

# 물분무를 이용한 화재제어에 관한 실험적 연구

김성찬\* · 박현태\* · 유홍선\*

(2002년 10월 15일 접수, 2003년 1월 18일 심사완료)

## An Experimental Study of Fire Suppression Using a Water Mist in a Compartment

Sung Chan Kim, Hyun Tae Park and Hong Sun Ryou

**Key Words:** Water Mist(물 분무), Fire Suppression(화재제어), Pool Fire(풀 화재), Fire Control(화재억제), Fine Spray(미세분무)

### Abstract

The present study investigates the fire suppression characteristics using a water mist fire suppression system. The fire extinguishing times are measured for various fire sources, fuel types, and different total flooding rates of water mist. Pool fire with hydrocarbon fuel is successfully extinguished within a minute under the operating conditions of the water mist system. Two different regimes of the smoke layer cooling are observed, such as rapid and slow cooling processes. The regimes are divided by threshold time which is calculated with auto-correlation function. The threshold time for the initial cooling decreases with increasing water flow-rates and fire sources. These initial cooling effects play an important role in preventing the occurrence of flashover fire by the initial fire suppression.

#### 기호설명

- $D_p$  : 화원직경 [m]  
 $\dot{m}_f$  : 연소량 [kg/s]  
 $Q_w$  : 총물분사량 [lpm]  
 $Q$  : 발열량 [kW]  
 $R_{xx}$  : 자기상관함수  
 $\Delta H_C$  : 연소열 [kJ/kg]  
 $\Delta t_{ext}$  : 실제 소화시간 [s]  
 $\Delta t_C$  : 초기냉각시간 [s]  
 $t_s$  : 점화후 소화시까지의 시간 [s]  
 $t_d$  : 점화후 물분무 작동까지의 시간 [s]

$T_{SL}$  : 연층평균온도 [°C]

$\tau$  : 지연시간 [s]

### 1. 서론

분무액적은 열기관, 냉각장치, 분무도장, 화재 제어장치등 폭넓은 산업분야에 널리 응용되고 있다. 특히 화재 제어 분야에서는 우수한 소화 특성을 가진 물분무를 활용한 스프링클러나 미세 물분무(Water Mist) 등이 적용되고 있다. 그러나 대부분의 분무현상에 대한 연구는 자동차 엔진을 비롯한 다양한 열기관의 연소 성능향상을 위한 분무 특성을 파악하는데 집중되어 왔으며 반대로 연소를 억제하기 위하여 물분무를 활용하는데 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 가장 일반적인 수계 소화 설비로는 스프링클러가 널리 이용되었으나 소화과정에서 발생하는 과도한 물 소모량으로 인한 수질오염과 수손의 우려가 있는 공간(문화재, 도서관, 전산실 등)에 대해서는 사

\* 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : cfdmcc@cau.ac.kr

TEL : (02)813-3669 FAX : (02)813-3669

\* 중앙대학교 대학원

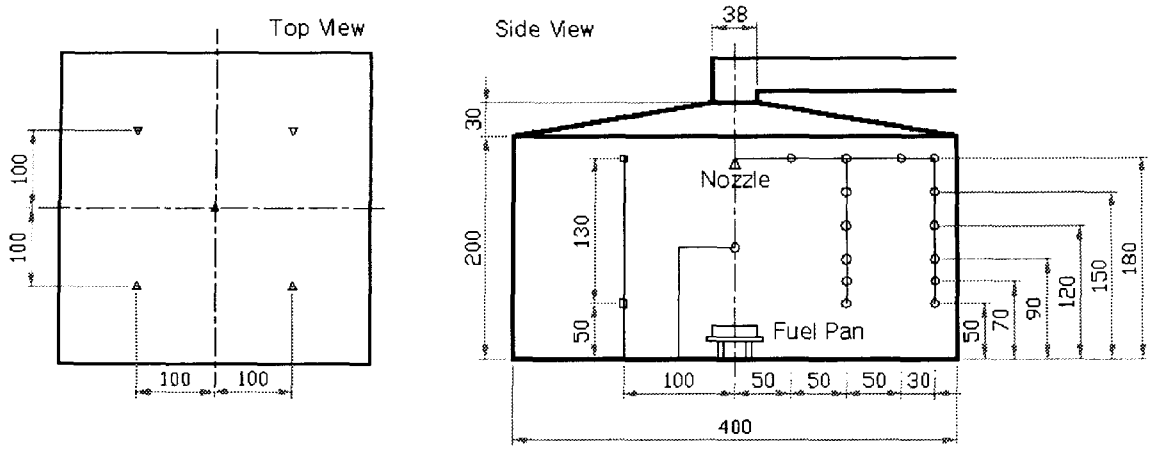


Fig. 1 A schematic of the experimental setup. [unit : cm]

