

입자 직경에 따른 물분무수 거동 특성에 관한 수치적 연구

이동찬*, 정우성**, 이철규**, 이덕희**, 장용준**

A Numerical Study of Water Mist Behavior According to Droplet Diameter-Size

Dong-Chan Lee*, Woo-Sung Jung**, Cheul-Kyu Lee**, Duck-Hee Lee**, Yong-Jun Jang**

Key Words : CFD(전산유체), Water Mist(물분무수), Droplet Diameter-Size(입자크기), Fire Flame(화염)

Abstract

In this study, analysis of water mist behavior is performed using numerical simulation. Water mist is characterized by the droplet flow which is one of the multiphase flows and is discrete fluid droplets in continuous air. It is important to choose the proper diameter of droplet-size and the distance between the fire location and the position of water mist because it depends on the buoyancy from fire. Therefore the behavior of water mist with fire should be simulated by FLUENT, a commercial computational fluid dynamics(CFD) program, with Lagrangian discrete phase model. (DPM)

1. 서론

화재 발생 시 화염원 확산 방지를 위한 초기 화재 진압 기술로서 미분무수(Water mist)는 고압의 노즐에 물을 분사시킬 때 발생하는 미세한 물방울($<1,000\mu\text{m}$)을 이용한다. 기존의 수계소화설비의 주류를 이루는 스프링클러에 비하여 물방울 입자가 작아 동일한 유량 대비 열전달 표면적이 넓을 뿐만 아니라 쉽게 증발할 수 있어 이를 이용한 잠열 효과가 매우 크다. 따라서, 화재 진압에 상당히 우수하다. 또한, 기존의 대형 설비에 사용되는 소화시스템은 적용 대상에 따라 엔진기관실과 같은 비주거 공간에는 할론이나 CO_2 소화시스템이 사용되고 주거 공간 및 공공장소에는 스프링클러가 사용되고 있으나 최근에는 CO_2 저감을 위시한 환경 규제 및 소화설비의 소손에 대한 우려가 점차 강화되고 있는 추세이므로 미분무수의 소화 설비의 수요가 증가하고 있다.

기존 스프링클러 대비 적은양의 물로 동일한 화재진압 효과를 낼 수 있는 장점은 지속적인 소화수 공급이 불가능한 운송수단의 화재 진압 수단으로 최근 매우 고무적이며 선박의 경우 엔진실과 같은 각종 설비에 화재 진압장치로 이미 적용되고 있다. 최근에는 대구지하철 참사 이후 철도차량의 화재 진압수단으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 기존 연구결과로 K.C. Adia는 미세물분무수($<10\mu\text{m}$)의 화재진압 성능에 대해 수치해석과 실험을 이용하여 연구를 수행하였고, 김성찬 등은 밀폐된 공간에 다중의 미분무수 노즐을 설치하여 분무각이 화재실내부의 온도분포에 미치는 영향에 대해 실험과 수치해석을 비교하였으며, 김호영등은 개방공간에서 단일노즐을 이용한 실험적 연구를 진행하였다. 철도화재 관련 최근 연구로 김동현, 박원희 등은 중저압

물분무를 이용한 객차의 화재 진압에 대하여 실험과 수치해석을 병행한 연구를 수행되었으며 최근 수행중인 철도종합안전기술개발사업의 '철도화재 안전성능평가 및 사고 방지 기술개발'에서는 객차에 적용되는 미분무수의 성능평가 방법 개발을 위해 노즐선정과 화재 시나리오에 따른 화재진압 성능 기준에 관한 연구가 수행 중에 있다.

물리적인 관점에서 미분무수는 액적 입자 크기가 미세할수록 화재 진압에 효과적이나 액적 입자가 가지는 관성력은 상대적으로 감소하여 화재 시 수반되는 부력에 의한 유동과 화재 공간이 대기와 노출될 시 유발될 수 있는 외부 유동의 영향으로 인해 실제 화재 진압 참여에 지대한 영향을 줄 수 있다. 수치적인 관점에서 미분무수의 거동은 초기 화재로 인한 대기의 자연대류와 액체 상태의 액적 입자 분사로부터 이것의 증발로 인한 기체 상태의 수증기가 유동하게 되는 기체-액체-기체 동시 공존의 다상 유동이다. 또한, 대기 상태인 연속된 기체 상태와 각각의 개체로 존재하는 액체 상태의 액적 입자 존재로 인해 수치해석 진행 시 해석 영역 전체에 대하여 질량보존, 운동량보존, 에너지보존의 계산을 Eulerian 적인 관점에서 수행함과 동시에 액적입자에 대해서는 Lagrangian 방법을 이용한 계산이 수행되어야 한다. 그러나, 액적입자의 크기가 매우 미세한 수준($<10\mu\text{m}$)인 경우에는 미분무수가 너무 조밀하게 분포하게 되어 연속체와 비슷한 거동을 하게 되므로 이런 경우에는 미분무수 거동을 Eulerian 적인 관점에서 봐야 한다고 K.C. Adia는 제안하고 있다. 결국 미분무수는 외부유동이 차단된 상태에서 화염에 의한 부력에 적절히 대응할 수 있도록 노즐의 설치 위치 선정과 이에 따른 물분무수 액적 입자 크기 결정이 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 수치해석을 이용하여 초기 화재 발생 시 부력에 의해 발생하는 자연대류 유동을 해석하였고 이후 액적 입자크기와 분사되는 위치를 달리하였을 때의 미분무수 유동을 해석하였으며, 이를 위해 범용 CFD Code인 Fluent(Ver. 6.3)를 이용하였다.

