

미세물분무를 이용한 PPV의 화재진압효과

김성원 · 신창섭[†]

충북대학교 안전공학과

(2003. 6. 11. 접수 / 2003. 8. 21. 채택)

Fire Suppression Effect of PPV with Water Mist System

Sungwon Kim · Changsub Shin[†]

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received June 11, 2003 / Accepted August 21, 2003)

Abstract : To inject fresh air into a fire room, Positive Pressure Ventilation (PPV) can be used and the blower of PPV increases inside pressure of the room. It makes high flow rate of products of combustion, smoke and heat from the structure, and it is very helpful to fireman on the fire extinguishing work. The flame moves to the direction of airflow and the temperature of flame can be decreased rapidly. In this experiment, a water mist system is applied to PPV to increase the effectiveness, and various effective factors are studied.

n-Heptane and pine wood stick were used as fuel. Temperatures at the above and behind the combustion pan were strongly reduced by the water mist system and by the convective cooling with airflow. The smoke density was also decreased by PPV with water mist system and it can be explained by the absorption of smoke particles on the water mist droplet and by the strong exhausting effects of mobile fan.

Key Words : water mist, PPV, fire suppression

1. 서 론

화재 진압시 송풍기를 이용하여 화염이 발생한 구조물 내부로 신선한 공기를 유입시켜 내부압력을 상승시켜 소방관의 화재진압 활동을 돕는 방식을 PPV(Positive Pressure Ventilation)라고 하며, 구조물 내부 전체 영역의 열·연기 및 연소 생성물 등을 급속 배기시키고 내부 온도를 급속히 감소시킬 수 있는 것이 특징이다¹⁻³⁾.

현재 휴대 가능한 장비로 개발된 PPV 방식의 mobile fan은 영국 소방대의 42% 정도가 장비를 구비하여 화재 초기의 화염억제나 화재 진압후의 환기 목적 등의 소화 보조장비로 사용하고 있으며 그 중 27% 정도는 본격적인 소화활동전의 용도로 사용되고 있다. 또한, 최근 10년 간 미국에서도 유사한 연구가 진행되었는데 본격적인 소화활동전에 이러한 PPV 방식을 사용할 경우 67% 이상의 소방관들

이 화재구조물내에서 보다 편하고 안전한 작업조건을 만든 것으로 판단하고 있다⁴⁾.

PPV 방식의 적용시 fan의 유동방향에 따른 화염 이동으로 화재확대 가능성이나 인명피해의 확대 가능성이 우려될 수도 있지만, 지금까지의 연구결과에 따르면 화염에 대한 mobile fan에 의한 직접적인 피해가능성은 극히 적은 것으로 밝혀지고 있다⁵⁻⁸⁾.

한편, 미세물분무 시스템은 1,000 μ m 미만의 물분무를 발생시켜 화재발생시 냉각, 질식효과 등을 이용하여 화재를 소화시키는 시스템으로, 그 효율성이 입증되어 현재 많은 연구가 진행되고 있고, 산업현장에도 여러 용도로 적용되고 있는 소화시스템이다. 또한, 미세한 입자로 인해 구조물 내에서 확산이 용이해 PPV 방식과의 결합시 원거리까지 전파가 가능하게 된다^{9,10)}.

본 연구에서는 PPV 방식을 이용한 소화활동의 효율증대를 위해서 PPV에 미세물분무 시스템을 결합하여 이에 따른 화염억제 실험과 구조물 내부에서 발생된 연기의 급속배기 효과를 측정하였고, 두 방식의 결합에 의한 효율증대에 대하여 실험, 분석

[†]To whom correspondence should be addressed.
csshin@chungbuk.ac.kr

하였다.

