

플화재를 이용한 터널화재 부분배연 모델실험 Reduced-Scale Experiments of the Partial Smoke Extraction System in Tunnel Fires

이의주[†] · 유용호*

Eui-Ju Lee[†] · Yong-Ho Yoo*

부경대학교 안전공학부, *한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부
(2006. 8. 9. 접수/2006. 11. 30. 채택)

요 약

부분배연설비를 가지고 있는 침매터널에서 화재시 배연효율을 분석하기위해 플화재를 이용하여 축소모형실험을 수행하였다. 화재가 발생하였을 때 주위 유동이 없는 경우인 자연배연과 임계속도로 제트팬을 가동하는 강제배연의 경우에 터널내의 온도와 연소가스 농도를 측정하였다. 자연배연에 비해 강제배연은 화재발생 초기에 화원과 터널 내 기류와의 급격한 혼합에 의해 성층화 정도가 미미해지고 보다 낮은 온도를 화원주위에서 얻을 수 있었다. 이러한 급격한 혼합은 터널 상부에 위치한 부분제연 갤러리의 효율을 변화시키는데, 자연배연인 경우에 약 30%의 배연효율이 증가되었다. 일산화탄소 농도계측으로 얻어진 배연효율은 등온기체모델을 사용한 선행연구와 비교하여 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 침매터널 화재시 승객의 안전한 대피를 위한 부분배연설비의 최적 운전방안으로 제시된다.

ABSTRACT

Smoke extraction in tunnel fire is investigated experimentally with thermal model. The object is a immersed tunnel, of which the partial extraction system exists between the tubes. The model tunnel is measured 12 m long, 0.5 m wide and 0.35 m high. The fire is simulated to pool fire and the size corresponds to full scale fire of 5 MW based on Froude modeling. The performance of partial extraction system is determined under two ventilations, natural and longitudinal ones. The results show that compared with longitudinal ventilation, the smoke extraction efficiency of natural ventilation is increased about 30% because of smoke stratification in tunnel. Also the efficiency is identical to the iso-thermal model. The results will be help for activation of the ventilation system in emergency such as in the event of tunnel fires.

Keywords : Tunnel fire, Thermal model, Smoke extraction efficiency, Partial extraction system

1. 서 론

터널에서의 사고는 일반적으로 운전자의 집중 등에 의해 일반도로에서의 사고 발생을 보다 적지만 인명피해 측면에서는 위험도가 상당히 증가한다. 또한 PIARC 보고서¹⁾에 의하면 터널에서 사고가 발생하는 경우에는 약 60% 정도 화재가 발생한 것으로 알려져 있다. 터널에서 화재가 발생하면 반밀폐적 구조로 인하여 화재 발생시 터널내부는 고온으로 온도가 상승할 뿐만 아니라 배연의 제약으로 인한 다량의 유독성 가스 및 연기

가 발생하여 터널 내 이용자에게 호흡기 장애와 시야 확보를 감소시키고, 심리적인 공포감을 일으켜 대형피해로 발전할 가능성이 매우 높다. 특히 최근 국내에는 터널이 장대화되고 있고 형상이나 설비 등이 다양화되고 있으므로, 화재시 터널 특성에 맞는 제연 및 배연에 관한 연구가 요구되고 있다.

터널화재 연구에서 연기 유동을 제어하는 제연과 연기를 제거 또는 배출하는 배연에 대해서는 실규모의 실험이 어려우므로 일반적으로 축소실험을 많이 수행하고 있다. 터널 화재연구에서 주로 이용하는 축소모형 실험방법은 사용하는 화원의 종류에 따라 크게 3가지의 실험방법으로 나눌 수 있고, 각각을 열적 모델

[†]E-mail: ejlee@pknu.ac.kr

(thermal model), 등온기체 모델(isothermal model) 그리고 수력학적 모델(hydraulic model)로 나눌 수 있다.¹⁾ 본 연구에 사용된 열적모델은 실제 화염을 열원으로 이용하는 방법이다. 실제 열원으로 실험하는 경우에는 벽과 같은 주위와의 열전달 현상까지 직접적으로 모사할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 일반적으로 실물 실험과 같은 비율로 열방출율(heat release)을 조절할 수 없는 문제점이 있다. 실제 화원을 모사하기 위해서 폴화재가 일반적으로 사용되어지는데, 폴화재는 버너화재나 고체화재 등과 같은 다른 화재 장치들에 비해 실험장치가 간단하고 연소면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 장점이 있기 때문에 고정된 발열량의 확산화염을 묘사하는데 있어서 널리 사용되고 있고,^{2,4)} 프로판 등의 기체연료를 사용하기도 한다.⁵⁾ 하지만 축소모형에서 화재의 모든 특성을 일반화시킬 수 있는 적절한 상사 변수는 존재하지 않으므로 일반적으로는 발열량을 기준으로 Fr 수 상사를 하는 것이 일반적이다.