* 한국철도기술연구원 환경화재연구팀

** 한국철도기술연구원 환경화재연구팀

* Corresponding author, Email : dclee@krri.re.kr

2. 수치해석

2.1 해석대상

3×3×3m. 공간의 하부 정중앙에 원기둥 형태의 화염이 존재하고, 화염 주변에 8개의 미분부수 출구를 이분하게 배치한다. 화염 원기둥은 직경이 0.3m, 높이는 0.6m이다. 미분부수 출구는 중력방향과 수직인 상하부면 각각을 가로, 세로 균일하게 3등분 하였을 때 나오는 각 면의 정중앙에 위치시키고 출구 직경은 0.1m이며 화염이 존재하는 면을 제외하고 상하부 각각 8개씩 배치된다. 미분부수 설치 면 이외의 중력과 수직인 면은 외부 유동이 존재하지 않은 일반 대기압 상태에 노출되어 있는 것으로 간주한다. Fig. 1 은 해석 대상을 개략적으로 보여준다. 실제 해석 수행 시에는 상하부 동시에 물분부수가 분사되는 것은 고려되지 않는다. 다만, 분사되는 위치를 한 번에 설명하기 위하여 Fig. 1에는 동시에 도시하였다.

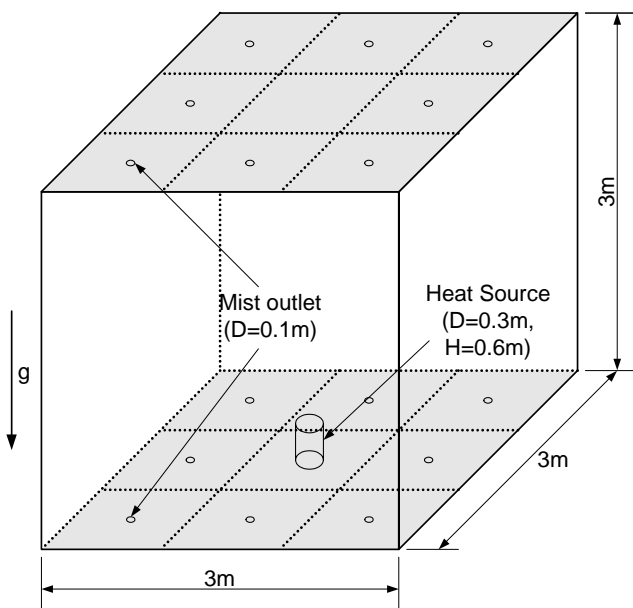


Fig. 1 Schematics of Control Volume for Numerical Simulation.

2.2 수치해석 전처리

수치 시뮬레이션을 수행하기 위한 형상 및 격자 생성 작업은 Fluent 전용 전처리기인 Gambit(Ver. 2.4)를 사용 하였다. Fig. 1에서와 같은 정육면체를 만들고 이 내부 zx면 정 중앙에 화염원인 원기둥을 생성하였다. 그리고 미분부수가 분사되는 위치에 Fig. 1에서와 같이 원으로 면을 생성하였으며 반대편 면에도 동일한 작업을 반복하였다.