2. 연구 배경

PPV는 개구부나 문을 통해 공기를 불어넣는 방식으로서 구조물 내부의 열과 연기를 제거하는 방식이다. 이러한 PPV는 화재 상황에서의 사용방법에 따라 능동적 환기(Offensive ventilation)와 수동적 환기(Defensive ventilation)로 나뉘게 된다. 능동적 환기란 화재에 직접적인 영향을 미쳐 화재 확산을 억제하고, 소방관이나 구조물의 안전을 보다 높이는 것으로 화재에 대한 직접적인 사용을 의미하며, 수동적 환기란 화원에 직접적인 영향을 미치지 않는 거리에서의 환기나, 화재 진압후 고온가스 및 연기의 급속배기를 목적으로 사용되는 것을 말한다. 즉, 능동적 환기에서는 본격적인 소화활동전의 사용과 소방관들의 부상주수와 동시에 사용하는 것을 의미하며, 이 경우 더 큰 효과를 발휘할 수 있다⁷⁾.

Fig. 1에는 PPV 방식의 fan 사용시 기본적인 고려 사항으로서 건물에 효과적인 영향을 미칠 수 있는 충분한 fan 용량, fan의 위치와 배열, 유입부 관련 변수들, 외부풍속의 영향 그리고 연속적인 환기 등을 기본적 5요소로 나타내었다. 또한, PPV 방식의 사용시에는 유입부를 충분히 덮는 완전밀폐와 반대편 개구부 확보라는 필수적인 조건이 반드시 선행되어야 한다.

FRDG(Fire Research and Development Group) 보고서에서는 화재시 mobile fan에 의한 사상자의 직접적인 피해보다는 화재 발생 초기에 발생한 인명 피해가 절대적이며 추가피해는 미미한 것으로 보고되고 있다. PPV 방식의 적용시 충분한 교육과 훈련을 받은 사용자가 mobile fan의 사용에 대해 충분히 숙지하고 있다면 경미한 피해도 최소화 할 수 있다고 하였다^{2,5,8,11)}.

U.S Army ECBC에서는 mobile fan을 10분 동안 사용한 경우 화확증기 농도를 50%~70%정도 감소시킬 수 있으며, fan의 경사각의 변화를 통하여 더욱 성능을 향상시킬 수 있다고 발표하였다^{12,13)}.

또한, Tuomisaari는 VTT Publication 326에서 fan 사용시에 구조물 내부의 천장에 설치된 분무노즐을 사용할 경우 더욱 효과적으로 화재실을 냉각시키고 플래시오버를 방지할 수 있다고 제안하였다¹⁴⁾.

한편, 건물 외부에 위치하는 fan과 유입부와의 거리는 구조물 내부로의 효과적인 PPV 가압효과와 발

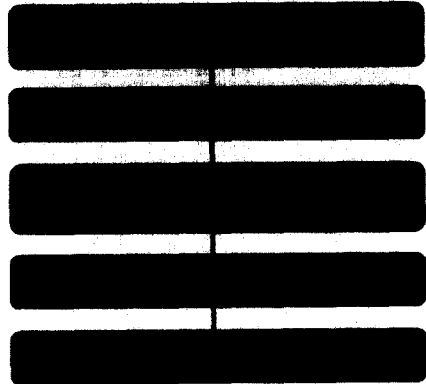


Fig. 1. Basic principles for the implementation of PPV.

생된 유량의 효율적인 유입을 위한 중요한 요인이 되는데 Rimen⁷⁾은 fan과 유입부와의 거리가 2m가 될 때, 유입되는 유량은 20~50% 정도 감소하고 내부압력 상승은 10% 정도 감소한다고 보고하였다. 또한, Ingason과 Fallberg는 PPV와 유입부와의 최적 거리로 1~3m를 제시하였고,⁵⁾ NRCC의 Loughheed는 그의 연구보고서에서 최대유입량이 발생하는 거리와 mobile fan의 특성상 모든 환기실험에서 가장 안정적인 유량이 유입되는 거리에 대하여 보고하였다¹⁵⁾.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치 및 실험재료

본 연구에서 사용된 fan은 날개(blade)가 2개이고, 날개 한 개의 길이가 0.51m인 형태로서 최대 9.2m³/s의 유량을 발생시킬 수 있으며, mobile fan의 엔진은 가솔린을 주연료로 하는 6마력 turbo 타입이었다. 또한, fan 전면부 하단에 연장지지대가 달려있어 경사각 조절이 가능하며 후면부의 수직 이동이 가능한 지지대를 동시에 사용하면 설치 높이까지 조정할 수 있다.

