

터널 화재에서 연기거동에 관한 실험적 연구

유병훈, 황철홍, 이창언, 김정엽*, 신현준*
 인하대학교 기계공학과, 한국건설기술연구원*

An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fire

Byung-Hun Yoo, Chul-Hong Hwang, Chang-Eon Lee, Jung-Yup Kim*, Hyun-Joon Shin*
*Department of Mechanical Engineering, INHA University, Korea Institute of Construction
 Technology**

1. 서론

국내에서는 산악지형이 많은 지리적 특성상 장대터널의 수요가 급증하고 있다. 그러나 지하공간을 활용하는 장대터널은 반 밀폐적 구조로 인하여 화재 시 배연에 많은 어려움이 있으며, 고온의 유독성 연기로 인하여 호흡과 시야의 장애 및 심리적인 공포감으로 대형 사고를 초래할 수 있다. 장대터널의 수요가 급증하는 국내현황을 고려하면, 화재 시에 발생하는 여러 현상들을 체계적으로 규명하여 터널의 방재, 환기 및 피난설비를 설계하는데 필요한 자료를 구축하는 것은 매우 시급한 과제라 할 수 있다.

일반적으로 터널 화재 시 열 및 연기의 거동을 제어하는 방법에는 자연배기 방식과 강제배기 방식이 있다. 터널 화재에 관한 기존 연구로서 Kim¹⁾ 등과 Chow²⁾ 등은 수직구를 통한 자연배기 터널에서의 수치적, 실험적 연구를 통해 발열량에 따른 연기의 거동 특성에 대해 파악하였다. 그리고 Lee³⁾ 등은 자연배기 시에 터널 단면의 형상 변화에 따른 연기의 거동특성을 파악한 바 있다. 또한, Kim⁴⁾ 등과 Atkinson⁵⁾ 등은 터널의 구배에 따른 연기의 거동을 수치해석 및 모형터널 실험을 통해 검토하였다. 강제배기에 관한 연구로는 Thomas⁶⁾ 등과 Kennedy⁷⁾ 등이 실험 및 Froude 수에 기초한 이론해석을 통해 터널 내 강제배기 시에 발열량과 임계속도(Critical velocity)간의 관계식을 도출한 바 있다.

그러나 대부분의 연구에서는 모형터널의 제작 및 설치공간의 문제점으로 비교적 짧은 길이의 모형터널을 대상으로 연구를 수행하였다. 화재 발생 시 터널 길이에 따른 연기의 거동특성이 다르기 때문에 보다 유효한 실험결과를 얻기 위해서는 장대터널의 단면과 길이에 대한 정확한 축소모형에서의 실험이 요구되어 진다. 또 화재 실험에서 가장 중요한 변수인 화원에 대한 정확한 모사도 매우 중요하다. 기존 실험에서 주로 사용된 Plume 화원은 실제 화재에서와 비슷한 거동을 갖는 화염을 생성시키는 반면에, 시간에 따른 발생 열량이 변하게 되어 화재 연구에 필요한 여러 인자들을 독립적으로 조절하기 어렵다는 단

점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에 건설 예정인 실제터널의 축소모형을 대상으로, 시간당 발생 열량이 일정한 화원을 이용하여 자연배기 상황에서 사람들이 대피할 수 있는 비상출구 위치의 적절성을 검토하고, 강제배기 상황에서 연기의 역류를 방지하기 위한 제연설비의 설계에 필요한 기초적인 자료를 획득하고자 한다.