본 연구는 GK 프로젝트로 추진되는 부산-거제 연결도로 중 3.6 km 구간의 해저터널을 대상으로 한다. 본 터널은 국내에서 최초로 건설되는 침매형 장대 해저터널로서 지상에 건설되는 기존의 도로터널과는 환기 및 방재 설비기술 측면에서 고려되어야 할 조건에서 차이가 있으며, 화재 등 유사시에 해저터널의 특수성 및 터널 디자인의 특이성을 고려하여 피난대책이 수립되어야 한다.

침매터널은 제작상의 특수함에 기인하여 일반적으로 침매함 양측 차도부 사이에 중앙 서비스갤러리를 설치하고 있다. 본 연구에서 사용된 침매터널은 Fig. 1과 같은 구조를 가지고 있어, 아래 공간부터 각각 비상대피용 통로(주대피통로는 사고반대터널), 기계·전기설비용 공간, 그리고 화재시 배연 통로로 사용된다. 이중 상부의 배연갤러리는 기존의 침매터널과는 달리 새롭게 적용된 설비이다. 터널에서 화재가 발생하면 제트팬을 가동시켜 임계속도 이상으로 송풍하여 연기의

역류를 방지하고, 중앙갤러리 상부의 부분배연갤러리를 통하여 배연을 함께 하여 보다 안전한 대피를 가능하게 설계되었다.

이러한 중앙 배연 갤러리의 설치에 따른 배연효율 및 최적 운영방안을 연구하기 위해서 실험적 연구와 수치적 연구를 병행하였다.^{6,7)} 하지만 수치적 연구와 실험적 연구의 결과는 정성적으로는 일치하지만, 배연효율의 경우에 약 50%의 차이에서 보듯이 정량적으로는 차이가 매우 크다. 그러므로 새로운 실험적 모델을 사용하여 결과를 비교할 필요가 있었고, 본 연구에서는 실제화원인 헵탄 폴화재를 이용한 열적모델을 이용하여 강제배연 및 자연배연에서 보조제연 갤러리의 역할을 정성적으로 살펴보았으며, 일산화탄소(CO) 농도로부터 배연효율을 측정하여 등온기체 모델의 결과⁶⁾와 비교·분석하였다.

2. 실험방법

화재시 인명피해를 유발하는 주된 인자인 연기의 온도와 가스농도 등을 측정하기 위해 폴화염을 이용하여 열적모델을 적용하였다. 폴화염에 사용된 연료는 헵탄(heptane)으로서 일반적으로 모든 자동차 연료의 주성분으로 알려져 있고, 상대적으로 다른 액체연료에 비해 연기발생량은 적다. 실제화원 모사를 위한 폴화재 버너는 스테인레스 스틸로 제작하였고, 직경을 변하게 하여 연기량과 화염의 크기를 조절할 수 있다. 또한 버너 내 연료의 수위를 일정하게 하는 장치를 사용하여 열전달 효과를 최소화 하였다.⁸⁾ 화원의 크기는 이전 연구방법인 등온기체모델을 적용한 결과와 부합되도록 5 MW 급의 화재로 가정하였고, 모형터널의 1/20 축소 스케일에 맞추어 Froude Scaling에 의해 8 cm 직경으로 제작되었다.