한편, 미세물분무 노즐은 7개의 오리피스로 구성된 7N3 노즐을 이용하여 fan의 유동방향에 따라 이동하게 하였으며 또한 노즐의 방사분포는 10kg/cm²에서 원형의 분포를 나타내고, 유량이 1.4 l/min로서 입자크기는 SMD 135µm인 선형분무 노즐 2개를 사용하였다.

본 실험에서 화재를 발생시키기 위한 연료로 n-heptane과 pine wood stick을 사용하였다. n-Heptane은 alkane의 대표적 물질로서 개질 가솔린과 디젤류

가 alkane을 각각 70%와 95% 포함하고 있어, 가솔린과 함께 IMO와 NFPA에서 미세물분무의 소화성을 실험하기 위해 적합한 물질로 알려져 있으며, pine wood stick은 오리나무와 더불어 목재화재 실험에 주로 사용하는 것으로 알려져 있다¹⁶⁾.

3.2. 실험방법

미세물분무 시스템이 적용된 mobile fan의 유류화재에 대한 소화특성을 실험하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 설치하였다. Fig. 2에서 실험장치는 크게 화재실, 미세물분무 장치, 연기밀도 측정기, mobile fan으로 구성되며 실험은 PPV 방식만을 사용한 경우와 PPV 방식에 미세물분무 노즐을 결합하여 사용한 경우의 화염온도 및 연기밀도 변화를 측정하였다.

화재실은 10m(L)×3m(D)×2.5m(H)을 이용하였으며 미세물분무 노즐의 방사시 일정압력을 연기 위해 고압질소를 이용하여 수조를 10kg/cm²로 가압하여 분무하였다. 또한, PPV의 사용에 따른 연기의 급속배기 효과를 측정하기 위하여 유출부인 창문(1.1m×0.9m)에 연기밀도 측정기를 설치하여 자유연소시와 PPV의 사용시에 연기 배출 특성을 측정하였다. Mobile fan과 화재실 입구와의 거리는 1m로 하였으며, 미세물분무 노즐을 fan 전면의 각각 다른 위치에 2개를 설치하여 방사하였다.

n-Heptane의 화염 크기는 Babrauskas¹⁶⁾에 의해 계산된 열방출량(RHR; Rate of Heat Release) 식을 이용하여 계산하였다. 연소용기는 0.4m×0.4m×0.1m(h)를 사용하였고, 연료의 양은 n-heptane 2ℓ였다. 점화 후 화염이 정상상태가 되는 시점인 2분 후에 fan만을 가동하거나 fan 가동과 동시에 미세물분무를 방사하였으며, 화염이 소멸될 때까지 연속적으로 가동하였다.

Pine wood stick은 70℃에서 48시간이상 건조한 것을 사용하였으며, Fig. 3처럼 수동식 소화기 검정 기술기준의 목재모형 기준에 의거하여 체적비 약 1:10 scale로 축소하여 실험하였다¹⁷⁾. 또한, 철제 앵글연소대를 제작하여 유면과 최하단 목재와의 거리를 0.3m 이격시키고 gasoline 1ℓ를 점화시킨 후 목재에 착화시켰다. Pine wood stick의 열방출량은 식(1)을 이용하였으며 목재 전체에 균일하게 착화시킨다고 가정할 때 질량손실율 m'' 은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다¹⁶⁾.

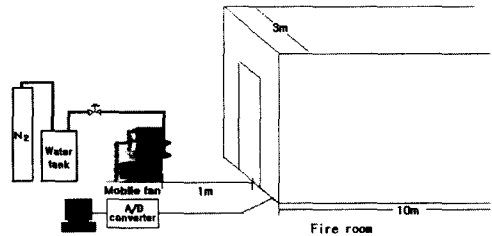


Fig. 2. Schematic of fire suppression experiment.