2. 실험방법

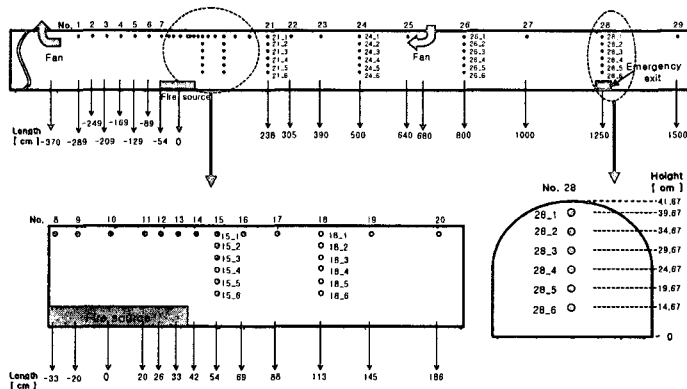


Figure 1 Schematic of the experimental setup and thermocouples positions

2.1 원형 및 모형터널의 개요

본 연구에서 대상으로 하는 건설 예정의 장대 터널(이하, 원형터널)은 길이 600m, 최대 높이 7.5m 및 폭 10.2m이며, 화재가 발생할 경우 대피할 수 있는 비상출구(Emergency exit)는 225m 간격으로 설치되어 있다. 실험을 위한 모형터널은 원형터널을 1/18로 축소한 것으로 길이 33.4m, 높이 0.417m, 폭 0.566m의 크기를 갖는다. Figure 1은 이 모형터널의 개략도를 나타낸 것으로서, 비상출구는 대형버스를 축소한 모형화원을 기준으로 약 12.5m에 설치되었다. 모형터널의 재료는 열에 의한 변형을 막기 위하여 두께 0.005m의 강화 아크릴을 이용하였다. Table 1은 실험에 이용한 모형터널의 제원 및 화원의 발열량을 나타낸 것이다.

Table 1 Model tunnel using Froude scaling

	실제터널	모형터널
터널 수평 길이	600 m	33.4 m
터널 수직 길이	7.5 m	0.417 m
비상출구 위치	225 m	12.5 m
발열량 (대형버스기준)	20 MW	14.55 kW

터널 내부의 연기의 거동을 계측하기 위하여 화원 근처에는 R-Type 열전대를 사용하였고, 화원 근처를 제외한 다른 부분에는 T-Type 열전대를 사용하였다. Figure 1에서 열전대의 위치는 점으로 표현되었다. 연기의 수평방향 이동속도를 계측하기 위하여, 열전대는 천정으로부터 약 2cm 낮은 곳에 등비 간격으로 설치하였다. 또

연기의 수직분포를 파악하기 위하여, 열전대를 화원과 비상출구 사이의 6곳에 5cm 간격으로 균등하게 배치하였다. 강제배기의 경우에는 화원을 중심으로 양쪽의 설치된 팬을 이

용하여 외부공기의 유입과 배출을 유도하였다.

2.2 화원의 설계

화재시의 연기(smoke) 거동은 화염의 분포면적, 화염길이 및 시간당 발생 열량(열 방출율) 등에 따라 매우 달라진다. 이러한 거동을 정확히 파악하기 위해서는 가능한 위와 같은 화재의 변수들을 독립적으로 가변시킬 수 있는 화염 발생장치(이하, 모형화원)가 요구된다. 기존의 많은 연구들에서는 Plume 화원을 이용하였으나, 이 경우에는 시간 경과에 따른 기화율의 변화로 인해 열 방출율, 화염길이 등의 제어가 어렵고, 또 연료 소모에 따른 화염 기부(Base)의 위치변화로 인하여 화재의 특성이 시간경과에 따라 변하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 모형화원의 문제점을 보완하기 위하여 시간에 따른 액체 연료의 기화율 및 화염 길이를 거의 일정하게 지속시킬 수 있는 램프 심지(Wick)를 사용하였다.

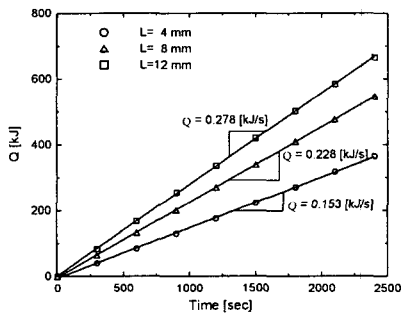


Figure 2 The variation of heating value for one wick

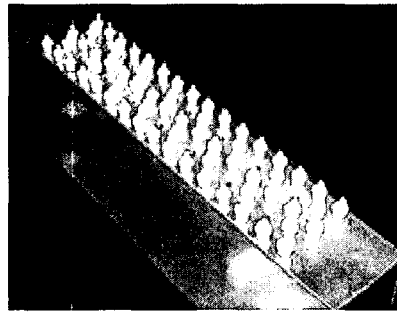


Figure 3 Fire source using a wick

Figure 2는 약 5mm의 지름을 갖는 심지 1개에 대한 발열량(Q)을 측정한 것으로 연료는 43.12 kJ/g의 발열량을 갖는 등유를 사용하였다. 열 방출율(\dot{Q})은 시간에 따른 연료 소모량을 측정하여 산출하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 특정 심지 길이에 대해 열 방출율은 시간에 관계없이 거의 일정하며 심지 높이에 비례하여 열 방출율이 증가함을 알 수 있었다.