Fluent는 전형적인 비정렬격자(Unstructured Grid) 기반의 해석 코드이다. 따라서 본 연구에서 해석하고자 하는 대상과 같이 정렬격자(Structured Grid)를 구현할 수 없는 문제의 접근성이 매우 뛰어나며 그에 따른 사면체, 육면체, 피라미드, 프리즘과 같은 다양한 형태의 격자 적용이 가능하다. 본 대상의 경우 zx면은 비정렬 형태의 사각 격자 생성이 가능하고 y방향으로는 정렬 사각 격자 생성이 가능하므로 비정렬 육면체 격자를 적용하였다.

zx면의 원기둥 중심을 지나는 xy면과 yz면을 기준으로 형상과 경계조건이 동일하기 때문에 정확한 대칭을 이루어 전체 해석 영역의 1/4만을 계산하는 것이 가능하다. 이로 인한 격자수 감소는 전체 계산 수행 시간을 단축시켜주는 요인이다. 1/4영역에 대한 전체 소요된 격자는 21,900개이며 전체 영역에 대해 생성된 격자는 Fig. 2와 같다.

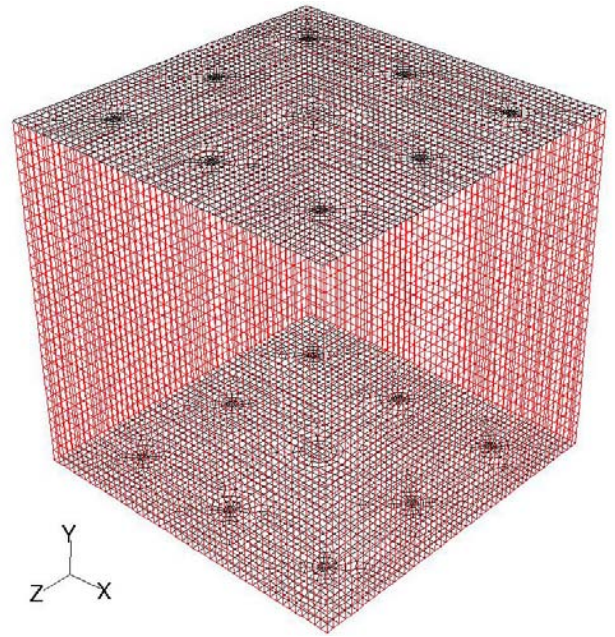


Fig. 2 Mesh Generation for Fig. 1.

2.3 수치해석 조건

화재 발생 후 2초 경과 후에 미분부수가 분사되는 것으로 가정하였는데 이는 미분부수가 초기 화재 발생 시 화염 확산 방지를 목적으로 두고 있기 때문이다. 화염은 연소와 복사를 무시하고 시간에 따라 일정한 열이 지속적 방출되는 조건을 설정하였으며 그 값은 50kW이다. 이럴 경우 미분부수의 화재 진압의 효과에 대한 정량적 비교가 불가능하나 액적입자의 거동을 예측하는 것이 본 연구의 목적이기 때문에 이러한 가정을 하였다. 대기압 상태에 노출되어 있는 면의 가정은 268°C로 설정하였다. 화재 발생 시 주변 온도 상승을 감안하고 비정상상태 수치해석 간에 적절한 초기 값의 설정이 해의 수렴에 있어 매우 중요하기 때문이다. 화염의 열밀도가 매우 높음으로 인해 매우 높은 온도 상승이 예상되기 때문에 공기는 이상기체(ideal gas)로 가정하여 2초까지의 자연대류 유동해석을 수행하였다.

화재 진압을 위한 미분부수의 분사 해석은 Fluent의 DPM (discrete phase model)을 사용하였다. 연속적인 분포를 가지는 공기와 각각의 개체로 존재하는 액적입자가 동시에 존재하는 2상 유동을 해석하는 기법으로 Fluent에서 제공하는 모델이다. 액적 분사량은 노즐 당 0.008kg/s로 총 0.064kg/s 이고 300K 대기압 상태의 water-liquid로 가정하였다. 난류모델로는 $\kappa-\epsilon$ 모델을 채택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염온도분포

시간 간격을 0.01s로 설정하여 비정상상태 해석을 2초까지 수행한 결과를 화염중심을 지나는 xy면에 대해 Fig. 3에서 보여준다. (a)에서 최대 온도 상승은 약 1000°C에 육박하는 것을 보여주고 있으며 강한 부력 효과로 인해 화염원으로부터 y 방향으로 높은 온도 분포를 보여 준다. 복사 효과를 무시하고 주변을 대기 상태로 가정하였기 때문에 x, z 방향으로 온도가 균일하게 나타남을 확인할 수 있다. 속도 역시 열부력에 의해 중력과 반대 방향으로 강한 상승 유동이 발생함을 확인할 수 있으며 상승된 유동은 빠르게 외부로 빠져 나가고 하부에서는 상대적으로 약하게 공기가 유입됨을 (b)에서 확인할 수 있다.

