

도로터널에서 자연풍에 의한 미세물분무의 화재제어 특성에 관한 수치해석 연구

A Numerical Study on the Fire Suppression Characteristics of a Water Mist with Natural Wind in a Road Tunnel

황철홍 · 김한수 · 이창언[†] · 장영남* · 신현준**

Cheol-Hong Hwang · Han-Su Kim · Chang-Eon Lee[†] · Young-Nam Jang* · Hyun-Joon Shin**

인하대학교 기계공학과, *(주)우당기술산업 연구소, **한국건설기술연구원
(2006. 12. 4. 접수/2008. 9. 11채택)

요 약

본 연구에서는 FDS 코드를 이용하여 외부 자연풍에 의한 터널 내의 미세물분무 소화특성을 검토하였으며, 상세반응이 고려된 1차원 대항류 비예혼합화염을 이용하여 화염내부에서 미세물분무의 냉각 및 화학 반응효과에 의한 소화현상을 규명하였다. 연구결과로서, 외부 자연풍의 유속 증가에 따라 고온 연기층의 분포 및 분무 특성의 큰 변화가 발생됨을 확인하였다. 외부 자연풍이 없는 경우에는 분무입자 직경이 작을수록 소화성능이 좋지만, 풍속이 증가함에 따라 입자직경이 클수록 소화성능이 좋아짐을 알 수 있었다. 자연풍은 입자의 화염면 침투를 방해할 뿐 아니라, 충분한 산소의 공급으로 화재 억제를 방해할 것으로 예측된다. 또한 자연풍이 존재하는 조건의 화염은 화염 신장효과에 의해 밀폐된 공간에서의 화염 보다 작은 양의 H₂O 침투에 의해서도 소화될 수 있으며, H₂O의 화학반응에 의한 소화효과는 외부 자연풍의 유속에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, the fire suppression characteristics of a water mist with natural wind in a road tunnel were calculated using the FDS(Fire Dynamic Simulation) code. In addition, the cooling and the chemical kinetic effects of water vapor on fire extinction were investigated in a counterflow non-premixed flame using a detailed chemistry. As a result, the behavior of fire plume and the spray characteristics of water mist are modified remarkably with the increasing of wind velocity. In the case which is not the external natural wind, small droplets are more efficient in fire suppression than large droplets. However, the large droplets show better results on the fire suppression than the small droplets with the increasing of wind velocity. It can be estimated that the natural wind disturb the penetration of water droplets into the flame region and decrease the effect of oxygen dilution. Finally, it can be identified that the fire into the natural wind can be suppressed with smaller amount of H₂O by flame stretching effect in the flame region than one in an enclosure, and the chemical kinetic effects of H₂O on fire extinction are not affected significantly the velocity of natural wind.

Keywords : Water mist, Fire suppression, Tunnel, Extinction mechanism, Water vapor

1. 서 론

지하공간의 화재제어를 위해 기존에는 Halon 1301 등과 같은 불활성 가스 및 화학약품이 주로 사용되었으나, 오존층 파괴 등의 환경문제로 인하여 이들 소화

제의 사용이 제한되었다. 이후 새로운 청정 소화시스템의 개발이 진행되고 있으며, 특히 1990년대 초반부터 화재진압 효율이 높고 지하공간의 피해를 최소화시킬 수 있는 미세물분무(Fine water spray or Water mist)에 대한 관심이 증가되고 있다. 일반적으로 미세물분무에 의한 화재 억제기구로서 화재 플럼(Plume) 및 연료 표면의 냉각효과와 화염대의 산소농도 저감 및

[†] E-mail: chelee@inha.ac.kr

연료 회석에 의한 효과가 가장 영향이 크다고 알려져 있다.¹⁾ 이외에도 물입자의 열적 방어벽 역할에 의한 화원으로의 복사열전달 감소효과와 화염대에 H₂O의 유입에 의한 화학반응효과 등이 존재한다.²⁾

대표적인 수계화재제어 장치인 스프링클러는 화재제어에 대해 화원 및 화염의 냉각효과에 주로 의존하고 있으며, 다량의 물 분사량에 의한 2차 피해가 발생하는 단점을 가지고 있다. 반면에 400 μm(액체연료 기준) 이하의 크기로 입자를 분사하는 미세물분무는 액체 입자 표면적의 증가로 인한 냉각효과와 수증기로 기화될 때 급격한 부피팽창으로 인한 산소농도의 감소효과로 스프링클러에 비해 소화효율이 높으며, 물 소모율을 90% 정도 저감시킬 수 있다고 알려져 있다.³⁾

