

지하 공간의 워터커튼 시스템 화재제어 특성 분석

유우준 · 남준석 · 최진종 · 이정균* · 김동준* · 유홍선**
한국소방산업기술원, (주)파라다이스산업*, 중앙대학교**

An Analysis of the Smoke Control Characteristics of Water Curtain System for Underground Space

Woo Jun You* · Jun-Seok Nam* · Jin Jong Choi* · Dong Joon Kim** ·
Jeong Kyoon Lee** · Hong-Sun Ryou†

요 약

본 연구에서는 지하 방호공간에서 화재가 발생한 경우 워터커튼 시스템에 의한 연기의 차단효과와 화재제어 특성을 분석하였다. 이를 위해서 분사각도 180°, 오리피스 직경 8.2 mm의 노즐과 지하방호 공간용 실화재 실험 장치를 제작하였으며, 화재강도 1.5 MW 기준 A급 1단위 화재 실험으로부터 온도분포와 가시도를 측정하여 연기의 차단효과를 확인하였다. 화재제어 특성을 분석하기 위해서 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 해석프로그램인 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하여 동일한 실험조건에서 온도분포를 비교하였으며 노즐의 설치개수 변화에 대한 화재해석 및 실험결과로부터 워터커튼 시스템은 노즐의 설치위치와 개수, 화원으로 부터의 거리, 제연 등의 설비 조건과 분사 노즐의 특성, 공급 유량 등이 중요한 상관관계를 갖고 있음을 확인하였다.

1. 서 론

현대의 도시 구조는 교통, 상업, 주거 공간, 공공 시설 등 다양한 형태의 기능을 포함하고 있으며, 산업의 발전과 경제 성장에 따라서 공간 활용에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다[1]. 대표적인 사례로는 최근 교통의 문제를 해결하기 위해서 대도시 도로를 계획하기 위한 방안이 마련되고 있는 사례를 들 수 있으며[2], 이제는 지상에서 뿐만 아니라 지하공간의 활용이 요구되는 추세이다. 하지만, 도시 구조를 형성하기 위한 공간의 활용범위가 넓어짐에 따라서 인명안전의 위험도는 높아질 수 있다. 특히, 지하공간은 창이 없는 폐쇄형 공간으로 화재가 발생할 경우 급격한 압력 상승과 함께 가연성 물질로 인하여 다량의 유독가스가 발생할 수 있으며, 화재로 인한 정전 또는 연기에 의해서 피난 경로를 쉽게 파악할 수 없는 취약점을 갖고 있다[3]. 노삼규[1] 등은 이러한 지하공간에서 화재가 발생한 경우 피난안전에 관한 연구를 수행하여 제연설비와의 연동성과 제연경계벽의 중요성을 제안하였고, 홍천화[4] 등은 지하공간에서 연기의 거동 특성 및 주요 인자에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 국내의 자료에 의하면 지하 공간에서 화재가 발생한 경우 연기를 빠르게 차단하기 위한 수계 소화 설비 개발에 관한 연구가 미비한 상태이며, 최근 노즐의 분사 형태를 얇은 커튼으로 하여 연기의 이동을 차단하기 위한 워터커튼 시스템의 적용 방안이 제시되고 있다. 따라서 본 연구에서는 워터커튼 시스템에 의한 연기의 차단효과를 분석하기 위해서 실험 장치를 제작하였으며 화재실험을 실시하여 온도분포와 가시도를 측

정하였다. 또한, 화재 해석프로그램인 FDS를 사용하여 온도분포 해석결과를 비교하였으며 워터커톤 시스템의 화재제어를 위한 주요 인자를 분석하였다.

표 1 계측장비 및 노즐 사양

Sensor	Specification	Num
Thermo couple	K-Type, Length 200 mm	7 set ×3
Heat Flux meter	0~10kW/m ²	1 set
Pressure Transducer	0~10 bar, ±0.5 %	2 ea
Laser Measurement	0.5 m He-Ne Laser	3 ea
Nozzle Type	Injection angle : 180 °, Diameter : 8.2 mm	3 ea

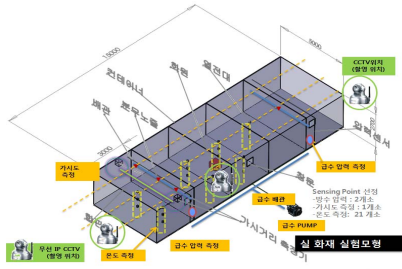


그림 1. 실물 지하상가모형 측정설비 배치도

2. 본 론

2.1 실험장치제작

본 연구를 위해 사용된 실험공간은 그림 1과 같이 폭 5.0 m 높이 2.7 m 길이 15.0 m의 지하상가모형을 제작하여 중앙부에 화원을 배치하고 내·외부 공간의 온도변화를 측정하기 위해서 열전대 7개 각각에 대해서 높이 2.5 m, 2.0 m, 1.3 m 지점에 온도센서를 설치하였으며 출구 부분에는 레이저 투광기를 설치하여 가시도를 측정하였다. 각종 센서로부터의 측정 Data는 Labview S/W 프로그램과 Agilent DAQ 장비를 이용하여 수집하였으며 계측장비 및 노즐의 사양은 표 1과 같다.