용이 제한되어 왔다. 대신 할론1301 등과 같은 불활성 가스나 화학약제를 이용하여 왔으나 몬트리올 협정에 의해 Halon계 소화약제의 사용이 제한되고 국제 해사기구(IMO)에서 선박용 화재진압시스템으로 물분무 소화 장치를 요구함에 따라 물분무 화재 제어 시스템에 대한 연구가 다시 활발히 진행 중이다. 일반적으로 물분무에 의한 화재 제어의 기구는 미세 물입자에 의하여 화염 및 플럼(Plume)의 냉각효과, 액적 증발과정에서 발생하는 체적 팽창으로 인한 산소 차단효과와 물입자에 의한 복사열 차단효과 등이 지배적이다. 이러한 화재제어기구는 어느 한 요소에 의해 지배되는 것이 아니라 각각의 제어 기구가 복합적으로 작용하게 되고 화원의 크기, 종류 및, 화재 공간의 특성 등과 화재 특성에 의해서도 영향을 받게 된다. 최근 물분무 화재 제어시스템에 대한 연구로는 M. Morita 등은 풀화재에 대한 물분무 화재 실험을 통하여 풀화재의 화재 진압요소가 증발잠열, 열용량, 산소농도 및 연료의 냉각효과 등에 의해 지배되며 이중 연료 냉각효과의 영향이 다른 효과에 비해 상대적으로 작다는 사실을 제시하였다.<sup>(1)</sup> B. Yao 등은 제한된 공간내에서 에탄올 및 고체연료 연소실험을 통하여 소화를 위해서는 충분한 유량의 물분무가 제공되어야 하고 외부와의 환기량이 적을수록 소화효과는 증가하는 것으로 나타났다.<sup>(2)</sup> K. Prasad 등은 메탄올 풀화재에 대한 물분무의 상호작용을 수치해석적으로 접근하여 소화기구의 상대적인 기여도를 파악하였으며 연층의 온도, 연소량 및 발달량 변화에

관한 연구를 수행하였다.<sup>(3)</sup> 미국의 USCG에서는 비교적 큰 화재 공간인 선박의 기관실에 대하여 상용물분무 화재제어시스템의 소화실험을 통하여 각 시스템의 소화특성을 파악하였으며 동일 작동 조건에 대하여 소화시간은 화원이 클수록 감소한다는 사실을 제시하였다.<sup>(4)</sup> 한편 2000년 2월, 유럽 5개국은 새로운 화재감지와 소화시스템에 대한 연구공동체(FIREDETEX Project)를 구성하여 그중 물분무 소화시스템에 대하여 활발한 연구가 진행 중이다.<sup>(5)</sup> 그러나 물분무 소화 장치에 대한 연구는 연구실수준의 규모가 작은 화재에 대한 현상을 파악하는 수준이며 화재 공간내부의 분무와 화염의 상호관계 및 화재실 내부의 열전달 특성과 같은 연구결과는 아직도 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이전 연구를 통해 개발된 물분무 노즐을 이용하여 공간 화재에 대한 화재 실험을 통해 연소 제어 특성 및 열전달 특성을 파악하고자 한다. 또한 본 연구 결과를 통하여 물분무 소화 장치 및 수치해석에 대한 기초적인 연구자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

물분무 화재 제어 실험을 위하여 길이 4 m, 폭 4 m, 높이 2.3 m 크기의 화재실을 제작하였다. 화재실의 형상 및 주요 치수는 Fig. 1과 같다. 화재 진화후 연소가스를 효율적으로 배출하기 위하여 화재실의 상부는 후드형태로 제작하였으며 실

