

장대 교통터널 화재시 임계속도 결정에 관한 실험적 연구

윤찬훈 (인하대학교 환경토목공학부 박사과정), 윤성욱 (GS건설 연구개발팀 과장),
 유용호 (한국건설기술연구원 화재설비연구부),
 김진 (인하대학교 공과대학 환경토목공학부 부교수)

1. 서 론

장대터널은 반 밀폐공간이라는 점과 더불어 매우 긴 연장을 가지고 있다는 점으로 인하여 화재나 사고가 발생하는 경우, 일반도로가 갖는 위험요소보다 더 많은 위험요소를 내포한다. 특히, 터널에서 화재는 기류의 확산이 제한되어 화재연기로 인한 가시거리의 감소, 유독성가스의 확산 및 급격한 온도상승, 산소농도의 감소를 초래하여 통행자의 생명을 위협할 뿐만 아니라 구조물이나 각종설비 및 차량의 손상을 유발시킬 수 있다.

터널 화재시 발생하는 스모그는 가시도(visibility)를 낮추고, 이로 인해 승객들로 하여금 탈출로를 찾지 못하게 한다. 또한 짧은 기간 동안의 호흡기 노출로 의식불명, 그리고 장기간의 노출은 사망까지도 초래할 수 있기 때문에 스모그의 억제는 매우 중요하다. 이런 이유로 장대터널에서의 방재 설비개념 중 스모그와 연소가스의 상승 특성(buoyant nature)에 의해 발생하는 역기류(back-layering)[1]를 방지케 하는 것이 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 또한, 화재시 터널에서 연층의 성층화를 유지하면서 열기류의 역류현상을 억제하기 위한 최소 풍속인 임계속도(Critical Velocity)는 비상시 적정 환기량 평가를 위해 사용되는 표준이 될 수 있고 이 공기속도의 정확한 예측 및 분석은 터널의 화재와 같은 비상시 핵심기술이 된다. 현재 세계적으로 임계속도를 유추하기 위하여 몇 가지의 식이 이용되고 있으나 국내의 경우 화원 전체가 연기로 충만하다는 가정에서 유도된 Kennedy 식(식 1)이 가장 보편적으로 이용되고 있다.

$$V_c = K_g \cdot \left(\frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A \cdot T_f} \right)^{1/3} \cdot Fr_c^{-1/3} \quad (\text{식 1})$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A \cdot V_c} + T_\infty$$

$$K_g = 1 + 0.0374 \gamma^{0.8}$$

- V_c : 임계속도, [m/sec]
- g : 중력가속도, [m/sec²]
- H : 터널높이, [m]
- Q : 화재강도, [KW]
- ρ_∞ : 공기의 밀도, [kg/m³]
- C_p : 공기의 비열, 1.005[KJ/kg K]
- A : 터널의 단면적, [m²]
- T_f : 연소 가스의 온도, [K]
- Fr_c : 임계 Fr 수
- T_∞ : 공기의 온도, [K]
- K_g : 구배계수
- γ : 경사, [%]

또한, 화재의 규모가 상대적으로 작은 경우, 화원주위에서 터널 단면의 일부분에만 연기가 존재한다는 사실로부터 Tetzner등은 Kennedy 식에 보정계수(β)를 제안하였다.[2] 보정 계수는 0~1의 범위를 가지며, 화재하중 및 터널 형상 등 여러 변수에 따라 다르게 나타난다.

$$V_c = K_g \cdot \left(\frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A \cdot T_f} \right)^{1/3} \cdot Fr_c^{-1/3} \quad (\text{식 2})$$

$$T_f = \frac{Q}{\beta \cdot \rho_\infty \cdot C_p \cdot A \cdot V_c} + T_\infty$$

$$K_g = 1 + 0.0374 \gamma^{0.8}$$

β : 보정계수

한편, 2003년도 감사원의 감사결과에 의하면 각 지방 국토관리청에서는 종류환기방식으로 터널을 건설하면서 합리적인 임계속도를 고려하지 않고 일률적으로 2m/s의 속도로 설계하고 있는 것으로 나타났다.[3] 또한 한국도로공사에서는 “고속도로 터널 환기시설 설계기준”을 마련하면서 Kennedy식만을 임계속도 산정방식으로 사용하였었으며, 이후 수행된 “고속도로 방재시스템 연구용역”결과에서는 Kennedy식을 보완한 D. Tetzner식이 실제 현상에 부합하는 것으로 보고하고 있다. 이에 본 연구에서는 합리적으로 임계속도를 고려하기 위하여 터널 화재 발생 후 제연설비를 가동시키는데 소요되는 시간, 피난자의 대피시간 등에 대한 연구 자료들을 취합, 정리하고, 이와 함께 Froude 상사를 기본으로 한 축소 모형실험(직

경:0.2m, 연장:20m의 일방향 쌍굴 터널을 제작)을 실시하여 최적 임계속도 산출을 위해 D. Tetzner식의 보정계수(β) 값을 결정하는 것에 연구의 초점을 맞추었다.