미세물분무 시스템에 관한 대부분의 연구들은 입자 크기, 플럭스(Flux) 밀도, 분사 모멘텀 및 통풍조건 등이 소화효과에 미치는 영향에 대해 수행되고 있다. 이들 인자들의 소화효과에 대해 간략히 살펴보면, 입자 직경이 작을수록 넓은 표면적에 의해 증발 및 열 흡수율이 증가되어 냉각효과가 증가되며, 복사열 감소에도 보다 효과적이다. 그러나 작은 입자는 화염 및 고온 연기에 의한 부력과 항력에 의해 화염 및 연료 표면에 도달하기 어려우며, 공기흐름에 의해 입자거동이 변경되는 문제점을 가지고 있다.⁴⁾ 플럭스 밀도, 즉 단위 체적당 유량에 대한 기존 연구결과를 살펴보면, 연료 및 다양한 조건들에 대해 소화를 위한 최적 유량이 존재하며, 과도한 유량증가는 소화효율의 향상을 가져오지 못한다고 알려져 있다.⁵⁾ 분사 모멘텀은 물 입자의 화염대 통과뿐만 아니라 주위 공기의 유입과 관련된 중요한 변수로서 입자크기, 유속, 공급압력 및 분사 각도 등과 밀접한 관련을 갖고 있다. 마지막으로 통풍조건에 대해 살펴보면, 통풍이 있는 조건에서 소화 가능한 단위 체적당 유량은 밀폐된 조건의 경우에 비해 약 10배 정도 많아야 된다고 보고된 바 있다.⁶⁾

이들 연구결과들은 지하공간에서 미세물분무 시스템의 최적 조건도출을 위해 매우 중요한 정보를 제공하고 있으나, 소화에 관한 복잡한 인자들의 상호작용으로 인하여 일반적인 결론 도출보다는 특정 응용분야에 한정되어 적용되고 있는 실정이다. 즉 새로운 응용분야에 화재제어 시스템의 적용을 위해서는 보다 현실적인 조건들에 대한 검토가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 도로터널에서 미세물분무 시스템의 최적조건 도출을 궁극적 목표를 두고 있다. 일반적으로 터널 내부에서는 지형 및 계절별 기후, 터널의 길이, 위치 및 입구형상에 따라 약 0.5 m/s~2.5 m/s의 다양한 범위의 유속이 존재한다고 알려져 있다.⁷⁾ 이러한

자연풍은 화염 및 연기의 거동뿐만 아니라 분무에 의한 소화특성에도 큰 변화를 초래할 것으로 예측된다. 이러한 배경 하에 본 연구에서는 FDS(Fire Dynamic Simulation)를 이용하여 터널 내부에서 외부 자연풍에 따른 미세물분무에 의한 소화현상을 관찰하였다.

또한 기존 3차원 수치계산에서는 화염대의 상세한 열전달 및 화학반응효과에 의한 소화특성을 검토하는데 많은 어려움이 있기 때문에, 간단한 1차원 대향류 비에 혼합화염을 대상으로 산화제에 H₂O의 첨가에 따른 냉각 및 화학반응효과가 화염소화에 미치는 영향을 추가로 규명하였다.

2. 계산방법 및 조건

2.1 터널에서 자연풍에 의한 미세물분무의 소화특성

터널 내부에서 물분무에 의한 소화현상을 모사하기 위하여 본 연구에서는 FDS(ver. 4.0)를 이용하였다.⁸⁾ 본 코드는 3차원, 비정상 유동을 모사할 수 있는 대와동 모사(Large eddy simulation) 기법이 적용되었으며, 아격자(Subgrid) 연소모델로서 무한반응속도를 가정한 혼합분율모델(Mixture fraction model)이 적용되었다. 기상과 분무 액적과의 유동해석은 Eulerian-Lagrangian 방법을 적용하였으며, 이들의 열 및 물질전달은 Ranz and Marshall 식에 의해 고려되었다.⁹⁾ 분사되는 액적 크기 분포는 Rosin-Rammler 분포를 이용하였으며, 그 분포 함수는 다음과 같다.

