



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

2유체노즐을 이용한 헵탄 폴화재  
소화에 대한 실험적 연구



2019년 2월

부경대학교 대학원

소방공학과

정찬석

공 학 석 사 학 위 논 문

2유체노즐을 이용한 헵탄 풀화재  
소화에 대한 실험적 연구

지도교수 이 치 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2019년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

소 방 공 학 과

정 찬 석

정찬석의 공학석사 학위논문을 인준함.

2019년 2월



위원장 공학박사 최재욱



위원 공학박사 최준호



위원 공학박사 이치영



# 목 차

1. 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 동향 .....	3
1.3 연구 목표 .....	6
2. 실험 장치 및 방법 .....	7
2.1 2유체노즐 .....	7
2.2 화재 소화 실험 .....	9
2.2.1 연소속도 및 열방출률 .....	9
2.2.2 화재 소화 .....	13
2.3 분사 특성 측정 실험 .....	19
2.3.1 유량 분포 .....	20
2.3.2 액적 크기 .....	23
2.3.3 분사 속도 및 유량 .....	25
2.3.4 공급 압력 .....	28
3. 실험 결과 및 고찰 .....	30
3.1 분사 특성 측정 실험 .....	30
3.1.1 유량 분포 .....	31

3.1.2 액적 크기 .....	34
3.1.3 분사 속도 및 유량 .....	37
3.1.4 공급 압력 .....	40
3.2 화재 소화 실험 .....	43
3.2.1 연소속도 및 열방출률 .....	43
3.2.2 소화 가능 여부 .....	47
3.2.3 화재 플룸 가시화 .....	50
3.2.4 소화 시간 및 물 소모량 .....	52
3.2.5 미분무가 연소속도에 미치는 영향 .....	55
4. 결 론 .....	58
참 고 문 헌 .....	60

## List of Tables

Table 1. Some properties of heptane with hexane and ethanol .....	10
Table 2. Summary of fuel pan and heptane fuel .....	11
Table 3. Experimental conditions .....	17
Table 4. Burning rate and heat release rate under different fire source diameters ..	44



## List of Figures

Figure 1. Twin-fluid nozzle .....	8
Figure 2. Pictures of load cell and indicator .....	12
Figure 3. Schematic diagram of experimental set-up for fire extinguishment experiment .....	15
Figure 4. Experimental equipment .....	16
Figure 5. Picture of fire experiment room .....	18
Figure 6. Experimental set-up of flow distribution measurement .....	21
Figure 7. Flow distribution measurement result (Water flow rate = 641 g/min, Air flow rate = 70 L/min) .....	22
Figure 8. Experimental set-up of droplet size (SMD) measurement .....	24
Figure 9. Experimental set-up of downward air velocity flow rate measurement .....	26
Figure 10. Experimental set-up of downward air volume flow rate measurement .....	27
Figure 11. Experimental set-up of pressure measurement .....	29
Figure 12. Flow distribution measurement data (Air flow rate = 50 L/min) .....	32
Figure 13. Normalized flow distribution measurement data (Air flow rate = 50 L/min) .....	33

Figure 14. SMD measurement data .....	35
Figure 15. Cumulative volume distributions of droplet (Water flow rate = 321 g/min) .....	36
Figure 16. Downward air flow velocity measurement data .....	38
Figure 17. Downward air volume flow measurement data .....	39
Figure 18. Pressure measurement data of inlet water flow .....	41
Figure 19. Pressure measurement data of inlet air flow .....	42
Figure 20. Effect of fire source diameter on burning rate .....	45
Figure 21. Effect of fire source diameter on heat release rate .....	46
Figure 22. Extinguishment map under different fire source diameter conditions .....	49
Figure 23. Visualization of heptane pool fire during discharge of air (Fire source diameter = 160 mm) .....	51
Figure 24. Extinguishment time under different fire source diameter conditions .....	53
Figure 25. Estimation of water consumption under different fire source diameter conditions .....	54
Figure 26. Influence of air flow rate on burning rate under water flow rate of 156 g/min .....	56
Figure 27. Influence of water flow rate on burning rate under air flow rate of 30 L/min (fire source diameter = 160 mm) .....	57

Experimental Investigation on Heptane Pool Fire  
Extinguishment Using Twin-fluid Nozzle

Chan Seok Jeong

*Department of Fire Protection Engineering, The Graduate School,  
Pukyong National University*

**Abstract**

In the present experimental study, the spray characteristics and the liquid pool fire extinguishing performance of twin-fluid nozzle using the air and water were investigated. As the spray characteristics, the spray distribution, droplet size, and downward velocity and volume flow rate distributions of air were measured with the inlet pressures of air and water flows. For the liquid pool fire extinguishing experiment, the heptane (n-heptane) was used as the fuel and three kinds of fuel source diameter (80, 120, and 160 mm) were tested. As increase in the fuel source diameter, both of burning rate and heat release rate increased. Through a series of fire extinguishment experiments, the extinguishment map, extinguishment time, and estimated water consumption were provided and discussed. In the higher air flow rate and smaller fuel source diameter conditions, the heptane pool fire put out easier, and the extinguishment time and estimated water consumption were observed to be short and small, respectively. In addition, the effect of water mist on the burning rate was examined. The burning rate increased with increasing the air flow rate, which might be due to the mixing enhanced by the water mist.

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

미분무소화설비는 물을 이용하여 화재를 소화하는 소화설비이며, 물은 우리 주변에서 가장 쉽게 접할 수 있는 소화약제이다. 물의 장점은 무독성이고 화학적으로 친환경적이며, 다른 가스계(예를 들면, 이산화탄소 등)소화약제보다 경제적인 장점이 있다.<sup>1)</sup> 이런 물을 이용한 미분무소화설비는 할론(Halon)소화약제의 사용이 금지되면서 그 대안으로 각광받기 시작하였다. 국내 화재안전기준<sup>2)</sup>(NFSC 104A)에 따르면 미분무(Water mist)를 “물만을 사용하여 소화하는 방식으로 최소설계압력에서 헤드로부터 방출되는 물입자 중 99%의 누적체적분포가 400  $\mu\text{m}$  이하로 분무되고 A급(일반화재), B급(유류화재), C급(전기화재) 화재에 적응성을 갖는 것”으로 정의하고 있다. 이러한 미분무를 이용하는 미분무소화설비는 다른 수계소화설비에 비해 더욱 작은 물의 양으로 소화가 가능하고 수손의 피해가 적은 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 그리고 400  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 크기의 액적들로 인해 다른 수계소화설비와 달리 유류화재나 전기화재에도 적응성이 있다는 점을 고려하여 볼 때, 미분무소화설비는 기존의 수계소화설비 뿐 아니라 비수계소화설비를 대체할 수 있는 가능성이 있는 소화설비이며, 이를 위해서는 다양한 관련 연구가 수행되어야 한다.

이러한 미분무에 의한 소화원리는 기존 스프링클러소화설비의 경우에 비해 훨씬 복잡한 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 스프링클러소화설비에 의한 소화원리는 냉각효과가 대표적인 것으로 알려져 있는 반면, 미분무소화설비에 의한 소화원리는 냉각효과 뿐 아니라 질식효과 및 희석효과도 지대한 영향이 있는 것으로 보고되어있다.<sup>1)</sup> 미분무가 생성될 경우 표면적이 크고, 물의 증

발 잠열이 크기 때문에 화재 소화 시 냉각효과를 극대화할 수 있다. 그리고 미분무에 의해 생성되는 증기의 경우 화염이 유지되는데 필요한 산소의 유입을 효과적으로 차단할 수 있다. 또한, 미분무가 수증기가 되면서 부피가 팽창되고, 이러한 현상이 화염 주변의 산소 및 가스 농도를 떨어뜨리는데 기여할 수 있다. 또한, 노즐로부터 분사된 미분무가 연료면 주변의 복사열을 감소시켜 주위의 가연물로 화재가 확산되는 것을 억제시키게 된다. 하지만 미분무에 의한 소화 효과에 대한 세부적인 이해 및 정량적인 분석이 아직도 제한적이며, 이를 위해서는 다양한 화재 조건 하에서 미분무를 활용한 화재 소화 실험 데이터 확보가 이루어져야 한다.

한편, 미분무소화설비의 구성 요소 중 핵심적인 것은 미분무를 생성하는 노즐(Nozzle)이며, 기존의 미분무소화설비의 화재 소화 관련 연구에서는 대부분 단일유체노즐(Single-fluid nozzle)을 이용하였다. 전형적인 단일유체노즐은 노즐 중심에 작은 원형 오리피스(Orifice)를 통해 높은 압력으로 액체를 통과시켜서 미분무를 생성하게 된다. 단일유체노즐의 경우, 오리피스 구경이 작을수록 더욱 미세한 크기의 액적을 생성할 수 있고, 동일한 오리피스 크기에서는 액적을 고속으로 방사해야 미분무를 생성할 수 있다.<sup>3~4)</sup> 그러나 필요한 크기의 미분무를 생성하는데 있어서 오리피스 구경을 줄이고, 높은 압력(또는 고속)으로 분사하는 방식만으로는 한계가 있을 수 있다. 따라서 이러한 단일유체노즐의 한계를 극복하기 위해 2유체노즐(Twin-fluid nozzle)을 통한 미분무 생성을 고려해 볼 수 있다. 2유체노즐은 액체를 고속의 기체에 충돌시켜 고속 기체에너지에 의해 노즐을 통과한 물이 미세한 액적으로 미립화되어 미분무가 생성된다.<sup>3~4)</sup> 현재 대부분의 미분무소화설비에는 단일유체노즐이 적용되고 있고, 앞서 언급한 2유체노즐을 실제 미분무소화설비에 적용하기 위해서는 2유체노즐을 이용한 다양한 화재 소화 실험이 수행되어야 한다.

## 1.2 연구 동향

대부분의 미분무소화설비를 이용한 화재 소화 연구는 단일유체노즐을 이용하였다. 단일유체노즐을 이용한 실험은 대부분 첨가제<sup>5~11)</sup>, 연료 종류<sup>10~15)</sup>, 소화 효과<sup>9,16~18)</sup>, 액적 크기<sup>12,13,18,19)</sup>, 연료팬 종류<sup>13,14)</sup>, 노즐 종류<sup>19,20)</sup>, 노즐 높이<sup>6,7,21)</sup>, FDS (Fire Dynamics Simulator)<sup>22~25)</sup> 등의 영향을 파악하기 위한 연구가 수행된 바 있다. 이처럼 대부분의 기존 연구들은 화재 소화 실험에서 단일유체노즐을 이용하였다. 단일유체노즐을 이용하여 미세한 크기의 액적을 생성하기 위해서는 대체로 높은 압력이 필요하다. 높은 압력을 유지하기 위해서는 여러 종류의 시스템 및 유지비용이 요구될 수 있다.<sup>4)</sup> 그리고 미분무 분사 특성을 독립적으로 제어하기 어려운 측면이 있다. 이러한 단일유체노즐의 단점들을 보완하기 위해서 2유체노즐의 적용을 고려해 볼 수 있다. 2유체노즐을 이용한 화재 소화에 관한 실험적 연구가 일부 이루어진 바 있다.

국내의 경우 Paek and Oh<sup>26)</sup>은 백등유(Kerosene) 화재와 비화재 조건에서 2유체노즐을 이용하여 미세한 액적이 화염에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 먼저, 2유체노즐의 분사 특성을 파악하기 위해서 PDA (Particle dynamics analyzer)를 이용하여 공기 공급 유량에 따른 액적 크기, 미분무 분사 속도를 측정하였다. 미분무 액적의 크기는 화재와 비화재 시 공기 공급 유량이 증가함에 따라 감소하였다. 또한, 너무 미세한 크기의 미분무를 사용하면 화재 소화 시 화염에 도달하기 전에 증발하는 것을 확인하였다. Kim and Cha<sup>27)</sup>는 노즐 형상 변화에 따른 2유체노즐의 분무에 관한 연구를 수행하였다. 실험은 외부 혼합형 노즐보다 내부 혼합형 노즐이 분무효과에 있어 더 우수함을 확인하였다. 그리고 전체 노즐에서 공기 공급 속도가 증가하면 분무각이 증가하였으나, 물 공급 속도가 증가하면 분무각이 감소하는 것을 확인하였다. Lee et al.<sup>28)</sup>은 2유체노즐을 이용한

미분무 건을 이용하여 유류화재와 목재화재에 대한 화재 소화 연구를 수행하였다. 미분무 건은 유류화재와 목재화재에 대해 모두 40초 이내에 소화되었으며, 물을 이용하여 화재 소화를 하였으므로 다른 첨가제를 이용한 화재 소화보다 더욱 친환경적이라고 보고하였다. 그러나 미분무 건은 분사각이 작아 질식효과를 기대하기에는 어려움이 있다고 언급하였다. Kim et al.<sup>29)</sup>은 2유체노즐을 개발하여 노즐의 분무 유동 특성에 대한 파악과 화재 소화 연구를 수행하였다. 그들이 사용한 2유체노즐은 공기 공급 유량이 증가하면 분무각이 증가하고, 물 공급 유량이 증가하면 분무각이 감소하는 경향이 나타남을 확인하였다. 화재 실험은 무인자동소화시스템을 이용하였다. 화재 발생 후 6초에 화재를 감지하고, 미분무가 분무되면서 5초 이내에 소화가 되었다. 해당 실험에서 2유체노즐을 이용한 무인자동소화시스템이 이상 없이 작동하면서 초기에 소화가 가능하다고 언급하였다.