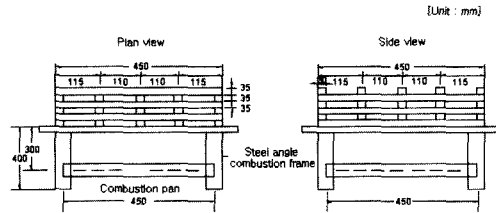


Fig. 3. Experimental set-up of wood cribs.

$$RHR = \Delta h_c \times m'' \quad (1)$$

$$m'' = \frac{4}{D} m_0 v_p \left(1 - \frac{2v_p t}{D}\right) \quad (2)$$

여기서, D는 스틱의 두께[mm], m_0 는 crib의 초기 질량[kg], t는 연소시간(time since ignition)[sec], v_p 는 연료표면의 구배속도(fuel surface regression velocity)이며, 목재의 경우 v_p 는 $2.2 \times 10^{-6} D^{0.6}$ 이고, Δh_c 는 12MJ/kg 이다¹⁶⁾.

연료의 종류와 fan에서 발생된 유속에 따라 소화·억제실험을 하였으며, 미세물분무를 방사후 화염의 온도분포와 소화·억제효과를 확인하기 위해 K type 열전대를 연소팬 직상부에 0.4m, 0.8m, 1.2m 높이로 3개를 설치하였다. 한편, 목재화재에서는 철제 앵글 연소대의 높이(0.3m)만큼 고려하여 실제 높이 0.7m, 1.1m, 1.5m에서 측정하였다. 또한, fan에 의한 거리별 온도분포를 측정하기 위해서 화염전면과 후면으로부터 0.5m, 1m 거리의 높이 0.4m 위치에 열전대 4개를 설치하였고, 이를 A/D convertor를 이용하여 화염온도를 1초 단위로 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 미세물분무의 영향

PPV방식의 fan을 이용한 미세물분무의 소화·억제특성을 측정하기 위하여 연료로 n-heptane과 pine

wood stick을 사용하였으며, Babrauskas의 식으로부터 구한 *n*-heptane의 열방출량은 280kW였다.

Fig. 4에는 *n*-heptane fire에서 자유연소시 화염 직상부에서의 측정 높이에 따른 온도변화를 나타내었다. 연소시간은 417초가 소요되었으며, 발화 후 약 1분 이후에 각각의 채널 온도가 정상상태가 되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에는 PPV의 유량을 2.7m³/s로 발생시켰을 때 화염온도 변화를 나타내었다. 연소팬 직상부 0.4m 높이에서 fan 가동 30초 후에 PPV 방식만을 사용한 경우는 127℃, PPV 방식과 미세물분무를 동시에 사용한 경우는 57℃를 나타내었다. 이는 이 시각대의 자유연소시의 온도인 543℃보다 각각 76%, 90% 낮은 온도를 나타낸 것으로 연소팬 후면으로의 화염이동으로 인해 화염 직상부에서의 온도 감소율이 증가하였다는 것을 나타내며, 결국 fan에 의한 대류성 냉각작용과 연소 팬에 도달한 미세물분무의 냉각작용으로 화염온도가 더욱 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 연소팬 후면 0.5m에서의 화염온도 변화를 나타낸 것으로 PPV 방식을 사용한 경우, 화염이동으로 인해 연소팬 후면의 온도가 증가하였으며 PPV 가동 45초 만에 최고온도인 428℃까지 도달하였다. 반면에, PPV 방식과 동시에 미세물분무를 방사한 경우에는 화염온도의 증가폭이 상당히 줄어들어 최고화염온도는 286℃를 나타냈다. 이러한 결과는, 연소팬 후면으로 집중되었던 화염위치까지 미세물분무가 도달하여 냉각효과에 의해 온도상승을 대폭 감소시킨 것으로 판단된다. 또한, 전체적인 연소시간은 자유연소시에 417초, PPV 방식만을 사용한 경우가 347초, PPV 방식과 동시에 미세물분무를 방사한 경우는 332초가 소요되었다.

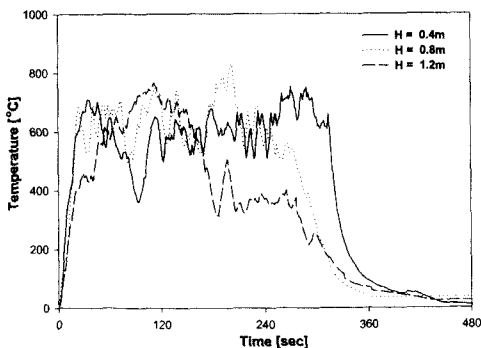


Fig. 4. Free-burning flame temperature of *n*-heptane fire by height [above combustion pan].