$$F(d) = 1 - e^{-0.69(d/d_m)^{2.4}} \quad (1)$$

터널 내부의 화재를 모사하기 위하여, Figure 1(a)와 같이 길이 6 m, 폭 2.7 m, 높이 2 m의 터널형상을 고려하였으며, 화원의 크기는 0.3 m×0.3 m로 하였다. 이때 연료는 Methanol로서 열발생율은 22.89 kW로 설정하였다.¹⁰⁾ 미세물분무 노즐은 45° 반각을 갖는 Solid cone 타입을 고려하였으며, 화원 상부의 1.8 m 높이에 설치하였다. 이 때 유량과 관련된 K-factor는 2.5로 가정하였다. 노즐의 작동시간은 화재 발생 후 100초로서 모든 조건에 대해 동일하게 설정하였다. 계산에 사용된 격자 분포는 Nx×Ny×Nz=150×45×55로서 약 37만개가 사용되었으며, 화원근처를 중심으로 격자를 집중시켰다.

미세물분무의 공급압력은 10 bar로 고정하였으며, 자연풍에 대한 입자 직경의 영향을 검토하기 위하여 0.1 mm, 0.2 mm 및 0.4 mm의 입자직경이 고려되었다. 또한 이때 외부 자연풍의 유속은 0.0, 0.4, 0.8 및 1.2 m/s가 고려되었다.

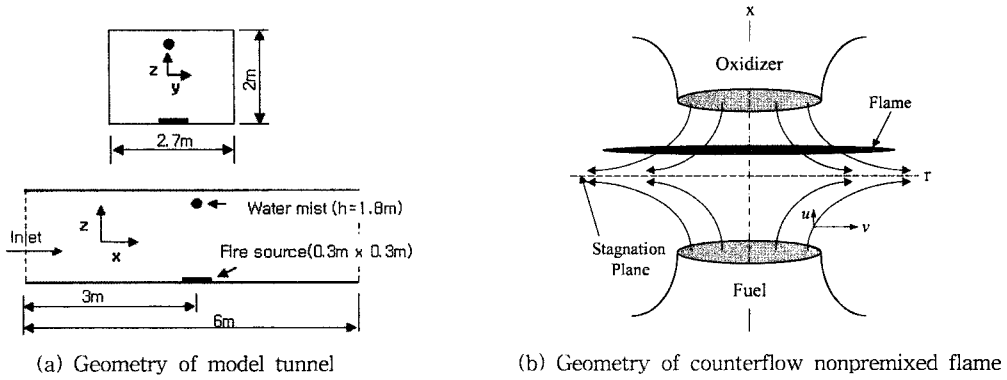


Figure 1. Geometries of 3-D model tunnel and counterflow nonpremixed flame.

2.2 H₂O의 냉각 및 화학반응효과에 의한 소화특성

밀폐된 지하공간에서의 화염은 연료의 증발율과 부력에 지배되어지며, 연료와 공기가 만나는 화염면의 신장율(Strain rate)은 매우 작은 값을 갖게 된다. 그러나 터널에서는 외부 자연풍에 의해 화염면은 신장되게 되며, 화염면의 두께, 화염온도 및 반응율 등의 변화가 발생된다. 또한 신장을 변화에 따라 화염대 근처에서 기화된 H₂O가 화염면에 미치는 열 및 화학반응효과의 변화가 예상된다. 따라서 본 연구에서는 외부 자연풍이 존재할 때 화염 내부에서 소화에 미치는 미세물입자의 역할을 규명하기 위하여, Figure 1(b)와 같은 1차원 대향류 비예혼합화염을 대상으로 신장율에 따른 H₂O의 소화특성을 검토하였다.

계산에 사용된 지배방정식은 원통좌표계의 1차원 상미분 방정식으로서 연속, 운동량, 에너지, 화학종 및 상태방정식으로 구성된다. 이때 복사 열손실을 고려하기 위하여 Optically thin 모델¹¹⁾을 사용하였으며, 상세 화학반응을 고려할 수 있는 Oppdif code¹²⁾를 이용하였다. 이들에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 (13)을 참고하기 바란다.

Figure 1(b)에서 연료 CH₄는 (+)x 방향, 공기 및 H₂O가 포함된 산화제는 (-)x 방향으로 공급되며, 각 노즐의 유속은 동일하게 하였다. 노즐간의 거리(L)는 2cm이며, 임의 스트레인율(a)는 다음 식(2)를 통해 구하였다. 이때 u는 노즐 유속, ρ는 밀도, 하첨자 F와 O는 연료 및 공기측 노즐값을 의미한다.

