 고려하고 있다. 횡류환기방식에서의 종방향 풍속의 제어에 대한 필요성은 유럽에서 검토되기 시작한 것으로 몽브랑 터널 및 고타드 터널의 경우, 최근의 화재 이후 종방향 기류를 제어하기 위하여 젯트팬을 시설하고 있다. 또한 니혼자키 터널의 경우에도 기류의 제어를 위해서 샤칼트 방식을 적용한 바가 있다[8-10].

4. 수치시뮬레이션 검토

4.1. 수치시뮬레이션 조건

횡류환기방식의 연기거동에 대한 검토 및 적정 배연풍량 산정을 위해서 본 연구에서는 Table 2에 제시한 터널모델에 대해서 FDS[11](Fire Dynamics Simulation)에 의한 수치해석을 수행하였다.

본 해석모델에서 배기구(단면적 $1m^2$)는 터널입구 및 출구의 100m지점에서부터 터널의 중앙부에서 10m간격으로 총 90개 지점에 설치하였으며, 총 격자수는 125만개(50(폭방향)×25(높이)×1000(길이))이다.

해석모델의 화재강도는 20MW(차량단면:2.12×10 m, HRRPUA=943.4kW/m^2)로 화재는 선형적으로 성장하여 4분 동안에 완전히 성장하는 것으로 하였으며, 해석시간은 600초로 하였다.

배기구의 배연풍량(Q_E)은 식 (1)로 정의하였으며, 식 (1)에서 연기발생량(Q_S)은 $80m^3/s$로 하고, 부가적인 풍량을 고려하기 위한 V_r은 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 m/s의 8조건으로 고려하였다.

$$Q_E = A_r \cdot V_r + Q_S \quad (1)$$

Table 2. Tunnel dimension

터널연장 (m)	단면적 (m^2)	터널높이 (m)	배기구간격
1,000	내공 단면적 : 60.8 차도 단면적 : 50.2 덕트 단면적 : 10.6	5.0	10m간격 단면적 : $1m^2$ (90개소)

여기서, A_r은 터널단면적이다.

각 배기구의 경계조건은 풍속 일정조건으로 해석하였으며, 배기구에서 V_r에 따른 배연풍량 및 배기구 면풍속은 Table 3에 나타낸바와 같다.

4.2. 시뮬레이션 결과

Fig. 3 및 Fig. 4는 배연을 수행하지 않는 경우, 시간에 따른 연기의 이동특성을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 가시도에 영향을 미치는 연기농도의 한계값을 반사체의 경우에는 $65mg/m^3$, 비반사체의 경우에는 $115mg/m^3$로 설정하여 검토하였다.

Fig. 3은 터널유입 풍속이 0m/s인 경우로 연기는 화재지점을 기준으로 하여 양방향으로 대칭현상을 이루며 이동하며, Fig. 5(d)에서 알 수 있는 바와 같이 이동속도는 시간이 증가하면 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 화재발생 6분후 연기의 이동거리는 266.7m로 연기의 평균이동속도는 1.1m/s정도에 이르는 것으로 나타났으며, 5분 경과시 연기의 이동거리는 233m로 나타나고 있다.

또한 피난연락갱의 설치간격에 따른 대피시간을

Table 3. Exhaust air flow rate and plan velocity for the various of Vr

Vr (m/s)	QE (m^3/s)	배기구 면풍속(m/s) (단면적 : $1.0m^2$)
0.0	80	0.89
0.5	105	1.17
1.0	130	1.45
1.5	155	1.73
2.0	180	2.01
2.5	205	2.28
3.0	230	2.56
3.5	256	2.84

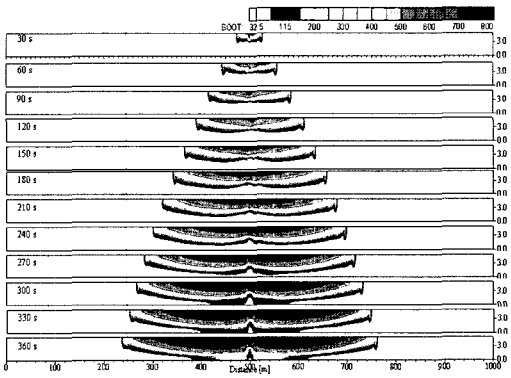

Fig. 3. Smoke transportation characteristic (in the case of no exhasut, tunne linner airflow velocity = 0m/s).

