

미세 물분무 노즐의 유동특성에 관한 연구

유우준 · 한용택 · 김창섭* · 김창* · 유홍선**†

한국소방산업기술원, *(주)지에스하이텍, **중앙대학교

An Investigation on the Flow Characteristics of Water Spray Nozzle

You Woo Jun · Young Tak Han · Chang Seob Kim* ·
Chang Kim* · Hong-Sun Ryou**†

Korea Fire Institute

*GS Hitec. Co. LTD.

**Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received August 11, 2015; Revised August 19, 2015; Accepted August 24, 2015)

요 약

본 연구에서는 노즐의 형상변화에 따라서 방사유량, 살수분포 그리고 액적크기를 측정하였다. 이를 위해서 중심부 직경이 6.0 mm이고 반지름 방향 방사각도가 142°와 148°인 이중 구조의 미세 물분무 노즐(LPN142, LPN148) 형상을 제작하여 UL2167 시험규격에 의해서 살수분포와 분사거리의 관계를 정량화하였다. Helium-Neon 레이저에 의한 광학적 분석 방법을 적용하여 방사유량 변화에 따라서 웨버 수와 액적 크기 그리고 방사각도에 관한 경험식을 구하였으며, 전달 방정식의 주요인자인 소멸 항과 액적크기의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 이중 구조의 미세 물분무 노즐은 최소허용 유량범위가 결정된 경우 작동압력, 분사거리, 액적 직경을 예측하여 화재특성을 분석함으로써 노즐 선정이 가능할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

In this study, the relations of flow rate, discharging distance and droplet size are measured in accordance with the nozzle shape. The dual type nozzles of LPN142 and LPN148, which have identical core diameter (6.0 mm) and the different radial injection angles ($\theta_2 = 142^\circ$ and 148°), are manufactured. The distribution diameters with discharging distance are quantified by UL2167 test standard. The relations between discharging angle and droplet sizes, which are measured by the method of Helium-Neon laser equipment, are obtained by the empirical correlation as working pressure increase. Moreover, the extinction coefficient, which is major parameter of the radiative transport equation (RTE) is analyzed with variable droplet sizes. Thus, it is possible to opt the nozzle's shape by analyzing the relations of working pressure, spray distance, droplet size and fire characteristics at minimum allowable flow rate.

Keywords : Dual type nozzle, Sauter mean diameter, Fire intensity, Webber number, Extinction coefficient

1. 서 론

철도 및 도로 터널과 같이 출입구가 개방된 구획 공간은 대기와 내부 공간의 경계가 없는 형태이지만 화재 시 가연물의 종류, 발화원의 위치, 내부체적, 개구부의 크기 등에 따라서 화재 특성이 달라진다⁽¹⁻³⁾. 이러한 구획 화재를 효과적으로 진압하기 위해서는 플래시오버(flash over)에 도달하기 이전에 소화설비가 작동되어야 하지만 공간의 개구 면적이 작고 반 밀폐된 구획에서는 보다 쉽게 환기부족 화재에 도달하고 실시간 화재특성이 크게 변하는

특징을 갖고 있다^(2,3). 구획화재의 비정상화재 특성에 관한 선행 연구로써 Senegirev 등⁽⁴⁾은 환기부족상태에서 화원과 출입구의 거리변화를 통해 연료유량에 따른 화재강도를 측정하였으며, Makhviladze 등⁽⁵⁾은 연료종류, 화원의 위치, 구획형상 및 환기면적 등 보다 다양한 조건에서 출화시간 및 비정상 화염거동을 분석하였고, Chen 등⁽⁶⁾은 고온 상층부의 온도 상승률과 플래시오버의 상관관계에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 화재성장을 예측하거나 모델링하기 위한 연구가 활발함에도 불구하고 소화설비용 노즐의 유동현상을 고려한 화재특성에 관한 연구는 부

†Corresponding Author, E-Mail: cfdmec@cau.ac.kr
TEL: +82-2-820-5280, FAX: +82-2-813-3669

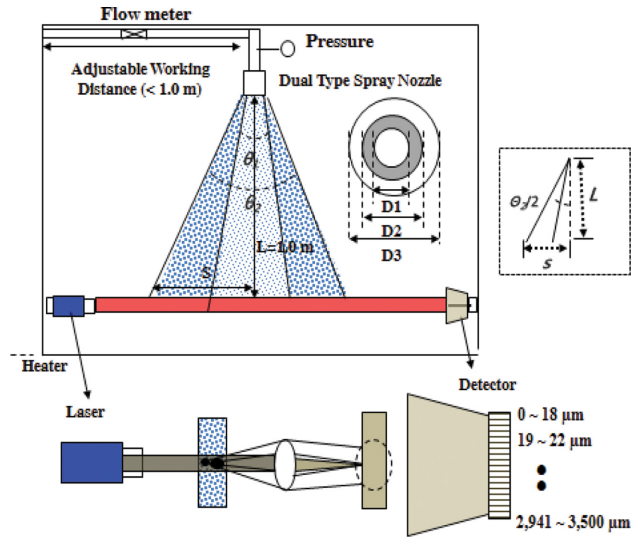


Figure 1. Schematic diagram of the measurement apparatus for droplet size.