Figure 3은 제작된 모형화원을 나타낸 것이다. 이 모형화원은 실제버스의 길이를 축소 한 것으로 직육면체의 강철 상자에 연료인 등유를 넣고, 상판에는 필요한 개수의 심지를 등 간격으로 부착하여, 모형 화재의 분포면적, 화염길이 및 열 방출율을 조절할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 대형버스의 화재에 상응하는 열 방출율 14.55kW를 구현하기 위해 지름 5mm, 높이 8mm의 심지 80개 설치하였다. 이때 심지 개수의 증가로 인한 불완전 연소를 고려하기 위하여 연소효율은 0.8로 가정하였다. 기존의 연구에서는 연소효율을 0.7로 가정하고 있으나, 본 연구에서 사용하는 화원은 완전연소의 가능성이 크기 때문에 보다 높은 연소효율을 부여하였다. 이에 대한 명확한 검증은 추후 이루어져야 할 것으로

보인다.

위와 같은 결과로부터 심지 화원은 심지의 직경, 높이 및 개수, 분포 위치를 적절히 조절하여 화염 분포면적, 화염길이 및 열 방출율, 화재강도(열 방출율/화재면적) 등을 조절할 수 있어 화재연구의 화원으로 유용함을 알 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자연배기

화원에서 발생하는 연기는 부력효과로 상승한 후에 터널 천정을 따라 이동하는데, 하류로 진행하면서 터널 천정으로의 열손실 때문에 연기의 밀도가 증가하게 되고 연기는 어느 시점에서 점차 하강을 하게 된다. 이 연기가 하강하는 시점 및 거리는 화재 발생 시 대피를 위한 시간, 가시거리, 유독성 물질로부터의 안전성 확보 측면에서 매우 중요한 정보이다. 자연배기 시 대피할 수 있는 시간을 확보하기 위해서는, 사람 키 높이까지 연기가 하강하는 시간 및 거리를 예측할 수 있어야 하며, 이 정보는 비상출구의 위치 선정에 매우 중요한 자료로 활용 된다. 한 예로, 장대터널 내에서 화재 발생 시 250m의 거리를 사람이 대피하는데 걸리는 평균 시간은 기존 문헌에서 일반적으로 4분으로 언급되고 있다.⁸⁾

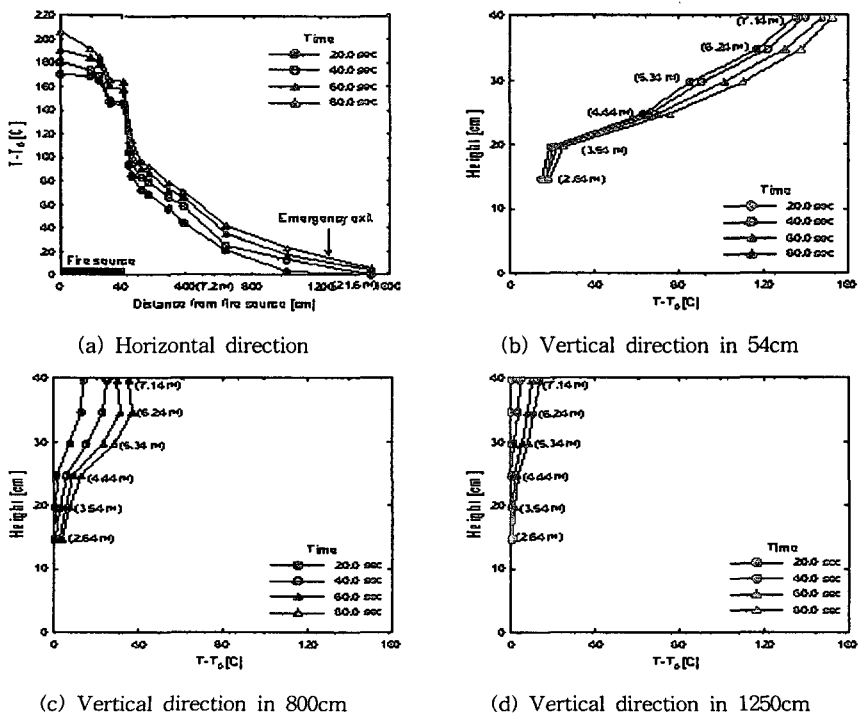
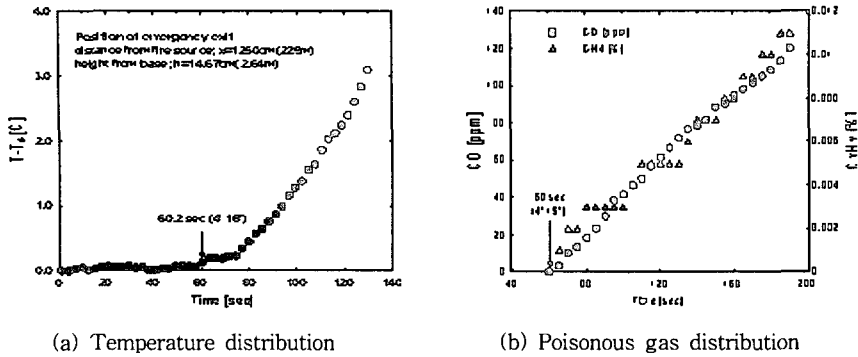