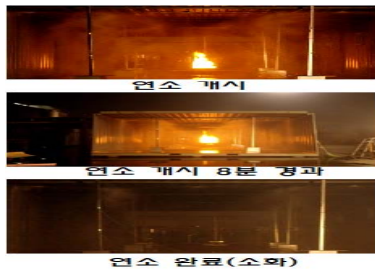


그림 2. A급 1단위 화재실험

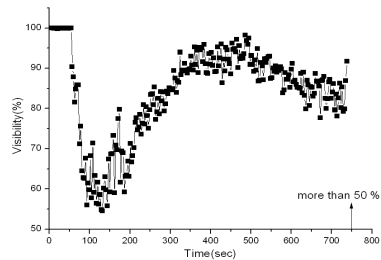


그림 3. 분무 노즐 전후 가시거리 변화

2.2 화재실험 시나리오

지하공간의 화재실험을 위해서 일본 카지마건설의 실험 자료[5]를 근거로 하여 화재강도 1.5 MW 기준 A급 1단위로 그림 2와 같이 화재 실험을 실시하여 워터커톤 전·후의 가시도 및 온도분포를 측정하였다. 그림 3은 최초 방사가 발생하는 초기 구간을 제외하고 연기 저감율에 대한 효과가 50 %이상임을 보여주고 있다. 이는 고온의 열기를 가진 연기가 수막을 통과하면서 냉각되어 멀리 이동하지 못함으로써 연기밀도를 저감시키는 것으로 사료된다. 그림 4는 화원으로부터 노즐방향으로 2.5 m 지점과 6.5 m 지점의 열전대에서 측정된 온도 차이를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 열전대의 높이 2.5 m에서 워터커톤을 전후로 하여 온도차가 (105 ± 50) °C 정도의 범위에 있으며, 높이 1.3 m에서 온도차가 (10 ± 4) °C 정도임을 보여주고 있다. 하지만, 높이 2.0 m에서의 온도차는 약 (-10 ± 2) °C 정도로 화원에서의 온도가 더 낮은 것을 확인할 수 있는데 그 이유는 고온의 열기 중 일부가 노즐로부터 분사되는 물의 운동량에 영향을 받아서 수직 하향한 이후 다시 자체

열원에 의해서 완전히 밑으로 내려가지 않기 때문으로 판단되며, 좀 더 정확한 원인을 분석하기 위해서는 설비조건을 고려한 실험적 연구와 유동현상 및 온도분포를 가시화하여야 한다.

2.3 워터커팅시스템 화재해석

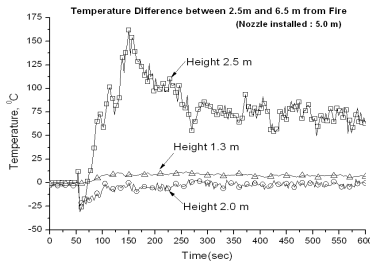


그림 4. 노즐 전후의 온도분포

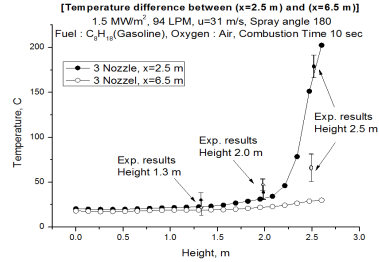


그림 5. 해석결과와 온도분포 측정값 비교

워터커팅 시스템의 연기제어 특성을 분석하기 위해서 NIST의 화재해석프로그램인 FDS를 사용하였다. FDS는 화원에서 발생하는 연기와 열유동에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식을 식 (1) ~ (3)에 나타내었다.

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

$$\partial(\rho u) / \partial t + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}' \quad (2)$$

$$\partial(\rho h) / \partial t + \nabla \cdot \rho h u = Dp/Dt + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \epsilon \quad (3)$$

여기서 각 기호의 의미는 참고문헌[6]에 나와 있으며, 식 (2)의 비선형 방정식을 풀기 위해서 RANS를 기반으로 하여 난류 모델은 LES와 Smagorinsky model을 사용하고 있으며 연료표면과 산화제 사이의 화염경계층에서 발생하는 생성물 및 CO yield를 예측하기 위하여 Multi-mixture fraction model을 사용하였다. 이 밖에 워터커팅으로 사용한 노즐의 분사 형태는 FDS 내에 포함되어 있는 Spray model을 사용하였으며, 입자크기는 600 μm 정도로 가정하였다. FDS의 수치적인 계산과정은 음속의 유동현상과 실제 화학반응에서 발생하는 연소가스에 의한 연기발생 및 연료 표면에서의 물리적인 현상을 표현하는데 제한이 있다[3,6]. 또한, Spray model을 적용하는 과정에서 입자의 크기와 주요 특성길이가 실제 사용한 노즐의 분사 특성과 다르기 때문에 정확한 현상을 모사하기는 어려우며, 본 연구에서는 설비조건을 고려한 해석여부를 판단하기 위해서 실험결과로부터 구한 온도분포와 해석결과를 비교하였다. 그림 5는 높이 2.5 m, 2.0 m, 1.3 m 지점의 온도 측정값과 동일조건에서 온도분포 해석결과의 차이를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 화원으로부터의 거리가 6.5 m이고 높이가 2.5 m와 2.0 m인 경우를 제외하고 온도분포가 모두 측정범위 내에 있는 것을 확인할 수 있다.