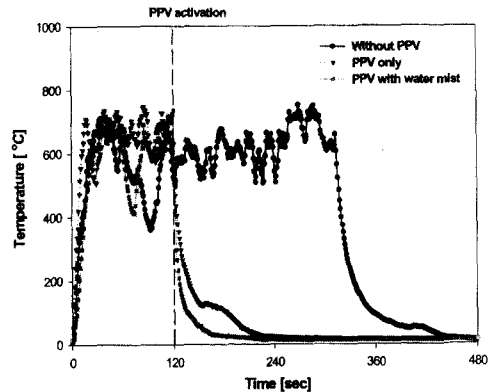


Fig. 5. Flame temperature of *n*-heptane fire using PPV systems [0.4m above the combustion pan, flow rate : 2.7m³/s].

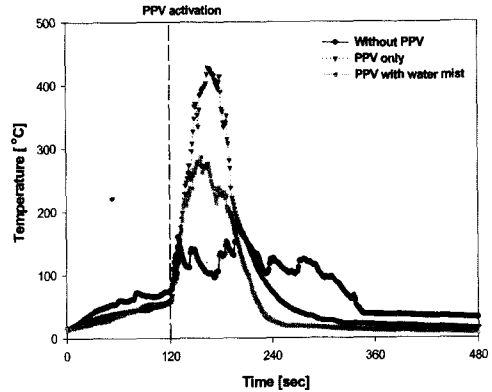


Fig. 6. Flame temperature of *n*-heptane fire using PPV systems [0.5m behind the combustion pan, flow rate : 2.7m³/s].

Fig. 7은 5.9m³/s로 fan의 유량을 발생시켰을 때 화염온도 변화를 나타내었다. 구조물 내부로 유입되는 유량 증가에 따라 자유연소시에 비해 fan 가동 30초만에 각각 88%, 97% 더 낮은 화염온도를 나타내었다.

Fig. 8에서는 연소팬 후면 0.5m에서의 온도 변화를 나타낸 것으로, 증가한 유량으로 인하여 온도감소가 Fig. 6에 비해 더욱 현저하게 나타났다. Fan 가동 30초 후의 온도는 자유연소시 137℃, PPV 방식만을 사용한 경우가 145℃인 반면에 PPV 방식과 동시에 미세물분무를 동시에 사용한 경우는 34℃로 자유연소시의 화염온도보다 더 낮게 측정되었다. 즉, 유량 증가에 따른 열손실의 급격한 증가와 함께 연소팬 후면으로의 미세물분무 유입이 더욱 증가한 것으로 판단된다.

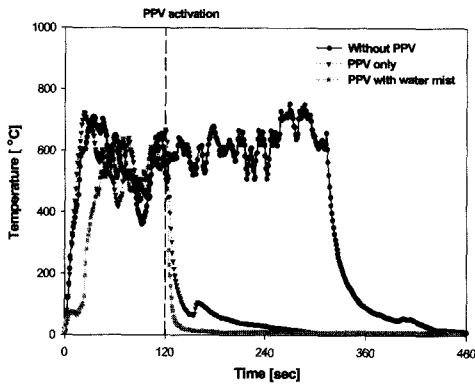


Fig. 7. Flame temperature of *n*-heptane fire using PPV systems [0.4m above the combustion pan, flow rate : 5.9m³/s].

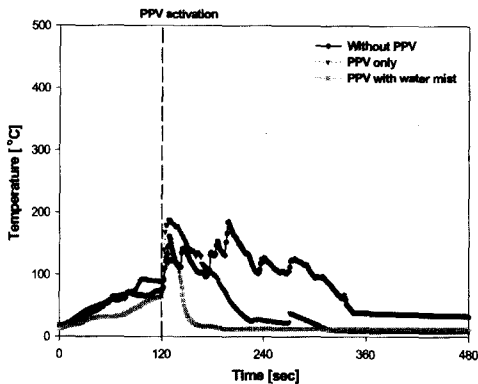


Fig. 8. Flame temperature of *n*-heptane fire using PPV systems [0.5m behind the combustion pan, flow rate : 5.9m³/s].