Figure 4 Temperature distribution of horizontal and vertical direction

Figure 4(a)는 자연배기 상태에서 천정 바로 밑에서 측정한 온도들의 수평방향 분포를 도시한 것으로, 측정 시간은 화재 발생을 기준으로 20초 간격으로 80초까지 측정하였다. x축은 화원으로부터의 거리를 나타내며, x축의 괄호 안의 수치는 실제 원형터널의 길이이고, 화원 근처(0~42cm)는 이해를 돕기 위해 확대 도시하였다. 온도 분포를 보면 화원의 중심부에서 온도가 최고값을 나타내며, 시간경과에 따라 점차 높아져 화재 발생 후 20초에서 170℃이었던 것이 80초가 지나면서 210℃까지 상승한다. 화원 부근의 고온 분포는 연기의 상승과 함께 복사열에 의한 영향이 복합적으로 작용되었기 때문으로 예상된다. 화재 발생 후 20초가 지나면 화원 중심으로부터 약 1000cm 전까지 온도 상승이 있고, 40초 후에는 비상출구의 위치인 1250cm에서 대략 10~20℃의 온도 상승이 있다. 이를 통해 터널 최 상부에서는 화재 발생 후 40초 이전에 연기가 비상출구 위치까지 도달함을 알 수 있다.

Figure 4(b)(c)(d)는 화원 중심에서 측방향으로 54, 800, 1250cm 떨어진 위치에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시한 것이다. 측정시간은 수평방향의 온도분포에서와 같이 화재 발생 후 20초 간격으로 80초까지 측정하였다. 각 그림에서 x축은 온도 상승값을 나타낸다. 또 y축은 모형터널 내에서의 측정점 높이를 나타내며, 괄호 안의 수치는 상응하는 실제 원형터널 내에서의 높이를 의미한다. Figure 4(b)는 화원에서 54cm 떨어진 곳에서 측정한 온도의 수직방향 분포를 나타낸 것이다. 측정한 모든 시간에서 온도는 터널 천정 부근에서 하부로 갈수록 급격히 하강하며, 각각의 위치에서 시간 경과와 따라 점진적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이들 온도 상승은 화원과 매우 가까운 위치에서 측정한 값이기 때문에 고온의 연기 이동과 더불어 화염의 복사열이 복합적으로 작용한 결과에 기인한다고 할 수 있다. Figure 4(c)는 화원에서 800cm 떨어진 곳에서 측정한 온도의 수직방향 분포를 나타낸 것이다. 온도의 수직방향 분포 및 시간 경과에 따른 변화 경향은 Figure 4(b)와 유사하나, 온도 상승의 절대치에서는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이 지점에서의 천정 부근 온도는 80초가 지나도 천정은 약 40℃, 하부에서는 2~3℃정도만 상승함을 있음을 알 수 있다. 이는 연기가 터널 천정을 따라 이동하면서 발생하는 열손실 및 주변 공기와의 희석에 의한 것으로 예상된다. Figure 4(d)는 비상출구의 위치에 해당되는 측방향 길이 1250cm의 결과를 도시한 것이다. 이 지점에서의 천정 부근 온도는 20초 후부터 약간씩 증가하여 80초에서 최대 10℃까지 상승하나, 하부에서는 화재 발생 후 80초가 지나도 온도가 거의 변하지 않는 것처럼 보인다. 이를 보다 상세히 검토하기 위해, Figure 5의 비상출구 위치에서 연기의 영향을 면밀히 검증하였다.



