

# 플룸을 통과하는 수적의 속도변화

## The variation of droplet velocity in a fire plume

김진국 / 방재연구실 선임연구원, 공학박사

### - Abstract -

The objective of this paper is to present an equation which can give some insight of the behavior of droplet in a fire plume. The equation is derived with a number of engineering relations drawn from the literature for calculating properties of fire plume. Plume properties considered here include temperatures, velocities and virtual origin. In addition, the drag force for a sphere and the energy equation are considered.

## 1. 서론

국내의 경우에는 스프링클러의 성능을 평가하기 위해서는 여러 항목이 시험되고 있지만 시험에 합격하기 위해서 가장 주의해야 할 항목이 살수분포 [1]로 알려져 있다. 그러나 스프링클러의 본래 목적은 화재를 진압하는 것이므로 살수분포뿐만 아니라 ADD[2]와 관련된 수적의 직경 및 분사속도도 함께 고려되어야 한다. 살수분포 시험은 널리 알려진 바와 같이 스프링클러에서 나오는 물이 균일하게 분포되는 정도와 적정한 반경까지 분사되는 가를 평가하는 시험으로 살수분포가 좋은 경우에도 수적의 직경이 작고 분사속도가 낮은 경우에는 화염을 통과하여 연료의 표면에 도달하지 못한다. 이러한 경우 화재에 의하여 생성되는 플룸을 따라서 수적이 부유하게 되어 화재진압을 할 수가 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 문헌에서 주어지는 플룸의 관계식을 이용하여 수적의 유효성을 평가할 수 있는 관계식을 유도하였다.

## 2. 화재 플룸의 특성

플룸에서의 수적의 거동을 이해하기 위해서는 먼저 플룸의 특성을 알 필요가 있다. 따라서 아래에 간단히 플룸의 특성을 설명하였다. 화염으로부터 연료 표면으로 열전달이 일어나서 휘발성 연소성 가스가 발생하고 이 가스가 화염면에 들어가서 화염이 유지된다. 여기서 평균화염 길이,  $L$ ,은 다음과 같이 표현된다.[3]

$$L = -1.02D + 0.230Q^{2/5} \quad \dots (1)$$

여기서  $D$ 는 화원의 직경[m]이고  $Q$ 는 총 열발생율[kW]이다. 위의 식에서 알 수 있듯이 같은 열량을 갖는 화재의 경우에도 직경이 클수록 화염의 길이는 작아지고 같은 직경의 경우에도 열발생량이 많을수록 화염의 길이는 길어진다.

플룸의 경계 부분에서 공기의 유입이 일어나서 중앙 부분으로 이동하게 되므로 속도는 반경방향으로 가우스 분포를 가진다고 생각할 수 있다. 플

플룸 중앙의 유속  $u_c$  와 초과온도(excess temperature)  $T_c$ 는 다음과 같이 표현된다[3].

$$\Delta T_c = 9.1 [T_o / (g C_p \rho_o^2)]^{1/3} Q_c^{2/3} (z - z_o)^{-5/3} \dots\dots (2)$$

$$u_c = 3.4 [g / (C_p \rho_o T_o)]^{1/3} Q_c^{1/3} (z - z_o)^{-1/3} \dots\dots (3)$$

여기서  $Q_c$ 는 전체 발열량 중 대류부분을 나타내고,  $z$ 는 화원에서부터의 거리이다. 이 식은 화염 하류의 플룸에 대해서만 유효하며 화원에서 멀어질수록 초과온도값은 점점 감소하고 속도도 떨어짐을 알 수 있다. 이로부터 화재에서 발생한 플룸은 화염의 선단부에서 가장 빠른 속도를 가짐을 알 수 있고, 위로 상승을 하면서 주위공기의 유입에 의하여 온도와 속도가 감소하게 될 것이라는 물리적인 개념과 잘 일치한다. 그리고  $z_o$ 는 가상점 화원(virtual origin)[4] 으로 다음과 같이 표현된다.

$$z_o = -1.02D + 0.083 Q^{2/5} \dots\dots(4)$$

가상점화원은 화염 하류의 플룸 속도 및 온도 분포가 유사성을 갖는다는 것을 이용하기 위하여 도입된 개념적인 화원이다.