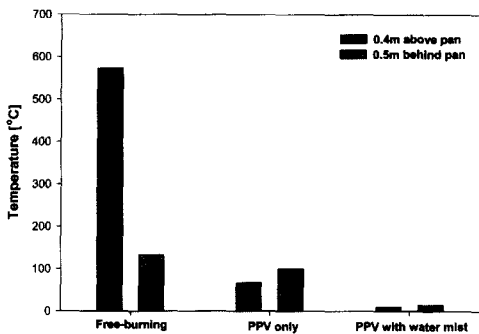


Fig. 9. Effect of water mist on the temperature reduction of *n*-heptane fire [flow rate : 5.9m³/s, at 180sec].

Fig. 9에 5.9m³/s의 유량일 때의 연소팬 직상부 0.4m 위치와 연소팬 후면 0.5m 거리에서의 PPV 및 미세물분무에 의한 온도 감소 현상을 나타내었다. PPV 가동 60초 후의 각각의 온도를 나타낸 것으로,

연소팬 직상부에서 PPV 방식만을 사용한 경우 506 °C 감소된 반면 미세물분무를 동시에 방사한 경우 563°C 감소한 것을 알 수 있다. 또한 연소팬 후면에서의 온도는 PPV 방식만을 사용한 경우 33°C 감소하였으며, 미세물분무를 동시에 방사한 경우 118°C가 감소하였다. 즉, 유입량 증가에 따라 연소팬 후면에서 PPV만을 사용한 경우 온도감소가 나타난 것으로 판단된다. 한편, 미세물분무의 화염면 유입에 따라 온도감소 폭이 증가하였으며, PPV 방식만을 사용한 경우에 비해서 그 차이가 현저히 나타났다. 이는 PPV 사용시 일부 제거되었던 연소확대 가능성을 크게 저하시켜 인명피해 가능성과 화재확대 가능성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

다음은 wood fire에 대하여 PPV 및 미세물분무 시스템이 결합된 PPV의 효과를 측정된 결과로, 이론식에 의한 pine wood stick의 RHR은 62.4kW였다.

Fig. 10에 연소팬 직상부 0.7m에서의 화염온도 변화를 나타내었다. Fan 가동후에 전체적인 화염온도의 저하현상이 일어났으며, PPV 방식만을 사용한 경우보다 미세물분무를 동시에 사용한 경우가 더 낮은 온도분포를 보였다. 한편, *n*-heptane fire 보다 온도저하 속도가 느리게 일어났는데 이는 wood crib의 특성에 따라 PPV 방식의 대류성 냉각작용과 미세물분무의 화염면 유입에 일정시간이 소요된 것으로 판단된다. 그 결과 *n*-heptane에서의 급격한 감소에 비해 완만한 온도감소가 일어났다.

Fig. 11에는 wood fire의 연소팬 후면 0.5m에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. PPV 방식과 동시에 미세물분무를 방사한 경우 온도가 감소하여 PPV 방식만을 사용한 경우 100°C 증가한 것과 대조를 이뤘으며, 자유연소시의 온도와 유사한 결과를 나타내

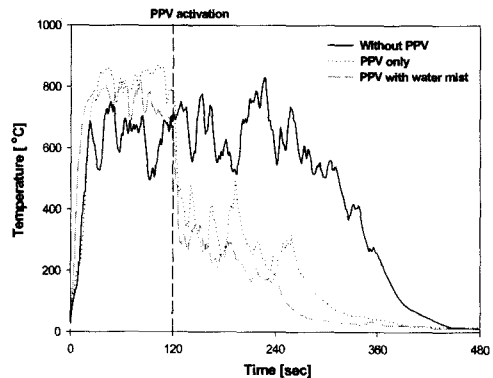


Fig. 10. Flame temperature of wood fire using PPV systems [0.7m above the combustion pan, flow rate : 2.7m³/s].