(a) Temperature distribution (b) Poisonous gas distribution
Figure 5 Temperature and poisonous gas distribution in emergency exit

Figure 5는 실제터널의 비상출구 위치(1250cm)에서의 사람 키보다 약간 높은 위치(14.67cm)에서 시간에 따른 온도 및 유독물질인 CO의 농도를 도시한 것이다. Figure 5(a)의 온도분포에서 초기의 미소한 온도변화는 외부공기의 교란에 의한 것으로 판단되며, 화재 발생 후 약 60초 후에는 온도가 일정한 경향으로 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러나 온도 상승값은 80초에서 0.5°C, 120초에서 2°C로 매우 미소하다. Figure 5(b)는 미연가스인 CxHy 농도와 CO 농도를 측정된 것으로, CO 농도를 보면 화재 발생 후 60초가 지나면 감지되기 시작하여 80초 후에는 20ppm, 120초 후에는 60ppm, 200초 후에는 약 100ppm으로 일정하게 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 시간 경과에 따라 계속적으로 증가하는 이유는 시간 경과와 더불어 터널 내의 산소량 감소로 인한 불완전 연소가 더욱 활발히 진행된 결과라 여겨진다. 이와 같은 경향은 CxHy 농도 분포에서도 알 수 있다. 단, CxHy 농도의 경우에는 센서의 낮은 해상도로 인하여 국부적으로 일정한 값을 나타내지만, 시간에 따른 증가 경향을 CO 농도와 동일함을 알 수 있다.

이 결과들로부터 화재 발생 후 60초가 지나면 비상출구 위치에서도 사람 키 높이에 해당하는 하부에서 연기의 영향이 있음을 알 수 있다. 이는 본 실험의 모형터널에서는 비상출구의 최대거리인 1250cm의 거리를 57초안에 대피해야하는 것으로, 본 연구에서 대상 터널의 비상출구 위치는 제연설비가 가동하지 않을 시에도 비교적 적절한 것을 알 수 있다. 그리고 연기거동의 감지는 CO와 같은 유독가스에 의한 감지가 유리하며, 온도에 의한 감지는 그 변화가 미소하기 때문에 연기 감지에는 주의가 요망 된다.

3.2. 강제배기

장대터널의 화재 시 연기유동의 제어를 위하여 터널내부의 상류에서 제연설비를 통해 강제배기를 수행하게 된다. 일반적으로 임계속도는 화원 근처에서 연기가 역류되지 않는 순간에 제연설비가 설치된 상류위치에서의 단면 평균유속을 의미한다. 그러나 이러한 의미의 임계속도는 터널형상, 화원의 배치 및 크기 등에 의해 상당히 다른 값을 갖게 된다.⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 연기의 역류현상에 대한 보다 근본적인 접근을 위해 상류에서 제연설비를 이용하여 시간에 대해 일정량의 유량을 공급하고 각 유량에 대한 화원근처에서의 단면 평균유속을 임계속도로 정의하였다.

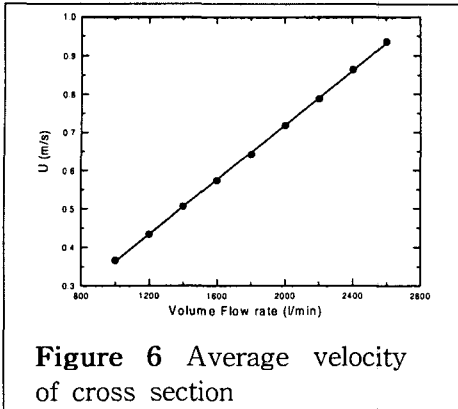


Figure 6 Average velocity of cross section

모형터널에서 제연설비 가동 시 터널 내의 연기 거동 및 임계속도를 측정하기 위하여, Figure 1에서와 같이 우측에서는 제연설비를 통해 외부공기를 유입해주고, 좌측에서는 터널 내부의 공기를 외부로 배출하게 설치하였다. Figure 6은 화원근처에 해당되는 수평 길이 54cm에서의 제연설비에 의해 공급되는 공기의 단면 평균유속을 측정한 것이다. 이때 평균유속은 각 유량에 대해 터널 단면의 중심부에서 등 간격으로 10개의 위치에서 측정하여 평균하였다. 유량이 1000~2600 l/min으로 변할 때