### 3. 수적의 직경 및 속도에 따른 항력

스프링클러에서 분사된 수적은 화재를 진압하기 위하여 플룸으로 들어가야 한다. 플룸은 부력에 의하여 상승속도를 가지고 있다. 따라서 수적에 대한 플룸의 상대속도에 의하여 수적은 저항을 받게 된다. 수적의 모양은 정확하게 구 모양은 아니지만 계산을 편리하게 하기 위하여 구로 가정한다. 유동장에 존재하는 구에 발생하는 항력(drag force)은 다음과 같이 표현된다[5].

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho_a u_r^2 \frac{1}{4} \pi d^2 \dots\dots (5)$$

여기서  $\rho_a$ 는 플룸의 밀도,  $d$ 는 수적의 직경,  $u_r$ 는 수적에 대한 플룸의 상대속도이다.  $C_d$ 는 항력계수(drag coefficient)로 다음과 같이 표현된다[5].

$$C_d = \frac{24}{Re} \dots\dots (6)$$

여기서  $Re$ 는 수적의 직경, 수적에 대한 플룸의 상대속도, 플룸의 점성을 기준으로하는 Reynolds 수이다.

### 4. 수적의 속도 변화

스프링클러에서 분사된 수적은 중력에 의하여 가속되고 플룸에 의한 저항으로 감속을 받게 된다. 중력의 경우는 일정한 중력가속도로 쉽게 처리가 가능하지만 플룸의 저항력은 위치에 따라서 상대속도 및 온도 값이 달라지므로 쉽게 처리할 수 없다. 본 연구에서는 스프링클러의 분사에 따른 플룸의 변화와 수적의 증발을 무시하고 단순히 수적과 플룸의 속도만을 고려하였다.

$z_1$ 에서의 수적의 속도를  $u_1$ 이라고 하면, 에너지 보존법칙에 의하여 미소시간 동안  $\Delta z$  이동한 수적의 위치  $z_2$ 에서의 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{2} m u_1^2 + (mg - F_d) \Delta z = \frac{1}{2} m u_2^2 \dots\dots (7)$$

여기서  $m$ 은 수적의 질량으로  $\rho_w V$ 로 표시되고,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $V$ 는 수적의 체적을 나타낸다.

따라서  $u_1$ 의 수적이  $\Delta z$ 만큼 이동하였을 경우의 유속  $u_2$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_2 = \sqrt{(mg - F_d) \Delta z + \frac{1}{2} m u_1^2} \dots\dots (8)$$

하지만  $F_d$ 는 (5),(6)식에서 보는 것처럼 플룸의 유속과 온도에 의하여 결정된다. 그러므로  $F_d$ 를 정확하게 구하는 것이 수적의 운동을 기술하는 데에 있어 가장 핵심적인 내용이다. 본 연구에서는 문헌에 주어진 플룸의 관계식을 이용하여 저항력  $F_d$  계산에 필요한 물성치를 구하였다.

### 5. 저항력 계산과정

$F_d$ 를 계산하기 위해서는 (5),(6)식에 기술된 모

든 인자의 값을 알아야 한다. 먼저 (4) 식을 사용하여 가상점화원의 위치를 구할 수 있는데 연료에 따라서 발열량과 화원직경의 관계는 다르다. 많은 연료가  $1\text{m}^2$ 당  $0.5\sim 1\text{ kW}$ 의 발열량을 가지고, 정확한 발열량을 사용하기 위해서는 문헌을 참조하여야 한다. 가상점화원이 구해지면 (3),(4)식을 이용하여 플룸의 온도와 속도를 구할 수 있다. 비열과 온도는 주위 공기를 기준으로 사용하고 다만 총발열량에서 대류발열량의 비율은 연료의 특성이므로 관련 문헌을 참조하여야 되고 화재모델링에서는 0.7 값을 많이 사용하고 있다.

Re 수는 플룸의 온도를 기준으로 밀도와 점성을 계산하면 계산에 필요한 모든 물성치는 구해진다.