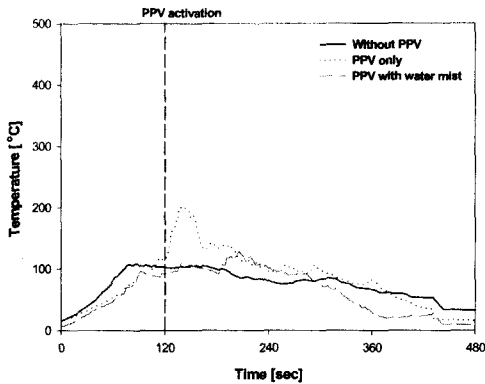


Fig. 11. Flame temperature of wood fire using PPV systems [0.5m behind the combustion pan, flow rate : 2.7m³/s].

어 PPV 방식에 의한 연소팬 후면의 일시적 온도상승 현상을 미세물분무를 사용함으로써 현저히 줄인 것으로 나타났다.

4.2. 연기밀도의 변화

급속배기 시스템인 PPV 방식을 사용할 경우 화재로 인해 발생된 연소가스를 단시간에 배출시킴으로서 인명의 생존가능성을 높이고, 화재진압 활동에 참여하는 소방관의 진화작업 환경개선 및 가시거리를 높임으로서 효율적인 소화효과를 얻을 있게 되어 궁극적으로 소화활동 시간을 단축할 수 있다. 본 연구에서는 화재시 발생하는 연기밀도를 측정하여 자연배기시와 PPV 방식만을 사용한 경우, 그리고 PPV 방식과 미세물분무를 동시에 사용한 경우의 연기밀도를 비교하였다.

Fig. 12에는 fan에서 발생된 유량이 2.7m³/s 일 때의 연기밀도를 나타내었다. 자유연소시에 비해 fan을 가동하였을 때 연기밀도는 급격히 감소하였으며, 미세물분무를 동시에 방사한 경우 이 보다 약 10% 더 낮은 연기밀도를 나타내었다. 즉, fan에 의한 가압효과로 인해 구조물 내부에서 연기가 급속히 배기되어 연기밀도가 급속히 낮아졌으며, 미세물분무를 동시에 사용한 경우 급속배기 효과와 동시에 물 입자가 연기 입자와 결합하여 낙하함으로써 연기밀도가 감소된 것으로 판단된다. 이는 곧 화재시 구조물 내 인명의 연소가스에 의한 피해 감소 및 시야 확보를 통한 대피까지도 원활하게 하는데에 도움을 줄 수 있을 것이다.

Fig. 13에는 fan에서 발생된 유량이 5.9m³/s 일 때의 연기밀도를 나타내었다. 2.7m³/s 일 때의 연기밀

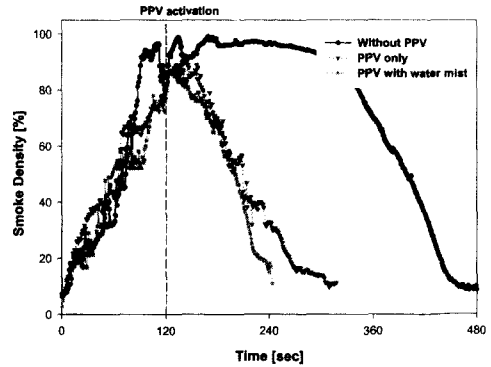


Fig. 12. Effect of PPV system on the smoke density of *n*-heptane fire [flow rate : 2.7m³/s].

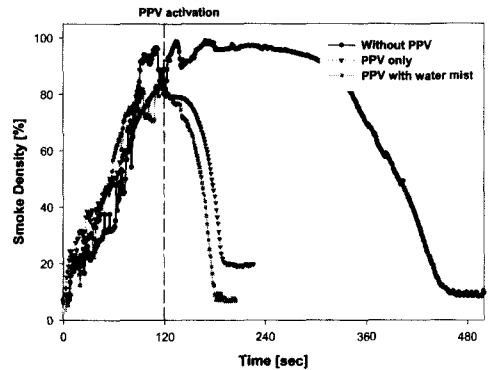


Fig. 13. Effect of PPV system on the smoke density of *n*-heptane fire [flow rate : 5.9m³/s].