2. 축소모형실험

2.1. 상사법칙

축소모형실험은 차원분석을 통해 실험결과를 일반화시키고 스케일링법칙을 만족시키는 무차원 매개변수들을 이끌어내는 것이 매우 중요하다. 유동을 해석하기 위한 방법은 Froude 모델링과 압력 모델링 등이 있다. 압력모델링은 모델의 주위압력을 변화시킴으로써 실제상황을 모사할 수 있다. 그러나 도로터널 환기시스템의 경우 모형의 주위압력을 변화시키면서 실험을 행하기가 현실상 어렵기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 일반적이다. Froude 모델링은 주위와 같은 상태에서 실험을 행할 수 있으며, 화재의 Froude 모델링은 기하학적 형태가 보전되어야 하므로 차원분석을 통하여 $V/L^{1/2}$ 와 $Q/L^{5/2}$ 를 일정하게 유지시키면 된다. Froude 모델링의 한계는 점착력이 매우 큰 경우이지만, 난류조건이 지배적인 화재인 경우 점착력은 무시될 수 있기 때문에 Froude 모델링을 적용하는 것이 가능하다. 화재의 Froude 모델링을 이용한 모형터널과 실제터널의 열방출율 및 속도는 식 3과 같이 스케일링될 수 있다(Oka Y. and Atkinson G.T., 1995).[4]

$$\left(\frac{Q_m}{Q_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{5/2}$$

$$\left(\frac{V_m}{V_r}\right) = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^{1/2} \quad (\text{식 3})$$

Q : 열방출량, [kW]
L : 터널길이, [m]
V : 환기속도, [m/sec]

식의 하첨자 'm'은 축소모형에서 스케일된 값을 나타내며, 'r'은 실제 터널에서의 값을 나타낸다. 식 3을 적용하여 축소모형터널에서의 열방출율, 환기속도 등을 계산하였으며, 그 결과를 실험에 적용하였다.

2.2. 실험장치

제작 모형은 그림 1과 같이 일방향 쌍굴 터널에 최대한으로 근사하도록 기하학적 형상을 모사하였으며, 터널부분은 실제 터널 단면의 1/50로 축소하였으며, 길이 20m, 단면직경 0.2m의 아크릴 원관에 노면에 상당하는 아크릴판을 삽입하여 단면을 실제의 터널 기준단면

과 거의 동일하게 하였다. 화원 부분은 아크릴 원형관의 변형을 방지하기 위하여 특수 유리로 제작하였고, 실제 화재를 일으켜 스모크의 전파형태를 관찰할 수 있었다. 화재 초기에는 스모크가 터널 천정부에 집중적으로 분포하며, 점차적으로 터널 하부로 전파된다.

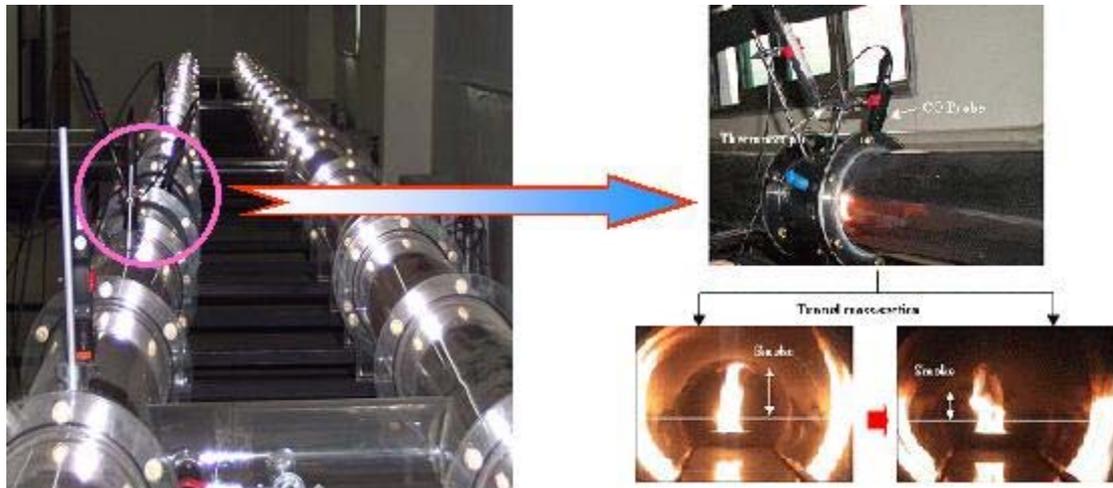


그림 1. 축소모형 실험 장치

측정은 터널내 열적 안정성 판단을 위한 온도와 화재시 발생한 연기의 거동특성에 따른 연기류를 확인하기 위하여 CO 농도를 대상으로 하였으며, 터널천장부에 연료의 불완전 연소로 발생하는 일산화탄소(CO)의 농도를 측정하기 위한 CO probe를 그림 2에서와 같이 설치하였다.

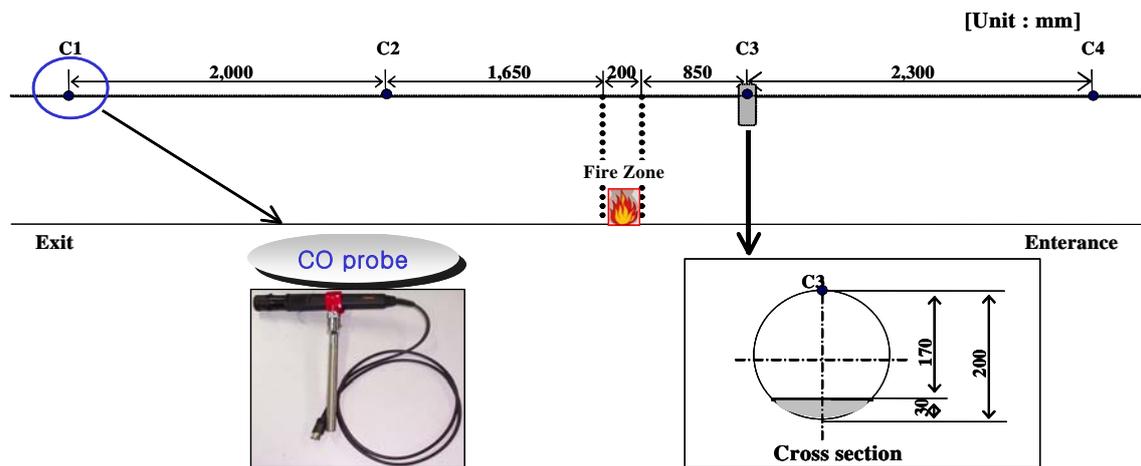


그림 2. 측정구간의 개략도(CO 센서의 위치중심)