2.4 노즐 개수 변화에 대한 온도분포

그림 6은 노즐의 설치 개수가 1개, 2개, 3개 그리고 5개 각각에 대해서 화원으로부터의 거리 2.5 m와 6.5 m 지점에서 높이 방향에 대한 온도분포 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 노즐의 개수가 1개인 경우를 제외하고 워터커팅 이후의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 워터커팅 노즐 1개에 대해서 속도벡터와 온도분포를 가시화한 것으로 노즐의 설치 지점(x=-5.0 m)과 화원 사이에서 연기가 순환하는 현상을 볼 수 있으며, 화원과 거리의 거리에 따라서 연기의 순환 속도에 영향을 줄 것으로 판단된다. 특히, 그림 7에서 높이 1.0 m의 경우 화원 근방에서 보다 워터커팅 이후에서의 온도가 실험결과와 같이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 워터커팅의 설비조건에 따라서

국소지점의 온도와 연기 밀도가 역전되는 현상이 발생할 수 있음을 의미한다.

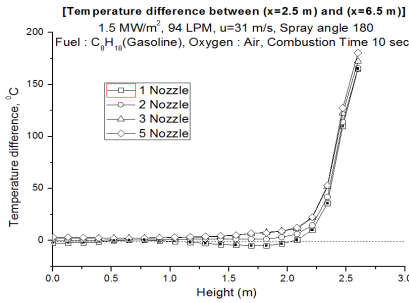


그림 6. 높이 방향에 대한 온도차

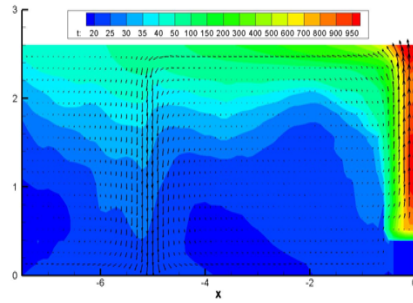


그림 7 속도벡터 및 온도분포 형상

3. 결 론

본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 첫째, 가시도 측정결과 워터커팅 시스템을 전후로하여 고온의 열기가 수막에 의해 냉각되면서 연기의 이동을 감소시킴으로써 연기 저감율이 향상되는 것을 실험적으로 확인하였다. 둘째, 워터커팅을 전후로 하여 국부 지점의 온도를 측정된 결과 높이 방향에 따라서 온도차가 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히, 노즐에서 분사되는 물의 운동량은 화원으로부터 이동하는 열기와 온도분포에 영향을 줄 수 있으며, 정확한 원인을 분석하기 위해서는 설비조건을 고려한 화재 실험과 유동현상에 관한 수치적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 셋째, 온도분포 측정값과 해석결과를 비교하여 노즐의 설치 개수 및 화원과 거리에 따라서 연기의 순환속도와 워터커팅 전후의 온도차에 영향이 있음을 분석하였으며 본 연구의 결과로부터 워터커팅 시스템의 화재제어 특성은 노즐의 설치위치와 개수, 화원으로부터의 거리, 제연 등의 설비 조건과 분사 노즐의 특성, 공급 유량 등이 중요한 상관관계를 갖고 있음을 확인하였다.

4. 후 기

이 연구는 소방방재청 재난안전기반구축사업 중 「지하방호공간의 워터커팅시스템용 노즐 개발」의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] 김진수, 박종근, 노삼규, “지하공간의 피난안전성평가시스템 개발에 관한 연구”, 한국화재소방학회지 논문지, Vol. 17, No 4, 2003, pp 57-63.
- [2] 정재호, 전덕찬, 신일재, 심동현, “국내 최초 대심도 복층터널의 계획-서부간선 지하도로 프로젝트 관련”, 자연 사람 그리고 터널, Vol.13, No.1, 2011, pp. 16-26.
- [3] 고권현, 김성찬, 유홍선, “환기부족 구획화재에 대한 FDS 해석 및 검증”, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 23, No 5, 2009, pp103-109.
- [4] 배상환, 이병권, 홍천화, “초고층 건축물 지하공간의 연기거동 특성 및 영향인자에 관한 연구”, 추계학술논문발표회, 2005, pp347-351.
- [5] Reiko Amano, “Water Screen Fire Disaster Prevention System”, Seisan-Keneyu, Vol. 57, No 4, 2005, pp177-181.
- [6] K .B. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, H. R. Baum and R. G. Rehm, “Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide”, 2007, NIST, Maryland.