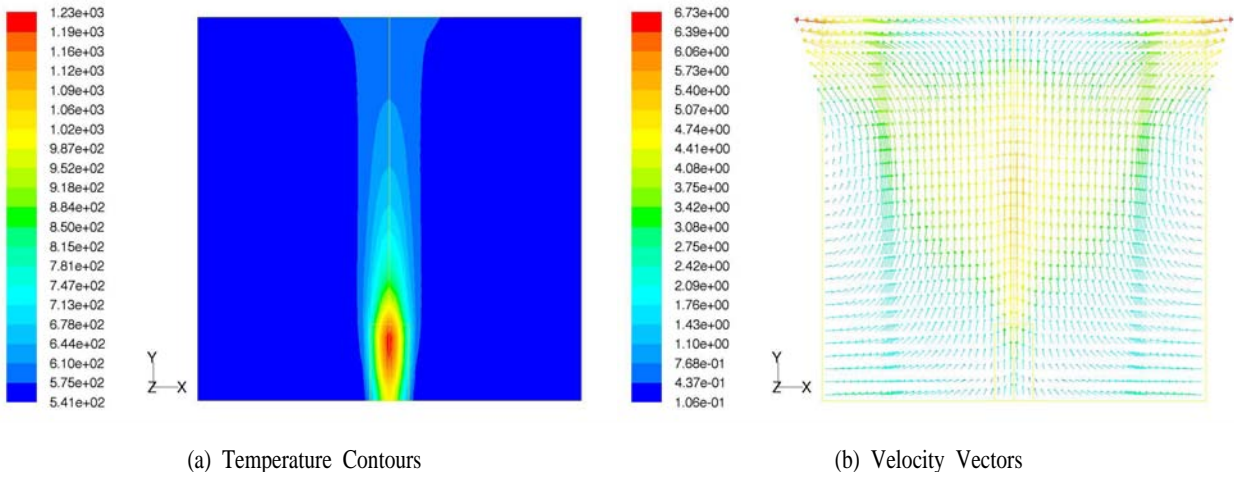


Fig. 3 Results of Numerical Simulation at t=2s.

3.2 미분무수 질량분포

미분무수 액적의 입자 직경을 10, 100, 300 μm 의 경우를 고려하여 상하부 각각 분사되는, 총 6가지 경우에 대하여 해석을 진행하였다. 미분무수 액적입자는 매우 미세한 크기임을 감안하여 유동 간 액적입자의 파괴 혹은 분리는 고려하지 않고 초기 설정 직경에서 상변화 시 바로 수증기로 변환한다는 가정을 하였다.

Fig. 4는 미분무수 분사 후 10초 후에 액적입자의 질량 분포를 화염중심을 지나는 xy면에 대해 보여준다. 노즐이 하부에 설치된 경우에는 미분무수가 분사 위치에서만 집중적으로 분포하고 있다. 이는 열부력에 의해 화염원으로 빨리 들어가는 중간에 액적 입자가 증발하기 때문으로 보인다. 액적 입자 크기에 따른 질량 분포를 보면 입자 직경이 작을수록 동일한 분사량 대비

많은 질량이 존재한다. 이것은 액적입자 직경이 작을수록 많은 액적이 존재하기 때문으로 보인다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 경우에 대해 노즐이 상부에 설치되었을 때의 해석 결과이다. 3가지 경우 모두 상부 측면에 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 2의 (b)에서 보는 바와 같이 열부력에 의해 상부 측면에 외부로 빠져나가는 유동을 확인할 수 있고 전체 해석 영역 속도 중에 이 부분이 가장 빠른 분포를 보이고 있다. 이 지점에 분사되는 미분무수는 이 유동의 영향으로 인해 극히 일부분만이 증발되고 대부분은 대기로 빠져 나가고 있는 것으로 보인다. 본 연구에서 가정한 미분무수 입자 크기와 분사 속도의 의한 관성력이 열부력에 의해 유발된 공기의 관성력보다 작음을 확인할 수 있다.