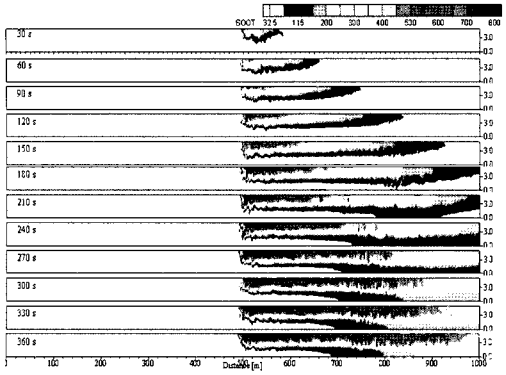

Fig. 4. Smoke transportation characteristic (in the case of no exhasut, tunnel inner airflow velocity = 2.5m/s).

대피시뮬레이션 프로그램인 Simulex를 이용하여 검토한 결과, 피난연락갱의 설치간격에 따른 대피시간은 Table 3에 제시한 바와 같다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 현재 건교부의 도로터널 방재시설설치 지침에 제시된 기준(피난연락갱 설치간격 250m)을 적용하면 대피소요시간은 약 5분 정도로 나타났다.

Table 4. Evacuation time for the various of a distance of the cross-passage installation

피난연락갱 설치간격	대피시간	피난연락갱 설치간격	대피시간
200 m 간격	4분 06초	500 m 간격	9분 02초
250 m 간격	4분 54초	550 m 간격	9분 51초
300 m 간격	5분 45초	600 m 간격	10분 45초
350 m 간격	6분 34초	650 m 간격	11분 37초
400 m 간격	7분 24초	700 m 간격	12분 30초
450 m 간격	8분 13초	750 m 간격	13분 22초

따라서, 이 경우, 대피가 완료되는 시점인 5분 경과시 연기의 이동거리는 233m로 연기가 피난연락갱까지는 미치지 못함을 알 수 있다.

Fig. 4는 터널유입 풍속이 2.5m/s인 경우에 시간에 따른 연기의 전파특성을 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 비교적 작은 풍속이지만 터널유입 풍속이 존재하게 되면 연기가 기류방향으로 이동되어 약 90초 정도가 경과하면 연기는 250m까지 이동되는 것을 알 수 있다. 또한, 연기경계층도 빠른 속도로 하강하기

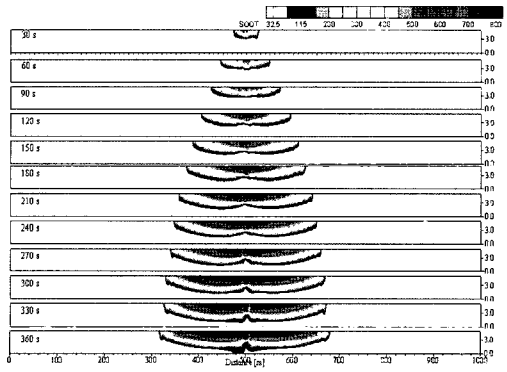

Fig. 5(a). Smoke transportation characteristic (exhaust flow rate Q_E = 80+0.0 A_r, tunnel inner airflow velocity = 0m/s).

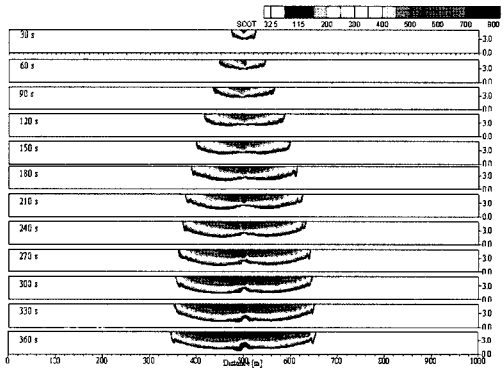

Fig. 5(b). Smoke transportation characteristic (exhaust flow rate Q_E = 80+1.0 A_r, tunnel inner airflow velocity = 0m/s).

