

미세물분무의 화염억제와 PPV 경사각의 영향

김성원, 이경덕*, 신창섭
 충북대학교 안전공학과, (주)화이어텍*

Flame Suppression by Water Mist and Influence of PPV Tilt Angle

Sung-Won Kim, Kyoung-Duck Lee*, Chang-Sub Shin
 Chungbuk National University, Firetec Co., Ltd.*

1. 서론

PPV(Positive Pressure Ventilation)란 화재진압시 송풍기를 이용하여 화염이 발생한 구조물 내부로 신선한 공기를 유입시켜 내부압력을 상승시키는 방식으로, 구조물 내부의 전체 영역에 균일하게 열·연기 및 연소 생성물 등의 급속 배기 및 구조물 내부 온도를 급속히 감소시킬 수 있는 것이 특징이다.^[1,2]

1980년대에 개발된 PPV는 현재, 미국, 프랑스, 독일, 영국 등의 소방선진국의 화재현장의 실전에서 사용되고 있으며, 영국 소방대에서는 전체 소방대의 약 42% 정도가 PPV 및 PPV 관련 장비를 구비하여 화재 초기의 화염억제나 화재 진압후의 환기 목적 등의 소화 보조장비로 사용하고 있다.^[3] 최근 발생한 대구지하철 화재사고에서는 제연설비의 부족으로 주요 사망사고의 원인이 되는 독성가스에 심각한 피해를 입었으며, 화재 발생후 3-4 시간이 지나도록 매연과 유독성가스로 인해 소화 및 구조활동이 어려움이 있었다. 이러한 경우, PPV는 독성가스에 의한 영향을 급속배기를 통해 단시간 내에 줄일 수 있으며, 인명적 측면에서 소방관의 시야확보 및 인명보호 등 소화활동에서도 그 효과를 발휘할 수 있다. 일부의 경우, PPV의 유동방향에 따른 화염집중으로 화재확대 가능성이나 인명피해의 가능성이 우려되고 있지만, PPV로 인한 직접적인 피해가능성은 극히 적은 것으로 밝혀지고 있다.^[4]

본 연구에서는 PPV를 이용한 소화활동의 효율증대를 위해 미세물분무 시스템과 PPV를 결합한 소화·억제 실험을 실시하였으며, 미세물분무는 PPV의 가동과 동시에 방사하였다. 또한, PPV 사용시 경사각(tilt angle)의 변화는 PPV에서 발생하는 유동과 화재 양상의 변화를 의미하므로, 이에 따른 화재의 특성을 파악하였으며, PPV 경사각에 따른 연기밀도를 측정하여 효율적인 급속배기 효과를 연구하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 PPV는 조절부, 지지부, fan과 엔진으로 구성되어 있으며, fan은 한

개의 날이 0.51m로 2개가 장착된 형태이다. PPV는 2.7m³/s-9.2m³/s 로 유량을 변화시키는 것이 가능하며, PPV 엔진은 가솔린을 주연료로 하는 6마력 Turbo 타입을 사용하였다. 또한, PPV 전·후면에서 경사각을 조절할 수 있으며, 수직 높이도 조절이 가능하다.

미세물분무 노즐은 7개의 오리피스로 구성된 7N3 노즐 2개를 이용하여, PPV에서 발생된 유동에 따라 실려가게 하였다. 방사분포는 10kg/cm²에서 원형 분포를 나타내고, 이 때의 입자크기는 134.96 μ m였다.

그리고 본 실험에서는 화재를 발생시키기 위한 연료로 *n*-heptane을 사용하였다. *n*-Heptane은 물보다 낮은 비점을 갖고 있어(98 $^{\circ}$ C) 물 입자가 화염으로 낙하할 때 화염 표면에서의 *splashing effect*를 방지할 수 있고, alkane의 대표적 물질로서 개질 가솔린과 고품질 디젤류 성분의 alkane을 각각 70%와 95% 포함하고 있어, 가솔린과 함께 IMO와 NFPA에서 미세물분무의 소화성능을 실험하기 위하여 적합한 물질로 알려져 있다.