또한, 화원은 직경이 7.5cm인 pool식 버너를 사용하였다. Pool식 버너란 수평연료표면에 서 연료가 자연 연소되는 버너로서, pool식 버너에서의 연소는 낮은 초기 모멘텀 확산화염

(diffusion flame)이라는 것과 부력효과에 의해 영향을 많이 받는다는 특징을 가짐으로써 실제 화재에서 나타나는 차량의 연소를 비교적 유사하게 모사할 수 있는 장점이 있다. 연료로는 가솔린을 사용하였으며, pool 화재의 경우 발열량은 식 4에 의하여 결정된다(O. Megret, O. Vauquelin, 2000). 또한, 연료의 연소효율은 증발된 연료가 모두 연소가 되는 것은 아니라는 가정 하에 0.7로 고려하였다.[5]

$$\dot{Q} = Hc \dot{m}'' A \quad (\text{식 4})$$

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' (1 - e^{-k\theta D})$$

$$\dot{m}_{\infty}'' : \text{휘발성물질의 질량감소율, [0.055kg/m}^2\text{sec, } k\theta=2.1 \text{ m}^{-1} \text{]}$$

$$Hc : \text{휘발성물질의 연소열, [휘발유=43.7 MJ/kg]}$$

$$A : \text{화원단면적, [m}^2\text{]}$$

모형 터널에서 발생한 화재의 강도는 현재 국내 방재 설계 시 기준이 되고 있는 화재 강도 20MW로 모사하였다.

3. 화재 시나리오

터널 내 화재가 발생하면, 일반적으로 운전자는 즉시 차량 밖으로 나와 터널 밖으로 탈출할 것이지만 경우에 따라서 어떤 운전자는 차량의 화재를 진압하기 위해 소화기를 찾거나, 화재상황을 외부에 알리기 위해 본인이 가진 휴대전화를 이용할 수도 있으며, 공황상태에 빠져 움직이지 못할지도 모른다. 터널 내 화재 발생시 운전자들의 행동을 미리 예측하고 고려한다면, 제연 시스템의 설비 및 운영비 절감은 물론 인명피해를 극소화시킬 수 있을 것이다. 따라서 제연에 필요한 터널 내 임계속도 결정에 앞서 화재 시나리오를 작성함으로써 제연설비의 가동시점을 추정 할 수 있다. 터널 내 화재의 시나리오는 크게 차량 운전자의 경우와 터널 중앙제어실의 운영자의 경우 두 부분으로 나눌 수 있다. 차량 운전자의 경우는 그림 3에서와 같이 차량 내부에서 화재를 인지하며 있는 시간(time in the car), 화재 인지 후 차량 밖으로 나와 탈출구로 향하기까지의 시간(hesitation time), 차량에서 터널 탈출구로 탈출하는데 걸리는 시간(walking time)으로 나누었다.

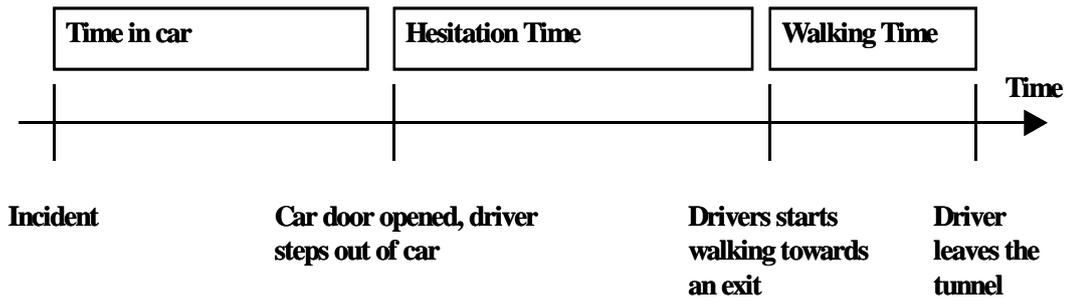


그림 3. 차량 운전자의 대피행동 [6]

제어실 운영자의 경우는 그림 4와 같이 화재 발생 후 터널 운영자가 감지하는데 소요되는 시간(warning time), 화재 감지로부터 위험의 정도를 인지하는 시간(reaction time), 화재 인지로부터 어떤 행동을 취할 것인지 결정하는 시간(decision time), 행동을 취하는 시간(movement time)으로 나누어 생각할 수 있으며, 결국, 위의 두 가지 관점에서의 화재 시나리오를 작성하여 현실에 가장 부합되는 상황을 만들었다.