사용된 터널 축소모형의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 터널단면은 주터널의 경우 폭 500 mm, 높이 350 mm이며 Fig. 1과 같이 상부의 갤러리는 실제터널과 같이 경사면으로 처리하였다. 또한 배연갤러리는 폭 155 mm, 높이 60 mm의 단면으로 제작하였고, 60 mm × 12 mm 크기의 댐퍼 3쌍이 한조가 되어 120 mm 간격으로 설치되어 있다. 축소모형의 상세한 설명은 기존의 연구⁹⁾에서 설명되어 있고, 수행된 실험에서 터널의 조건은 다음과 같다. 모형터널은 길이 1 m의 구간으로 나누어져 있으며 모두 12개의 구간으로 구성되어 있다. 1번 구간에 화원을 위치시키고 3, 5, 7, 9, 11 번 구간 전면부의 댐퍼를 개방하였고, 유속은 주터널 유동이 없는 경우에 부분배연갤러리 속도를 0.6 m/s로

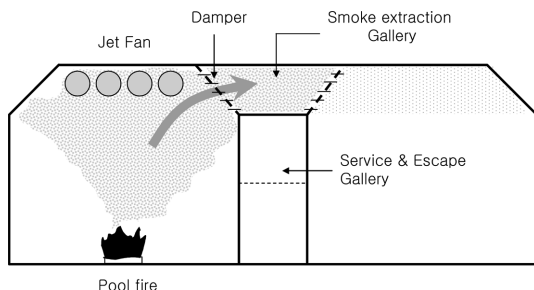


Fig. 1. Cross section of Busan-Goeje immersed tunnel.

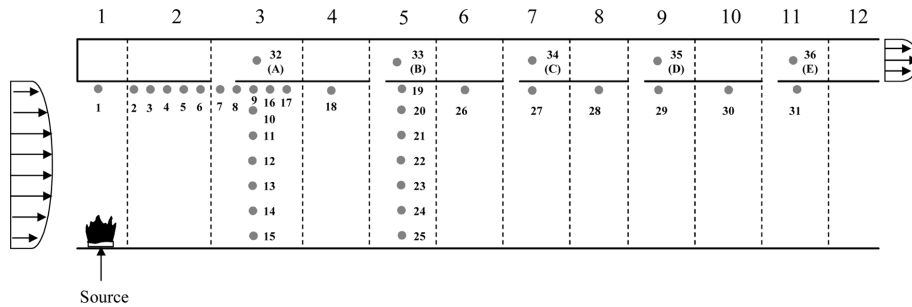


Fig. 2. Schematic diagram of reduced scale tunnel with the measuring positions of temperature, velocity and gas concentrations.

설정하였다. 중요한 실험변수는 Fig. 2의 좌측에서 풍동을 이용하여 터널내로 유입되는 주터널의 유속으로서 본 연구에서는 5 MW의 화재에서 임계속도인 0.5 m/s를 사용하였으며, 이러한 임계속도를 주터널에 계속 유지시켜주는 경우를 강제배연, 주터널에 외부 유입유속이 없는 경우를 자연배연으로 규정하였다. 속도 측정을 위해서 열선유속계(Kanomax Co.)를 이용하였다.

본 연구에서는 터널 각 부분에서 온도측정을 위해 36개의 K-type 열전대를 사용하였고 Fig. 2와 같이 배치하였다. 열전대의 위치는 먼저 주터널 단면에서는 풀화염 바로 상부의 천장면(No.1)에서 연기의 온도를 측정하였으며, 주로 연기층이 이동하는 천장면에 위치시켰다. 2번과 3번 터널 섹션에는 온도의 변화가 클 것으로 판단되어 천장에 각각 5개의 열전대(No.2-6, No.7-9, No.16, No.17)를 놓았고, 4번부터 11번 단면에서는 중앙에 각각 1개의 열전대(No.18-19, No.26-31)를 그림과 같이 위치시켰다. 또한 주터널 3번과 5번 섹션에서는 7개의 열전대 트리(thermocouple tree)를 이용하여 단면의 상하온도를 기록하였다. 부분제연을 위한 보조 갤러리 내에서는 부분제연 댐퍼를 개방한 바로 하류(No.32-36)에서 온도를 측정하였다.

또한 부분배연갤러리를 통한 배연의 정량적 분석을 위하여 가스농도분석과 속도를 측정하였다. 가스분석기(Horiba, 3100A)를 통해 측정된 가스의 종류는 일반적으로 연소시 발생하는 주된 가스인 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 그리고 산소(O₂) 농도를 대상으로 하였고, 질산화합물(NO_x)도 측정이 가능하였지만 화염이 고온이 아닌 특성상 발생량이 극히 미미하므로 이 데이터는 제외하였다. 가스농도는 모두 6 지점에서 측정하였는데, 화원 바로 위 천장부분에서 측정한 값을 기준값으로 채택하였고, 각 5개의 부분배연갤러리 위치(A-E)에서 유속과 함께 측정하여 효율을 계산하는데 사용하였다.