본 연구그룹인 Jeong and Lee<sup>30)</sup>는 2유체노즐을 이용하여 액체 폴화재를 대상으로 선행적인 화재 소화 실험을 수행한 바 있다. 에탄올(Ethanol) 1200 mL 폴화재에 대해 물 공급 유량 632 mL/min, 공기 공급 유량 40 L/min과 70 L/min 조건에서 2유체노즐의 미분무를 이용한 화재 소화 실험을 수행하였다. 실험 결과, 공기 공급 유량 70 L/min 조건에서 화재 소화가 가능함을 확인하였다. 또한 Jeong and Lee<sup>31)</sup>는 헥산(Hexane) 140 mL를 이용하여 화재 소화 실험을 수행하였다. 실험은 2유체노즐을 이용하였고, 액체로는 물, 기체로는 공기와 질소를 이용하였다. 다양한 액체 및 기체 공급 유량 조건에서의 실험을 통해 소화 가능 여부, 소화 시간, 물 소모량을 측정하고 검토하였다.

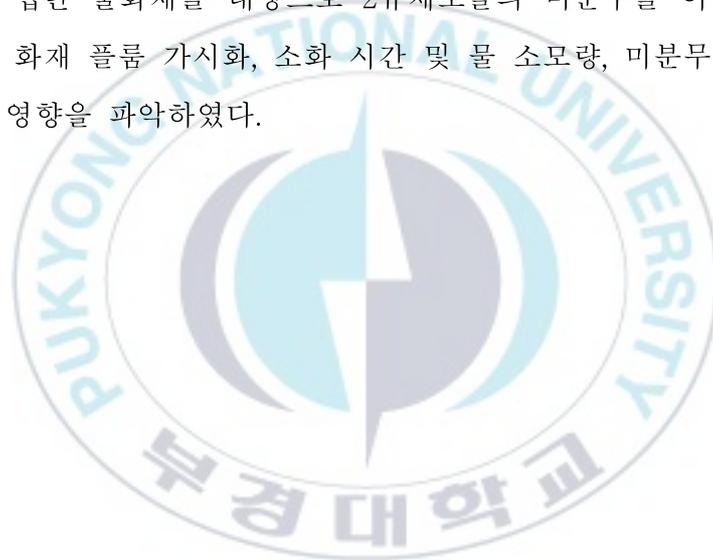
국외의 경우 Huang et al.<sup>32)</sup>은 2유체노즐을 이용하여 유체 압력 조건에 따른 액적 크기와 미분무의 분사 속도를 측정하였다. 그리고, 화재 실험의 경우 3 m × 3 m × 3 m 크기의 화재실에서 디젤(Disel) 폴화재 조건을 이

용하였고, 유체 공급 유량 조건에 따른 소화 실험을 수행하였다. 화재 실험 결과 물 공급 유량 약 70 kg/h, 질소 공급 압력 0.3 MPa 이하의 공급 조건에서 화재가 소화되지 않았다. 그러나 나머지 물과 질소 공급 조건에서는 1분 이내에 화재 소화가 가능하였다. Gupta et al.<sup>33)</sup>은 1 m × 1 m × 1 m의 화재실에서 헵탄 풀화재를 이용하여 2유체노즐의 미분무로 화재 실험을 수행하였다. 먼저 2유체노즐의 미분무 액적 크기를 측정하고, 기체로 공기와 질소 공급하여 소화 실험을 진행하였다. 또한, 미분무 분사 방법에서 간헐적 분사와 연속적 분사 방법에 따라 화재 소화 시간이 짧고 물 소모량이 적은 조건이 있음을 확인하였다. 한편, 기체로 공기를 주입한 경우가 질소를 주입할 때보다 화재 소화 시간이 약 30~50% 증가하는 것을 확인하였다. 또한, Gupta et al.<sup>34)</sup>은 동일한 화재실과 2유체노즐을 이용하여 화재 소화 실험을 진행하였다. 실험은 공급 압력 10 bar 이하에서 진행되었으며, 연료팬 위치에 따른 화재 소화 실험과 화재실 내의 가스 농도를 측정하였다. 실험 결과 물 공급 유량 210~225 mLPM 조건이 헵탄 풀화재 진압에 가장 효과적이라고 언급하였다.

기존 연구 동향에서 알 수 있듯이 대부분의 2유체노즐을 이용한 화재 실험 연구는 단일유체노즐보다 미흡한 상황이다. 따라서 더욱 다양한 화재 조건에서 2유체노즐을 이용한 화재 소화 실험 연구가 필요하다.

### 1.3 연구 목표

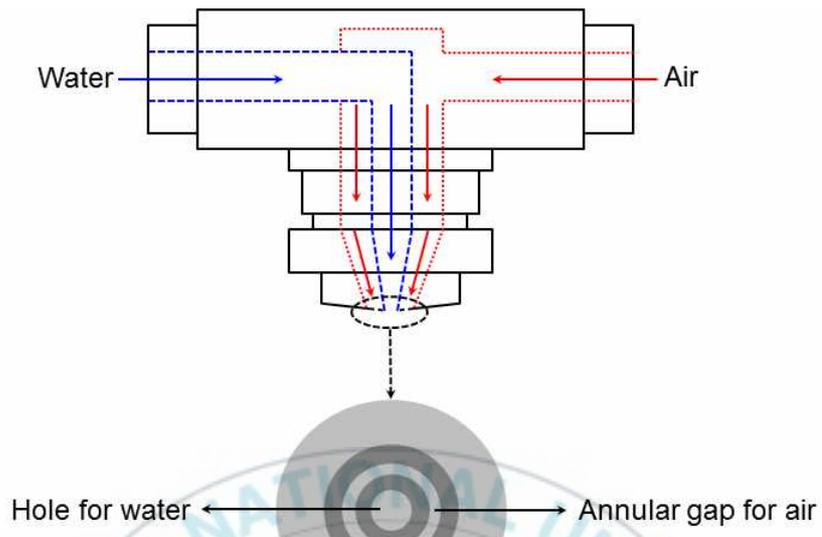
본 연구에서는 2유체노즐을 이용하여 분사 특성을 측정하고, 해당 2유체노즐을 이용하여 액체 폴화재 소화 실험을 수행하였다. 2유체노즐의 분사 특성 실험의 경우, 다양한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 유량 분포, 액적 크기, 분사 속도 및 유량, 공급 압력을 측정 및 검토하였다. 화재 소화 실험의 경우, 액체 연료로 헵탄(n-Heptane)을 이용하였고, 화원 직경 80 mm, 120 mm, 160 mm에 따른 연소속도 및 열방출률을 측정하였다. 이러한 화원 직경의 헵탄 폴화재를 대상으로 2유체노즐의 미분무를 이용하여 소화 가능 여부, 화재 플룸 가시화, 소화 시간 및 물 소모량, 미분무가 연소속도에 미치는 영향을 파악하였다.



## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 2유체노즐

본 연구에서는 미분무 생성을 위하여 2유체노즐을 이용하였다. 2유체노즐의 개략도 및 사진을 Figure 1에 나타내었다. 일반적으로, 2유체노즐은 높은 속도의 기체를 공급하여 중심에서 공급되는 물을 분출 지점 내부나 외부에서 충돌시켜 미세한 크기의 액적을 생성한다.<sup>3~4)</sup> 2유체노즐은 액체와 기체 공급 유량을 각각 조절하여 다양한 분사 특성을 구현할 수 있고, 동일한 물 공급 조건에서 단일유체노즐에 비해 액적을 더욱 미세한 크기로 생성할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용한 2유체노즐은 노즐 중심에서 액체가 흐르고, 주위 환형 부분에서 기체가 흘러 노즐 분출 지점에서 미분무를 생성하는 구조로 되어 있다. 본 연구에서 이용한 2유체노즐은 기존 선행 연구에서 사용한 것과 동일한 것으로, 물 공급 홀(Hole)의 직경은 1.524 mm이고, 기체가 공급되는 환형 부분의 간격은 0.254 mm이다.



(a) Schematic diagram<sup>30)</sup>



(b) Pictures

Figure 1. Twin-fluid nozzle.

## 2.2 화재 소화 실험

### 2.2.1 연소속도 및 열방출률

본 연구에서는 화재 소화 실험을 위하여 헵탄을 이용하였다. Table 1에 헵탄의 물성치<sup>35,36)</sup>를 나타내었고, 비교를 위하여 본 연구그룹의 기존 선행 연구에서 사용한 헥산 및 에탄올의 물성치<sup>35,36)</sup>를 함께 정리하였다.

Table 2에 연소속도(Burning rate) 및 열방출률(Heat release rate, HRR) 측정을 위해 사용한 스테인리스 스틸(Stainless steel) 재질의 원형 연료팬(Fuel pan) 및 연료 정보를 나타내었다. 본 연구에서 화원 직경 변화를 위해 3가지 직경(80 mm, 120 mm, 160 mm)의 연료팬을 이용하였다. 화원 직경에 따라 연료량 140 mL와 420 mL를 사용하였고, 연소속도 및 열방출률을 측정하였다.

연소속도와 열방출률은 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 메스실린더를 이용하여 헵탄 140 mL와 420 mL를 계량하고, 연료팬에 부은 후 로드셀(Load cell, AND, SB15K10)에 위치시켰다. 이 때, 로드셀 위에 200 mm × 200 mm 정사각형 타일(Tile)을 두어 화재 시 연료팬에서 로드셀로의 열 전달을 최소화하였다. 이후 헵탄에 점화를 하여 연소시켰으며, 초시계를 이용하여 연료가 모두 연소되는데 걸린 시간을 측정하였다. 연료 무게를 시간으로 나누어 연소속도를 계산하였으며, 연소속도에 연소열(Heat of combustion)을 곱하여 열방출률을 도출하였다. Figure 2는 실험에 사용된 로드셀을 나타내었다. 로드셀은 0~15 kg 영역을 측정할 수 있고, 측정된 값을 0~10 V의 전기적 신호로 변환하여 데이터 수집장치를 통해 해당 전기적 신호를 수집하였다.

Table 1. Some properties of heptane with hexane and ethanol<sup>35,36)</sup>

Fuel	Heptane (n-Heptane)	Hexane	Ethanol
Flash point (°C)	-4	-22	13
Boiling temperature (°C)	98	69	78.3
Ignition point (°C)	215	225	363
Specific gravity (-)	0.68	0.7	0.8
Heat of combustion (kJ/kg)	44926	45100	26900
Explosion range (%)	1.1 ~ 6.7	1.1 ~ 7.5	3.3 ~ 19

Table 2. Summary of fuel pan and heptane fuel

Fuel pan diameter (mm)	80	120	160
Fuel pan height (mm)	45	65	80
Burning surface area (m <sup>2</sup> )	0.005	0.011	0.02
Heptane fuel volume (mL)	140		420
Heptane concentration (%)	95		98



Figure 2. Pictures of load cell and indicator.

## 2.2.2 화재 소화

본 연구에서 이용한 화재 소화 실험 장치는 Jeong and Lee<sup>30,31)</sup> 연구에서 사용한 장치와 동일한 장치를 이용하여 연구를 수행하였고, 해당 장치의 개략도를 Figure 3에 나타내었다. Figure 4에는 화재 소화 실험 시 이용한 실험 장치의 사진을 나타내었다. 화재 소화 실험을 위하여 본 연구에서는 2유체노즐을 이용하였다. 2유체노즐에 물을 공급하기 위하여 물탱크(Water tank)와 마이크로 기어 펌프(Micro gear pump, LongerPump, WT3000-1JB)를 통해 원하는 물 공급 유량을 조절하였다. 한편, 기체를 공급하기 위하여 공기압축기(Air compressor, COMP-WORLD, GX-160)와 MFC (Mass flow controller, Line Tech, M3100V)를 사용하여 원하는 공기 공급 유량을 조절하였다. 공기압축기와 MFC 사이에 압력조절기(Pressure regulator)를 설치하여, 공기압축기에서 MFC로 공급되는 공기의 압력을 3 bar로 설정하였다.