## 6. 수적의 속도와 ADD

앞에서 언급한 바와 같이 플룸의 유속은 화염의 선단부에서의 최고값을 갖는다. 따라서 수적이 연료 표면에 도달하기 위해서는 하류에 있는 플룸을 통과하여 화염선단부에 도달해야한다. 수적이 화염에 도달하면 냉각 및 질식효과에 의하여 화염의 반응속도를 감소되고 따라서 화염에서 발생하는 발열량을 감소한다. 그러므로 화염후류의 플룸의 유속 또한 감소하므로 뒤에 따라오는 수적은 더 쉽게 화염에 접근할 수 있을 것이다. 결과적으로 화염에 일단 수적이 진입하면 수적은 연료면에 도달할 수 있다고 가정할 수 있다. 그러므로 앞절에서 주어진 플룸의 온도와 유속에 관한 관계식이 화염 후류의 플룸만을 기술하는 것이지만 연료표면에 도달하는 수적을 계산하는 데에 사용할 수 있다.

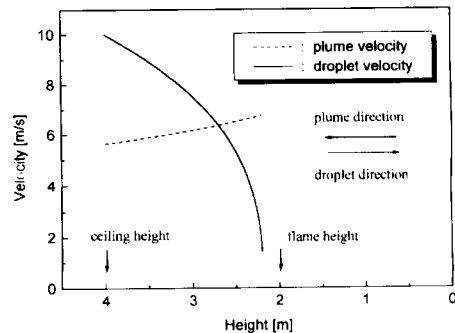
## 7. 플룸과 수적의 속도 계산

직경 1.5m의 메틸알코올을 사용하는 경우 총 발열량이 844 kW로 알려졌다. 이 경우에 화원으로부터 4m 위의 스프링클러가 10 m/s의 속도로 분사되고 입자의 크기는 0.5mm인 경우에 대하여 계산을 수행하여 그림.1에 그 결과를 나타내었다. Fortran을 사용하여 프로그램을 작성하였고 부록.A

에 제시하였다. 화염의 길이는 약 2m이므로 계산을 2m까지 수행할 수 있다. 실제 스프링클러에 대하여 적용하는 경우에는 수적의 크기 및 분사속도를 측정해야 한다. 본 연구에서는 정성적인 효과만을 살펴본다. 2.절에서 설명한 바와 같이 화염상부로 갈수록 플룸의 유속은 감소한다. 수적의 경우는 화원으로 가까이 올수록 플룸의 속도는 증가하기 때문에 수적의 속도는 급격히 떨어진다. 본 계산의 경우는 수적이 화염에 닿지 못하고 플룸에 의하여 날려가게 된다. 따라서 더 높은 속도로 분사되어야 화재진압을 할 수 있을 것이다.

## 8. 결 론

- 1) 화재 진압을 위한 스프링클러의 성능을 평가하기 위해서는 살수분포뿐만 아니라 수적의 크기 및 속도도 고려해야 한다.
- 2) 화재 플룸의 특성을 나타내는 관계식을 정리하였다.
- 3) 수적의 운동에 영향을 주는 항력에 관한 관계식과 계산방법을 제시하였다.
- 4) 에너지 방정식을 이용하여 미소거리 이동시 수적의 속도변화를 구하는 식을 제시하였고, Fortran 언어를 사용한 프로그램을 작성하였다.
- 5) 플룸의 유속에 비하여 수적의 유속이 진행방향으로 더 급격한 감소를 보이고, 주어진 예에서 분사속도가 낮을 경우 스프링클러에서 분사된 수적이 화재에 접근하지 못하고 플룸에 의하여 날려갈 수 있음을 보여주었다.



[그림 1] 위치에 따른 플룸과 수적의 유속

## 참고문헌

- [1] 스프링클러헤드의검정기술기준, KOFEIS 0501
- [2] ESFR Updat Vol,2, N0,1
- [3] G. Heskestad, Engineering Relations for fire plumes, Fire safety J., Vol,7, pp,25-32, 1984
- [4] G. Heskestad, Virtual origins of fire plumes, Fire Safety J., Vol,5, p,109, 1983
- [5] F. M. White, Viscous fluid flow, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1991