3. 실험결과

본 연구에서는 강제배연과 자연배연인 경우에 대해서 속도, 농도, 온도측정을 수행하였고 그 결과를 해석하였다. 각 데이터는 시간에 따라 변동이 있어 화원을 점화하고 약 10분이 지난 후의 주위 값을 평균하여 사용하였다.

3.1 강제배연

강제배연을 실험적 임계속도(0.5 m/s)로 주어진 경우에 부분배연 갤러리에서 측정된 속도, 연소가스 농도 그리고 온도를 Table 1에 정리하였다. 각 부분배연 갤러리에서의 속도는 하류방향으로 갈수록 중첩되므로 증가하는 경향을 보이고, 연소생성물인 일산화탄소와 이산화탄소는 상류에서 높음을 확인할 수 있다. 하지만 농도의 구배가 작으므로 초기에 혼합이 급격히 일어남을 알 수 있다.

Fig. 3에는 천장면의 온도를 나타내었다. 화원에 점화 후 주터널에서 팬을 가동하지 않은 경우에는 화원 바로 위부분 열전대(No.1) 온도의 시간역사를 함께 도시하였다. 먼저 화원 바로 위 천장면의 온도는 그림에서와 같이 약 250°C의 온도를 나타내고 있지만 팬을 가동한 후 급격히 떨어져 약 85°C로 유지됨을 알 수

Table 1. Flow properties of partial smoke extraction gallery under critical velocity

Position	Velocity (m/s)	CO (ppm)	CO ₂ (vol%)	O ₂ (vol%)	Temperature (°C)
A	0.06	12	0.31	20.49	28.9
B	0.20	11	0.29	20.51	26.8
C	0.32	10	0.27	20.53	24.4
D	0.43	8	0.23	20.59	23.5
E	0.65	8	0.21	20.62	22.2

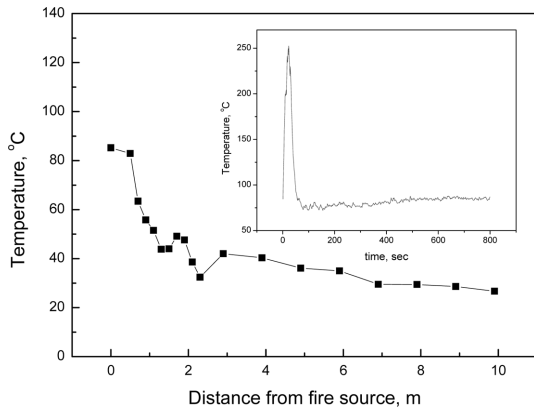


Fig. 3. Temperature profiles on the ceiling of the tube for longitudinal ventilation.

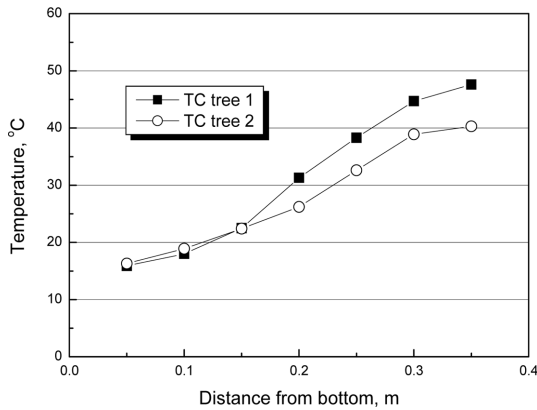


Fig. 4. Temperature profiles with height for longitudinal ventilation.

있다. 전체적인 천장면 온도는 하류로 갈수록 감소하여 40-25°C로 유지되는데, 첫 번째 댐퍼가 위치한 2 m 주위에서는 온도의 변동이 심함을 볼 수 있다. 이는 댐퍼를 통한 유입시 강한 와류 등에 의해 주터널의 유동장이 변하기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 화원 근처에 위치한 열전대 트리의 종방향 온도를 나타내고 있다. 열전대 트리 1과 2는 각각 Fig. 2의 터널단면 3과 단면 5에 위치한 열전대 트리를 나타낸다. 수직방향 온도는 천장면에 가까울수록 높은 온도를 보이므로 약간의 온도상승에 의한 부력효과가 보이지만, 정량적으로는 10°C 미만의 온도차이를 보여주므로 화원 근처에서 연소가스와 주터널 유동과의 혼합이 잘 이루어졌음을 나타낸다.