단면의 평균 유속(U)은 0.35~0.95m/s로 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 본 연구에서는 1000 l/min에서 2600 l/min까지 유량을 순차적으로 증가시키면서 화원근처의 연기 역류현상을 온도 측정을 통해 관찰하였다.

Figure 7(a)는 강제배기의 공급 유량이 1600 l/min (0.57m/s)일 경우에 터널 천정 근처에서 시간에 따른 수평방향 온도분포를 도시한 것이다. 그림에서 x축은 화원으로부터의 수평방향 거리, y축은 온도 상승값을 나타내며, 화원부근(-54~42cm)의 온도분포는 확대 도시하였다. Figure 4(a)의 자연배기와 비교할 때 강제대류에 의해 최고 온도점이 하류방향으로 이동되었으며, x=42cm 근처에서 매우 큰 구배에 의해 온도가 감소한다. 시간에 따른 온도경향을 살펴보면, 상류방향으로 온도가 조금씩 증가하고 있다. 이를 통해 터널의 천정부분을 통하여 미소하게 연기가 확산되고 있음을 짐작 할 수 있다.

Figure 7(b)와 (c)는 이를 보다 자세히 검토하기 위하여 각각 수평 길이 54cm와 113cm에서의 수직방향 온도를 시간에 따라 도시한 것이다. Figure 7(b)에서 보면 터널 천정 근처의 온도는 80~120℃ 정도의 상승을 보이고 있어, 연기의 역류를 확인할 수 있다. 그러나 터널 하부의 온도변화는 거의 없어 연기의 하강이 100초 이내에는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Figure 7(c)의 결과도 Figure 7(b)의 결과와 마찬가지로, 터널 천정 부근의 온도는 최대 40℃까지 상승하는 것으로 보이나, 터널 하부의 온도는 거의 변하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 제연설비에 의해 유입되는 총 공기유량이 1600 l/min(0.57m/s)일 때 화원 근처의 터널 천정부근에는 미소량의 연기가 역류되고 있으나, 강제 배기에 의한 연기가 터널의 하부로 역류되거나 하강되지 않음을 확인할 수 있다.