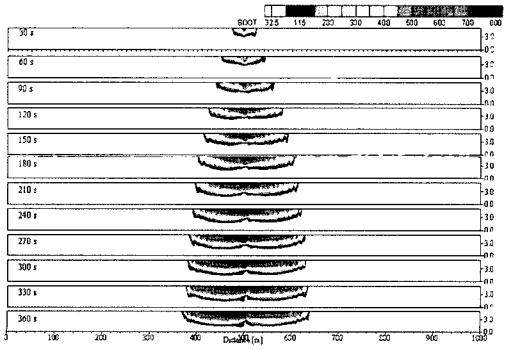

Fig. 5(c). Smoke transportation characteristic (exhaust flow rate Q_E = 80+2.0 A_r, tunnel inner airflow velocity = 0m/s).

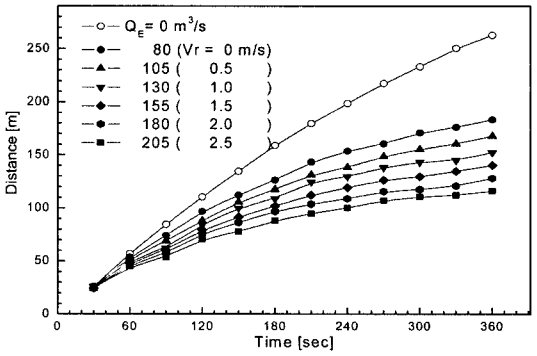

Fig. 5(d). Smoke transportating distance by the various of exhaust flow rate.

때문에 터널내 대피자는 연기에 직접적으로 노출 위험성이 크다는 것을 알 수 있다.

따라서, 도로터널에서는 대면통행방식의 터널일지라도 상하행 교통량의 불균형으로 인한 교통에 의한 피스톤효과 및 자연풍의 영향으로 인해서 터널유입 풍속이 상시 존재하게 되므로 터널유입 풍속이 존재하는 경우에 안전성 검토가 필요하다.

Fig. 5는 균일배기방식의 반횡류환기방식을 적용하는 경우에 배연풍량에 따른 연기의 이동특성을 나타낸 것으로 Fig. 5(a)는 $Q_E = 80m^3/s(V_r = 0.0m/s)$인 경우이다. 즉, 배연풍량을 연기의 발생량과 동일하게 적용한 경우이며, (b)와 (c)는 각각 $130m^3/s$, $180 m^3/s$를 적용한 경우이다. 그림에서 배연풍량이 증가할수록 연기의 이동거리는 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 배연풍량에 따른 연기의 이동거리를 정리하여 나타낸 것으로 연기의 이동거리는 배연풍량 증가에 비례하여 감소하는 경향을 보이고 있으며, 배연풍량이 $80m^3/s$인 경우에는 5분후의 연기 이동거리는 183m정도로 배연을 하지 않는 경우보다 72%수준으로 감소하며, 배연풍량이 205 $m^3/s(V_r = 2.5m/s$ 적용)인 경우, 연기의 이동거리는 배연을 수행하지 않는 경우보다 1/2로 감소하고 있다.

Fig. 6(a),(b),(c)는 일반적으로 설계에 적용하는 자연환기력에 의한 터널유입 풍속을 2.5m/s로 가정하는 경우에 배연풍량에 따른 연기의 이동특성을 나타낸 것으로 각각 $205(Q_E = 80+2.5\ A_r)$, $230(Q_E = 80+3.0\ A_r)$, $256\ Q_E = 80+3.5\ A_r)\ m^3/s$를 적용한 경우이다.

이 경우, 배연풍량을 $205(Q_E = 80+2.5\ A_r)$으로 하는 경우, 약 180초가 경과되면 연기의 이동거리는 250 m에 도달하게 된다. 따라서 현재 방재시설 설치지침 기준(대피시간 6분, 피난연락갱 간격 : 250m, 대피자의 대피속도 1.1m/s기준)에 준하여 피난연락갱을 설치하는 경우에는 180초 이후에는 연기가 대피자를 위협하게 될 것으로 예측된다.