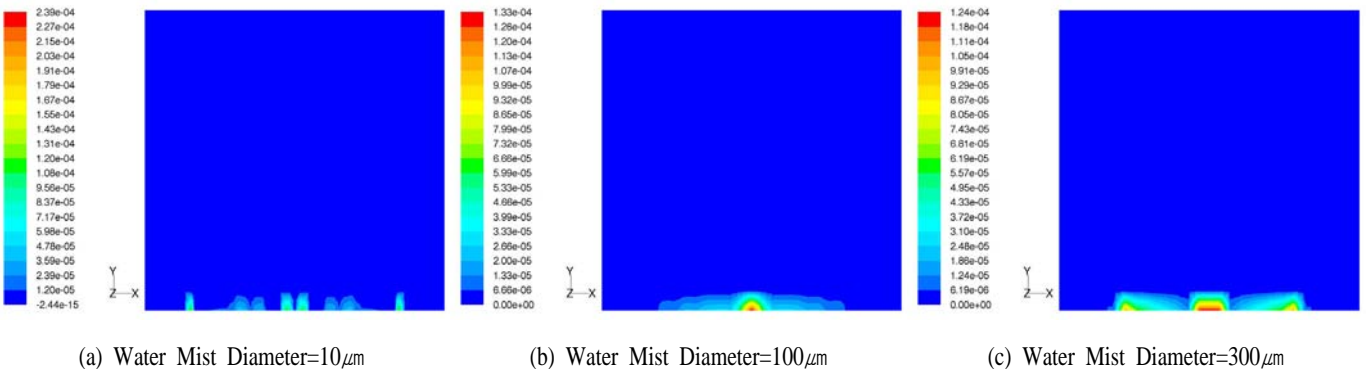


Fig. 4 Water Mist Mass Distributions for Bottom-up Injections at t=12s.

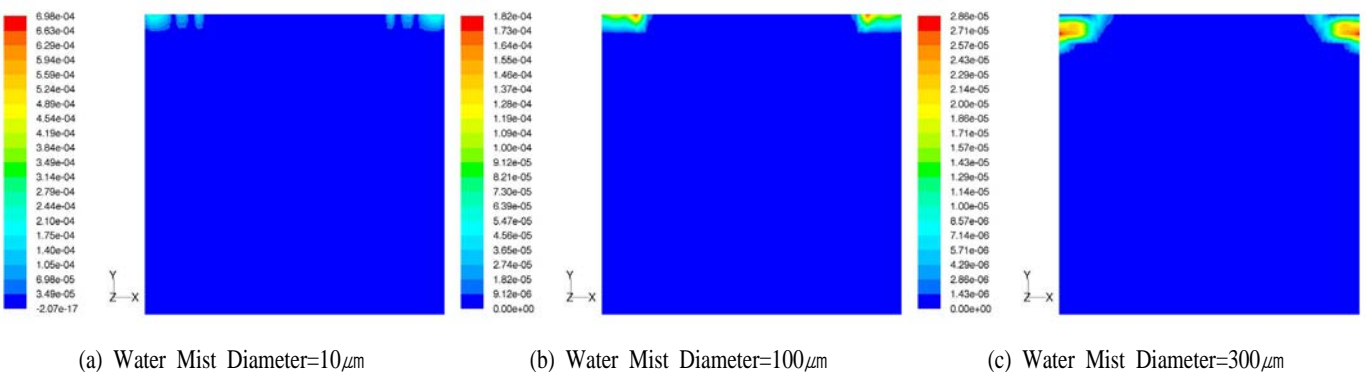


Fig. 5 Water Mist Mass Distributions for Top-down Injections at t=12s.

3.3 H₂O 질량 비율

분사된 미분무수는 화염 혹은 해석영역의 높은 온도로 인해 증발한다. 즉 미분무수 분사 시점인 2초부터 해석영역의 기체는 공기와 수증기가 동시에 존재한다. 이 때, 전체 기체 대비 수증기의 질량 분포를 통해 미분무수의 화재 진압 참여 정도를 가늠할 수 있으며 이를 통해 온도 분포의 설명이 가능하다.

Fig. 6은 미분무수 분사 후 10초 후에 수증기의 질량 비율 (Mass Fraction) 분포를 화염중심을 지나는 xy면에 대해 보여준다. 노즐이 하부에 설치된 경우이며, (a), (b), (c) 모두 화염의 중심에 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 화염 중심에서 미분무수의 증발이 집중적으로 일어나는 것을 의미하며 화염원의 열소산에 직접적인 영향을 끼치고 있음을 의미한다. 또한, Fig. 2에서 보여주는 온도와 유동장의 변화와 유사한 형태로 수증기 질량 비율이 분포함을 확인 할 수 있다. 이 부분 역시 화재 진압에 미분무수가 적절히 참여 하고 있음을 의미한다. 입자 직경에 따른 질량 비율 분포를 보면 (a)는 상부 측면과 근접한 위치까지 존재하고 (b)는 상부 중심까지 존재하며 (c)는 상부 중심에 적당히 떨어진 위치까지 존재함을 확인할 수 있다. 입자 직경이 작을수록 많은 입자수가 존재하게 되고 이는 입자 개당 체적 감소를 의미한다. 입자체적이 감소할수록 증발이 보다 쉽게 일어 날수 있기 때문에 수증기의 질량 비율이 보다 넓게 분포하는 것으로 판단되며 반대로 입자 직경이 증가함에 따라 액적이 증발되기 위해서는 보다 강한 열이 필요하기 때문에 Fig. 6과 같은 분포를 가짐을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 경우에 대해 노즐이 상부에 설치되었을 때의 해석 결과이다. Fig. 5의 미분무수 질량 분포와 거의 유사한 해석결과를 보여준다. 이것 역시 열부력에 의한 해석 영역 상부 측면에 외부로 빠져나가는 강한 유동의 영향에 의해 국부적인 영역에서만 수증기가 존재하는 것으로 판단된다. 이 경