3.2 자연배연

자연배연 하에서 부분배연갤러리에서의 속도, 농도

Table 2. Flow properties of partial smoke extraction gallery under natural ventilation

Position	Velocity (m/s)	CO (ppm)	CO ₂ (vol%)	O ₂ (vol%)	Temperature (°C)
A	0.08	29	0.90	19.56	28.9
B	0.20	30	0.98	19.48	26.8
C	0.33	22	0.68	19.88	24.4
D	0.42	17	0.51	20.10	22.5
E	0.73	9	0.26	20.45	22.2

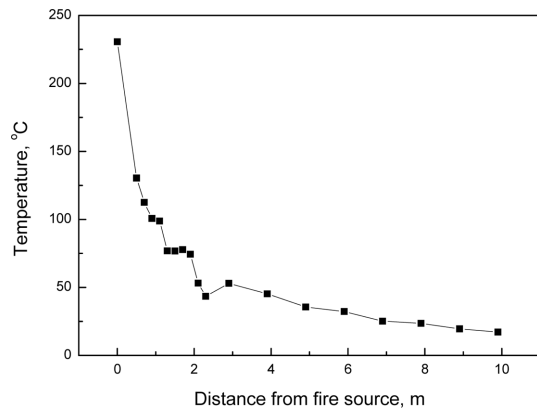


Fig. 5. Temperature profiles on the ceiling of the tube for natural ventilation.

분포 그리고 온도를 Table 2에 나타내었다.

연소로 인한 생성물 지표라 할 수 있는 일산화탄소, 이산화탄소 농도 그리고 산소소모율 모두가 강제배연의 경우에 비해 상대적으로 증가하였다. 이는 강제배연인 경우에는 팬에 의한 유동이 연소가스를 희석시키지만, 자연배연에서는 전체 단면에서 기존에 존재하고 있는 공기만이 희석되는 결과로 판단되어 진다. 화원 근처에 있는 부분배연갤러리 댐퍼에서는 강제배연의 경우에 비해 3배 이상의 일산화탄소 농도가 측정되지만 속도나 온도는 거의 유사함을 볼 수 있다. 높은 CO 농도는 많은 화재가스를 포함하고 있다는 의미이고, 속도나 온도가 유사한 값을 보이는 것은 화재발생 초기부터 벽면 등에 열전달이 커짐으로서 설명할 수 있다.

Fig. 5의 천장면에서의 온도를 보면 화원에서 첫 번째 댐퍼까지는 급격히 온도가 감소하나 첫 번째 댐퍼를 지나서는 강제 배연의 경우와 거의 유사함을 볼 수 있다. 또한 화원에서 2 m 하류에 위치한 댐퍼의 천장에서는 역시 온도의 변동이 발견된다. Fig. 6의 화원 주위 종방향 온도분포를 보면 강제배연에 비해 터널단

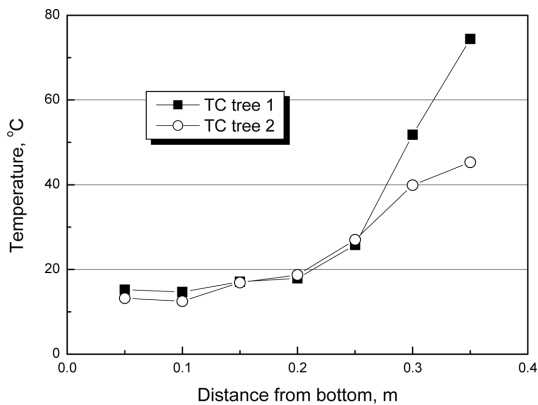


Fig. 6. Temperature profiles with height for natural ventilation.

면 3과 5에서 상부온도의 많은 차이가 있다. 이는 연기피집 또는 혼합이 자연배연인 경우 상당부분 하류방향으로 지연됨을 의미한다. 또한 두 그림에서 상부의 각 3지점 온도를 제외하고는 거의 온도변화가 없으므로 성층화된 연기 층은 단면 3에서 약 3/7 상부에만 존재하고 첫 번째 댐퍼를 지나서는 강제배연의 경우와 유사하다고 할 수 있다.