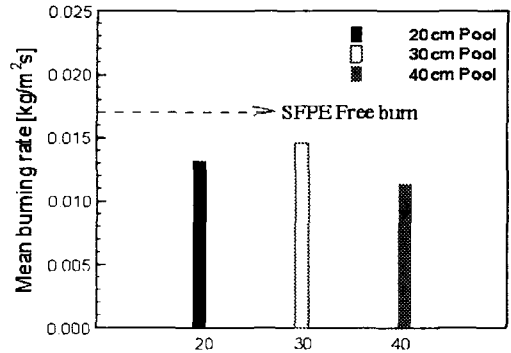
**Table 1** Specifications of the tested nozzle

Sauter Mean Diameter (SMD)	121 $\mu\text{m}$
Spray angle	Outer : 90° Inner : 70°
Operating pressure	13 bar
K-factor	1.66
Spray pattern	Hollow cone type

험도중에는 급배기 효과를 배제하기 위하여 화재실은 밀폐되었다. 화재 발생으로 인한 온도상승 및 물분무에 의한 냉각효과를 측정하기 위하여 화재실 내부에 열전대(K-type)를 설치하였다. 수직방향의 온도분포는 화원에서 각각 1 m와 1.8 m 떨어진 위치에 수직열전대를 설치하였으며 바닥에서의 위치는 각각 0.5 m, 0.7 m, 0.9 m, 1.2 m 및 1.5 m 위치에 설치되었다. 천정부근의 온도분포를 파악하기 위하여 중심에서 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 및 1.8 m 위치에 각각 열전대를 설치하여 상부연층의 온도를 측정하였다. 화재실 내부의 산소농도 및 연소생성물의 농도를 파악하기 위하여 가스농도분석계를 이용하였다. 상부에서는 일산화탄소와 이산화탄소의 농도를 측정하였으며 연료의 연소화 관련있는 하부에서는 산소와 이산화탄소의 농도를 측정하였다. 화원의 발열량을 산정하기 위하여 물분무를 작동시키지 않은 상태에서 로드셀(Load cell)을 이용하여 시간에 따른 연료의 증발량을 측정하여 기준발열량을 산정하였다. 또한 전체 물분무 시스템에 공급되는 체적유량과 관내 압력을 측정하기 위하여 관의 분기가 시작되는 지점에 유량계와 압력계를 설치하였다.

**2.2 물분무 시스템**

화재 제어 실험에 이용된 물분무 노즐은 압력형 물분무 노즐로써 스윙방식의 중공형 분무노즐을 이용하였으며 화재실에 대하여 Fig. 1과 같이 5개의 노즐을 설치하였다. 작동 조건에 대한 분무 노즐에 대한 개략적인 분무특성은 Table 1과 같다. 물분무의 작동조건은 천정에 위치한 열전대의 온도가 85°C 될 경우 물분무 시스템을 가동하였다. 분무유량에 따른 화재 제어특성을 파악하기 위하여 분사유량을 4~6 lpm까지 변경하여



**Fig. 2** Mean burning rate of methanol

**Table 2** Heat release rates for various fire sources

Fuel type	Pool size[cm]	Heat output[kW]
Methanol	30 cm	22.89
	40 cm	32.57
n-Hexane	30 cm	114.51
	40 cm	198.55
Gasoline	30 cm	82.90
	40 cm	130.60

실험을 수행하였다.

**2.3 화원**

화원의 발열량 및 연료에 따른 물분무 소화 특성을 파악하기 위하여 세 종류의 연료와 2 가지 크기의 화원을 사용하였다. 화원은 강철재질의 정사각형의 용기로서 각 변의 길이는 각각 30 cm 그리고 40 cm이며 높이는 5 cm로 제작하였다. 사용 연료는 탄화수소계 연료인 n-Hexane ( $\text{n-C}_6\text{H}_{14}$ )과 가솔린 그리고 알콜계 연료인 Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )을 이용하였다. 화원의 발열량은 물분무가 없는 조건에 대하여 다음식에 의해 계산되었다.<sup>(6)</sup>

$$Q = \dot{m} \Delta H_C \tag{1}$$

여기서  $\dot{m}$ 과  $\Delta H_C$ 는 각각 연료의 증발량과 연소열을 나타내고 있다. Figure 2는 화재실 내부에서의 메탄올에 대해 측정된 평균 연소량을 나타내고 있다. 평균 연소량은 SFPE의 Free burn