Fig. 6(b)는 배연풍량을 연기발생량보다 2.9배 증가시킨 $230(Q_E = 80+3.0\ A_r)$로 하는 경우로 270초(4

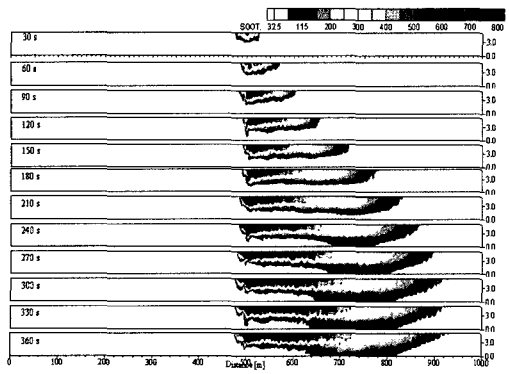

Fig. 6(a). Smoke transportation characteristic (exhaust flow rate $Q_E = 80+2.5\ A_r$, tunnel inner airflow velocity = 2.5m/s).

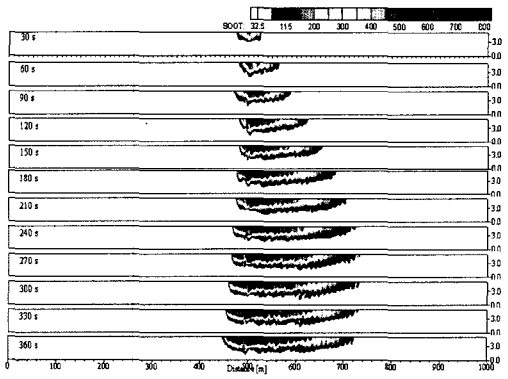

Fig. 6(b). Smoke transportation characteristic (exhaust flow rate $Q_E = 80+3.0\ A_r$, tunnel inner airflow velocity = 2.5m/s).

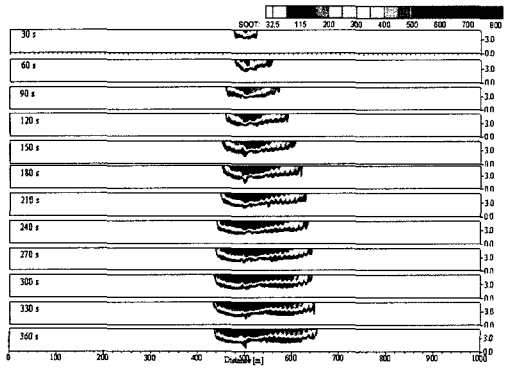

Fig. 6(c). Smoke transportation characteristic (exhaust flow rate $Q_E = 80+3.5\ A_r$, tunnel inner airflow velocity = 2.5m/s).

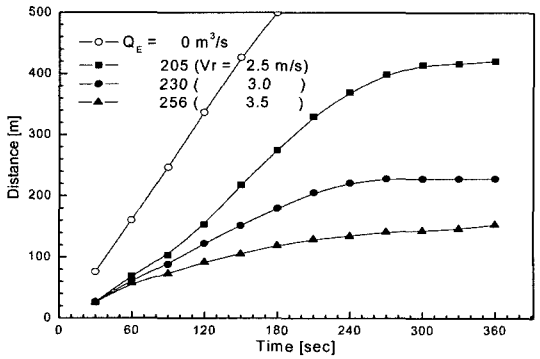

Fig. 6(d). Smoke transportating distance for the exhaust flow rate 2.5m/s.

분 30초)이후에 연기의 이동거리는 시간이 증가하여도 거의 증가하지 않는 특성을 보이며, 이동거리가 227m 정도로 억제되는 것으로 나타났다. 따라서 이 경우, 피난연락갱 간격이 250m인 경우에 대피자의 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 6(d)참조).