상세 반응기구로는 49개의 화학종과 279개의 소반응(Elementary reaction)으로 구성된 GRI 2.11이 사용되었다. H₂O가 소화에 미치는 냉각 및 화학적 효과를 분리하기 위하여, XH₂O라는 인위적인 화학종을 반응기구에 포함시켰다. 이때 XH₂O는 화학반응에는 참여하지 않지만, H₂O와 동일한 열 및 전달 물성치를 갖도

록 하였다. 즉 H₂O가 포함된 결과는 열 및 화학적 반응효과가 동시에 고려된 것이며, XH₂O로 대체된 경우는 단순히 H₂O의 열적 냉각효과만이 고려된 결과라고 할 수 있다.

$$a = \frac{2(-u_o)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{(-u_o)\sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}}} \right] \quad (2)$$

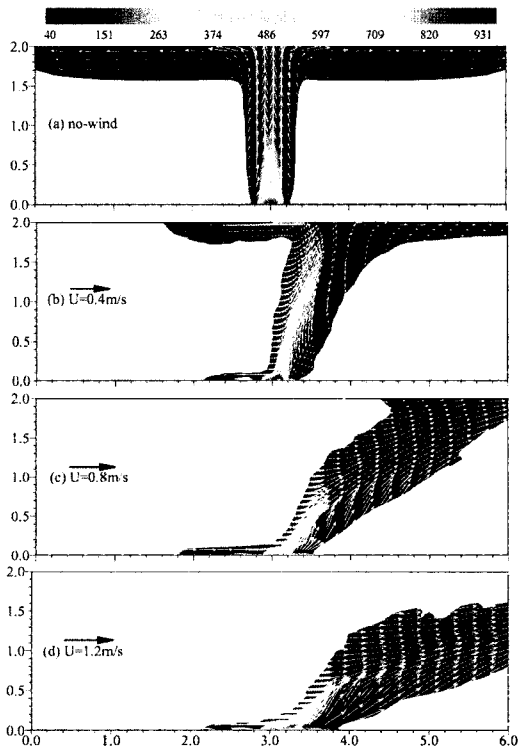


Figure 2. Mean fields of velocity vector and temperature distribution over 25°C at y=1.35 m with wind velocity (unit:°C).

3. 결과 및 검토

3.1 터널에서 자연풍에 의한 미세물분무의 소화특성

Figure 2는 미세물분무가 작동되기 전에 외부 자연풍에 의한 화염 및 연기의 분포를 확인하기 위하여, 터널 단면의 평균 온도분포와 속도벡터를 도시한 것이다. 이때 온도는 초기 터널 내부보다 높은 25°C 이상의 값을 도시하였다. Figure 2(a)의 경우에는 외부 유속이 존재하지 않는 조건으로 부력에 의해 연기가 상승한 후에 입구와 출구쪽으로 이동되는 대칭현상을 잘 보여주고 있다. Figure 2(b)는 좌측의 입구에서 0.4 m/s의 균일한 분포의 외부 자연풍이 유입된 결과로서, 터널 천정의 좌측으로 연기의 역류가 발생되지만, 연기기둥(Plume)은 대체적으로 우측으로 치우쳐 있음을 볼 수 있다. Figure 2(c)와 (d)는 외부 자연풍의 유속이 0.8 m/s와 1.2 m/s일 때의 결과로서 터널 상부에서 연기의 역류가 발생되지 않으며, 풍속에 따라 Plume이 우측으로 점차 치우쳐 있음을 확인할 수 있다. 위 결과로부터 화원 상부에 설치된 분무노즐에 의한 연기 및 화원의 소화 성능이 풍속에 따라 크게 달라질 수 있음을 짐작할 수 있다.

Figure 3은 공급압력 10 bar와 입자직경 0.2 mm의 조건에서 풍속에 따른 순간적인 온도분포를 도시한 것으로서, 온도는 100°C 이상의 고온만을 나타내었다. 각 그림에 삽입된 시간은 분무 노즐이 작동되는 시간(0 sec)을 기준으로 5 sec와 10 sec를 의미한다.