Table 3은 화재 소화 실험 조건을 나타내고 있으며, 화재 소화 실험 시 물 공급 유량은 156~483 g/min으로 공급하였고, 공기 공급 유량은 30~70 L/min으로 공급하였다. 화원은 노즐로부터 2 m 아래 설치하였으며, 화원 직경은 80 mm, 120 mm, 160 mm의 원형 연료팬을 이용하여 조절하였다. 연료는 헵탄을 사용하였으며, 화원 직경 80 mm, 120 mm에서는 연료량 140 mL, 화원 직경 160 mm에서는 연료량 420 mL를 이용하였다. 원형 연료팬 아래에는 200 mm × 200 mm 정사각형 타일 위치시켜 바닥과 연료팬 간 열전달을 차단하였고, 화재 소화 실험 시 디지털 카메라(Digital camera, Canon, EOS M10)를 이용하여 화재 플룸 가시화 실험을 수행하였다.

화재 소화 실험은 크기 2410 mm(가로) × 3570 mm(세로) × 2450 mm(높이)의 화재실 내에서 수행하였고, 해당 화재실 사진을 Figure 5에 나타

내었다. 화재 소화 실험 시 화재실 내부에 설치된 직경 200 mm의 원형 덕트(Duct) 2개는 개방된 조건이었다. 화재 소화 실험 이후에는 배풍기를 이용하여 3시간 동안의 충분한 환기 후 다음 실험을 수행하였다.

화재 소화 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 헵탄 풀에 점화 후 1분 간 자유연소하여 화염이 안정화되기를 기다린 이후, MFC에서 원하는 공기 공급 유량에 도달할 때까지 약 10초 간 공기를 분사하였다. 이후 공기와 함께 원하는 물 유량을 공급하여 화재가 소화 될 때 까지 미분무를 분사하였다. 화재 소화 가능 여부의 경우, 화재 소화 후 재점화를 하여 판단하였다. 재점화가 가능하면 미분무에 의한 화재 소화로 판단하고, 재점화가 불가능하면 소화 불가능으로 판단하였다.



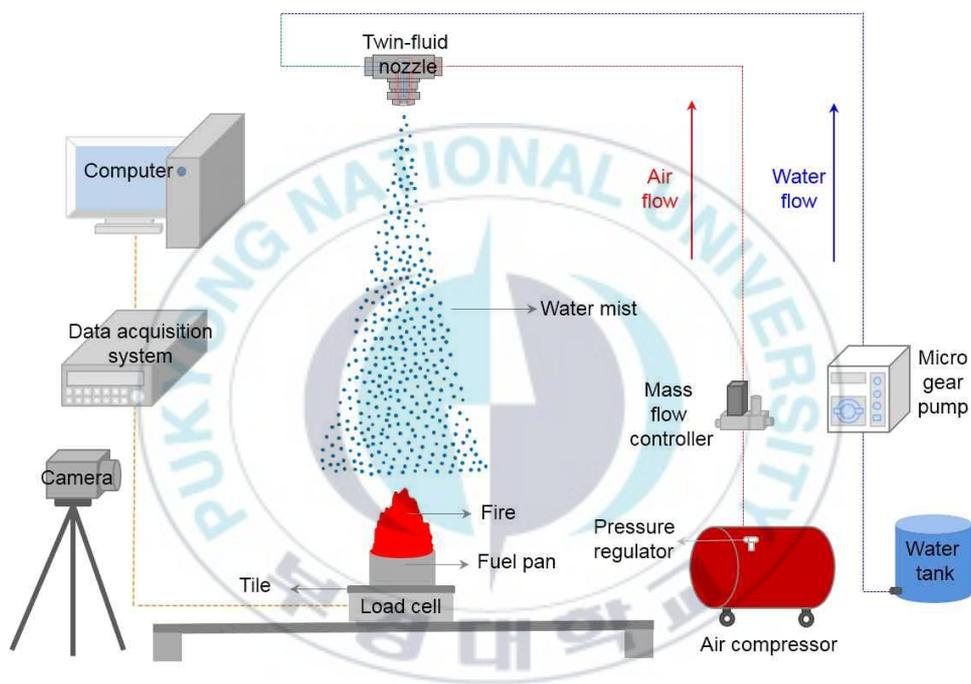


Figure 3. Schematic diagram of experimental set-up for fire extinguishment experiment.



(a) Micro gear pump



(b) Water tank



(c) Mass flow controller



(d) Air compressor



(e) Mass flow meter



(f) Data acquisition system

Figure 4. Experimental equipment.

Table 3. Experimental conditions

Nozzle	Twin-fluid nozzle	
Water flow rate (g/min)	156 ~ 483	
Air flow rate (L/min)	30 ~ 70	
Distance between nozzle and fire source (m)	2	
Liquid fuel	Heptane (n-Heptane)	
Fuel volume (mL)	140	420
Fire source diameter (mm)	80, 120	160



Figure 5. Picture of fire experiment room.

## 2.3 분사 특성 측정 실험

미분무에 의한 화재 소화는 노즐의 미분무 분사 특성에 의해 지대한 영향을 받을 수 있다. 따라서 다양한 공급 유량 조건에서 본 연구에서 사용한 2유체노즐의 미분무의 분사 특성(유량 분포, 액적 크기, 분사 속도 및 유량)을 측정하였고, 2유체노즐에 유체 공급 시 입구 압력을 측정하였다. 2유체노즐의 미분무 분사 특성 측정 실험 장치 및 방법에 대해 아래에 기술하였다.



### 2.3.1 유량 분포

2유체노즐에서 분사되는 미분무의 유량 분포를 측정하기 위하여 채수통(Patternator)을 제작하였다. 채수통은 아크릴을 이용하였으며, 셀(Cell) 한 개의 크기는 50 mm(가로) × 50 mm(세로) × 500 mm(높이)의 직사각형으로 제작하였다. 셀은 총 19개로 구성되어있다. Figure 6과 Figure 7에 실험 사진 및 실험 결과의 예를 각각 나타내었다.

유량 분포 측정 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 채수통에 100 mm의 높이까지 물을 채우고, 채수통의 중심 셀을 노즐 수직 아래 위치시켰다. 이후 원하는 물과 공기 공급 유량에 따라 미분무를 분사하였으며, 초시계를 이용하여 채수통의 각 셀에서 1분 간 채워진 물의 높이를 측정하였다. 또한, 각 셀에서 측정된 물의 높이를 채수통에서 측정된 가장 높은 물의 높이로 나누어 정규화하였다.

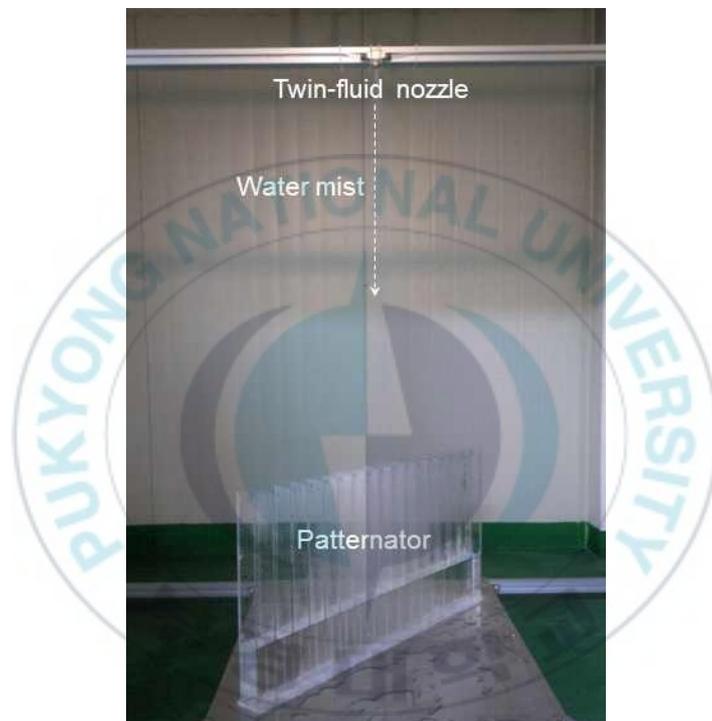


Figure 6. Experimental set-up of flow distribution measurement.

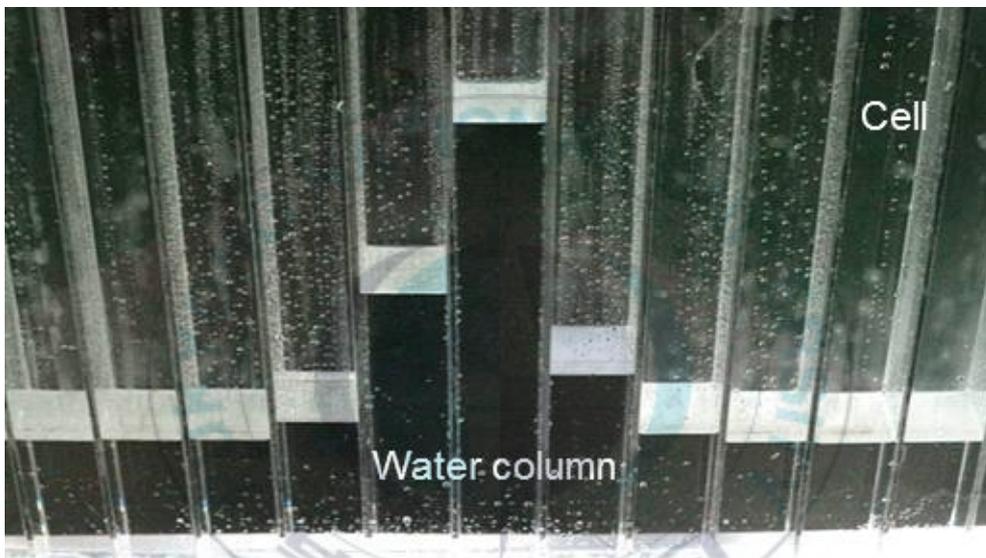
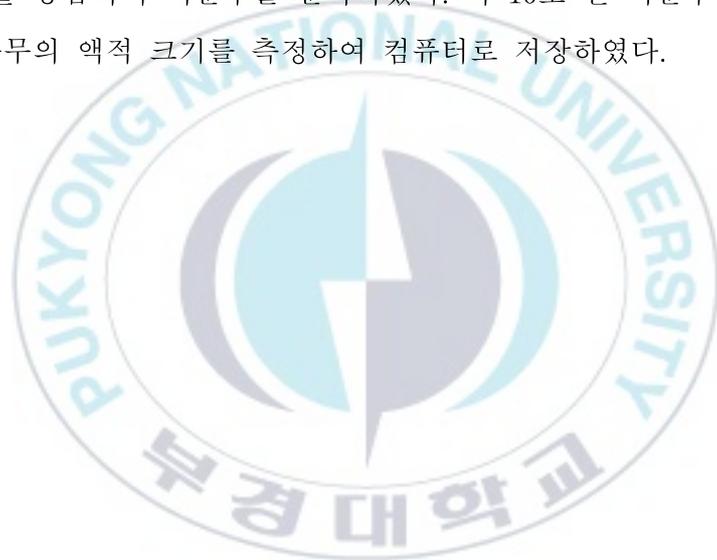


Figure 7. Flow distribution measurement result  
(Water flow rate = 641 g/min, Air flow rate = 70 L/min).

### 2.3.2 액적 크기

Figure 8은 액적 크기(Sauter mean diameter, SMD) 측정 장치 사진이다. 측정 장치는 레이저 빔(Laser beam)의 회절을 이용한 말번 타입(Malvern type) 장비를 이용하여 액적 크기를 측정하였다. 측정 장치의 한계로 인해 액적 크기는 노즐로부터 약 275 mm 떨어진 위치에서 측정하였고, 레이저와 디텍터(Detector) 사이의 거리는 400 mm이다.

액적 크기 측정 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 원하는 물과 공기 유량을 공급하여 미분무를 분사하였다. 약 10초 간 미분무 분사 후 약 1분간 미분무의 액적 크기를 측정하여 컴퓨터로 저장하였다.