3.3 부분배연의 경우 배연효율 분석

열적모델을 사용하는 경우에는 배연효율을 결정할 수 있는 두 가지의 방법이 있다. 하나는 배연구에서 측정된 유속과 온도로부터 상온의 기체가 얻은 열량을 구할 수 있고, 이 값과 열원에서 발생하는 발열량의 비로서 계산할 수 있다. 이 방법은 모든 단면에서 단열 조건인 경우 사용될 수 있다. 다른 하나는 화원에서 생성된 연소가스의 양을 부분제연 갤러리에서 배출하는 양으로 나눈 값으로서 효율을 측정하는 방법이다. 이러한 두 가지의 방법 중에서 본 터널모형에서는 단열 처리를 하지 않았을 뿐 아니라 실험적으로 단열의 조건을 만들기가 매우 어려우므로 후자의 방법으로 배연 효율을 결정하였다. 실제로 발열량 기준으로 배연 효율을 측정할 경우에 1-2%의 효율만이 계산되는데, 이로 부터 상당한 양의 열이 모형터널 벽면을 따라 소실됨을 알 수 있었다.

하지만 온도 데이터로 각 실험 및 수치해석에서 얻은 결과를 비교하기 위해서는 화원에서 발생하는 연기의 양과 연기의 평균온도를 알고 있어야 배연효율을 얻을 수 있다. 열적 실험에서는 화원에서 발생하는 연기의 양과 평균온도를 측정할 수 없으므로 이론적 해석에서 이러한 화원과 연기의 정보를 얻어야 한다. 다

행히 등온기체모델에서 각 화재규모별 천장면에서의 연기온도 및 연기량을 계산할 수 있으므로 이 값을 적용하였다.^{6,9)} 이러한 이론적 근거에 의한 산출된 고온 연기량을 사용할 때, 비교에 의해 그 정확성을 나타낼 수 있는 물리량이 바로 화원 상부의 열전대에서 측정된 연기온도이다. 같은 5 MW급 화재에서 온도를 비교하여 보면 이론적인 값은 309°C이지만 열적모델의 실험에서 측정된 값은 256°C로 약 50°C의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이의 원인은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째는 이론적 열전달 값의 부정확성이다. 실험적 온도가 낮게 나왔으므로 이론보다 많은 열전달이 이루어져 있음을 가정할 수 있다. 이러한 초과 열전달의 이유는 복사열 손실의 증대와 대류 열전달의 가능성이라 할 수 있다. 복사열 분율은 이론적으로 30%를 채택하였는데 이 값은 다른 연구자^{2,9)}에 의해 적절한 값으로 평가될 뿐 아니라 터널외벽의 온도가 극저온이 아니므로 일단 논의에서 배제할 수 있다. 다음의 가능성은 대류열전달의 증대다. 대류열전달의 증가는 외벽 온도의 점차적인 증가로 볼 수 있는데, 실제 실험에서 외벽의 온도는 상온에 비해 그리 높지 않으므로 이러한 효과를 무시할 수 있다고 판단된다. 두 번째 온도 차이의 원인은 화염이 초기에 정상상태에 도달하지 않았다는 가정이다. 실제 측정된 화염 상부에서의 온도는 점화 후 수십 초 지난 후에 측정된 값으로 정상상태로 볼 수 없다. 점화 후 초기에는 스테인레스 외벽으로의 열전달과 연료 하단의 물로 많은 양의 열이 빠져나가므로 연료표면에서의 증발이 둔화되고, 궁극적으로는 적은 발열량을 기록할 것으로 판단된다. 본 해석에서는 상기한 두 가지의 원인 중 두 번째의 가정보다 타당한 원인으로 판단되었다. 이러한 경우에 본 연구에서 측정된 온도는 화염이 정상상태에 도달한 600 초 후의 값이므로 이론적 값을 그대로 사용하여 배연 효율 등을 비교하였다. 즉, 582 K와 625 l/min을 화원에서 발생한 연기의 온도와 유량으로 사용하였다. 또한, 배연효율을 결정하기 위해서는 공기와 혼합된 연기의 정압비열을 계산하여야 하는데 일반적으로 부분제연 갤러리에서의 유체 온도는 50°C 정도이므로 온도에 따른 비열의 변화는 무시하였다.