Figure 3(a)의 풍속이 0인 경우에 노즐 작동 후 5초 뒤 고온영역이 크게 감소되었으며, T=10 sec인 경우 고온영역이 더욱 감소되어 화염이 점차적으로 소화되고 있음을 짐작할 수 있다. Figure 3(b)는 풍속이 0.4 m/s의 결과로서, T=5 sec와 10 sec의 그림에서 볼 수 있듯이 고온 영역이 점차적으로 감소되어지나, 풍속이 0인 결과와 비교할 때 소화가 매우 느린 속도로 진행되고 있음을 짐작할 수 있다. 반면에 풍속이 0.8 m/s인 Figure 3(c)를 살펴보면, 시간이 지날수록 화원 근처의 고온영역이 오히려 점차적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 즉 풍속이 증가함에 따라 미세물분무의 소화 성능은 점차적으로 감소됨을 확인할 수 있는데, 이는 풍속에 따른 고온 연기층의 이동 및 분무 입자의 패도변화에 의해 발생될 수 있음을 짐작할 수 있다.

이들 결과는 터널에 미세물분무의 설치 위치 및 간격에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다. 즉 풍속이

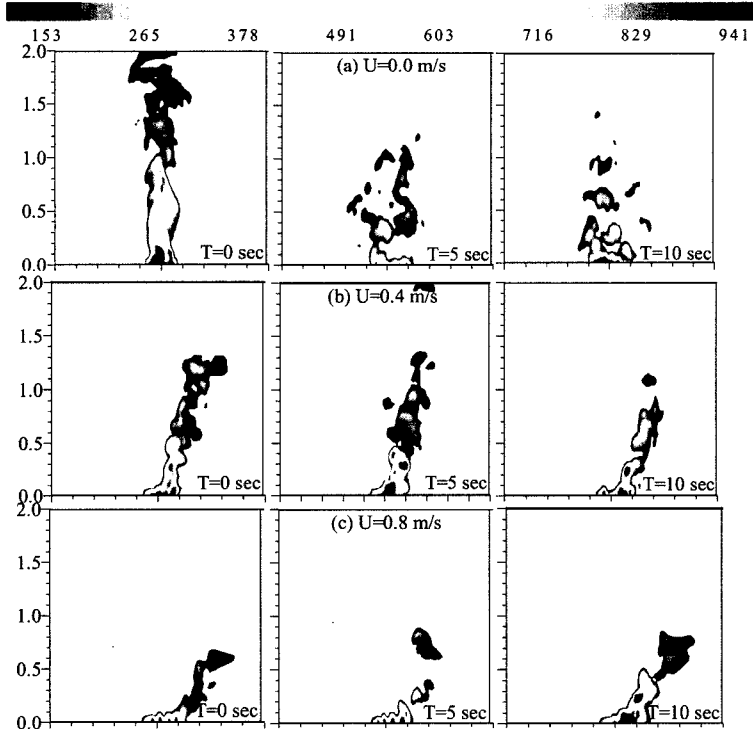


Figure 3. Temporal temperature distribution over 100°C at y=1.35 m with wind velocity in the conditions of p=10 bar, d=0.2 mm (unit:°C).

증가함에 따라 화원에 도달할 수 있는 입자의 거리가 변화되기 때문에 노즐의 분사각도 뿐만 아니라 풍속에 의한 영향을 고려하여 노즐 설치각도를 설정하여야 할 것이다. 또한 노즐이 터널 천정에 설치된 경우, 풍속이 증가될 때 미세 입자가 하부의 화원에 도달하지 않고 자연풍의 흐름을 따라 하류로 배출될 수 있기 때문에 노즐 위치의 선정에 많은 주의가 요구된다.

이 외에도 풍속의 증가에 의한 공기 공급량 증가로 냉각 및 질식 소화기구의 역할이 크게 달라질 수 있을 것으로 예측되며, 최적 공급압력, 분사형태 및 입자크기의 설계치가 기존 밀폐된 지하공간에서의 경우와 많은 차이를 있을 것으로 짐작되어진다. 따라서 본 연구에서는 외부 자연풍이 존재할 때 입자의 크기에 따른 소화성능의 변화를 우선적으로 검토하였다.