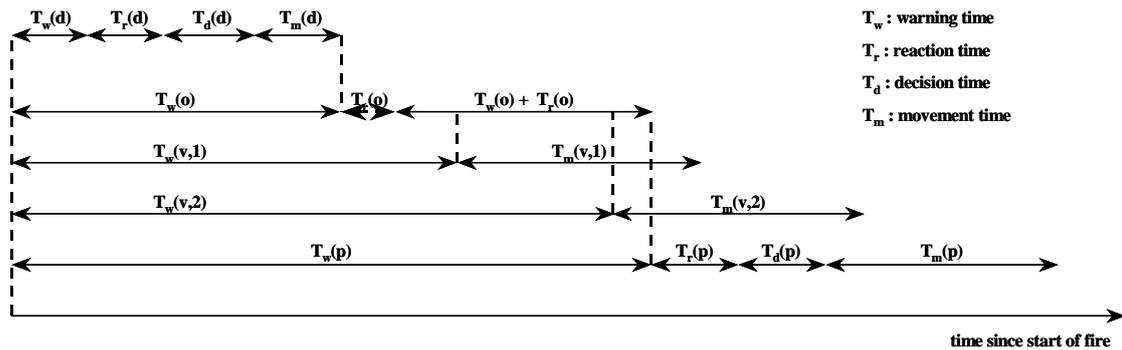


그림 4. 차량 운전자와 제어실 운영자의 피난시간 분포 [7]

터널에서 화재가 발생한 경우 화재설비가 즉시 가동되는 것이 가장 이상적인 형태이나, 실제 상황에서는 즉시 화재 설비가 가동되지 못하거나 일정시간 후에 가동이 된다. 혹은 화재 발생 후 전기 공급의 중단으로 인하여 화재설비가 가동되지 않거나, 비상팬의 역전운행으로 인하여 더 큰 문제를 발생시키기도 한다. 본 연구에서는 화재 인지에 소요되는 시간을 감안하여 현실에 가장 가까운 화재 설비의 가동시간을 결정하기 위해 차량 운전자의 대피 시나리오와 제어실 운영자의 조정 시나리오 중 적합한 상황을 가정하여 종합적으로 함께 조합하여 분석하였다. 한편, 차량운전자로부터 제어실 운영자로 전달되는 화재 인지 수단에는 비상경보, 비상전화, 개인휴대전화, 화재감지기, CCTV 등이 있으나 CCTV의 경우는 터널 관리자의 시각적 인지에 소요되는 시간에 의존되므로 제외하였다.

3.1. 비상경보

비상경보는 화재 발생시 화재장소 또는 중앙 감시실에서 터널 내에 경보를 발령하여 화재를 통보할 수 있는 설비로 우리나라 고속도로 터널에서는 소화기 또는 소화전함에 병설하여 설치하고 있다. 국내 고속도로 터널 방재시설 설치규정에는 터널 연장 500m 이상에 설치하도록 되어 있으며, 50m 이내 간격으로 위치할 수 있도록 규정되어있다. 비상경보에 의한 운전자의 화재 인지에서 화재설비(Jet fan) 가동까지의 시간은 식 5와 같은 시나리오로 유추할 수 있다.[7]

$$T = Tw(d)+Tr(d)+Td(d)+Tm(d)+Tw(o)+Tr(o)+Td(o)+Tm(o) \quad (\text{식 } 5)$$

- Tw : 화재를 감지하는 시간
- Tr : 화재를 인지하는데 걸리는 시간
- Td : 행동을 결정하는데 걸리는 시간
- Tm : 움직이는 데까지 걸리는 시간
- (d) : detector, 화재 발생지에서 멀지 않은 곳에 있는 운전자
- (o) : operator, 터널 통제실에 있는 운영자

화재 발생 차량에서 멀지 않은 곳의 운전자는 화재를 감지하는 시간(Tw(d))을 10초, 인지하는 시간(Tr(d)) 10초, 인지 후 즉시 비상경보기로 이동하는 경우가 있겠지만, 어떤 운전자는 화재를 진압하려고, 가까운 곳의 소화기로 이동하거나, 개인용 소화기를 사용할 것임을 감안할 때 행동 결정시간(Td(d))을 100초 정도로 판단하여 볼 수 있다. 결국, 화재 발생 후 소비된 총 시간 120초 후에는 소화기로 소화할 수 없을 정도(0.1MW)로 불길이 성장하게 되므로, 차량 운전자는 자동적으로 비상경보기를 찾게 되며 화재경보기를 누르게 될 것이다. 비상경보기는 국내기준 50m 이내로 설치되어 있으며, 사람의 평균 걷기 속도가 1m/s 이므로 경보기까지 도달하는데 약 50초의 시간이 소요된다. 그리고 비상경보기의 작동 방법을 알아내어 누르기까지의 시간을 최대 10초로 가정한다면, 결국 차량 운전자가 경보기를 찾아 누르는데 까지 걸리는 시간(Tm(d))은 60초가 된다. 한편, 제어실 운영자의 관점에서 판단하여 보면 비상경보를 듣고(Tw(o)), 인지하는 것(Tr(o))은 거의 동시에 이루어지며, 숙련된 관리자의 경우라면 최소 10초 이내에는 화재를 인지할 수 있다고 판단된다. 또한 화재 발생 지점을 파악(Td(o))하는데 30초, 비상 환기 시스템을 가동(Tm(o))하는데 약 10초면 충분 할 것이다. 결론적으로 비상경보기에 의한 화재설비(Jet fan)의 가동까지 소요되는 시간을 120초+60초+50초= 230초로 예상된다.

3.2. 비상전화

터널 내부의 교통사고나 화재사고 등의 비상시에 사고 운전자 또는 발견자가 터널관리소에 연락하기 위한 비상전용 전화기의 위치는 우리나라 고속도로 터널 기준으로 200m 이내 간격 설치 설치를 규정하고 있다. 비상전화의 시나리오 역시 식 5를 이용하여 비상경보기와 유사한 형태로 나타내었다. 터널 내 차량 운전자가 화재를 인식하기까지 걸리는 시간은 비상 경보기의 경우와 동일하게 생각하여 볼 수 있으므로 120초가 예상된다. 그리고 비상전화는 200m 이내의 간격으로 설치되기 때문에 차량 운전자의 걸기 속도가 1m/s라고 가정하면, 소요시간은 200초가 되며, 화재 상황을 제어실 운영자에게 설명하는데 30초가 걸린다고 가정하여 비상전화를 통해 제어실 운영자에게 화재사고를 인지시키는데 걸리는 총 소요 시간은 230초가 된다. 제어실 운영자는 비상전화를 이용하여 화재의 규모와 발생지점을 파악하게 되므로, 비상경보기를 이용한 경우(50초)에 비해 약 40초를 절약할 수 있을 것으로 판단된다. 결론적으로 비상전화에 의한 화재설비 가동까지 소요되는 시간은 120초+230초+10초=360초가 예상된다.