도보다 증가한 유량으로 인하여 더욱 급격히 감소하였으며 미세물분무를 동시에 방사한 경우 약 15% 더 낮은 연기밀도를 나타내었다.

5. 결론

화재진압 활동시 열·연기 및 연소생성물의 급속배기에 사용되는 PPV 방식에 미세물분무 시스템을 결합하여 *n*-heptane fire와 pine wood fire에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PPV 방식과 동시에 미세물분무를 방사하였을 때, 화염면에 도달한 미세물분무의 영향으로 냉각효과가 증대되어 연소팬 직상부와 후면에서의 온도가 PPV 방식만을 적용한 경우보다 감소하였다.

2) PPV 방식과 동시에 미세물분무를 방사한 경우에 급속배기 효과와 함께 연기입자가 물에 흡수됨으로서, 구조물 내부의 연기밀도가 저하되어 PPV만

을 사용한 경우보다 낮은 연기밀도를 나타냈다. 그리고 PPV의 유량이 큰 경우 연기밀도의 감소효과가 더 크게 나타났다.

3) 목재화재의 경우 목재의 crib 특성과 구조에 의해 *n*-heptane fire 보다 상대적으로 완전한 온도 감소 특성을 나타내었다. 또한, 미세물분무를 사용한 경우에 목재의 crib 내부로 미세물분무가 효과적으로 유입되어 화염면에서의 증발 및 냉각효과에 의해 온도 저하가 나타났다.

참고문헌

- 1) 신창섭외 5인 공역, “방폭공학”, 동화기술, 2000.
- 2) B. Crandell, E. Hartin, “The Standard Offense : Fire Attack”, Positive Pressure Training Manual of Tempest, 1992.
- 3) M. Ertel, C.B Gregory, “Firefighting-Basic Skills and Techniques”, The Goodheart-Willcox Company, Inc. 1998.
- 4) www.firetactics.com
- 5) H. Ingason, R. Fallberg, “Positive Pressure Ventilation in Single Medium-Sized Premises”, Fire Technology, Vol. 38, No. 3, pp. 213~230, 2002.
- 6) S. Svensson, “A Study of Tactical Patterns During Fire Fighting Operations”, Fire Safety J., Vol. 37, No. 7, pp. 673~695, 2002.
- 7) J. Rimen, “The Use of Positive Pressure Ventilation in Fire Fighting Operations”, Fire Engineers, Vol. 60, No. 206, pp. 7~13, 2000.
- 8) S. Svensson, “Experimental Study of Fire Ventilation During Fire Fighting Operations”, Fire Technology, Vol. 37, No. 1, pp. 69~85, 2001.
- 9) 이경덕, 신창섭, “방사특성 변화에 따른 미세물분무의 소화특성”, 한국 화재·소방학회, 제15권, 제4호, pp. 41~48, 2001.
- 10) 이경덕, “저압식 미세물분무 시스템의 소화성능 최적화와 첨가제의 영향”, 공학박사학위논문, 충북대학교 안전공학과, 2002.
- 11) J. Rimen, “An Assessment of the Use of Positive Pressure Ventilation in Domestic Properties”, FRDG Publication Number 17/96, 1996.
- 12) “Tyne & Wear Fire Brigade PPV Trials - at Chiltern fire”, 1998.
- 13) J.A Victor, “Use of Positive Pressure Ventilation(PPV) Fans to Reduced the Hazards of Entering Chemically Contaminated Building”, U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center (ECBC), Report No. ECBC-TR-065, 2000.
- 14) M. Tuomisaari, “Smoke Ventilation on Operational Fire Fighting”, VTT PUBLICATIONS 326, Technical Research Center of Finland, 1997.
- 15) G.D. Lougheed, P.J. McBride, D.W. Carpenter, “Positive Pressure Ventilation for High-Rise Buildings”, NRCC, Research report 102, 2002.
- 16) “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, NFPA, 1995.
- 17) 수동식 소화기의 형식승인 및 검정기술기준 (KOFEIS 0901), 한국소방검정공사, 2000.