에는 화염원에서 직접 증발이 일어나지 않게 때문에 화재 진압에 거의 영향을 미치지 못할 것으로 예측된다. 다만, 화염원의 간접적 열전달인 대류에 의해 노즐이 하부에 설치된 경우 대비 약 1/100-1/1000의 수준의 증발이 일어남을 확인할 수 있다.

3.4 미분무수 분사에 따른 온도분포

본 연구에서 화염은 연소와 복사를 무시하고 특정 유체 체적에서 방출되는 열이 시간에 따라 일정하다고 가정하였다. 그러나, 실제 화재 현상은 연소반응에 의해 진행되며 시간에 따라 나오는 열 방출양이 다르게 분포한다. 따라서 본 해석을 통해 나온 결과를 바탕으로 정량적인 온도분포를 예측할 수 없으나, 앞서 언급한 바와 같이 미분무수 유동 특성이 온도 분포에 영향을 미치는 중요한 변수이기 때문에 해석한 각 경우에 대해 상대적인 온도 비교는 가능하다.

Fig. 8은 미분무수 분사 10초 후의 온도 분포를 보여 준다. Fig. 6의 수증기 질량 비율 분포에서 설명하였듯이 미분무수가 화염원을 관통하며 많은 열을 증발 잠열로 소산시키고 있음을 확인할 수 있으며 이로 인해 약 200-300°C의 온도가 감소한 것을 보여 준다. (a), (b), (c) 세 경우 모두 비슷한 온도 분포를 보여주고 있으며 입자 직경이 100 μ m인 경우가 최고점의 온도가 가장 낮게 나오고 있고, 나머지 두가지 경우가 비슷한 것을 확인할 수 있다. 입자 직경에 따른 잠열 변화의 특성에 기인한 것으로 예측되나 이에 대한 연구는 물리적, 수치적 관점에서 추후에 진행해야 할 것이다.

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 조건에서 노즐이 상부에 설치된 경우에 대해 온도 분포를 보여 준다. 수증기 질량 비율 분포에서 논했듯이 화염으로 가장 먼 국소 위치해서 열전달이 일어나므로 전체 온도 변화에 전혀 영향을 미치지 못하고 있음을 보여주며 이로 인해 t=2s 일 때 최고 온도와 동일함을 확인할 수 있다.

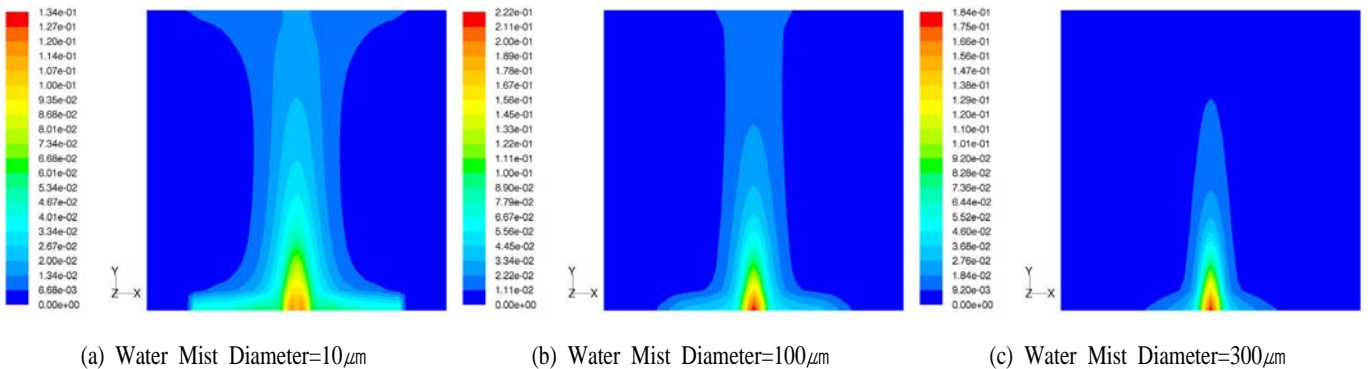


Fig. 6 Mass Fraction of H₂O for Bottom-up Injections at t=12s.