3.3. 개인휴대전화

국내에는 현재 개인 휴대전화의 보급이 일반화되어 화재 발생시 실제로 가장 빈번하게 이용될 수 있는 화재감지 및 전달수단이다. 개인휴대전화에 의한 화재감지 시나리오는 식 6과 같다. 터널관리사무소에 화재사고 소식을 전달하는 타 경우에는 달리 119센터에 신고를 하게 되는 점이 특이할 만한 점이다.

$$T = Tw(d)+Tr(d)+Td(d)+Tm(d,119)+Tw(o)+Tr(o)+Td(o)+Tm(o) \quad (\text{식 6})$$

화재를 감지하고 인지하기까지 소요되는 시간은 비상경보기, 비상전화와 동일하다고 판단할 수 있으므로 120초된다. 차량 운전자가 개인휴대용전화로 119센터와 통화를 하기까지는 약 30초가 예상되며, 현재 사고지점과 화재 규모를 설명하는데 소요되는 시간은 최소 30초가 필요할 것이다. 그리고 119센터에서 관할 터널 관리사무소에 연락을 취하여 화재를 인지시키는데 까지 소요되는 시간은 약 60초로 예상된다. 결국 터널 관리사무소에서 화재를 인지하는데 필요한 시간은 240초 정도가 될 것이며, 119센터로 부터 화재 지점과 규모를 인지하였으므로 화재설비를 가동하는데 걸리는 시간은 약 10초가 된다. 결론적으로 개인 휴대전화를 이용할 경우 화재 설비를 가동하기까지 소요되는 총 시간은 120초+120초+10초= 250초가 필요하다고 판단된다.

3.4. 화재 감지기

감지 센서에 의해 화재로 인한 열, 연기, 빛 등을 감지하여 화재를 수신반에 알리는 설비

로 우리나라 고속도로 터널 방재시설 설치규정에는 2000m 이상의 터널에 설치하도록 되어 있다. 화재 감지기에는 불꽃 감지기, 디지털 온도 감지기, 정온식 감지 선형 감지기 등 여러 가지가 있지만, 국내 터널에 일반적으로 가장 많이 쓰이는 화재 감지기는 정온식 감지 선형 감지기이다. 선형 감지기는 70℃와 90℃에서 감지음을 발생시켜 제어실 운영자에게 화재가 발생한 지점을 알려주게 된다. 선형 감지기에 의한 화재감지 시나리오 역시 식 5의 관점에서 생각해 볼 수 있다. 그러나 차량 운전자에 의한 모든 항목들을 생략되며, 단순히 화재감지기의 감도에 따라 화재설비 가동시간이 결정되므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3.5. 비상 화재시스템(Jet fan) 가동까지의 시간 결정

터널 화재사고 시 차량 운전자 및 터널 관리자의 적절하게 조합된 화재 시나리오를 통하여 비상 화재시스템이 가동되기까지의 시간을 예상해 볼 수 있다. 비상경보, 비상전화, 개인 휴대전화, 화재감지기에 의한 시간을 종합적으로 분석하여 볼 때, 터널의 특성상 그 폐쇄성으로 인하여 화재가 발생하였을 경우, 운전자들은 매우 당황하게 될 것이며 화재로 인한 독성가스 및 스모그로 인하여 차량 운전자들이 침착하게 대처할 수 없는 패닉 상태가 될 것이다. 이러한 상황에서의 비상전화는 크게 실효성이 떨어질 것으로 판단된다. 또한 화재감지기의 경우도 그 효과는 매우 좋으나, 오랫동안 사용을 하지 않아 방치된 경우 화재에 대한 감도가 상당히 저하 될 수도 있다. 하지만 비상경보기의 경우 우리나라 터널을 기준으로 50m 간격으로 설치되어 비교적 운전자들이 손쉽게 접근하여 사용할 수 있을 것이다. 또한 우리나라의 휴대폰 보급률이 세계 1위로서 약 3400만 여명이라는 휴대폰 인구를 감안하였을 때, 개인 휴대전화의 사용은 비상환기시스템을 가동시키는데 매우 큰 역할을 할 수 있을 것이다. 비상 환기시스템이 가동되는데 소요되는 시간을 분석해 본 결과 비상경보기는 약 230초, 개인휴대전화는 약 250초의 시간이 소요되었다. 이러한 사실을 토대로 본 연구에서는 비상 환기시스템(Jet fan)의 가동시점을 약 4분(약 240초)으로 결정하였다.

4. 실험결과

4.1. 보정계수(β)에 따른 모형실험

현재 고속도로 방재시스템 설계의 기준이 되고 있는 20MW 화재 강도를 적용하여 실험하였으며, 임계속도는 표 1과 같이 Tetzner 식의 보정계수를 변화시켜 4가지 경우로 나누어 실험하였다.