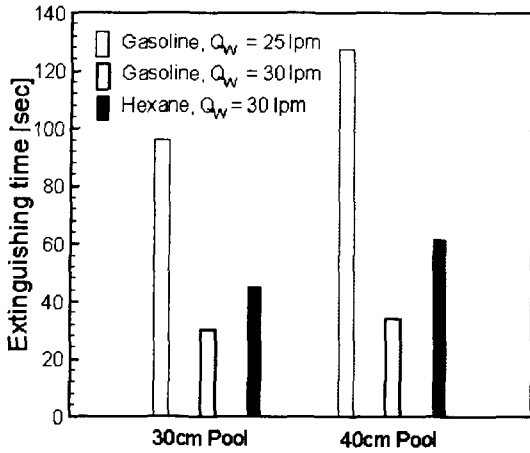


Fig. 3 Comparisons of suppression time

상태의 제시된 값보다 다소 작은 값을 보이고 있다.<sup>(7)</sup> 이것은 화재실 내부의 공간상의 제약으로 인한 유입공기의 감소 영향과 연료의 순도등에 의한 것으로 사료된다. 전체 사용된 화원에 대한 발열량은 Table 2와 같다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 소화작용

일반적인 화재실내의 물분무 화재 제어시스템에 의한 소화현상은 분무에 의한 냉각효과와 증발된 수증기의 체적팽창에 의한 산소차단효과가 지배적이다. 동일 분무조건 하에서 화원과 소화시간과의 관계는 화원의 면적이 클수록 많은량의 산소를 필요로 하고 이에 따라 LOI(Limiting Oxygen Index)에 도달하는 시간이 빨라지므로 소화시간은 짧아지는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 그러나 이러한 현상은 상대적으로 큰 화원에 대해서나 장애물에 의해 화원의 직접냉각이 제한되는 경우 산소차단의 효과가 지배적인 환경에 대하여 주로 성립된다. 따라서 본 연구에서는 화염이 분무에 의해 직접 노출되어 물분무에 의한 화염냉각이 있는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. Figure 3은 전체 물분사량이 25 lpm과 30 lpm인 경우의 소화시간을 비교하였다. 소화시간  $\Delta t_{ext}$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta t_{ext} = t_s - t_d \quad (2)$$

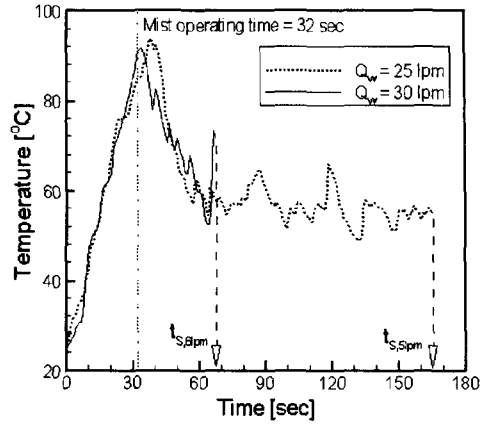


Fig. 4 Ceiling temperatures and suppression times with water flow-rate

여기서  $t_s$ 와  $t_d$ 는 각각 점화이후 소화되는데 까지 걸린시간과 점화 이후 물분무를 작동하는데 걸린시간을 나타낸다. 가솔린과 헥산 모두 화원의 크기가 증가함에 따라 소화시간도 증가함을 보여주고 있다. Figure 4는 40 cm 가솔린 화원에 대하여 물분사량에 따른 천정에서의 온도변화 및 소화시간을 보여주고 있다. 물분사량이 증가함에 따라 소화시간은 감소하는데 물분사량이 30 lpm인 경우의 소화시간이 25 lpm인 경우에 비해 3배 이상 빨리 소화작용이 이루어진다는 사실을 파악하였다. 가솔린과 헥산의 연료에 따른 소화시간은 발열량이 큰 헥산의 경우가 소화시간이 더 길게 나타났다. 한편 메탄올 화재의 경우 물분무 작동이후 화염의 높이는 크게 감소하였으나 10분이 경과하여도 소화는 이루어지지 않았다. 이러한 현상은 메탄올의 이론산소요구량이 상대적으로 작아 작은량의 산소로도 지속적인 연소가 가능하고 발열량이 상대적으로 작기 때문에 증발되는 물분무량이 작아 산소차단효과가 크지 않기 때문인 것으로 파악된다. 그러나 상대적으로 이론산소요구량이 큰 가솔린이나 헥산의 경우 화염의 냉각효과와 함께 증발된 수증기의 산소차단으로 인하여 물분무 작동이후 1분정도 이내에 소화가 이루어졌다.