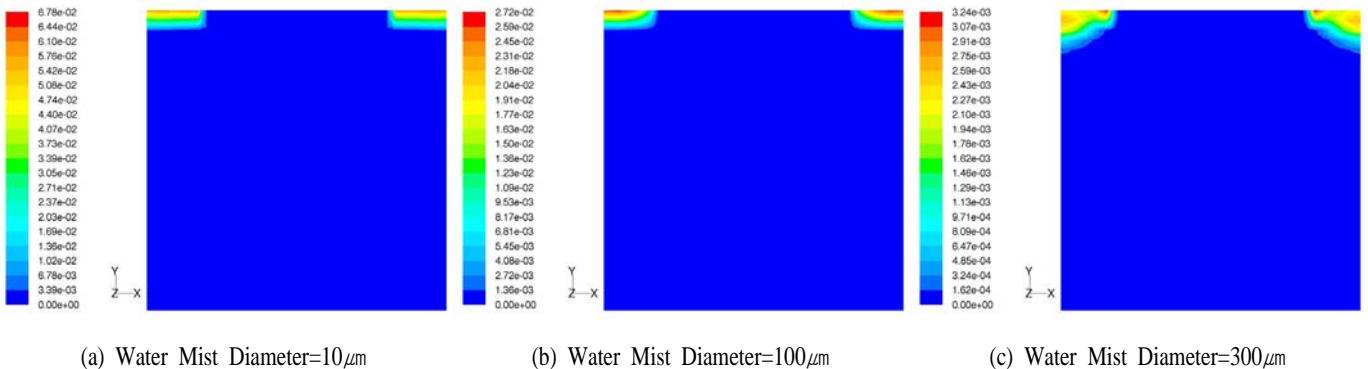


Fig. 7 Mass Fraction of H₂O for Top-down Injections at t=12s.

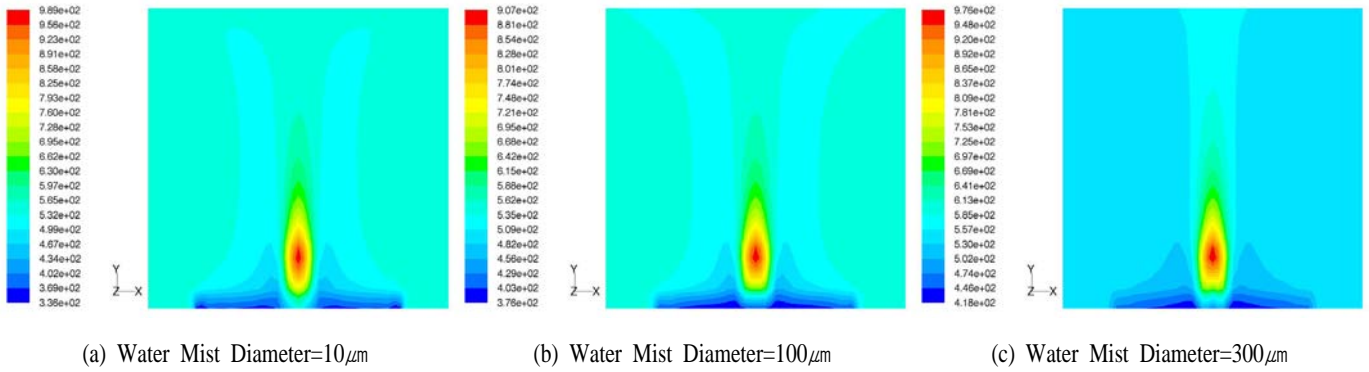


Fig. 8 Contours of Temperature for Bottom-up Injections at t=12s.