또한 연소가스 양으로서 효율을 계산하기 위해서는 열원에서 발생하는 전체 가스의 유량과 실험에서 효율 계산에 사용할 수 있는 기체 종류를 선정하여야 한다. 먼저 선택된 기체종류는 일산화탄소(CO)이다. 일산화탄소를 사용할 수도 있지만 현재 실험에 사용되는 계측기의 특성상 일산화탄소의 경우에 보다 높은 분해능을 가지므로 효율계산에 사용되었고 실험에서와 같이

저온에서는 일산화탄소가 반응하지 않으므로 초기 생성된 값을 그대로 유지한다고 볼 수 있다. 전체가스 유량은 5 MW 등온기체 실험에서 사용된 이론적인 값을 사용하였다. 그러면 다음의 식으로 부분제연 갤러리의 배연효율을 결정할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{A_p \cdot v_p \cdot X_{CO}}{Q_s \cdot X_{CO,s}} \quad (1)$$

여기서 A(m²), v(m/s), X, Q(m³/s)는 각각 단면적, 속도, 부피분율, 유량을 의미하고, 하첨자 p와 s는 부분배연갤러리와 화원을 의미한다. 본 연구에서는 화원으로부터 발생하는 CO의 농도, X_{CO,s}는 유동이 없는 상태인 자연배연에서 부분배연갤러리를 가동시키지 않은 조건에서 화원 상부에서 측정된 값인 23 ppm을 사용하였다.

Fig. 7과 Fig. 8에 부분제연 갤러리의 배연효율을 도시하였고, 각각 등온기체모델의 결과⁶⁾와 비교하였다. 먼저 자연배연 조건인 Fig. 7에서는 부분배연갤러리의 배연량은 앞의 2개의 댐퍼에서 거의 결정한다고 판단된다. 또한 전체적으로 열적모델을 사용하였을 경우 등온기체모델에서 산정된 값보다 큰 효율을 보이지만 최종 효율은 거의 같은 값을 보이고 있다. 이 그래프에서 댐퍼위치가 C에서 E로 갈수록 이론적으로는 증가 또는 접근하여야 하지만 약간 감소하는 모습을 볼 수 있는데 이는 분석의 오차에서 발생한 것으로 판단된다. 본 실험결과의 오차원인은 크게 두가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 분석기의 오차인데 측정장비의 경우 가스분석기에서는 본 실험의 측정범위에서는 최고 2 ppm의 오차가 발생하고, 열선유속계의 경우 0.05 m/s의 오차가 있다. 두 번째 원인은 흡기팬의 불균일성에

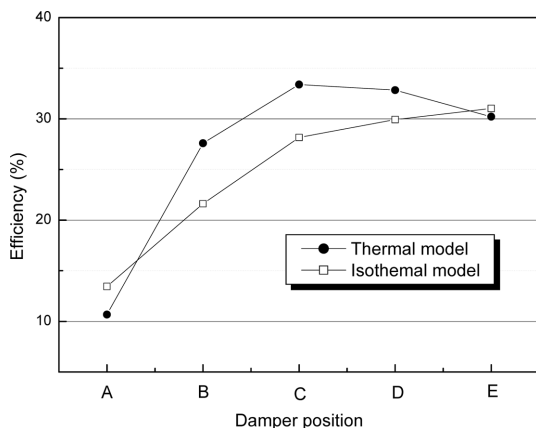


Fig. 7. The smoke extraction efficiency for natural ventilation.

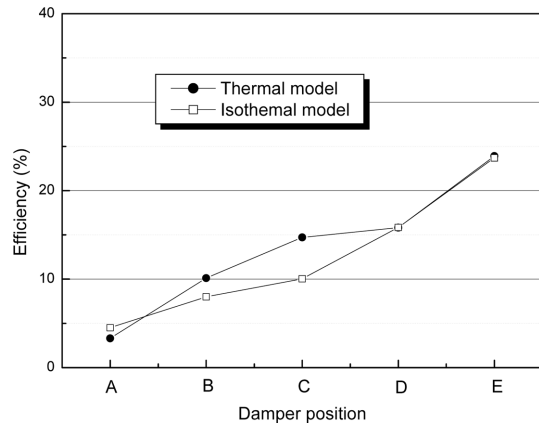


Fig. 8. The smoke extraction efficiency for longitudinal ventilation.