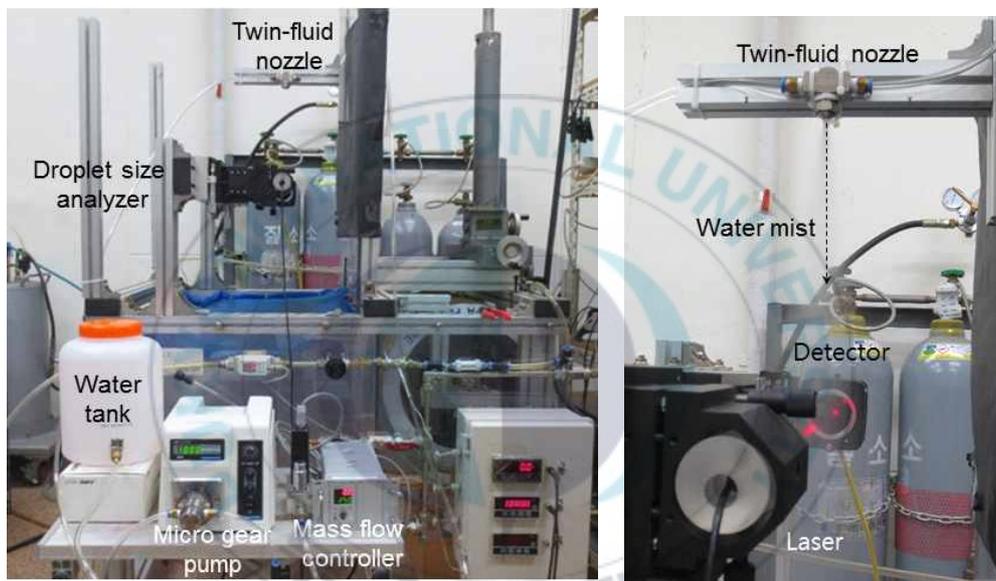


Figure 8. Experimental set-up of droplet size (SMD) measurement.

### 2.3.3 분사 속도 및 유량

Figure 9와 Figure 10에 2유체노즐에서 공기 분사 시 분사 속도 및 유량을 측정하기 위한 실험 장치 사진을 각각 나타내었다. 미분무 분사 속도 및 유량을 측정하는 것이 현실적으로 어려운 상황이므로 본 실험의 경우 공기만을 공급, 분사하여 2유체노즐로부터 수직 거리 변화에 따른 분사 속도 및 유량 변화를 측정하였다. 공기 공급 유량 조건은 20~70 L/min 영역이었다.

분사 속도의 경우 피토투브(Pitot L)와 압력 트랜스미터(Transmitter, KIMO, 210Class)를 이용하여 측정하였으며, 0~10 V의 전기적 신호 출력 방식에서 최대 측정 속도는 12 m/s로 설정하여 실험을 수행하였다.

분사 속도는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 피토투브는 노즐 수직 아래 위치를 하고 광학 수직·수평 측정기(Cross line laser level, SINCON, Class II)를 이용하여 피토투브와 노즐 간 수직과 수평을 설정하였다. 피토투브는 이송장치에 장착을 하여 높이 조절을 하였으며, 노즐과 0.4~1.5 m 떨어진 위치에서 분사 속도를 측정하였다. 분사 측정 시 공기 분사 후 약 10초 이후부터 측정을 시작하여 약 1분 간 실험 데이터를 획득하였다.

한편, 분사 유량의 경우, 유량 센서(Debimo blade)와 압력 트랜스미터(Transmitter, KIMO, 210Class)를 이용하였으며, 출력 방식 0~10 V 조건에서 최대 측정 유량을 300 m<sup>3</sup>/h으로 설정하여 측정하였다. 분사 유량 측정 실험은 분사 속도 측정 실험과 유사하게 진행되었으며, 피토투브 대신 유량 센서를 이용하여 실험을 수행하였다.

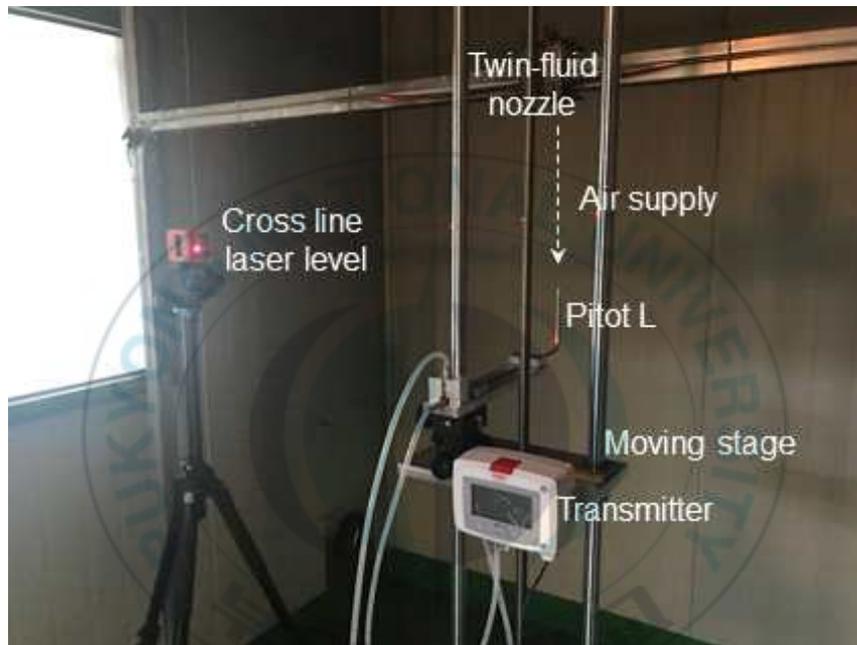


Figure 9. Experimental set-up of downward air velocity flow rate measurement.

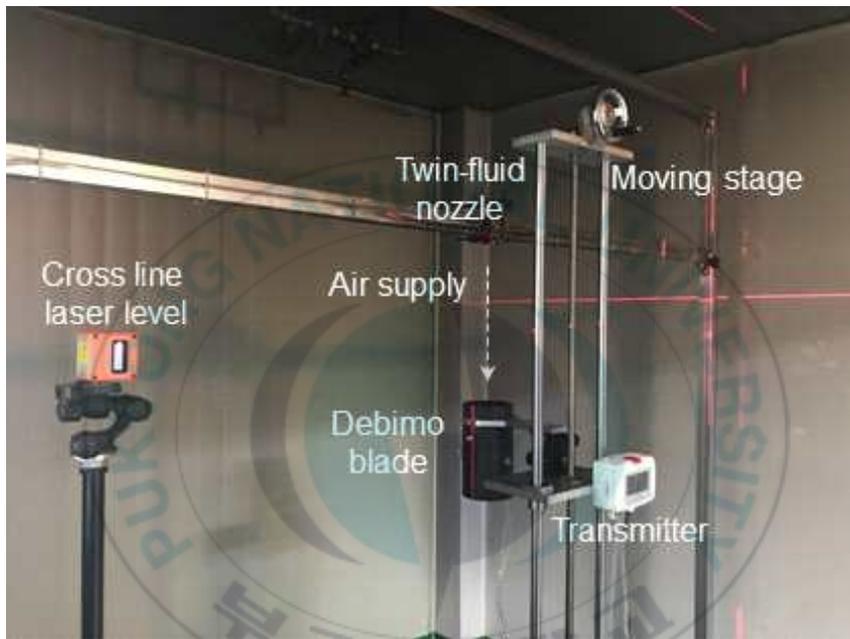


Figure 10. Experimental set-up of downward air volume flow rate measurement.

### 2.3.4 공급 압력

2유체노즐에 물 및 공기가 공급될 때 유량 조건에 따른 압력을 측정하였다. 공급 압력 측정을 위하여 2유체노즐의 물 및 공기 입구 측에 압력 센서(Pressure sensor, Keller, PA-21Y)를 설치하였다. 압력 센서는 2유체노즐 중심으로부터 약 85 mm 떨어진 위치에 설치하였다. 해당 압력 센서는 0~6 bar 영역을 측정할 수 있고, 측정된 값을 1~5 V의 전기적 신호로 변환하여 데이터 수집장치를 통해 해당 전기적 신호를 수집하였다. 공급 압력을 측정한 물 공급 유량 조건은 87~641 g/min 이고, 공기 공급 유량 조건은 10~70 L/min이다. Figure 11에 2유체노즐 및 압력 센서 설치 사진을 나타내었다.

공급 압력 측정 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 설정한 물과 공기 유량을 2유체노즐에 각각 공급하고 약 10초 이후부터 1분 간 압력 데이터를 수집하였다. 실험은 총 3회 실시하고 공급 압력의 평균과 표준편차를 도출하였다.

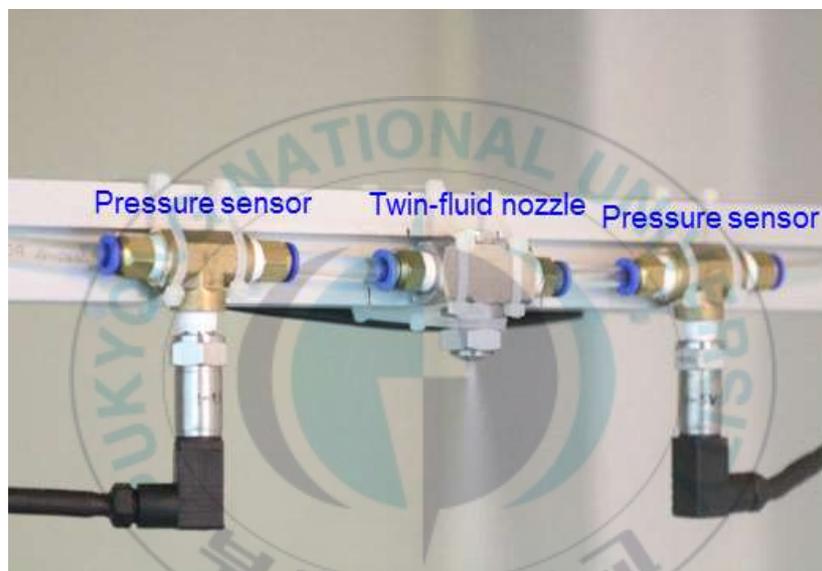


Figure 11. Experimental set-up of pressure measurement.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 분사 특성 측정 실험

분사 특성 측정 실험은 화재가 없는 조건에서 수행하였다. 아래에 유량 분포, 액적 크기, 분사 속도 및 유량과 2유체노즐에 유체 공급 시 압력 측정 결과들을 차례대로 나타내었다.



### 3.1.1 유량 분포

Figure 12에 2유체노즐로부터 분사되는 미분무의 유량 밀도 분포 측정 결과를 반경방향 거리에 따라 나타내었다. 해당 그래프의 결과는 공기 공급 유량이 50 L/min, 물 공급 유량이 156~948 g/min인 조건에서 수행된 실험 결과이다. Figure 12에서 x축은 2유체노즐 중심으로부터 반경방향 거리를 나타내고, y축은 채수통의 각 셀에서 측정한 물기둥(Water column)의 높이를 나타낸다. 모든 물 공급 유량 조건에서 노즐 중심(x=0 mm 위치)에서의 셀 내 물기둥 높이가 가장 높은 것을 알 수 있었고, 노즐 중심으로부터 거리가 멀어질수록 셀 내 물기둥의 높이가 낮아짐을 알 수 있었다. 이는 노즐로부터 분사된 물이 노즐의 중심에 집중적으로 분포한다는 것을 의미한다. 한편, 일정한 공기 공급 유량 조건에서 물의 공급 유량이 증가함에 따라 노즐 중심에서 측정된 물의 양이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

Figure 12를 이용하여 정규화된(Normalized) 유량 밀도 분포를 도출하였고, 이에 대한 결과를 Figure 13에 나타내었다. 정규화된 유량 밀도 분포는 각 유량 공급 조건에서 측정된 각 셀의 물기둥 높이를 가장 높은 물기둥 높이로 나눈 값을 의미한다. 본 실험에서는 노즐 중심에 해당하는 셀의 위치에서 물기둥 높이가 가장 높았으므로 노즐 중심에 해당하는 셀 내 물기둥 높이를 이용하여 각 셀에서 측정된 물기둥 높이를 나누었다. 따라서 모든 공급 유량 조건에서 노즐 중심에서의 정규화된 유량 밀도 값은 1로 나타났고, 노즐 중심으로부터 멀어짐에 따라 정규화된 유량 밀도 값이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 유량 밀도 측정 데이터를 토대로 본 연구에서 이용한 2유체노즐의 분사각을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 이용한 2유체노즐의 사양서에 분사각은 약 17~19°로 되어있으며, 본 실험의 분사 수직 거리 및 유량 분포 측정 결과(Figure 12와 Figure 13)를 토대로 볼 때 사양서의 분사각과 유사

한 분사각이 형성됨을 확인할 수 있었다.