Fig. 6(c)는 배연풍량이 256(Q_E = 80+3.5 A_r)인 경우로 이 경우에도 270초 이후에 연기의 이동거리가 160 m이하로 제한되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 자연환기력에 의한 터널풍속을 2.5m/s이하로 가정하는 경우, 배연풍량이 230(Q_E = 80+3.0 A_r)이상이면 연기의 이동거리는 250m이내로 제한할 수 있는 것으로 판단된다.

이상의 검토 결과로부터 균일배기 방식을 적용하는 반횡류 환기방식의 터널에서는 터널유입 풍속을 0m/s으로 가정하는 경우에 배연풍량이 연기발생량 이상이면 대피에 문제가 없을 것으로 판단되나, 일반적으로 터널에서는 차량에 의한 교통환기력 등 자연환기력에 종방향 기류가 존재하므로 터널 유입풍속과 배기구의 신선공기 유인효과등 부가적인 풍량을 고려한 배연풍량이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 균일배기 반횡류 환기방식을 적용한 도로터널에서 화재시 배연풍량을 산정하기 위해서 배연풍량에 대한 외국기준을 비교 · 검토하고 수치시뮬레이션을 통해서 배연풍량에 따른 연기의 이동거리를 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반횡류 방식에서 배연풍량은 배기구로의 신선공기의 유입 및 종방향 기류제어를 위하여 연기발생량보다 증대한 풍량을 설계 풍량하는 것이 최근 동향이다.

2) 자연환기력에 의한 터널유입 풍속을 0m/s로 가정할 때 배연풍량 을 연기발생량과 동일하게 산정하는 경우, 6분간의 연기의 이동거리는 250m 정도로 나타났다.

3) 자연환기력에 의한 터널유입 풍속을 2.5m/s로 가정하는 경우에는 배연풍량을 230m^3/s(Q_E = 80+3.0 A_r)로 할 때 연기의 이동거리를 250m 이내로 제한할 수 있는 것으로 나타났다.

4) 따라서, 반횡류 방식의 대면통행 터널일지라도 터널내 종방향 기류가 상시 존재하기 때문에 배연풍량은 종방향 기류제어 및 배기구로의 신선공기의 유입효과를 고려하여 연기발생량보다 상당히 증가하여 설계하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

참고문헌

1) National Fire Protection Association, 2000, "NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways", 2001 Ed, NFPA, USA, 2000.
2) Forschungsgesellschaft fur Strassenund Verkehrswesen, "Richtlinien fur die Ausstattung und den Betrieb von strabenTunneln (RABT)", Germany, 2002.
3) Minstere de L'Interieur, "Circulaire Interministerielle No 2000-82 du 30 Novembre 2000, Relative à la Réglementation de la Circulation des Véhicules Transportant des Marchandises Dangereuses dans les Tunnels Routiers du Réseau National", France, 2000.
4. Bundesministerium fur Verkehr, Innovation und Technologie, "RVS 9.286 Betriebsund Sicherheitseinrichtungen, Funkeinrichtungen, Bauliche Anlagen", Austria, 2002.
5. O. Vauquelin and D. Telle, "Smoke control in tunnel fires - shoud we talk about critical velocity or critical mass flow rate", 10th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 97～103, BHRGroup 2000 Vehicle tunnel.
6. O. Vauquelin, et. al., "Smoke extration experiments in case of fire in a tunnel", Fire Safety Journal, 37, pp. 525～533, 2003.
7. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, "도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구", 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 129～140, 2004.
8. Alan Weatherill, "New Mont Blanc tunnel ventilation systems", Tunnel Management International, Vol. 6, No. 1, 2003.
9. B. Bettelini, A. Henke, "Upgrading the Ventilation of the Gotthard road tunnel", 11th Int. Sym. on the Aero. and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 29～45, BHRGroup, 2003.
10. 鮫島利隆, "日本板(니혼자카)トンネル火災事故の復舊工事", 日本土木學會誌, 1980年 4月号.
11. Kevin B. McGrattan, Glenn P. Forney, Fire Dynamics Simulator(Version 3) - User's Guide, NIST, 2002.