외부 자연풍속에 따른 소화현상을 검토하기 위하여 미세 물분무 입자크기를 0.1 mm와 0.4 mm로 변화시켰다. Figure 4는 노즐 작동 후 5초일 때의 순간적인 온도분포를 도시한 결과이다. 외부 자연풍이 없는 Figure 4(a)를 살펴보면, $d=0.1\text{ mm}$ 의 경우가 0.4 mm에 비해 고온 영역이 매우 작음을 볼 수 있다. 이는 입자 직경이 작을수록 더 빠른 시간 내에 소화시킴을 의미하는 것으로서, 적정 공급압력 및 유속조건에 제공될 때 밀폐된 공간에서 입자 직경이 작을수록 소화성능이 높다는 기존 연구⁵⁾와 동일한 결과를 보여주고 있다. 즉 입자 직경이 작을수록 표면적 증가로 인하여 더 높은 증

발율을 갖게 되며, 이는 화염대의 냉각을 증가시키고 부력효과를 감소시킨다. 그때 미세 물입자는 고온 영역의 관통능력이 증진되며, 결과적으로 보다 효율적인 화재 성장을 억제할 수 있게 된다. Figure 4(b)의 외부 풍속이 0.4 m/s의 조건 역시, 각 입자직경에 대해 100°C 이상의 고온 영역은 비슷하지만 입자직경이 작을수록 900°C 이상의 고온 영역이 감소되었음을 볼 수 있다. 반면에 외부 풍속이 0.8 m/s의 조건에서는 $d=0.1\text{ mm}$ 의 조건이 $d=0.4\text{ mm}$ 의 조건보다 고온영역이 오히려 큼을 알 수 있다. 즉 외부 풍속이 증가됨에 따라 보다 큰 미세 물입자가 높은 소화성능을 보임을 확인할 수 있다. 이는 위에서 언급되었듯이 풍속이 증가될수록 산소공급량의 증가로 인하여 미세먼분무의 질식효과는 냉각효과에 비해 그 영향이 감소되며, 입자가 작을수록 작은 운동량으로 인하여 화원에 도달하지 않고 외부 자연풍의 흐름에 의해 입자거동이 변화되기 때문일 것으로 판단된다.

본 연구는 외부 자연풍이 존재하는 터널에서의 미세 물분무의 소화특성이 기존의 밀폐된 지하공간에서의 경우에 비해 상당한 차이가 있음을 알려주는 초기 연구결과로서, 보다 체계적이고 정량적인 정보를 도출하기 위하여 다양한 조건에서의 수치계산 및 실험검증은 향후 수행할 예정이다.

3.2 H₂O의 냉각 및 화학반응효과에 의한 소화특성

본 연구에서 고려된 FDS의 경우에는 혼합분율 연소 모델의 적용으로 인하여 화염의 국부적인 소화현상을 정확히 예측하지 못하며, 화염면에 H₂O의 첨가에 의한 화학반응효과를 고려하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 이미 잘 알려져 있듯이 미세 물입자는 화염대 근처에서 기화되어 화염대의 냉각, 산소 농도의 감소뿐만 아니라 화학반응에 의한 반응속도의 변화에 큰 영향을 주게 된다. 또한 외부 자연풍이 존재할 경우에 화염면은 유속증가에 의해 신장하게 되며, 이는 화염온도, 두께 및 반응율 등의 전반적인 연소특성을 변화시켜 화염면에 도달한 H₂O에 의한 소화특성의 변화를 초래할 수 있다.

Figure 5는 H₂O가 산화제 측에 공급되기 이전에 연료 및 산화제의 유속증가, 즉 스트레인율(S.R.) 증가에 따른 화염의 최고온도를 도시한 것이다. 일반적으로 부력에 의해 지배되는 화염면은 낮은 범위의 신장율을 갖기 때문에 본 연구에서는 100 s⁻¹ 이하의 스트레인율만을 계산하였다. S.R.=30 s⁻¹을 기준으로 온도가 증가한 후 점차적으로 감소되는 경향을 볼 수 있다. S.R.=30 s⁻¹ 이하에서 화염온도가 감소되는 현상은 고온 영역을

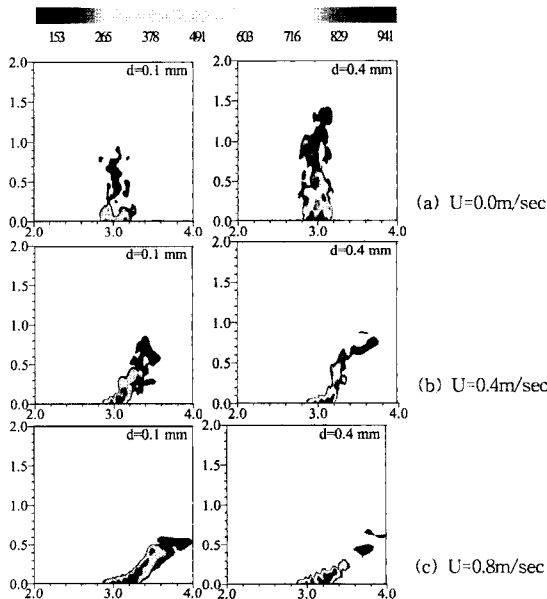


Figure 4. Temperature distribution with droplet diameter for each wind velocity at 5 sec (unit:°C).