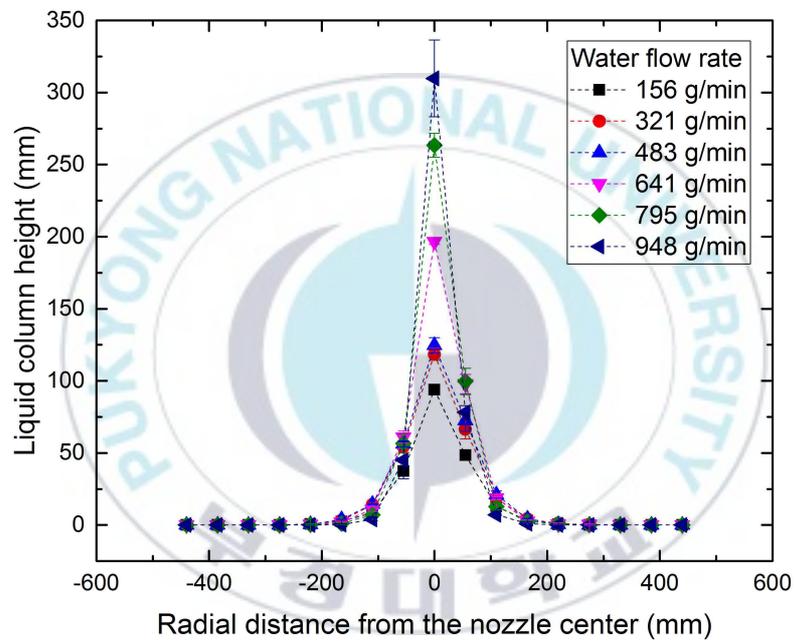


Figure 12. Flow distribution measurement data  
(Air flow rate = 50 L/min).

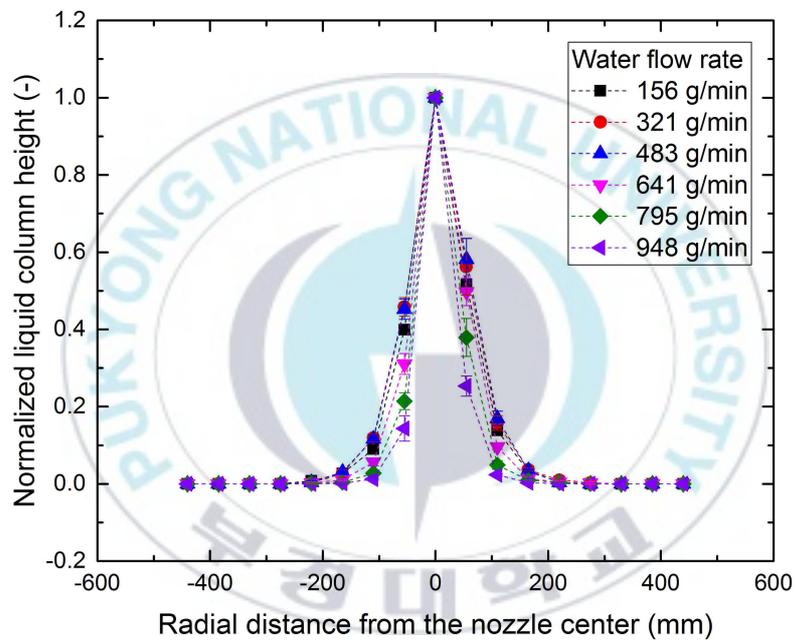


Figure 13. Normalized flow distribution measurement data (Air flow rate = 50 L/min).

### 3.1.2 액적 크기

Figure 14은 액적 크기(Sauter mean diameter, SMD) 측정 결과를 나타내고 있으며, SMD의 정의는 아래 식과 같다.

$$D_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2}$$

여기서  $D$ 는 액적의 평균 직경,  $n$ 은 액적의 개수,  $d$ 는 액적의 직경을 나타낸다.

측정 결과, 액적 크기는 유체 공급 유량 조건에 따라 20~110  $\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 한편, 공기 공급 유량이 증가함에 따라 동일한 물 공급 유량에서 더욱 미세한 크기의 미분무가 생성되었다. 즉, 액적 크기는 공기 공급 유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 동일한 공기 공급 유량 조건에서는 물 공급 유량이 감소함에 따라 생성되는 액적 크기가 감소함을 알 수 있었다.

Figure 15에 물 공급 유량 321 g/min, 공기 공급 유량 30~70 L/min 조건에서 측정된 누적 체적 분포를 나타내었다. 전체적으로 공기 공급 유량이 증가하면 더욱 미세한 크기의 미분무가 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

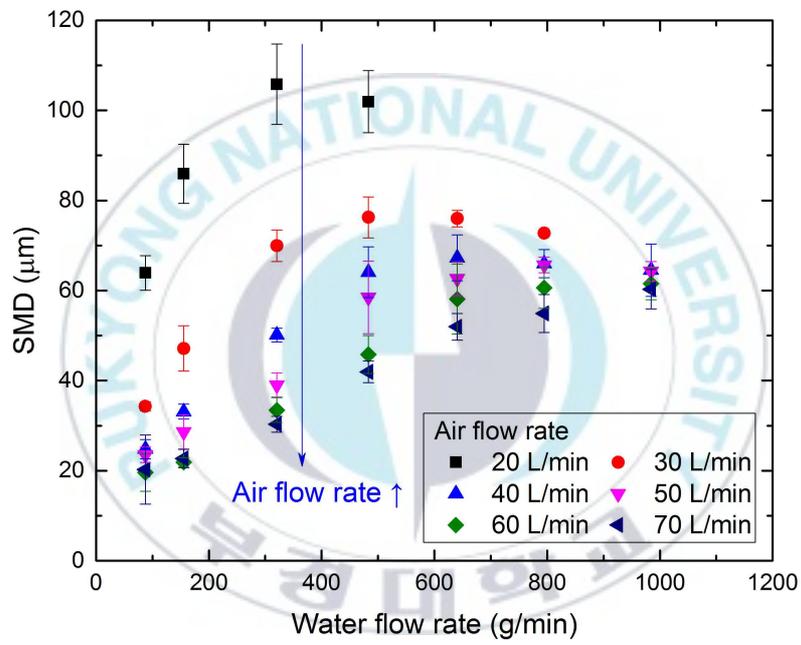


Figure 14. SMD measurement data.

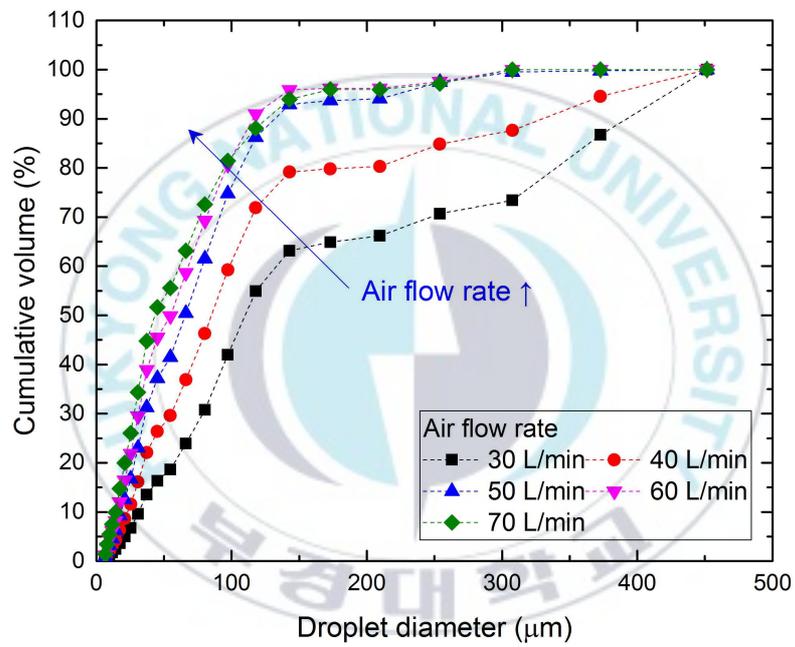
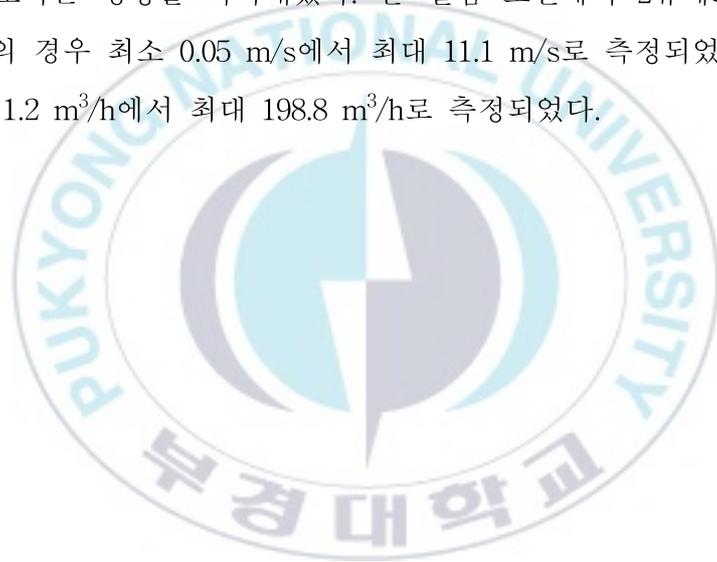


Figure 15. Cumulative volume distributions of droplet (Water flow rate = 321 g/min).

### 3.1.3 분사 속도 및 유량

Figure 16과 Figure 17에 2유체노즐에 의한 분사 속도 및 유량 측정 결과를 각각 나타내었고, 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 공기만을 공급하여 실험을 수행하였다. 공기 공급 유량은 20~70 L/min으로 변화시켰다.

공기 분사 속도 및 유량의 경우 공기 공급 유량이 증가함에 따라 증가하였고, 2유체노즐과 가장 가까운 지점에서 가장 큰 값을 나타내었다. 반면, 2유체노즐로부터 측정 지점의 수직 거리가 멀어질수록 측정된 분사 속도 및 유량이 감소하는 경향을 나타내었다. 본 실험 조건에서 2유체노즐에 의한 분사 속도의 경우 최소 0.05 m/s에서 최대 11.1 m/s로 측정되었고, 분사 유량은 최소 1.2 m<sup>3</sup>/h에서 최대 198.8 m<sup>3</sup>/h로 측정되었다.



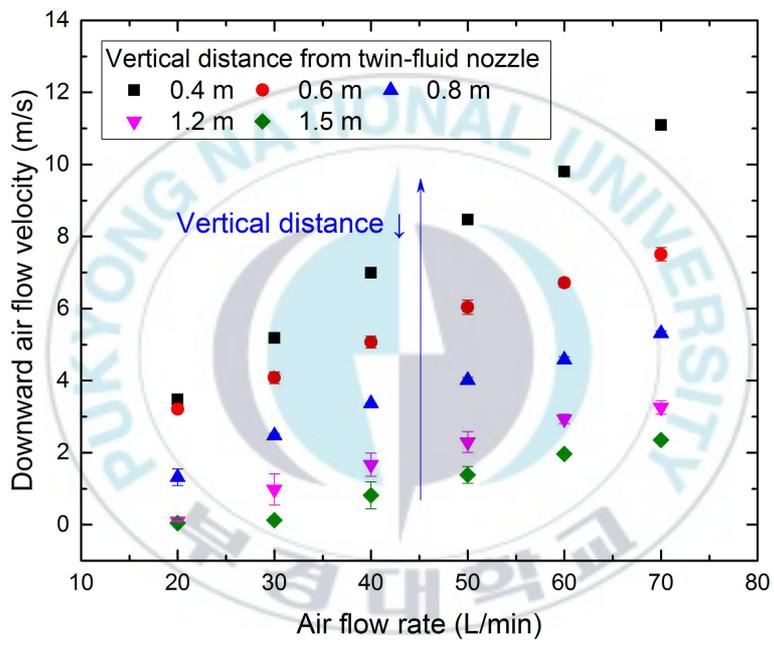


Figure 16. Downward air flow velocity measurement data.

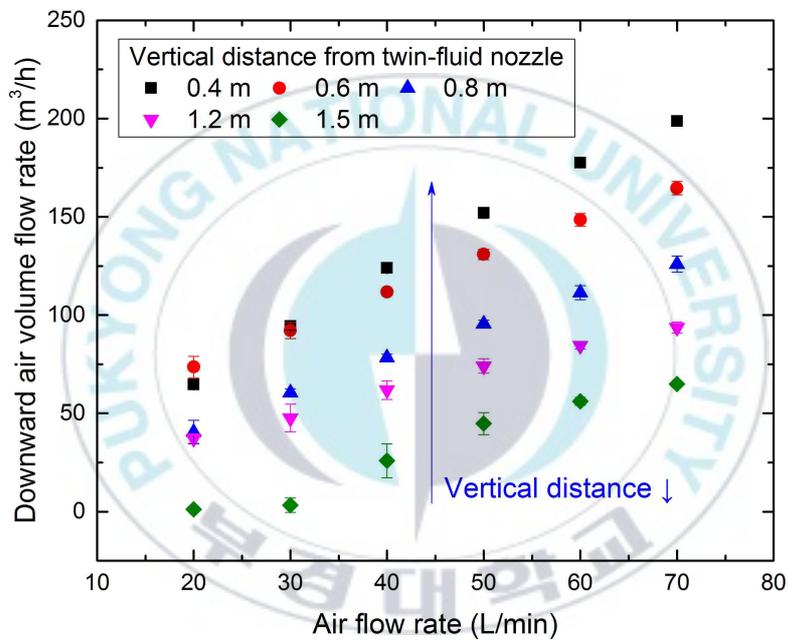


Figure 17. Downward air volume flow rate measurement data.