표 1. 20MW일 때 임계속도 (unit : m/sec)

		Real	Model
Case 1	D. Tetzner's eq.($\beta=0.2$)	3.18	0.45
Case 2	D. Tetzner's eq.($\beta=0.3$)	2.97	0.42
Case 3	D. Tetzner's eq.($\beta=0.4$)	2.76	0.39
Case 4	D. Tetzner's eq.($\beta=0.5$)	2.62	0.37

CO의 농도는 연기의 거동과 비례적으로 증가한다고 생각하여, 실험해본 결과 터널 후방에서 센서에 의해 CO가 감지되는 시점과 관측된 연기의 도달시점은 거의 일치하였다. 따라서 CO농도의 시간대별 변화를 검토하여 연기의 전파를 추정하였다. 국내의 경우 한국도로공사의 고속도로 터널환기시설 설계기준에 고속도로 터널의 적정 CO농도로 차량속도 10km/h일 때 100ppm으로 설정하여 적용하고 있다.[8] 또한, 미국의 국가안전기준인 NFPA(National Fire Protection Association) 502에서는 화재 발생 후 피난자들이 대피하는 동안(약 30분) 800ppm을 초과해서는 안된다고 규정하고 있다.[9] 그러므로 본 실험에서는 CO농도 100ppm을 기준치로 설정하고, 차량 운전자들이 화재발생 사실을 유관으로 관측이 어려운 지점, 즉, 화재로부터 약 50m 이격된 위치를 기준으로 하여 적용하였다. 화재 지점으로부터 47.5m(약 50m) 떨어진 위치에 CO Prove(C3)를 설치하고 그 농도에 초점을 맞추어 역기류 분포를 해석하였다. 그림 5~그림 8은 C3위치에서의 CO농도 분포를 도시한 것으로서 화재발생 4분 후에 비상환기시스템을 가동시키고, 가동 후 즉시 임계속도에 도달하는 것을 가정하여 실험하였다. 4가지 경우 모두 비슷한 양상을 보였으며 보정계수에 따라 CO 최고농도치의 변화가 나타났다. 화재 발생 후 330초에서 360초 사이에 170ppm~200ppm으로 최고 농도치에 도달하였으며, 그 이후로부터 CO농도가 감소되는 현상이 나타났다. 이는 역기류의 전파 이후 4분후에 발생하는 임계풍속으로 인한 역기류 제어효과를 통하여 C3위치(화재지점으로부터 약 50m)에서의 스모크 집중현상에 기인된다. 비상환기시스템(제연팬)이 가동되는 시점으로 판단할 때 약 97~127초(약 2분) 후에 CO 최고농도에 도달하고 그 이후 서서히 농도가 감소하는 것으로 나타났다.

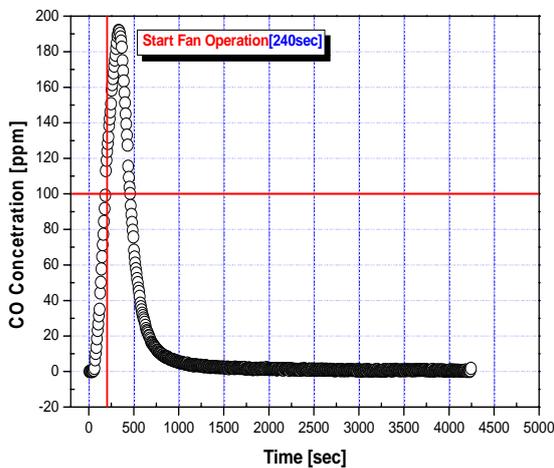


그림 5. C3위치에서의 CO농도분포
D. Tetzner's eq. [$\beta = 0.2$]

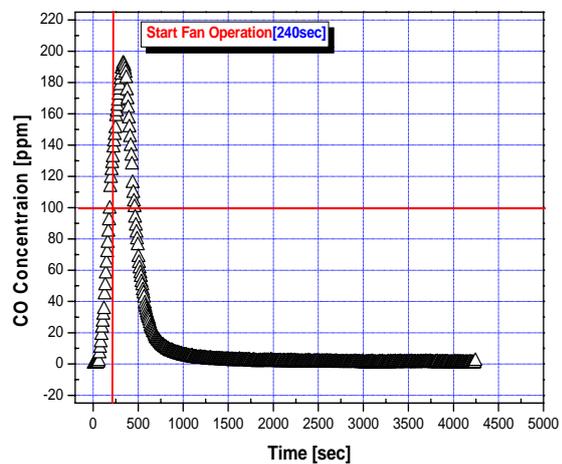


그림 6. C3위치에서의 CO농도분포
D. Tetzner's eq. [$\beta = 0.3$]

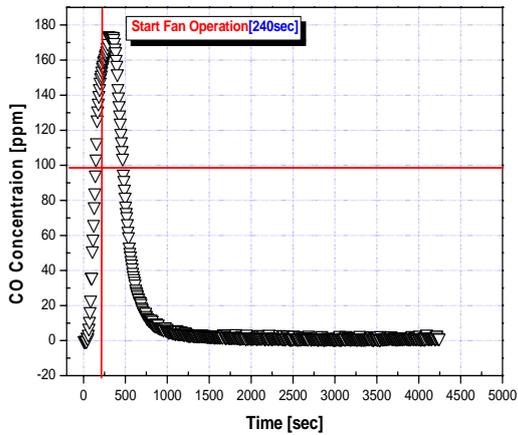


그림 7. C3위치에서의 CO농도분포
D. Tetzner's eq. [$\beta = 0.4$]