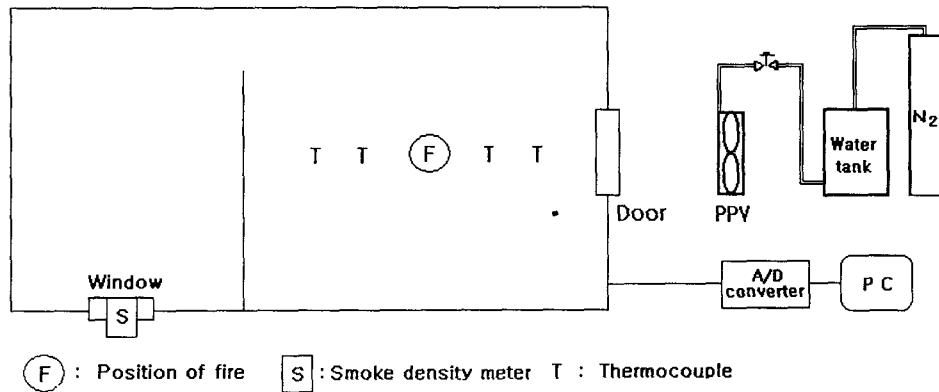


Fig. 1. Experimental set-up in test room.

2.2 실험방법

Fig. 1은 실험장치로 크게 화재실, 가압수조, PPV 및 연기밀도 측정기로 구성된다. 전체 화재실은 10m(L)×3m(D)×2.5m(H)를 이용하였으며 화원이 있는 화재실의 길이는 6m였다. PPV의 사용에 따른 연기의 급속배기 효과를 측정하기 위하여 유출부인 창문(1.1m×0.9m)에 연기밀도 측정기를 설치하여 자유연소시와 PPV의 사용시에 연기 배출 특성을 측정하였으며, 이때 연기밀도 측정기는 유출부 상단에서 5cm 하단에 설치하였다.

연소용기는 40cm(L)×40cm(D)×10cm(H)를 사용하였고, 점화에 사용된 연료의 양은 *n*-heptane 2ℓ로 물 3ℓ 위에 부유시켜 연소 팬에 의한 열 손실을 방지하였다.

PPV에 의한 화염온도의 변화양상을 측정하기 위해 PPV의 경사각 및 유량에 따라 소화·억제실험을 하였으며, 온도분포와 소화·억제효과를 확인하기 위해 K type 열전대를 연소 팬 직상부에 40cm, 80cm, 120cm 높이로 3개를 설치하였다. 또한, PPV의 영향에 따른 거리별 온도분포를 측정하기 위해서 화염전면과 후면으로부터 50cm, 100cm 거리의 높이 40cm 위치에 열전대 4개를 설치하였고, 이를 A/D convertor를 이용하여 화염온도를 1초 단위로 측정하였다.

연소 후 화염이 정상상태가 되는 시점인 점화 2분 후에 PPV만을 가동한 경우, PPV와 동시에 미세물분무를 방사한 경우로 분류하여 소화 및 억제특성을 파악하였고, PPV 경사각에 따른 소화·억제성능에 주는 영향을 분석하였다. 또한, 경사각은 지면

에서 상향으로 변화시켰으며, PPV의 full sealing과 거리에 따른 PPV와 미세물분무의 손실량을 고려하여 PPV와 화재실과의 거리는 1m로 하였으며, 유입부와 유출부의 면적비를 2:1로 고정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염에 대한 미세물분무의 영향

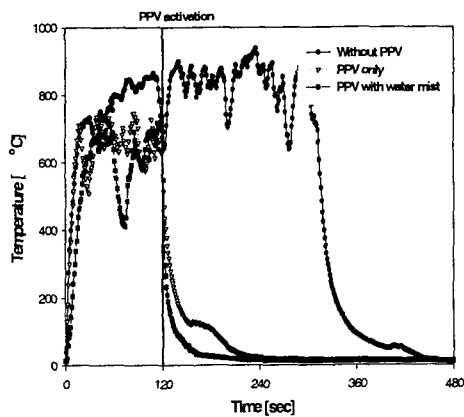


Fig. 2. Flame temperature of *n*-heptane fire using PPV systems. [40cm above the combustion pan]