### 3.1.4 공급 압력

Figure 18과 Figure 19에 물 및 공기 공급 압력 측정 결과를 각각 나타내었다. 물 공급 유량은 87~641 g/min, 공기 공급 유량 10~70 L/min으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 물 및 공기 공급 압력의 경우, 공급 유량이 증가함에 따라 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 본 실험 조건에서 물 공급 압력은 2.7 kPa에서 24.0 kPa, 공기 공급 압력은 7.0 kPa에서 198.1 kPa로 나타났다.



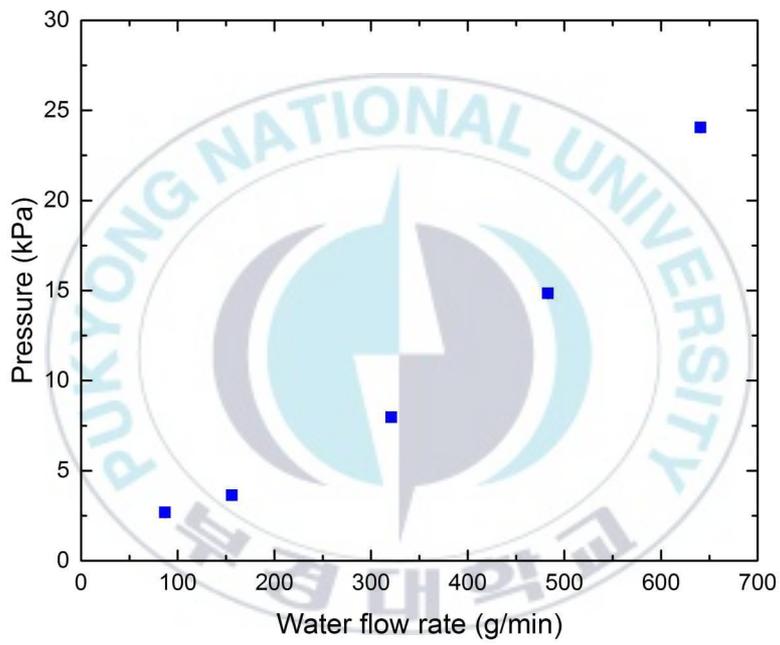


Figure 18. Pressure measurement data of inlet water flow.

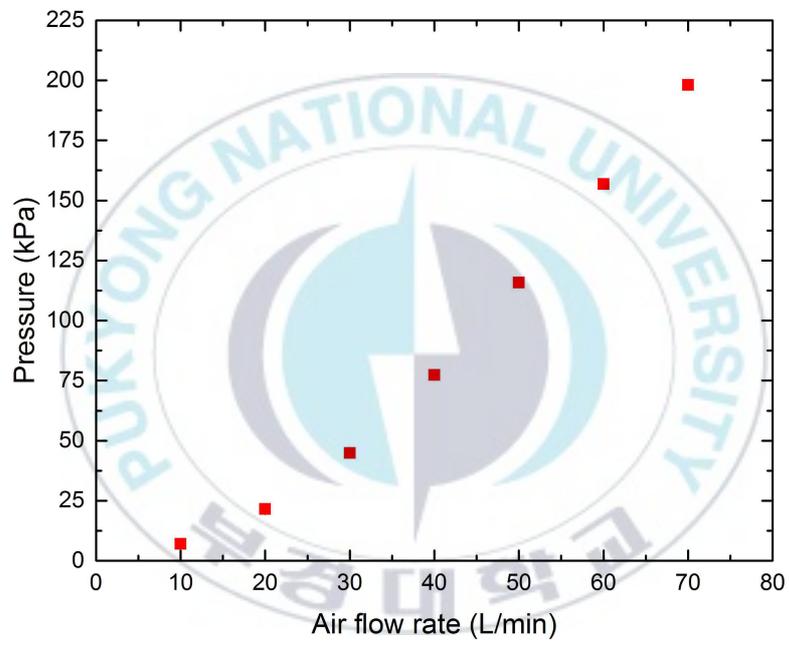


Figure 19. Pressure measurement data of inlet air flow.

## 3.2 화재 소화 실험

### 3.2.1 연소속도 및 열방출률

Table 4와 Figure 20, Figure 21에 본 연구에서 이용한 화원 직경에 따른 헵탄 폴화재의 연소속도 및 열방출률을 각각 나타내었다. 연소속도( $\dot{m}$ ) 및 열방출률(HRR)은 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$\dot{m} = W/t$$
$$HRR = \dot{m} \times H_c$$

여기서 W는 연료의 무게, t는 시간,  $H_c$ 는 연소열을 나타낸다.

화원 직경이 증가함에 따라 연소속도 및 열방출률이 증가하였다. 동일한 연료량인 140 ml를 이용하였음에도 불구하고 화원 직경이 80 mm인 경우에 비해 화원 직경이 120 mm인 경우가 연소속도 및 열방출률이 약 3.3배 증가함을 알 수 있었다. 즉, 화원 직경에 의해 연소속도 및 열방출률이 지대한 영향을 받음을 확인하였다. 반면, 화원 직경 160 mm의 경우, 가장 작은 화원 직경 80 mm의 경우에 비해 연소속도 및 열방출률이 약 7.2배 큰 것으로 측정되었다.

Table 4. Burning rate and heat release rate under different fire source diameters

Fire source diameter (mm)	80	120	160
Heptane fuel volume (mL)	140		420
Heptane weight (kg)	0.094 (±0.001)	0.097	0.285 (±0.001)
Burning time (s)	1912 (±11.6)	595	807 (±0.6)
Burning rate (kg/s)	0.000049 (±0.000001)	0.000163	0.000352 (±0.000001)
HRR (kW)	2.20 (±0.03)	7.32	15.82 (±0.04)

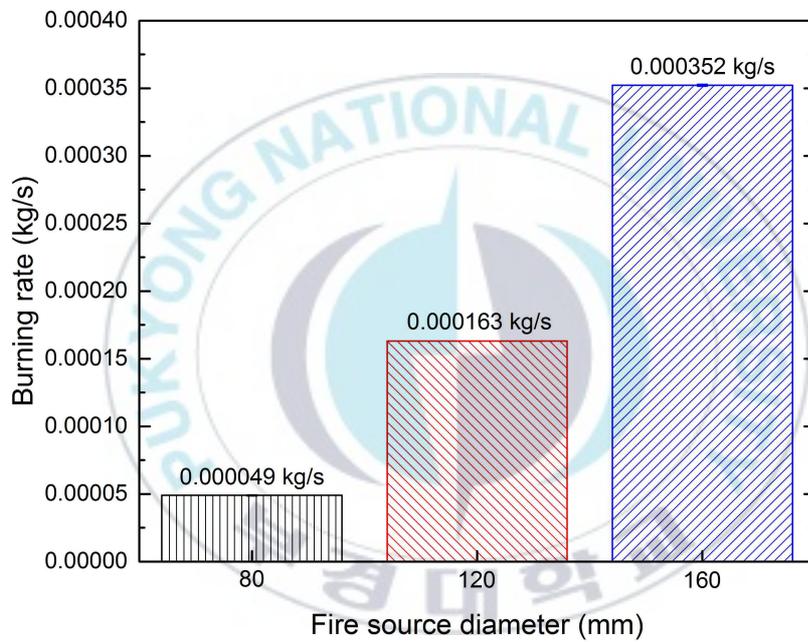


Figure 20. Effect of fire source diameter on burning rate.

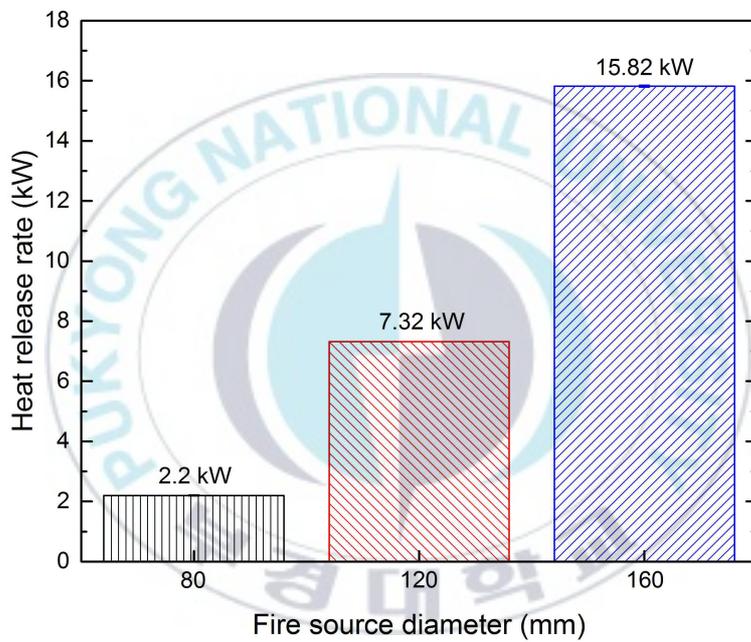


Figure 21. Effect of fire source diameter on heat release rate.

### 3.2.2 소화 가능 여부

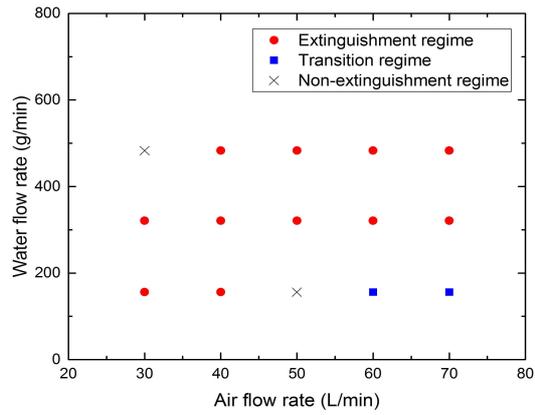
앞서 언급한 3가지 종류의 화원 직경에 대해 2유체노즐을 이용하여 화재 소화 실험을 수행하였고, Figure 22에 다양한 공기 및 물 공급 유량 조건에서의 화재 소화 가능 여부를 나타내었다. 화재 소화 실험의 경우, 물 공급 156~483 g/min, 공기 공급 유량 30~70 L/min의 조건으로 수행하였다.

화재 소화 실험은 총 3회 실시하였고, 소화 가능(Extinguishment regime), 천이영역(Transition regime), 소화 불가능(Non-extinguishment regime)으로 구분하였다. 실험 방법에서 언급하였듯이 미분무를 분사하여 화재가 소화된 후 재점화가 가능하면 해당 화재가 미분무에 의해 소화된 것으로 판단하여 소화 가능으로, 재점화가 불가능하면 소화 불가능으로 분류하였다. 한편, 각 조건에서 3회 반복 실험 시 1회라도 소화 불가능한 결과가 도출될 경우 천이영역으로 분류하였다.

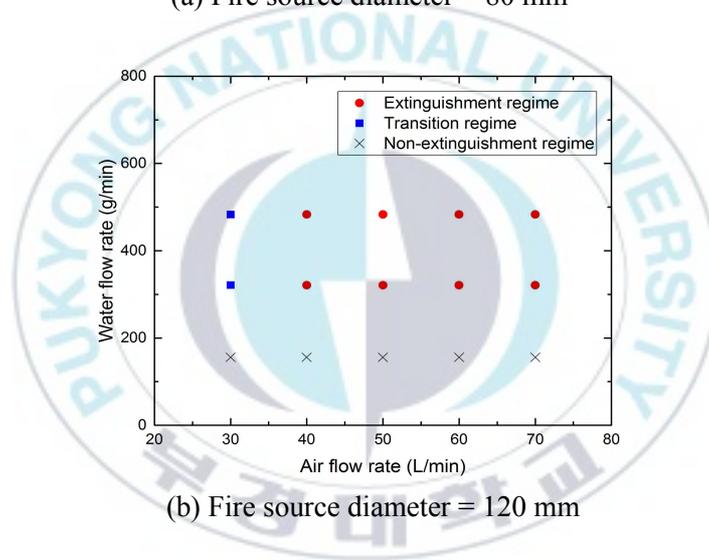
실험 결과, 물 공급 유량 321 g/min 이상의 경우에는 공기 공급 유량 40~70 L/min 영역에서 3회 반복 실험 결과 소화가 모두 가능하여 소화 가능으로 분류하였다. 이는 공기 공급 유량이 많은 경우에 성공적으로 소화가 가능하다는 점에서 기존 선행 연구결과<sup>30,31)</sup>와 일치한다고 판단된다. 이러한 결과의 원인 중 하나는 공기 공급 유량이 많은 경우 공기의 강한 하강 흐름에 의해 화재 플룸(Fire plume)이 억압되고 2유체노즐로부터 생성된 다수의 미분무가 화염 및 연료면에 도달하여 효과적으로 소화가 가능했기 때문으로 판단된다.<sup>30,31)</sup> 그러나 미분무에 의한 화재 소화 효과가 다양하고 복잡하다는 것을 고려할 때 추후 이에 대한 보다 세부적인 연구가 필요하다고 생각된다. 한편, 물 공급 유량 156 g/min 조건에서는 화원 직경 120 mm와 160 mm 경우에서 모두 미분무에 의한 소화가 이루어지지 않았다. 즉, 공기 공급 유량이 30~70 L/min인 경우, 화재가 소화된 후 재점화 시 재점화가 되지 않았고, 연료팬 내에 연료가 모두 소진된 것을 확인 할 수 있었다. 이

는 화원 직경 120 mm와 160 mm 경우에는 화원 직경 80 mm에 비해 열방출률이 커서 물 공급 유량 156 g/min 조건의 미분무로는 소화가 불가능함을 의미한다.