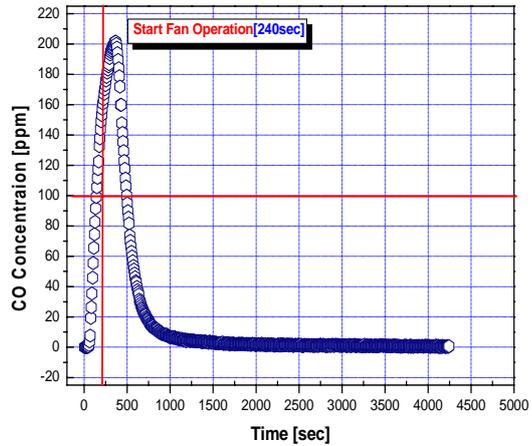


그림 8. C3위치에서의 CO농도분포
D. Tetzner's eq. [$\beta = 0.5$]

4.2. 최적 임계속도의 결정

그림 9에서는 제연팬 가동 후 적절한 임계풍속을 통하여 CO기준치(100ppm)에 도달하기까지의 상황을 보여주고 있다. 보정계수(β)의 값에 따라 적정 CO기준치에 도달하는 시간을 살펴보면, $\beta=0.2$ 의 경우 452초, $\beta=0.3$ 의 경우 459초, $\beta=0.4$ 의 경우 466초, $\beta=0.5$ 의 경우 487초가 경과된 후 각각 95.46ppm, 93.35ppm, 94.98ppm, 99.98ppm으로 CO적정 기준치에 부합되고 있다. 화재 발생 후 제연팬 가동시점을 기준으로 살펴보면 각각 212.2초, 219.2초, 226초, 247.5초로서 약 4분 내에 역기류를 효과적으로 제어하고 있다. 250초~400초 구간의 경우 보정계수에 따라 일정하게 변화하지 않음을 볼 수 있는데 이는 화재지점으로부터 발생하는 역기류와 터널 입구에서 유입되는 임계속도가 충돌하면서 불규칙한 기류가 발생되어 불안정한 CO 농도분포를 나타낸 것으로 판단된다. 그러나 약 400초(제연설비 가동 160초 후) 이후부터는 점차 그 분포가 안정화 되면서 보정계수에 따라 적절하게 역기류가 제어된다.

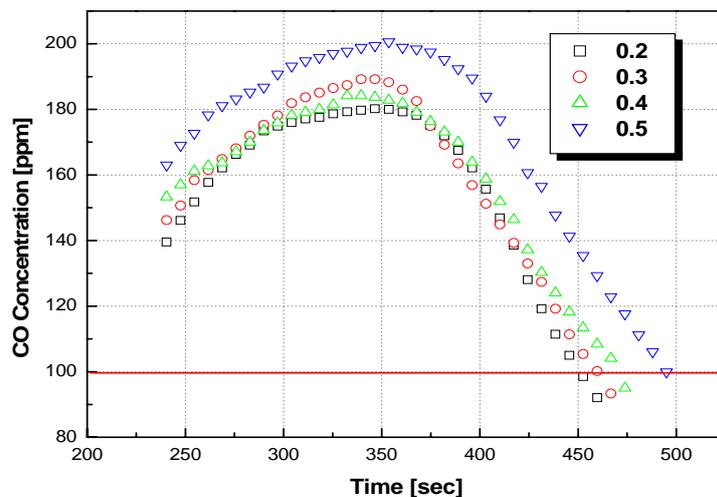


그림 9. C3 위치가 100ppm에 도달하기까지의 CO농도분포

스웨덴의 Anders Norén, Joel Winér (2003)[6]은 네덜란드의 Benelux Tunnel을 대상으로 피난 대피 실험을 하였다. Benelux Tunnel의 총 연장은 1350m 이며 피난 연락갱의 총 개수는 12개, 그 간격은 100m인 비교적 짧은 터널이다. 표 2 내용은 Benelux Tunnel 에서 화재 사고 시 운전자들이 터널 출구로 대피하는데 소요된 시간을 8가지로 분류하여 측정한 것이다. 운전자의 대피시간을 살펴보면 가장 빨리 대피한 사람의 경우는 45초이며, 가장 늦게 대피한 사람은 1109초로 약 18분이 소요되었다.

표 2. 차량 운전자들의 피난시간 분포[6]

Person	Leave car(s)	Hesitate (s)	Distance to exit (m)	Walking speed (m/s)	Walking time (s)	Total evacuation time(s)
1	40	0	20	2.2	9	49
2	65	228	150	1.65	90	383
3	193	82	54	1.37	39	314
4	142	0	68	0.82	83	225
5	331+30	18	111	1.05	106	362
6	331+130	0	12	1.45	8	469
Mr.Fast	14	0	100	3.27	31	45
Mr.Slow	547	161	100	0.38	263	1109