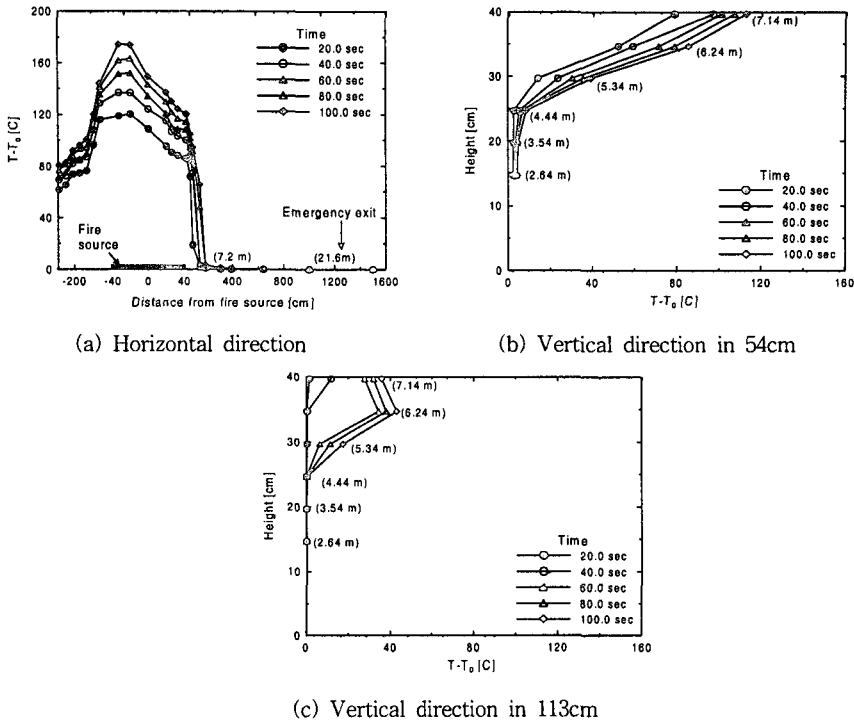


Figure 7 Temperature of horizontal and vertical direction at 1600 l/min

Figure 8(a)는 강제배기의 공급 유량이 1400 l/min (0.50m/s)일 경우의 터널 천정에서의 수평방향 온도분포를 시간에 따라 도시한 그림이다. 각 시간에 따른 분포는 Figure 7(a)와 비슷한 경향을 보이고 있으나, 제연설비의 공급 유량의 감소로 인하여 공간에 대한 온도 구배가 약간 감소되었음을 볼 수 있다. 즉, 역류되는 연기의 양이 증가하여 화원 우측의 온도상승이 보다 커짐을 볼 수 있다.

Figure 8(b)(c)(d)는 연기가 역류되는 정도와 역류위치를 검토하기 위하여, 수평 길이 54cm, 113cm, 238cm에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시하였다. Figure 8(b)를 보면 터널 천정부근에서 시간이 지남에 따라 최대 110℃정도의 온도 상승을 보이고 있고, 터널 아래로부터 2.64m가 떨어진 터널 하부에서도 5~6℃정도의 온도 상승을 보이고 있다. Figure 8(c)는 수평 길이 113 cm일 때의 수직방향 온도분포를 도시한 그림으로 최대 80℃정도의 온도상승을 보이고 있다. 또한, 터널 하부에서는 대략 2~3℃의 온도분포를 보이고 있는데, 이것은 연기의 확산에 의한 온도의 상승보다는 상층에 유입된 연기가 외부 유입공기에 의해 반대방향으로 역류됨에 따른 온도상승으로 보여 진다. Figure 8(d)는 수평 길이 238cm에서의 시간에 따른 수직방향 온도분포를 도시한 것으로 터널 천정부근과 하부에서의 온도변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 이 결과를 통해 제연설비의 유량이 1400 l/min인 경우에 터널 천정부근에서의 역류가 일어나는 범위는 수평 길이 113cm와 238cm 사이에 있음을 알 수 있다.