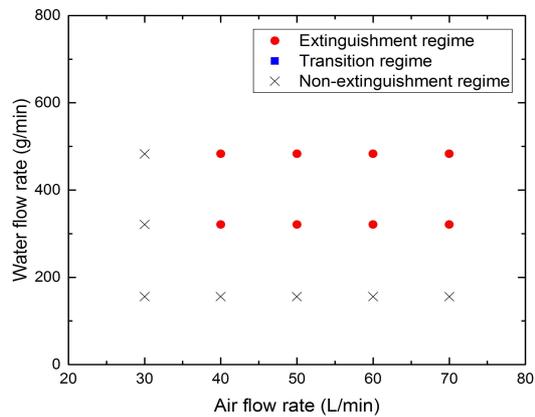




(a) Fire source diameter = 80 mm



(b) Fire source diameter = 120 mm



(c) Fire source diameter = 160 mm

Figure 22. Extinguishment map under different fire source diameter conditions.

### 3.2.3 화재 플룸 가시화

화재 소화 실험 시 화염 가시화를 수행하였으며 이 중 화원 직경이 160 mm인 경우에 대하여, 2유체노즐의 공기 공급 유량에 따른 화염 가시화 결과를 Figure 23에 나타내었다. 공기 공급 유량이 증가함에 따라 화염의 높이가 감소하는 경향이 관찰되었다. 화원 직경이 80 mm 및 120 mm인 경우에서도 공기 공급 유량이 증가함에 따라 화염의 높이가 감소하는 경향은 동일하게 나타났다. 본 가시화 실험을 통해 앞서 언급한 바와 같이 2유체노즐을 통해 분사되는 공기의 하강 흐름이 화재 플룸을 효과적으로 억압할 수 있다는 것을 확인하였다.





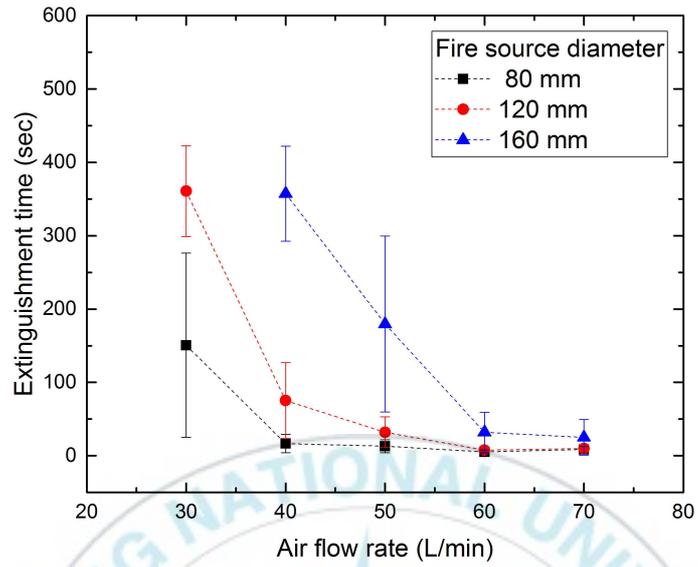
Figure 23. Visualization of heptane pool fire during discharge of air (Fire source diameter = 160 mm).

### 3.2.4 소화 시간 및 물 소모량

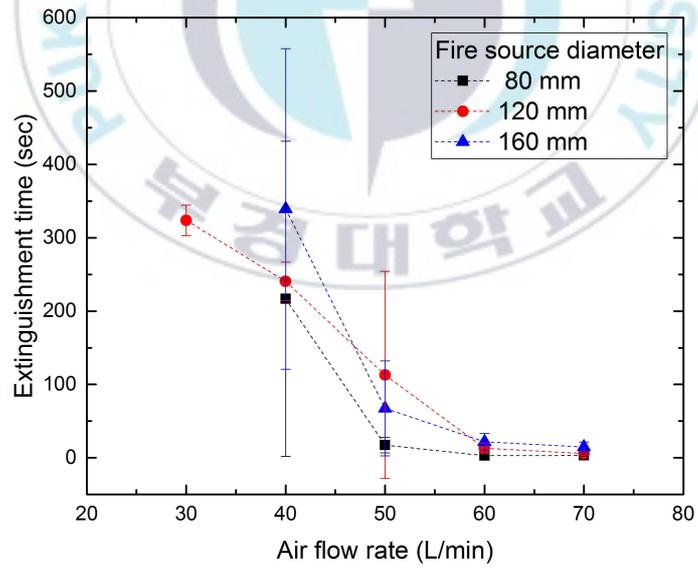
Figure 22의 소화 가능 여부 결과 그래프에서 물 공급 유량 321 g/min과 483 g/min의 조건에서 측정된 소화 시간을 Figure 24에 나타내었다. 소화 시간은 3회 측정하여 평균값을 계산하였고, 해당 결과에서 오차막대(Error bar)는 측정 데이터의 표준편차를 나타낸다.

물 공급 유량 321 g/min, 483 g/min 조건에서, 공기 공급 유량이 증가하면 소화 시간이 감소하는 경향이 관찰되었다. 공기 공급 유량 60 L/min 이상 조건에서는 물 공급 유량에 상관없이 모든 영역에서 약 30초 이내에서 소화가 가능하였다. 한편, 화원 직경이 증가함에 따라 동일한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 소화 시간이 전체적으로 증가함을 관찰할 수 있었고, 이는 화원 직경 증가에 따른 열방출률 증가 때문으로 판단된다.

Figure 25에는 Figure 24와 같은 조건에서 예측된 물 소모량을 나타내었다. 물 소모량은 물 공급 유량에 Figure 24의 소화 시간을 곱하여 도출하였다. 일정한 물 공급 유량 조건에서 공기 공급 유량이 증가함에 따라 물 소모량이 감소함을 알 수 있었다. 특히, 공기 공급 유량 60 L/min 이상에서는 모든 화원 직경의 경우에서 약 170 g정도의 물 소모량으로 화재 소화가 가능한 것으로 나타났다. 또한, 동일한 물 및 공기 공급 유량 조건에서 소화 시간과 유사하게 화원 직경 증가에 따라 물 소모량이 증가하는 것으로 관찰되었는데 이 역시 화원 직경 증가에 따른 열방출률 증가 때문으로 판단된다.

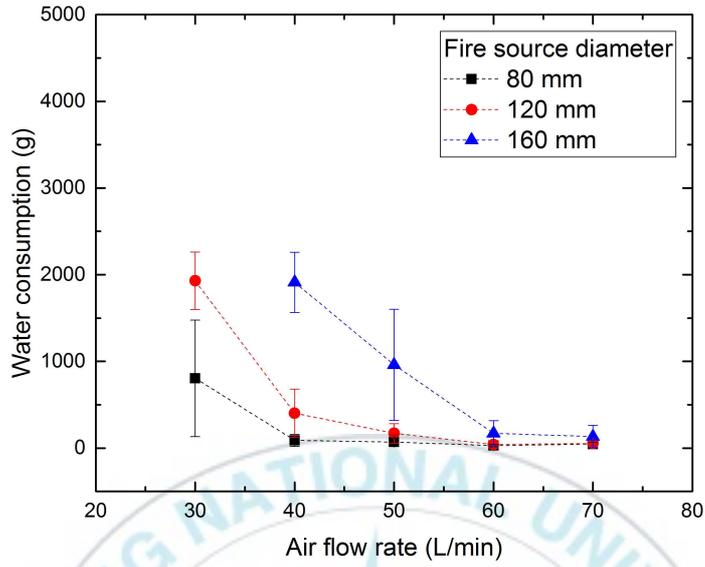


(a) Water flow rate = 321 g/min

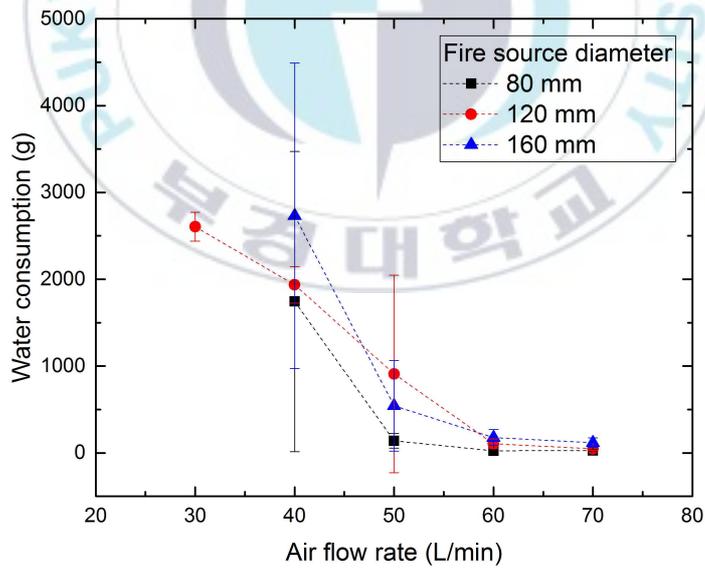


(b) Water flow rate = 483 g/min

Figure 24. Extinguishment time under different fire source diameter conditions.



(a) Water flow rate = 321 g/min



(b) Water flow rate = 483 g/min

Figure 25. Estimation of water consumption under different fire source diameter conditions.

### 3.2.5 미분무가 연소속도에 미치는 영향

Figure 22의 화재 소화 가능 여부 결과 그래프에서 화원 직경이 120 mm 및 160 mm 일 때 물 공급 유량이 적은 경우 화재 소화가 불가능하였고, 해당 영역에서 미분무가 연소속도에 미치는 영향을 검토하였다.

공기 공급 유량이 미분무 분사 시 연소속도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Figure 26에 화원 직경이 120 mm와 160 mm인 경우, 물 공급 유량이 156 g/min으로 일정한 조건에서 공기 공급 유량이 30 L/min에서 70 L/min으로 변화할 때의 연소속도 측정 결과를 나타내었다. 모든 공기 공급 유량 조건에서 화원 직경이 큰 경우가 작은 경우에 비해 연소속도가 큰 것으로 측정되었다. 한편, 공기 공급 유량이 증가함에 따라 연소속도가 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 이는 공급된 미분무에 의해 화재 플룸 내 혼합이 증대되기<sup>18)</sup> 때문으로 판단된다.

한편, 물 공급 유량이 미분무 분사 시 연소속도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 화원 직경 160 mm, 공기 공급 유량 30 L/min에서 3가지 물 공급 유량에 따른 연소속도 변화 측정 결과를 Figure 27에 나타내었다. 공기 공급 유량 변화에 비해 물 공급 유량 변화에 따른 연소속도의 변화는 큰 차이를 보이고 있지 않음을 확인 할 수 있었다.