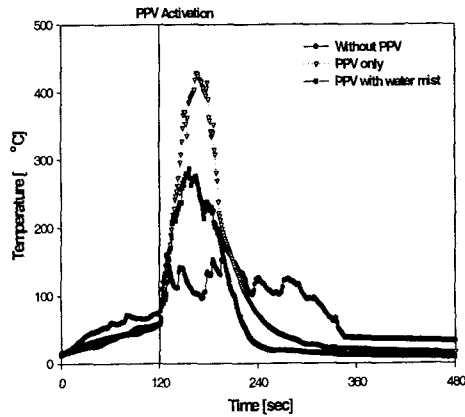


Fig. 3. Flame temperature of *n*-heptane fire using PPV systems. [back 50cm from the combustion pan]

Fig. 2에는 2.7m/s로 PPV 가동시 화염 직상부 40cm 높이에서의 화염온도 분포를 나타내었다. 자유연소시에 비해 PPV를 사용했을 때 화염온도는 급격히 감소하였으며, 미세물분무를 동시에 방사한 경우가 PPV만을 사용한 경우보다 온도가더욱 급격히 감소하였다. 이것은 연소 팬 후면으로의 화염이동으로 인해 화염 직상부에서의 온도 감소율이 증가하였다는 것을 나타내며, 결국 PPV에 의한 대류성 냉각작용과 연소 팬에 도달한 미세물분무의 냉각작용으로 화염온도가 더욱 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 연소 팬 후면 50cm 거리에서 화염온도를 측정된 것이다. PPV만을 가동한 경우, 화염이동으로 인해 연소 팬 후면의 온도가 급격히 증가하였으며 PPV 가동 45초 만에 최고온도인 428°C까지 도달하였다. 반면에, PPV와 동시에 미세물분무를 방사한 경우에는 화염온도의 증가폭이 상당히 줄어들어 최고화염온도는 286°C를 나타냈다. 이러한 결과는, 연소 팬 후면으로 집중되었던 화염위치까지 미세물분무가 도달하여 화염면에서 냉각효과에 의한 온도상승을 대폭 감소시킨 것으로 판단된다. 또한, 전체적인 연소시간은 자유연소시에 417초, PPV만을 사용한 경우가 347초, PPV와 동시에 미세물분무를 방사한 경우는 332초가 소요되었다. 즉, PPV 가동시 연료의 질량손실을 증가로 전체 연소시간은 감소하였다.

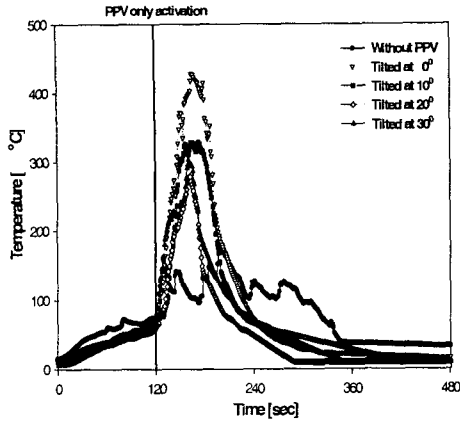


Fig. 4. Flame temperature of *n*-heptane fire by PPV tilted. [back 50cm from the combustion pan]

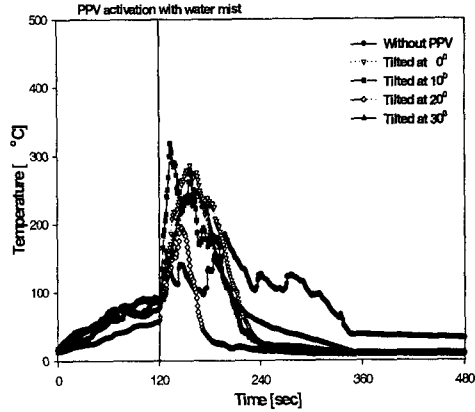


Fig. 5. Flame temperature of *n*-heptane fire by PPV tilted. [back 50cm from the combustion pan]