#### 3.2 연층의 냉각효과

소화작용과는 별도로 물분무에 의해 연층의 냉각에 의한 화재 제어 효과는 물분무 시스템

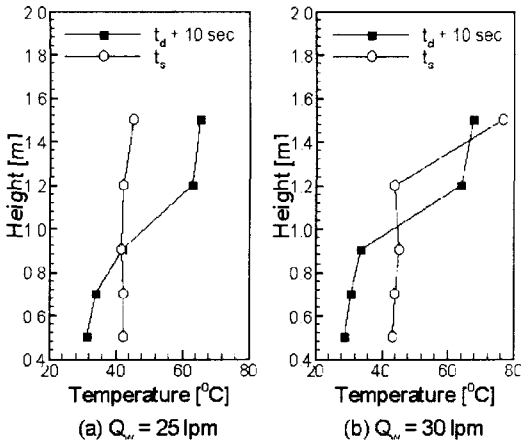


Fig. 5 Vertical temperature profiles for gasoline pool fire ( $D_p=0.4$ ) at the different times

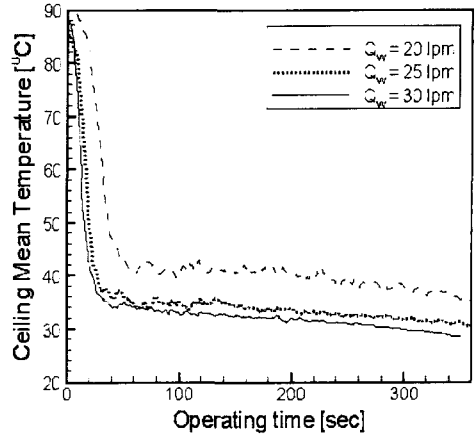


Fig. 6 Mean ceiling temperatures with total water flooding rates

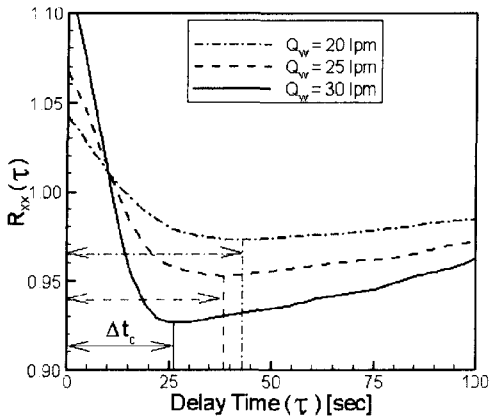


Fig. 7 Auto-correlation function of mean ceiling temperature for methanol fire ( $D_p=0.4$ )

Table 3 Threshold time of the initial cooling regions for methanol fire ( $D_p=0.4$ )

Pool size	20 lpm	25 lpm	30 lpm
30cm	65.8 sec	46.1 sec	36.2 sec
40cm	42.2 sec	37.6 sec	26.8 sec

의 중요한 역할중의 하나이다. Figure 5는 40 cm 가솔린 화재에 대하여 화원에서 1 m 떨어진 위치에서의 물분무장치 작동이후 10초 경과후와 소화되는 순간의 수직방향 온도분포를 나타내고 있다. 분사유량이 25 lpm인 경우 소화시간이 상대적으로 길기 때문에 연층이 충분히 냉각된후 소화가 이루어지게 된다. 그러나 분사유량이 30 lpm인 경우 짧은 소화시간으로 인하여 연층이 충분히 냉각되기도 전에 소화작용이 이루어지기 때문에 상부연층의 온도가 상대적으로 높게 나타났다. 한편 메탄올 화재의 경우 주어진 분사유량에 대하여 장시간동안 연소가 지속되기 때문에 시간