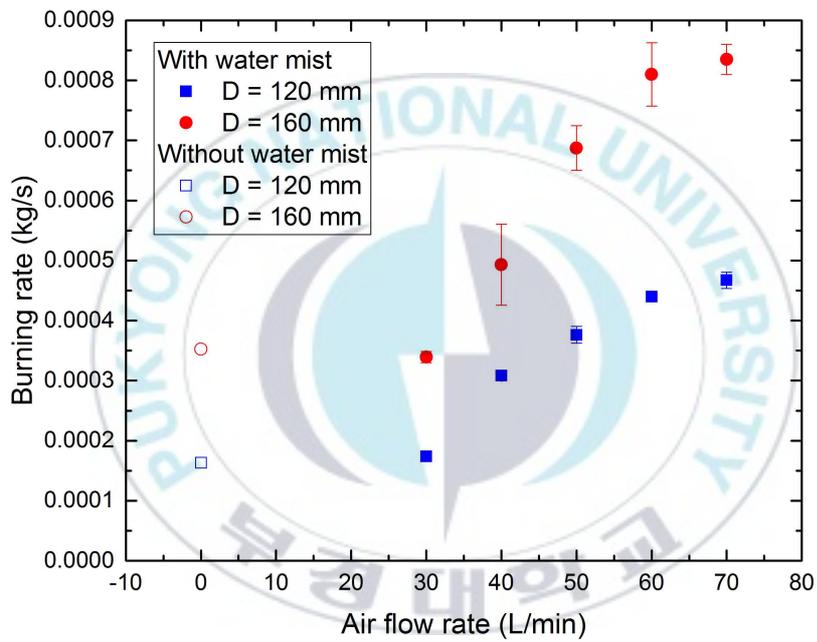


Figure 26. Influence of air flow rate on burning rate under water flow rate of 156 g/min.

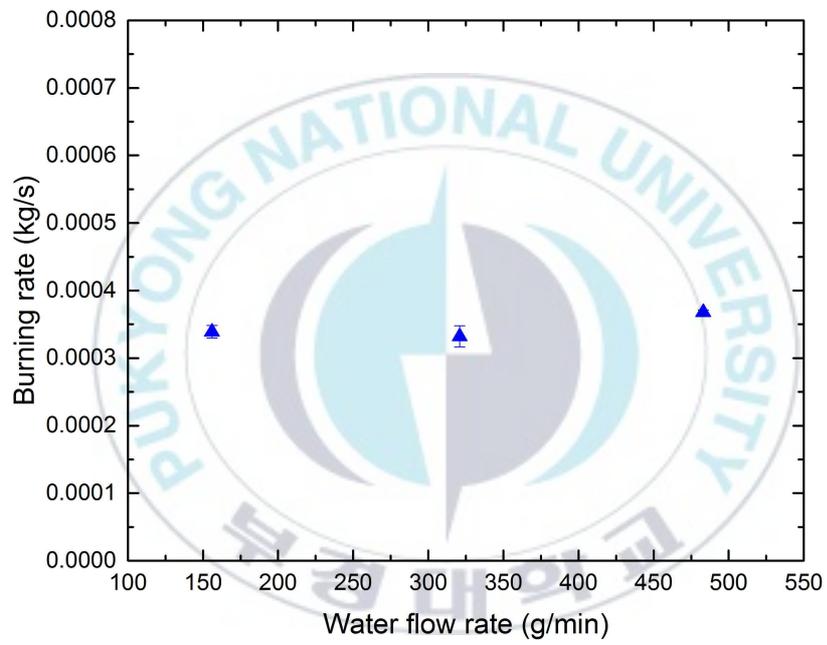


Figure 27. Influence of water flow rate on burning rate under air flow rate of 30 L/min (fire source diameter = 160 mm).

## 4. 결 론

본 연구에서는 2유체노즐을 이용하여 분사 특성을 측정하였고, 헵탄 풀 화재 소화 실험을 수행하였다. 화원 직경은 80 mm, 120 mm, 160 mm를 이용하였다. 주요 연구 내용을 아래에 정리하였다.

- 1) 2유체노즐의 분사 특성 측정 실험 결과 유량 분포의 경우 분사된 물이 노즐 중심에 집중적으로 분포하고, 액적 크기는 20~110  $\mu\text{m}$ , 공기 분사 속도는 0.05~11.1 m/s, 공기 분사 유량은 1.2~198.8  $\text{m}^3/\text{h}$ 로 나타났다. 공급 압력의 경우 물 공급 압력은 2.7~24.0 kPa, 공기 공급 압력은 7.0~198.1 kPa으로 측정되었다.
- 2) 열방출률의 경우 가장 작은 화원 직경은 2.20 kW, 가장 큰 화원 직경은 15.82 kW로 측정되었다. 화원 직경이 커지면 연소속도와 열방출률이 증가하였다.
- 3) 소화 실험 결과의 경우, 물 공급 유량 321 g/min과 483 g/min, 공기 공급 유량 40 L/min 이상에서 화원 직경에 관계없이 소화가 가능하였다. 소화 시간과 물 소모량은 공기 공급 유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그러나 동일한 물 및 공기 공급 유량 조건이라도 화원 직경이 큰 경우에 화재 소화 시간, 물 소모량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 소화 실험 결과 중, 소화가 불가능한 조건에서 미분무가 연소속도

에 미치는 영향에 대한 검토 결과의 경우, 공기 공급 유량이 증가하면 연소속도가 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 미분무에 의해 화재 플룸 내의 혼합 증대 효과로 판단된다.



## 참 고 문 헌

1. S. W. Nam, "Design & Construction of Fire Protection Systems", Sungandang (2018).
2. NFSC (National Fire Safety Code) 104A.
3. S. Y. Lee, "Atomization of Liquid", Minumsa (1996).
4. H. S. Jun, "Liquid Atomization", Munundang (2009).
5. J. M. Park and C. S. Shin, "Extinguishment of n-heptane Pool Fire by Water Mist Containing Alkali Metal Agent", Journal of the Korean of Safety, Vol. 20, No. 3, pp. 105-111 (2005).
6. W. J. Hwang, H. J. Kim, K. H. Oh, and S. E. Lee, "Experimental Study on the Fire Extinguishing Characteristics of Water Mist System", Fire Science and Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 78-84 (2009).
7. W. J. Hwang, H. J. Kim, K. H. Oh, S. E. Lee and S. W. Kim, "An Experimental Study on the Improvement of Fire Extinguishing Performance of Water Mist with Foam", Fire Science and Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 61-66 (2009).
8. T. W. Zhang, Z. Y. Han, Z. M. Du, K. Liu and Z. L. Zhang, "Cooling Characteristics of Cooking Oil Using Water Mist During Fire Extinguishment", Applied Thermal Engineering, Vol. 107, pp. 863-869 (2016).
9. C. Man, Z. Shunbing, J. I. A. Litao and W. U. Xiaoli, "Surfactant-containing Water mist Suppression Pool Fire Experimental Analysis", Procedia Engineering, Vol. 84, pp. 558-564 (2014).
10. K. D. Lee and C. S. Shin, "A Study on the Extinguishing Performance of Water Mist with Additives", Fire Science and Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 1-7 (2002).
11. S. I. Kim and C. S. Shin, "Comparison of Fire Extinguishing Effects for

- Water Mist Additives”, *Journal of the Korean of Safety*, Vol. 28, No. 6, pp. 23-28 (2013).
12. K. D. Lee and C. S. Shin, “Extinguishing Characteristics of Water Mist by Discharge Properties”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 41-48 (2001).
  13. S. Y. Oh, “The Effects of Spray Characteristics of Water Mist on the Fire Suppression of Liquid Pool Fire”, Master’s Thesis, Korea University (2004).
  14. T. Liang, M. Liu, Z. Liu, W. Zhong, X. Xiao and S. Lo, “A Study of the Probability Distribution of Pool Fire Extinguishing Times Using Water Mist”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 93, pp. 240-248 (2015).
  15. J. Qin and W. K. Chow, “Experimental Data on Water mist Suppression”, *Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 868-877 (2013).
  16. X. K. Xiao, K. Q. Kuang, T. S. Liang, H. D. Tang, G. X. Liao and K. K. R. Yuen, “Study on Flame Expansion Phenomenon in Pool Fire Extinguished by Water mist”, *Procedia Engineering*, Vol. 11, pp. 550-559 (2011).
  17. T. Liang, W. Zhong, R. K. K. Yuen, S. Lo and G. Liao, “On The Fire Intensification of Pool Fire with Water Mist”, *Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 994-999 (2013).
  18. M. B. Kim, Y. J. Jang and J. K. Kim, “Burning rate of a Pool Fire with Downward-directed Sprays”, *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 37-48 (1996).
  19. L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan and L. Xiaohui, “Experimental Research on the Water Mist Fire Suppression Performance in an Enclosed Space by Changing the Characteristics of Nozzles”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, pp. 174-181 (2014).
  20. Q. Li, P. Zhang, S. Guo, R. Pan, J. Qin and G. Liao, “Experimental Study on Suppression of n-Heptane Pool Fire with Water Mist under

- Longitudinal Ventilation in Long and Narrow Spaces”, *Procedia Engineering*, Vol. 62, pp. 946-953 (2013).
21. P. Zhang, X. Tang, X. Tian, C. Liu and M. Zhong, “Experimental Study on the Interaction Between Fire and Water Mist in Long Narrow Spaces”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 94, pp. 706-714 (2016).
  22. A. Jenft, A. Collin, P. Boulet, G. Pianet, A. Breton and A. Muller, “Experimental and Numerical Study of Pool Fire Suppression Using Water Mist”, *Fire Safety journal*, Vol. 67, pp. 1-12 (2014).
  23. H. M. I. Mahmud, K. A. M. Moinuddin and G. R. Thorpe, “Experimental and Numerical Study of High-pressure Water-mist Nozzle Sprays”, *Fire Safety Journal*, Vol. 81, pp. 109-117 (2016).
  24. S. C. Kim, H. S. Ryou, H. T. Park and K. Y. Bang, “Effect of Spray Angle of Water Mist Nozzle on Temperature Field of Compartment Fire”, *The Korean Society of Safety*, Vol. 18, No. 2, pp. 28-33 (2003).
  25. M. H. Jee and B. K. Lee, “Analysis of Fire Suppression Efficiency for Intermittent Water Spray Pattern by Fire Dynamics Simulator”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 216-220 (2008).
  26. M. S. Paek and S. H. Oh, “Spray Characteristics in Non-burning and Burning by Air-Blast Atomizer Sprays”, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 23, No. 3, pp. 33-43 (1995).
  27. J. H. Kim and K. O. Choi, “An Experimental Study on the Spray Characteristics for Twin-fluid with Nozzle Aspect”, *Journal of the Research Institute of Industrial Technology*, Vol. 21, pp. 8-14 (2002).
  28. S. K. Lee, M. J. Koh and S. K. Lee, “A Study on Fire Extinguishing Comparative Test of Water Mist Gun”, *Proceedings of 2007 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 143-148 (2007).
  29. B. H. Kim, H. S. Choi and D. K. Kim, “Spray Flow Characteristics of Twin-fluid Water Mist Nozzle for Fire Suppression”, *Journal of the Korean*

- Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 3, pp. 60-66 (2011).
30. C. S. Jeong and C. Y. Lee, "Examination on Liquid Pool Fire Extinguishment Performance of Twin-fluid Nozzle", *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 59-64 (2017).
  31. C. S. Jeong and C. Y. Lee, "Experimental Study on the Extinguishing Characteristics of Twin-fluid Nozzle using a Small-scale Hexane Pool Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 35-41 (2018).
  32. X. Huang, X. S. Wang, and G. X. Liao, "Characterization of an Effervescent Atomization Water Mist Nozzle and its Fire Suppression Tests", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, pp. 2573-2579 (2011).
  33. M. Gupta, R. Rajora, S. Sahai, R. Shankar, A. Ray and S. R. Kale, "Experimental Evaluation of Fire Suppression Characteristics of Twin Fluid Water Mist System", *Fire Safety Journal*, Vol. 54, pp. 130-142 (2012).
  34. M. Gupta, A. Pasi, A. Ray and S. R. Kale, "An Experimental Study of the Effects of Water Mist Characteristics on Pool Fire Suppression", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 768-778 (2013).
  35. S. R. Turns, "An Introduction to Combustion Concepts and Applications", McGraw Hill (1996).
  36. B. E. Poling, J. M. Prausnitz and J. P. O'Connell, "The Properties of Gases and Liquids", McGraw Hill (2000).
  37. J. A. Garcia, A. Lozano, J. Alconchel, E. Calvo, F. Barreras and J. L. Santolaya, "Atomization of Glycerin with a Twin-fluid Swirl Nozzle", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 92, pp. 150-160 (2017).
  38. H. K. Kwon, C. Y. Lee and S. Y. Lee, "Examination of 2-Fluid Nozzle and 3-Fluid Nozzle for Fuel Reformer of 5 kW SOFC System", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 13, No. 1, pp. 16-21 (2008).
  39. K. H. Oh, S. J. La and S. E. Lee, "A study on the Characteristics of

- Pool Fire”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 18, No 3, pp. 39-44 (2004)
40. S. I. Kim, “Comparison of Extinguishing Effects of Additives for Improving Extinguishing Performance of Water Spray”, Doctor’s Thesis, Chungbuk National University (2014).
41. J. R. Mawhinney, B. Z. Dlugogorski and A. K. Kim, “A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist”, *International Association for Fire Safety Science*, Vol. 4, pp. 47-60 (1994).
42. 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).