## 부 록

program drop\_velocity

C----- Initial Condition -----

c dd = the diameter of droplet [m]  
 c df = the diameter of pool fire [m]  
 c hc = the hight of ceiling [m]  
 c Lf = the flame height [m]  
 c qt = the total heat release rate of fire [kW]  
 c qc = the convective portion of qt [kW]  
 c rho\_w = the density of water [kg/m<sup>3</sup>]  
 c vi = the exit velocity of water from a sprinkler orifice [m/s]  
 c z0 = virtual origin [m]

c----- Variables -----

c cd = drag coefficient  
 c dt = time interval [s]  
 c rho = the density of plume [kg/m<sup>3</sup>]  
 c tc = the excess temperature of plume [k]  
 c uc = the maximum velocity of plume at the ceiling [m/s]  
 c vis = the viscosity of plume [Pa S e-6]  
 c vw = velocity of a droplet [m/s]

c z1 = the distance from a ceiling [m]  
 c z2 = the distance from a fire floor [m]

c  
 open(1,file='out.dat')  
 open(2,file='prt.dat')  
 dd = 0,0005  
 df = 1,5  
 dt = 0,01  
 hc = 4,  
 qt = 884  
 qc = qt \* 0,8  
 vi = 10,

c  
 Lf = -1,02 \* df + 0,235 \* qt \*\* 0,4

c a fitted-curve of viscosity of air

C Parameter Value Error

c-----  
 A = 2,52083  
 B1 = 0,06178  
 B2 = -3,09765E-5  
 B3 = 8,23602E-9

c-----  
 C vis = A + B1 \* X + B2 \* X<sup>2</sup> + B3 \* X<sup>3</sup>  
 C X = absolue temp.

c  
 rho\_w = 998,  
 vw = vi  
 z1 = 0,  
 z2 = hc

c  
 cu = 3,4 \* (9,8 / (1, \* 1,22 \* 290)) \*\* (1/3) \* qc \*\* (1/3)  
 ct = 9,1 \* (290 / (9,8 \* 1,22 \* 1,22 \* 1 \* 1,)) \*\* (1/3) \* qc \*\* (2/3)  
 z0 = -1,02 \*\* df + 0,083 \* qt \*\* 0,4  
 write(1,\*) ' flame height [m] = ', Lf  
 write(1,\*) ' virtual origin [m] = ', z0  
 write(1,\*) ' z2, tc, uc, vw, re'

c

```

do 100 i=1,1000
uc=cu/(z2-z0)**(1./3.)
tc=290.15+ct/(z2-z0)**(5./3.)
vis=(A+B1*tc+B2*tc*tc+B3*tc**3)
*1e-6
rho=1.294*273.15/tc
ur=uc+vw
re=rho*ur*dd/vis
write(1,*)z2,tc,uc,vw,re
write(2,*)z2,tc,vis,rho

if(z2,le,Lf) go to 900
cd=24./re
vw=sqrt(vw*vw+(19.6-1.5*(cd/dd)*
(rho/rhow)*ur*ur)*vi*dt)
z1=z1+vw*dt
z2=hc-z1
100
900 stop
end

```

### '97 방재기술실무교육(모집교육) 연간 일정표

구 분	차 수	과 정	월 일	구 분	차 수	과 정	월 일	
'97. 4월 (2회)	모집1차	전문과정	4. 21 ~ 24	11월 (5회)	모집13차	전문과정	11. 3 ~ 6	
	모집2차	일반과정	28 ~ 30		모집14차	일반과정	13 ~ 15	
	5월	모집3차	일반과정		5. 19 ~ 21	모집15차	전문과정	17 ~ 20
	6월	모집4차	전문과정		6. 2 ~ 5	모집16차	일반과정	24 ~ 26
7월 (2회)	모집5차	일반과정	7. 14 ~ 16		모집17차	일반과정	27 ~ 29	
	모집6차	전문과정	21 ~ 24		12월 (3회)	모집18차	전문과정	12. 1 ~ 4
8월	모집7차	전문과정	8. 11 ~ 14			모집19차	일반과정	8 ~ 10
(2회)	모집8차	일반과정	28 ~ 30	모집20차		일반과정	11 ~ 13	
9월	모집9차	전문과정	9. 8 ~ 11	'98. 3월 (5회)	모집21차	전문과정	'98. 3. 2 ~ 5	
	모집10차	일반과정	10. 9 ~ 11		모집22차	일반과정	9 ~ 11	
10월 (3회)	모집11차	일반과정	20 ~ 22		모집23차	일반과정	12 ~ 14	
	모집12차	전문과정	27 ~ 30		모집24차	전문과정	16 ~ 19	
					모집25차	전문과정	23 ~ 26	

\* 교육문의 : 0337-83-9864(담당실 : 인증연구실)