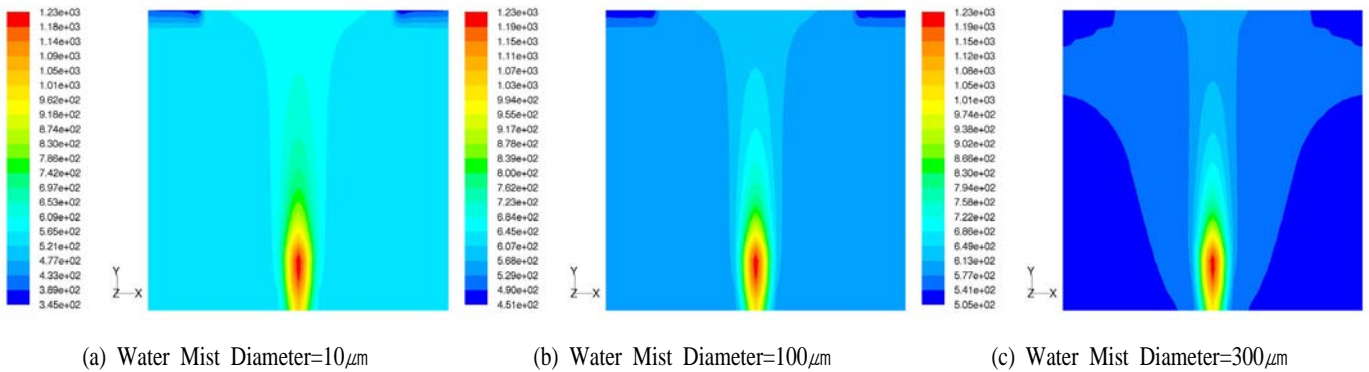


Fig. 9 Contours of Temperature for Top-down Injections at t=12s.

4. 결론

본 연구에서 초기 화재 진압을 위한 미분무수 분사 시 노즐 위치와 입자 직경에 따른 액적 거동과 증발된 수증기의 분포에 대하여 수치해석을 수행하였다. 화재 진압을 극대화하기 위해서는 화염으로 방출되는 열을 흡수하는 매체의 표면적 증가와 증발 잠열을 최대한 이용해야 한다. 이 때문에 이론적으로 미분무수는 1000µm의 미만의 직경을 요구하고 있고 그 크기의 감소가 화재 진압에 효과적이다. 그러나 액적 입자의 감소는 각 개체의 관성력을 저감시키며, 이는 미분무수 유동이 화재 시 발생하는 강한 열 부력의 지배하에 놓이게 되는 요인임을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 가장한 300µm 이하의 직경을 가지는 미분무수의 유동특성은 노즐의 설치 위치가 동일한 경우에 큰 차이점을 보이지 않았으며, 오히려 설치 위치가 화재 진압에 지배적인 인자임을 확인하였다. 따라서 동일한 설치 위치에서 액적 입자 크기가 화재 진압에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 본 연구에서 사용된 입자 직경보다 큰 경우에 대한 해석이 수행되어야 할 것이다. 한편으로 상부 노즐이 화원으로부터 동일선상에 위치하지 않는 것은 미분무수 거동이 화재 진압에 전혀 참여하지 못하는 것으로 확인된 바, 화염원에 직접 미분무수가 분사되는 경우에 대한 해석이 수행되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 입구와 출구를 모두 가지는 검사체에 대해 수치해석을 수행하였다. 미분무수의 활용은 외부 유동의 영향을 받지 않는 밀폐된 공간으로 한정하는 것이 타당하나, 본 연구의 우선적인 목적은 열 부력에 따른 미분무수 거동의 거시적인 고찰이며 이 때문에 화염 역시 일정 열원으로 가정하였다. 이와 같은 가정을 바탕으로 수치해석 시 빠른 수렴 조건을 만족하기 위해 개방된 공간을 해석 대상으로 하였다. 그러나 실제 가정에 맞는 밀폐된 공간에서의 미분무수 거동 예측을 위해서는 물리적인 특성에 대

한 보다 엄밀한 고찰과 더불어 수치적인 접근방법에 대한 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 건설교통부 철도종합안전기술개발사업 ‘철도화재 안전성능평가 및 사고방지 기술개발’ 과제의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- [1] K.C. Adiga, Robert F. Hatcher Jr, Ronald S. Sheinson, A Computational and Experiment Study of Ultra Fine Water Mist as a Total Flooding Agent, Fire Safety Journal 42 (2007), pp. 150-160
- [2] Fluent user's guide vols. 1-4. Fluent Incorporated, Central Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 1998-2004.
- [3] 정희택, 이창효, 최병일, 한용식, 옥영욱, 미분무수 소화 노즐의 분무 특성 예측을 위한 CFD기법의 적용, 한국전산유체공학회지, 제11권 제4호 (2006), pp. 56-61
- [4] 배강열, 정희택, 김형범, 노즐 특성 변화에 따른 미분무수와 화염과의 상호작용에 관한 수치해석, 대한기계학회 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집 (2007), pp. 2522-2527
- [5] 노재성, 양승신, 유홍선, 김동현, 정우성, 장용준, 중저압 물분무를 이용한 객차내 화재진압에 관한 실험 및 수치해석적 연구, 한국철도학회논문지, Vol.9, No.3 (2006), pp. 291-297
- [6] 김동현, 박원희, 장용준, 이한수, 유홍선, 장중국, 박정렬, 미세 물분무를 이용한 객차내의 화재제어 성능시험, 한국철도학회 학술발표대회논문집 (2007), pp. 64-68