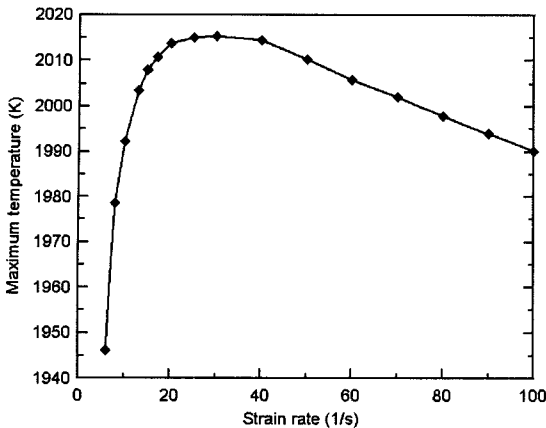


Figure 5. Maximum temperature profile with strain rate in a nonpremixed flame.

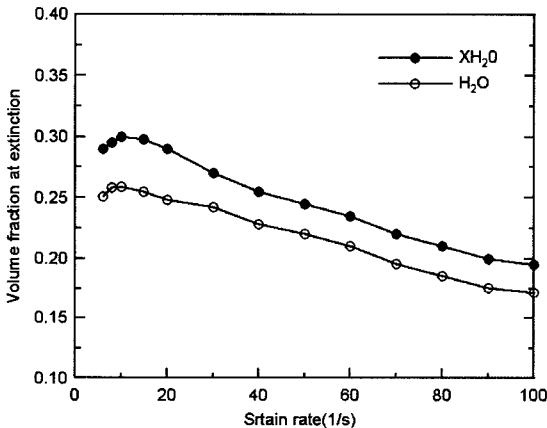


Figure 6. Volume fractions at extinction for H_2O and XH_2O with strain rate.

갖는 화염두께의 증가로 인한 복사열손실의 증가에 의해 발생됨을 기존연구를 통해 확인할 수 있다.¹¹⁾ 또한 $S.R. = 30 s^{-1}$ 이상에서는 반응에 의한 발생열에 비해 연료 및 산화제의 공급량이 증가하기 때문에 온도가 감소된다고 알려져 있다. 외부 자연풍이 존재할 때 밀폐된 공간에 비해 화염은 보다 넓은 범위의 신장율을 갖게 되며, 국부적으로 다른 화염면의 두께, 열발생 및 연료와 공기의 혼합특성 등을 갖게 된다.

Figure 6은 각 스트레인을 갖는 화염이 소멸될 때의 H_2O 또는 XH_2O 의 공기중 부피비를 나타낸 것이다. 실제 화재에서 미세 물입자는 고온대의 가열에 의해 약 100 이상의 기체 H_2O 로 변화되지만, 이들에 대한 효과는 본 계산에서는 무시하였다.

그림에서 약 $10 s^{-1}$ 의 S.R.을 기준으로 S.R.이 증가함

에 따라 보다 작은 양의 H_2O 침투로도 화염이 소멸될 수 있음을 알 수 있다. 즉 외부 자연풍의 유속이 증가할 때 화염면은 보다 큰 S.R.을 갖게 되며, 이때 상대적으로 작은 H_2O 가 화염면에 도달하더라도 화염은 소화될 수 있음을 의미한다. 또한 단순 열적효과만을 고려한 XH_2O 와 열 및 화학반응효과를 모두 고려한 H_2O 의 결과를 비교할 때 H_2O 의 화학반응효과는 모든 S.R.에 대해 화염을 소화시키는데 기여하고 있음을 알 수 있다.