Fig. 4는 2.7m³/s로 PPV만을 가동한 경우 경사각 변화에 따른 연소 팬 후면 50cm에서 온도 분포를 나타낸 그림이다. 경사각에 따른 화염온도는 0° > 10° > 30° > 20°의 순으로 높게 측정되었다. 경사각 0°에서 화염온도는 가장 높았으며, PPV에 의한 연소 팬 후면으로의 화염집중이 직접적인 원인으로 나타났다. 한편, 20°에서 가장 낮은 화염온도가 측정되었으며, 경사각 0°에 비해 150°C 낮게 측정되었다. 경사각에 따른 화염온도의 차이는 PPV 유동방향에 따른 화염위치까지의 가압효과의 차이를 의미하며, 따라서 연소 팬 후면으로의 화염이동 현상은 경사각에 따라 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 5에는 PPV와 동시에 미세물분무를 방사하였을 때 화염 후면 50cm 거리에서의 화염 온도 분포를 나타내었다. 미세물분무의 영향에 따른 화염온도는 0° > 10° > 30° > 20°의 순으로 높게 측정되었으며, 전체적으로 PPV만을 사용한 경우보다 낮게 측정되었다. 경사각 20°에서 가장 낮은 화염온도를 나타내었는데, PPV 가동 40초 후의 온도를 비교하면 PPV만을 사용한 경우에 260°C, 미세물분무와 동시에 사용한 경우가 123°C로 137°C나 더 낮게 측정되었다. 즉, 연소 팬 후면까지 도달한 미세물분무의 화염면 냉각 효과로 온도가 감소하였으며, 또한, 경사각 변화도 미세물분무의 유입량을 증가시키는데 기여한 것으로 판단된다.

3.2 연기밀도의 변화

구조물 내부에서 화재가 발생되면 연기밀도는 증가하고, 연기의 체류시간도 증가하게 된다. 하지만, 급속배기 시스템인 PPV를 사용할 경우에는 화재로 인해 발생한 연소가스를 단시간내 배출시킴으로서 사상자에 대한 생존가능성을 높이고, 화재진압 활동에 참여하는 소방관 등의 진화작업의 개선 및 가시거리를 높임으로서 효율적인 소화효과를 얻을 수 있다. PPV를 사용함으로써 얻을 수 있는 급속배기의 효과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

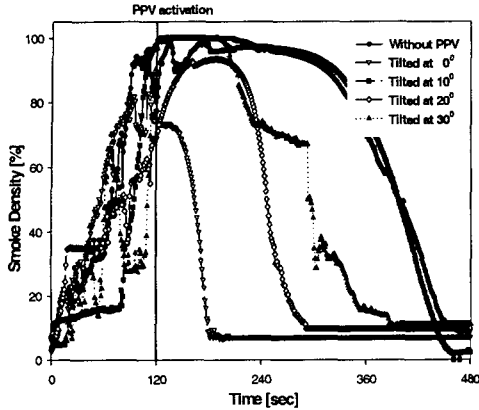


Fig. 6. Smoke density of *n*-heptane fire by PPV tilted.
[PPV only, Fan produced : 5.9 m³/s]

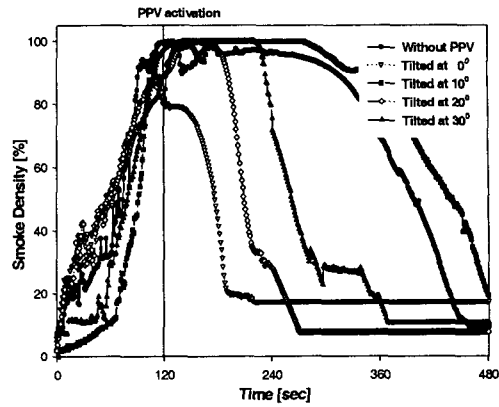


Fig. 7. Smoke density of *n*-heptane fire by PPV tilted.
[PPV with water mist, Fan produced : 5.9 m³/s]