기인한다. 실험유속범위에서는 최고 약 10%의 편차(drift)를 가지고 있는데 속도오차의 주 원인은 계측기 보다는 시간에 따른 흡기팬의 유량 불균일성으로 판단된다. 그러므로 최종 효율을 계산하는 경우에는 약 18% 정도의 최고 효율오차가 예상되지만 시간평균을 하여 오차를 최소화시켰다. Fig. 8의 강제배연인 경우의 배연효율을 보면 거의 선형적으로 효율이 증가하고, 최종 배연효율은 자연배연에 비해 약 30% 작다. 그리고 등온기체모델과 거의 모든 구간에서 일치하는 경향을 얻었으며 최종효율 또한 정확히 일치한다. 이상의 결과로서 두 모델의 검증은 한 결과 어떤 모델을 적용하여도 터널 화재시 연기의 부분배연 효율을 잘 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 갤러리의 배연설비만을 가동할 경우, 터널의 성층화가 유지되어 터널 전체에 연기가 혼합되는 것을 막을 수 있으며, 주로 상부에 존재하는 많은 연층의 배연에도 도움이 된다. 또한 강제배연인 경우에는 비록 터널내 유속에 의해 연기가 급격히 혼합되어 부분배연 갤러리의 유속 증가와 비례적으로 배연효율도 증가함을 보였다. 그러므로 화재 발생시 연층을 효과적으로 제어하기 위해서는 사람이 대피중에는 터널내부에 작은 유속을 유지하여 연층의 성층화를 유지하면서, 성층화된 연층 상부의 연기를 배연시키는 방법으로 운영되어야 할 것이다.

4. 결 론

40 m 댐퍼간격의 부분배연설비를 가지고 있는 침매 터널에서 화재시 배연효율을 분석하기 위해 플화재를

이용하여 1/20로 축소된 모형에서 실험을 수행하였다. 제트팬 가동 유무가 배연에 미치는 영향을 고찰하기 위해 화재가 발생하였을 때 주위 유동이 없는 경우인 자연배연과 임계속도로 제트팬을 가동하는 강제배연의 경우에 터널내의 온도분포와 배연효율을 실험하였다.

1. 천장면에서의 온도는 자연배연의 경우에 화원에서 첫 번째 댄퍼까지는 급격히 온도가 감소하나 첫 번째 댄퍼를 지나서는 강제 배연의 경우와 같이 거의 일정하다. 화원 주위 종방향 온도분포를 보면 강제배연에 비해 상부온도가 많은 차이가 있다. 이는 연기피집 또는 혼합이 자연배연인 경우 상당부분 하류방향으로 지연됨을 의미한다. 또한 자연배연인 경우 상부의 각 3지점 온도를 제외하고는 거의 온도변화가 없으므로 성층화된 연기층은 화원 근처에서 약 3/7 상부에만 존재한다.

2. 자연배연 조건에서는 부분배연갤러리의 배연량은 앞의 2개의 댄퍼에서 거의 결정될 정도로 상류쪽 설비가 큰 역할을 한다. 강제배연인 경우의 배연효율을 보면 거의 선형적으로 효율이 증가하고, 최종 배연효율은 자연배연에 비해 약 30% 작다.

3. 등온기체모델과 본 연구에 사용된 열적 모델로부터 얻은 부분배연 효율은 거의 모든 구간에서 일치하는 경향을 보이므로 어떤 모델을 적용하여도 터널 화재시 연기의 부분배연 효율을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999, PIARC Committee on Road Tunnels.
2. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Son, New York(1998).
3. X. C. Zhou and J. P. Gore, "Air Entrainment Flow Field Induced by a Pool Fire", Combustion and Flame, Vol. 100, No. 1, pp.52-60(1995).
4. E. J. Weckman and A. B. Strong, "Experimental Investigation of the Turbulence Structure of Medium Scale Methanol Pool Fires", Combustion and Flame, Vol. 105 No. 3, pp.245-266(1996).
5. Y. Wu and M. Z. A. Baker, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation System - A Study of the Critical Velocity", Fire safety Journal, Vol. 35, pp.363-390(2000).
6. 유용호, 이의주, 신현준, 신한철, 윤영훈, "터널화재시 부분배연설비에 의한 배연효율 향상에 관한 연구", 터널기술, Vol. 8, No. 1, pp.53-63(2006).
7. 유용호, 이의주, 신현준, "터널화재시 부분배연설비의 운영방안을 위한 수치해석적 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol. 20, No. 2, pp.72-79(2006).
8. 이의주, 안찬술, 신현준, 오광철, 이은도, "작은 풀화재에서의 연기특성", 한국화재소방학회 논문지, Vol. 19, No. 3, pp.58-63(2005).
9. O. Vauquelin and O. Megret, "Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel", Fire Safety Journal, Vol. 37, pp.525-533(2002).