한편, 부산-거제 간 침매터널 보고서(2004),[7]와 한국도로공사 기준에 약 10분을 운전자들의 피난 대피가능시간으로 정하고 있다. 그리고 PIARC 기준을 보면 화재의 위험을 인지하는 시간 2~5분, 화재를 인지하고 차량 밖으로 나오는데 걸리는 시간 0.5~5분으로 두고 있으며, Eureka Project의 일환으로 1995년 노르웨이 실제터널에서 시행된 시뮬레이션에 의하면 피난 가능한 안전시간은 화재온도가 최고점(800℃이상)에 달하여 제2의 화재가 발생하기 전인 약 6분 이내이다.[10] 그러나 국내에서 시행된 고속도로터널 방재시스템 연구에서는 2.5MW급 가솔린 화재 실험 실험결과를 이용하여, 제연설비가 가동되지 않은 조건에서 20MW급 화재시 의식불명에 이르는 시간을 약 4분으로 상정하여 이를 피난 허용시간으로 제시하였다.[11] 피난가능시간과 피난 속도에 대해 정확히 규정하는 것은 어렵지만, 국내 터널의 피난연락갱 간격이 250m인 점을 감안하여볼 때, 피난가능시간을 4분(약 240초), 피난 속도를 1.0m/s로 적용하는 것이 실제 상황에 가장 부합된다고 판단된다. 결정된 피난가능시간(4분)을 적용하여 터널 화재시 적절한 임계속도는 화재 발생 8분 후, 즉, 제연팬 가동 후 4분 이내에 역기류를 제어하여야 한다는 결론을 얻게 되었다. 본 연구에서 실험한 보정계수(β)값 0.2, 0.3, 0.4의 경우는 모두 적정 피난시간(화재발생 8분후)을 만족하고 $\beta=0.5$ 인 경우는 약 502초로서 8분을 약 20초정도 초과하고 있다. 그러나 본 축소모형실험의 한계성으로 인해 실제 화재성장곡선을 고려하지 못하고 화재의 시작점부터 20MW급 화재가 발생된 점을 감안하여 볼 때, 보정계수(β)의 수치 0.5를 적용시킨 임계속도 수치가 경제적, 효용성 측면에서 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 터널 화재시 발생하는 역기류를 효과적으로 제어함으로써 터널의 실제 상황에 부합되는 합리적인 임계속도를 산출하는데 목표를 두었다. 차량 운전자와 제어실 운영자의 관점을 고려하여 터널 화재 발생 후 제연설비의 가동 시점과 적절한 임계속도를 구현하는데 걸리는 시간을 결정하였다. 이와 함께 Froude 상사를 기본으로 한 축소 모형실험을 실시하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 운전자 및 터널 관리자의 화재 인지에 소요되는 시간을 감안하여 현실에 가장 가까운 비상환기시스템 가동시간을 문헌조사를 통해 결정하였다. 비상경보기의 경우 비상 환기시스템이 가동되는데 소요되는 시간은 약 230초, 개인휴대전화를 사용하는 경우는 약 250초가 소요되었으며, 이러한 사실을 토대로 본 연구에서는 비상환기시스템(Jet fan)의 가동시점을 4분(약 240초)으로 결정하였다.
2. 국내 터널의 피난연락갱 기준 간격이 250m인 점을 감안하여볼 때, 피난시간을 4분, 피난 속도를 1.0m/s로 적용하는 것이 실제 상황에 가장 부합된다. 그 결과 화재 발생 8분 후, 즉, 제연팬 가동후 4분 이내에 역기류를 제어할 수 있는 상기 속도가 실제 터널에 적합한 최적 임계속도(Critical velocity)가 된다.
3. 보정계수(β)의 값에 따라 적정 CO기준치(100ppm)에 도달하는 시간을 볼 때, $\beta=0.2$ 의 경우 452초, $\beta=0.3$ 의 경우 459초, $\beta=0.4$ 의 경우 466초, $\beta=0.5$ 의 경우 487초가 경과된 후 모든 경우가 기준치(100ppm이하)에 부합되었다. 한편, 제연설비 가동시점을 기준으로 살펴보면 212.2초~247.5초로서 합리적인 임계속도의 기준인 약 4분 내외로서 역기류를 효과적으로 제어하고 있다. 250초~400초 구간의 경우 보정계수에 따라 수치가 일정하게 변화하지 않음을 볼 수 있는데, 이는 화재지점으로부터 발생하는 역기류와 터널 입구에서 유입되는 임계속도가 충돌하면서 불규칙한 기류의 발생에 기인된다. 하지만 400초 이후부터는 점차 효과적으로 역기류가 제어되고 있다고 판단된다.
4. 축소모형실험 결과 D. Tetzner식의 보정계수(β)값 0.2, 0.3, 0.4의 경우는 모두 적정 피난시간(화재발생 8분후)을 만족하지만 $\beta=0.5$ 인 경우는 약 502초로서 8분을 약 20초정도 초과하고 있다. 그러나 본 축소모형실험의 한계성으로 인해 실제 화재성장곡선을 고려하지 못하고 화재의 시작점부터 20MW급 화재가 발생된 점을 감안하여 볼 때, 보정계수(β)의 수치 0.5를 적용시킨 임계속도가 경제적 측면, 효용성측면에서 바람직할 것이다.

사 사

본 연구는 GS건설(주) “장대터널 환기시스템 최적화 연구”용역의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

■ 참고문헌 ■

1. N.H. Danziger and W.D. Kennedy, 1982, "Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels.", 4th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 169-181.
2. D. Tetzner, R. Pollak and M. sippel, 1999, "Critical Velocity - Comparative assesment of test results and CFD simulation", International Conference on tunnel fire and Escape from Tunnels, pp. 181-190, Lyon, France.
3. 감사원 감사결과 처분요구서, 2003.9, "고속도로망 구축 및 운영실태".
4. Oka Y. and Atkinson G.T., 1995, "Control of smoke flow in tunnel fires", Fire Safety Journal, 25, pp. 305-32-2.
5. O. Megret, O. Vauquelin, 2000, "A model to evaluate tunnel fire characteristics", Fire safety journal 34, pp. 393-401
6. Anders Norén, Joel Winér, 2003, Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels "Data and design for faster evacuations", Department of Fire Safety Engineering, Report 5127, pp. 25~27.
7. Busan-Geoje Fixed Link, Immersed Tunnel, "Partial smoke extraction system CFD calculations", 2004.6.
8. 한국도로공사, "도로설계요령" 2001, pp. 247~250.
9. National Fire Protection Association, 1998, NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridge, and Other Limited Access Highways A.
10. Haack, 1998, "Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project", Tunnelling and Underground space technology, vol. 13, No. 4, pp. 377-381.
11. 최준석외, 2002, "터널내 자동차화재와 풀화재 비교 분석", 한국화재소방학회 춘계학술논문발표회, pp. 5-36