Fig. 6은 5.9m³/s로 PPV를 가동시켰을 때의 연기밀도를 나타낸 그림이다. 경사각이 없는 경우가 경사각이 있는 경우 보다 낮은 연기체류 시간을 나타냈으며, 경사각이 없는 0°의 경우는 30% 이상의 연기밀도로 화재실내 체류한 시간이 자유연소시의 378초에 비해 60% 이상 감소한 141초로 나타났다. 한편, 경사각 20°에서는 241초로 나타나 경사각이 있는 경우 배기효과가 감소하였다. 즉, 경사각의 변화로 화재실 내부의 연기와 미세물분무가 서로 혼합되어 화재실 내에서 체류함으로써 체류시간이 늘어난 것으로 생각된다. 즉, PPV만을 사용한 경우의 연기밀도는 경사각이 없는 상태에서 가장 좋은 결과를 나타냈으며, 이는 가압효과에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 7은 PPV와 동시에 미세물분무를 방사시켰을 때의 연기밀도와 화재실내 연기의 체류시간을 나타내었다. 경사각이 없는 0°에서 30% 이상은 167초였으며 경사각 20°, 30°에서 연기밀도 30% 이상 체류시간은 PPV만을 사용한 경우에 비해 각각 30초, 65초 감소한 211초, 227초가 소요되었다. 체류시간에서 나타나듯 즉, 화재실 외부로의 연기 배출 시간이 미세물분무에 의해 급속배기 효과가 증가하였다는 사실을 알 수 있다.

따라서, 경사각이 없는 경우가 경사각이 있는 경우 보다 더 빨리 배기되었으며, PPV만을 사용한 경우 보다는 미세물분무를 동시에 사용한 경우가 더욱 짧은 체류시간을 나타냈다.

4. 결론

화재진압 활동시 열·연기 및 연소생성물의 급속 배기에 사용되는 PPV에 미세물분무 시스템을 결합하여 PPV의 가동과 동시에 *n*-heptane 화재에 방사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2.7m³/s의 유량으로 PPV와 동시에 미세물분무 시스템을 가동시켰을 때, 연소 팬 직상부와 후면에서의 온도는 PPV만을 가동한 경우보다 감소하였다. 이는 화염면에 도달한 미세물분무의 영향으로 냉각효과가 증대되어 온도상승에 억제효과가 나타난 것으로 판단된다.

(2) PPV의 경사각이 20°인 경우에 연소 팬 직상부와 연소 팬 후면의 온도가 가장 낮게 나타났다. 이는 경사각에 의한 유입부에서 sealing 효과의 차에 의한 구조물 내부로의

미세물분무 유입량 변화로 후면에서 증발 및 냉각효과가 나타난 것으로 판단된다.

(3) 5.9m³/s의 유량으로 PPV와 동시에 미세물분무를 방사한 경우가 PPV만을 가동한 경우보다 낮은 연기밀도를 나타내었다. 이는 급속배기 효과와 동시에 연기입자가 물에 흡수됨으로서, 구조물 내부의 연기밀도가 저하된 것으로 판단된다. 또한, 경사각의 변화가 없는 경우에, 경사각의 변화가 있을 때보다 더 낮은 연기밀도가 측정되었다.

참 고 문 헌

1. J. Mittendorf, "Positive Pressure Training Manual of Tempest", Tempest Tech. Co., 1992
2. J. Rimen, "The Use of Positive Pressure Ventilation in Firefighting Operations", Fire Engineers, **60(206)**, pp.7-13, 2000
3. www.firetactics.com
4. At Chiltern fire, "Tyne & Wear Fire Brigade PPV Trials", 1998