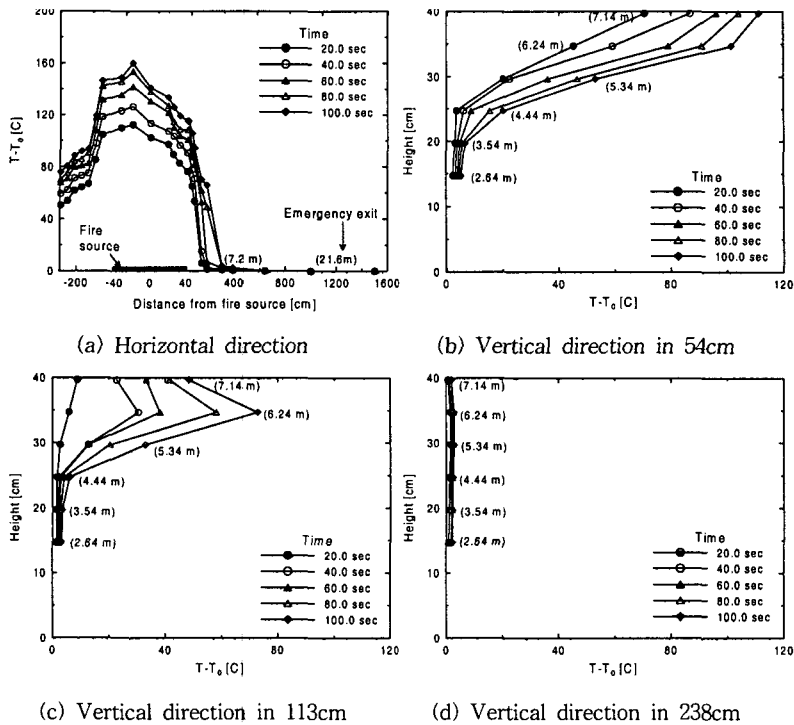


Figure 8 Temperature of horizontal and vertical direction at 1400 l/min

Figure 4(a), 7(a) 및 8(a)에서 화원 천정 근처의 최고 화염온도 값을 비교할 때, 자연배기에서는 약 210℃, 강제배기의 1400 l/min에서는 160℃이며 1600 l/min에서는 175℃이다. 강제대류의 열손실이 없는 자연배기의 경우가 가장 높은 최고온도를 갖게 됨을 알 수 있다. 그러나 1600 l/min의 경우에 1400 l/min에 비해 대류에 의한 열손실이 크어도 불구하고 더 높은 최고온도를 갖는다. 이는 강제대류의 열손실뿐만 아니라 강제배기로 인한 화염대의 산소공급으로 화염강도의 증가에서 그 원인을 찾아볼 수 있다. 실제로 본 연구에서는 화재 시 연료 및 공기 소모량에 대한 총괄 당량비를 측정하지는 못했지만, 1600 l/min의 경우에 대류 열손실에 비해 산소공급에 의한 화염강도의 증가로 1400 l/min보다 높은 최고온도를 갖는 것으로 추측된다. 위 결과를 통해 강제배기를 위한 공기 유입은 비록 상류로의 연기 확산을 방지할 수 있지만, 이른 당량비에 접근할수록 화재강도를 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이는 하류 방향으로 화재 전파를 촉진하는 부작용을 초래할 수 있으며, 이에 대한 보다 상세한 연구는 현재 진행 중에 있다.

4. 결론

본 연구에서는 축소 모형터널을 통한 자연배기 및 강제배기 시의 터널 내 연기거동에 관한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

심지를 이용한 시간에 따른 일정한 발열량을 갖는 화원의 제작을 통해 기존의 연구에

서 많이 이용된 Plume을 이용한 실험의 단점을 보완하였다.

제연설비가 가동되지 않은 자연배기 시의 터널 내 수평, 수직방향 온도분포 및 비상출구에서의 유독물질의 분포를 통해, 본 실험 대상의 실제터널에서 비상출구의 위치(225m)는 비교적 적절함을 알 수 있었다.

제연설비가 가동되는 강제배기 시 제연설비의 유량이 1600 ℓ/min(0.57m/s) 이상일 경우 터널 내의 연기는 역류되지 않음을 볼 수 있었고, 제연설비의 유량이 1400 ℓ/min(0.5m/s)일 경우에 수평 방향으로 113cm에서 238cm 사이에까지 연기가 역류되는 것을 알 수 있었다. 따라서 제연설비의 유량이 최소 1600 ℓ/min 이상이 되어야 연기의 역류가 발생되지 않음을 확인할 수 있었다.

이들의 연구결과를 바탕으로 화재에 영향을 주는 보다 구체적인 변수에 대한 체계적인 연구가 요구되어 진다.

후 기

본 연구는 “지하 공간전용 소화설비 및 소방방재 통합 시스템 구축에 관한 연구”의 일환으로 한국건설기술연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, S. C., Ryou, H. S., Lee, S. R. and Kim, C. I., 'A Study of Smoke Movement in Tunnel Fire with Natural Ventilation', Transactions of KSME B, Vol. 26, No. 7, pp. 976~982(2002).
2. Chow, W. K., 'On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation', Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, pp. 271~275(1998).
3. Lee, S. R., Ryou, H. S., Kim, C. I., 'An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Aspect Ratio of Tunnel Cross Section', Proceedings of the KSME 2003 Autumn Annual Meeting, pp. 115~120(2003).
4. Kim, W. K. and Han, W. T., 'The Study on the Burned Gas Movement respect to Tunnel Grade during Fire Disaster', Proceedings of the ASHRAE 2000 Winter Meeting, pp. 12~21(2000).
5. Atkinson, G. T., Wu, Y., 'Smoke Control in Sloping Tunnels', Fire Safety Journal, Vol. 27, pp. 335~341(1996).
6. Thomas, P. H., 'The Movement of Smoke in Horizontal Passage Against an Air Flow', Fire Research Station Note, No. 723(1968).
7. Kennedy, W. D. and Parsons, B., 'Critical Velocity: Past, Present and Future', One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels(1996).
8. <http://www.nidp.go.kr/>
9. Oka, Yasushi and Atkinson, G. T., 'Control of Smoke Flow in Tunnel Fires', Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 305~322(1995).