에 따른 연층의 냉각효과를 파악하였다. Figure 6은 40 cm 메탄올에 대하여 연층의 온도가 최고 온도에 도달한 이후 분사유량에 따른 연층의 평균온도 변화를 시간에 따라 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연층의 평균온도는 물분무 분사이후 급격히 하락하는 초기냉각구간과 일정 시간이후( $\Delta t_c$ )에 점진적으로 하락하는 경향을 보이게 된다. 이러한 냉각효과는  $\Delta t_c$ 를 기준으로 두 영역으로 분류되고 이때의  $\Delta t_c$ 는 자기상관함수(Auto-Correlation Function)를 계산하여 상관도의 최저값을 나타내는 순간의 지연시간(Delay Time) 값을 초기냉각이 이루어지는 시간으로 간주하였다.

$$R_{xx}(\tau) = \frac{x(t) \cdot x(t+\tau)}{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt} \quad (3)$$

메탄올 화재에 대한  $\Delta t_c$ 는 Table 3에 정의되어 있다.

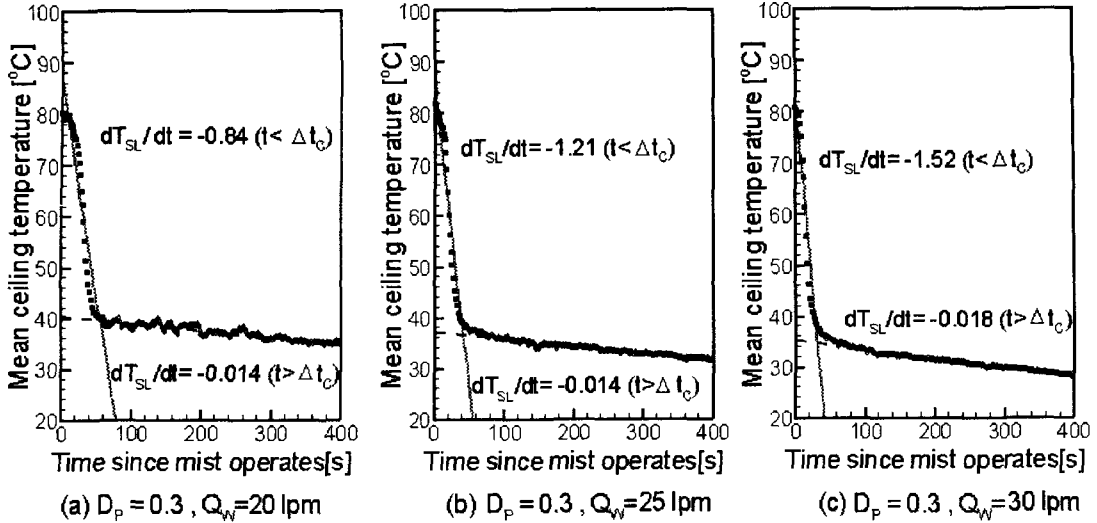


Fig. 8 Variation of ceiling temperature for methanol fire ( $D_p=0.3$ ) with different water flow-rate

Table 4 Temperature decreasing rates of the methanol fire [ $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ]

Pool size	20 lpm	25 lpm	30 lpm
30cm	0.84	1.21	1.52
40cm	1.36	1.64	2.36

초기 냉각이 이루어지는 시간구간  $\Delta t_c$ 는 화원의 크기와 물분사량이 클수록 더 빨라진다는 사실을 파악할 수 있다. Figure 8은 30 cm 메탄올 화재에 대한 천정에서의 평균 온도 변화를 나타내고 있다. 각구간은  $\Delta t_c$ 를 기준으로 선형적인 관계를 보이고 있다. 후기 냉각구간의 온도 변화율은 초기 냉각구간의 온도 변화율에 비해 상대적으로 무시할 수 있을 정도의 작은 변화를 보이고 있다. Table 4는 메탄올 화재에 대한 시간에 따른 온도감소율을 보이고 있다. 물분사량이 증가할수록 연층의 온도감소율은 크게 나타났으며 동일 분사유량에 대해서는 화원의 크기가 클수록 온도감소율이 크게 나타났다. 40 cm 메탄올 화재에 대하여 물분사량이 30 lpm인 경우 온도감소율이 가장 크며 연층의 온도를 1 $^{\circ}\text{C}$  냉각시키는데 이 경우 필요한 물분사량은 약 12 lpm 정도로 나타났다. Figure 9는 메탄올 화재에 대한 분사유량이 30 lpm인 경우의 화원 근처에서 시간에 따른 산소 및 이산화탄소 농도 분포를 나타내고 있다. 화재실 내부의 산소농도는 화원의 크기가 증가함에 따라