위 결과로부터 실제 외부 자연풍이 존재할 때 터널 내에서 생성되는 화염은 밀폐된 공간에서의 화염에 비해 보다 작은 양의 H_2O 에 의해서도 소화될 수 있음을 확인할 수 있으며, H_2O 에 의한 화학반응에 의한 소화효과는 외부 자연풍에 의해 크게 영향을 받지 않음을 짐작할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 FDS를 이용하여 외부 자연풍에 의한 터널 내의 미세물분무의 소화특성을 검토하였으며, 미세물분무에 의한 열 및 화학반응에 의한 소화특성을 검토하기 위하여 상세반응을 고려할 수 있는 1차원 비예혼합화염에 대한 계산을 수행하였다.

1. 외부 자연풍의 유속이 증가함에 따라 미세물분무의 소화성능은 점차적으로 감소됨을 확인하였으며, 이는 풍속에 따른 고온 연기층의 이동 및 분무 입자의 패도변화에 의해 발생됨을 알 수 있었다.

2. 외부 자연풍이 없는 경우에 입자직경이 작을수록 소화성능이 높지만, 풍속이 증가함에 따라 입자직경이 클수록 소화성능이 높아짐을 알 수 있었다. 이는 풍속이 증가될수록 산소공급량이 증가하기 때문에 질식효과와 영향이 감소되며, 입자가 작을수록 작은 운동량으로 인하여 입자가 화원에 도달하지 않고 외부 자연풍의 흐름에 의해 지배되기 때문일 것으로 판단된다.

3. 외부 자연풍이 존재할 때 풍속에 따른 분무 노즐의 설치간격, 설치 위치 등에 대한 고려가 요구되며, 최적 공급압력, 분사형태 및 입자크기의 설계치가 기존 밀폐된 지하공간에서의 경우와 많은 차이를 있을 것으로 예측된다.

4. 자연풍이 존재하는 조건의 화염은 밀폐된 공간에서의 화염에 비해 화염신장 효과로 인하여 보다 작은 양의 H_2O 침투에 의해서도 소화될 수 있으며, H_2O 의 화학반응에 의한 소화효과는 외부 자연풍의 유속에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다.

참고문헌

1. R. Wighus, "Engineering Relations for Water Mist Fire Suppression Systems", Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, pp.397(1995).
2. J.R. Mawhinney, B.Z. Dlugogorski and A.K. Kim, "A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist", Fire Safety Science - Proceedings of Fourth International Symposium, pp.47-60(1994).
3. Z. Liu and A.K. Kim, "A Review of Water Mist Fire Suppression Systems - Fundamental Studies", Journal of Fire Protection Engineering, Vol.10, No. 3, pp.32-50(2000).
4. P. Andersson, M. Arvidson and G. Holmstedt, "Small Scale Experiments and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water Mist", Technical Report 3080, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, May(1996).
5. J. Hua, J. Kumar, B.C. Khoo and H. Xue, "A Numerical Study of the Interaction of Water Spray with a Fire Plume", Fire Safety Journal, Vol.37, pp.631-657(2002).
6. R. Wighus, "Extinguishment of Enclosed Gas Fires with Water Spray", Proceedings of the Third International Symposium on Fire Safety Science, Edinburgh, Scotland(1991).
7. 임용준, 강현욱, 이호석, "도로터널 환기설계시 외부 자연풍 영향에 대한 연구", 기술보고서, Building and Tunnel Technologies Co. Ltd.(2004).
8. K.B. McGrattan, R.G. Rehm and H.R. Baum, "Large Eddy Simulation of Smoke Movement", Fire Safety Journal, Vol.30, No.2, pp.161-178(1998).
9. W.E. Ranz and Jr. W.R. Marshall, "Evaporating from Drops, Part", Chem. Eng. Prog., Vol.48, pp.141-146(1952).
10. 김성찬, 유흥선, "물분무에 의한 화재제어 특성에 관한 연구", 설비공학논문집, Vol.15, No.4, pp.261-267(2003).
11. J.S. Tien, "Diffusion Flame Extinction at Small Stretch Rates: The Mechanism of Radiative Loss", Combustion and Flame, Vol.65, pp.31-34(1986).
12. A.E. Lutz, R.J. Kee, J.F. Grcar and F.M. Rupley, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames", Sandia Report, SAND96-8243.
13. C.E. Lee, S.R. Lee, J.W. Han and J. Park, "Numerical Study on Effect of CO₂ Addition in Flame Structure and NO_x Formation of CH₄-Air Counterflow Diffusion Flames", Int. J. Energy Research, Vol.25, pp.343-345(2001).