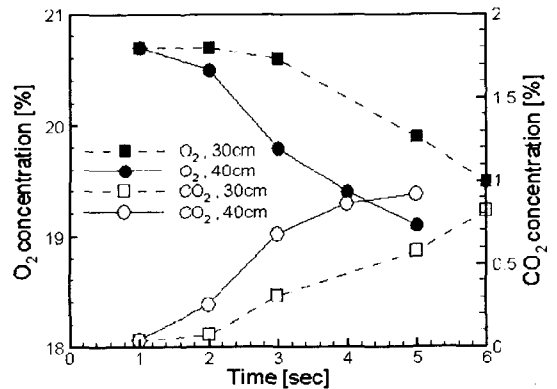


Fig. 10 Gas concentrations for the methanol fire with the water mist ( $Q_w=30$  lpm)

연소에 의해 소모되는 산소량이 증가하여 산소농도는 감소하였으며 반대로 이산화탄소의 농도는 증가하였다. 일반적으로 풀화재에 대한 가연산소량(LOI)은 13~18% 정도로 알려져 있는데 실험에서 측정된 값은 이보다 높게 형성되어 산소차단의 효과가 미미하게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 물분무에 의한 화재제어의 작동으로 인한 소화과정 및 열전달의 과정을 실적으로

로 파악하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 화원의 크기가 증가할수록 소화시간은 증가하였으며 분무유량의 증가가 소화시간에 큰 영향을 주었다. 이는 물분무에 의한 소화기구가 산소 차단효과와 함께 화염의 냉각효과가 크게 영향을 미치고 있음을 나타내고 있으며 탄소수소계 연료의 경우 적절한 분사유량에 대하여 소화시간은 1분 이내로 나타났다.

(2) 물분무에 의한 연층의 냉각은 임계시간을 기준으로 초기 급속냉각영역과 후기 냉각구간으로 분류되고 화원의 발열량과 분사유량이 증가할수록 초기냉각의 온도감소율은 증가하였다.

(3) 연층의 초기 온도감소율은 물분무 화재제어시스템의 초기 화재 진압 효과를 파악할수 있는 자료로써 연층의 냉각을 통하여 진실화재로의 성장을 막을수 있는 중요한 자료로 활용되어질 수 있다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업(M10113000012-01A2-90000600)지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

### 참고문헌

(1) Morita, M., Minami, T. and Kikkawa, M.,

2000, "Suppression Mechanism of Water Mist for Pool Fire," *15th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety*, Vol. 1, pp. 273~279.

(2) Yao, B., Fan, W. and Liao, G., 1999, "Interaction of Water Mists with a Diffusion Flame in a Confined Space," *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 129~139.

(3) Prasad, K., Li, C. and Kailasanath, K., 1999, "Simulation of Water Mist Suppression of Small Scale Methanol Liquid Pool Fire," *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 185~212.

(4) Back, G., Lattimer, B., Beyler, C., DiNenno, P. and Hansen, R., 1999, "Full-Scale Testing of Water Mist Fire Suppression SYstems for Small Machinery Spaces and Spaces with Combustible Boundaries-Volume I and II," Report No. CG-D-21-99, U.S. Coast Guard Research & Development Center.

(5) Kallergis, K.M., 2001, "New Fire / Smoke Detection and Fire Extinguishing Systems for Aircraft Applications," *Air and Space Europe*, Vol 3, No. 3/4

(6) Quintiere, J.G., 1997, *Principles of Fire Behavior*, Delmar Publishers.

(7) Babrauskas, V., 1988, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, pp. 2~1.2~15