죽은 상태이다. 특히, 노즐의 방사각도, 분사거리, 분포밀도 그리고 액적의 크기는 가연물이 산화제와 혼합되는 연소현상을 지속적으로 방해하기 때문에 화재강도는 노즐의 유동특성 변화에 지배적인 영향을 받게 된다. 이러한 유동특성이 화재성장에 미치는 영향을 분석한 기존 국내 연구 사례로 Kim⁽⁷⁾은 스프링클러의 작동 압력에 따라서 FDS 모델을 적용하여 화재제어 과정을 모사하고 기존 연구 결과와의 비교 분석을 통해서 반 밀폐된 구획 공간의 출입구에서 화재로 인한 연소가스 감쇄 방안에 관한 해석적 연구를 수행하였다. 하지만, 노즐에서 분사되는 유동현상은 화재 환경 조건에 따라서 불규칙한 상변화 과정을 겪기 때문에 화재특성을 고려한 소화설비용 노즐의 작동 성능에 관한 일반화된 관계식을 제시하는 것은 매우 어려운 문제이면서도 중요한 연구로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 미세 물분무 노즐의 형상인자 변화에 따라서 복사열을 감쇄하기 위한 방사각도, 분사거리 그리고 웨버 수(Weber number)에 따라서 액적크기와 소멸항의 관계를 분석하였다.

Table 1. Specification of the Experiment Apparatus

Components	Model	Specification
Test Chamber	• N/A	• Size (3 × 3) m
Droplet Measurement	• HELOS	• 0.1~3750 μm, 0.01~50% C _{opt} • HeNe Laser 632.8 nm, 5 mW
pressure	• S301 (Allsensor)	• (0~10.0) MPa • Accuracy ± (0.25% of f.s.)
Flow Meter	• UF801-P (UltrFlux)	• 1 mm/s~45 m/s, Response Time 0.2 s • 8 mm~1.0 m inner diameter • Accuracy ± (0.2 m/s + 3%f.s.)
Pump	• W5201 (DIBO)	• Range (0~20.0) MPa, (0~18.0) L/min

Table 2. Geometry of Dual Type Water Spray Nozzle

Test Sample	LPN 142	LPN 148
D ₁	1.9 ± 0.1 mm	1.9 ± 0.1 mm
D ₂	3.2 ± 0.2 mm	3.2 ± 0.2 mm
D ₃	6.0 ± 0.1 mm	6.0 ± 0.1 mm
S/L	2.904	3.487
θ ₁	60 ± 1°	60 ± 1°
θ ₂	142 ± 1°	148 ± 1°

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

본 실험에서 사용한 미세 물분무 노즐은 Figure 1과 같이 중심부와 반지름 방향으로 물이 분사되는 이중 구조의 형상을 갖고 있다. 전체 실험 과정은 그림에서 보듯이, 노즐의 방사각도에 따라서 유량과 압력을 측정하여 유량계수를 구하고 동일한 조건에서 단위면적에 분사되는 살수 분포와 액적크기를 측정하는 순서이며, 이를 소화설비용 노즐의 유동특성으로 정하였다. 액적의 크기를 측정하기 위한 입자 측정기(HELOS)는 렌즈의 크기에 따라서 측정 거리(working distance) 영역이 구분되어 있으며, 31개의 밴드(band) 구간에서 감쇄되는 빛의 회절 강도를 이용하는 원리로 실험장치 규격을 Table 1에 나타내었다.

2.2 노즐 유동특성 분석

본 연구에서 사용한 미세 물분무 노즐은 이중 오리피스 구조로써 내경(D1)과 외경(D3)에서 각각 미립화된 액적을 분사하며, 우수로에는 스윙(swirl)을 형성하였다. 실험에 사용한 노즐 LPN142와 LPN148은 최외각 각도(θ₂)를 제외한 내경(D1)과 외경(D3), 스윙(swirl) 등이 동일한 형상을 갖고 있으며, Table 2와 같다.

2.2.1 유량계수

Figure 2는 이중 구조의 미세 물분무 노즐(LP142, LPN148) 각각에 대해서 작동압력 변화에 따른 유량측정 결

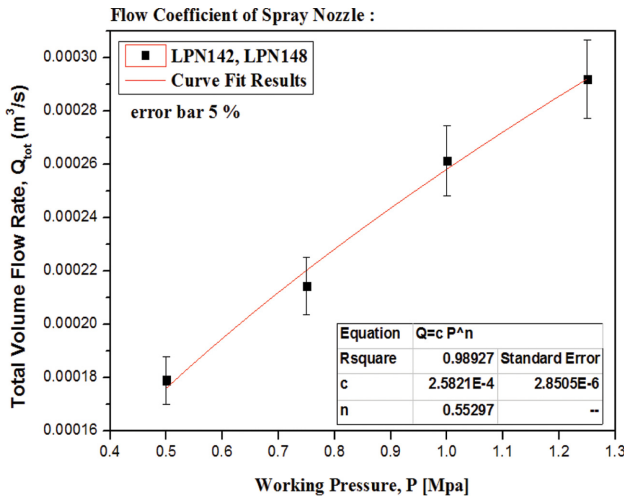


Figure 2. Flow rate VS. pressure for the flow coefficient of LPN142 and LPN148 nozzle.

과로 유량계수와 지수상수로 곡선 적합하면 식(1)와 같다.

$$Q_{tot} = C \times P^n \quad (1)$$

여기서, Q_{tot} , C , n 그리고 P 는 각각 총 방사유량(m^3/s), 유량계수($m^3/s/MPa^{1/n}$), 지수상수 그리고 작동압력(MPa)을 의미하며, Table 2에서 보듯이 θ_2 를 제외한 형상이 동일하여 LPN142와 LPN148 모두 R-square 0.99에서 유량계수가 0.000258이고 지수상수 n 은 0.55인 것을 확인할 수 있다.

2.2.2 분포시험 및 분사거리

Figure 3는 노즐의 작동압력 0.4 MPa인 경우 LPN142와 LPN148 각각의 노즐에 대해서 살수반경(r)에 따른 Q_s 을 식(2)로 곡선 적합한 후 식(1)에 의해서 노즐 끝단부에서 1 m 떨어진 지점에서 총 유량(Q_{tot})의 80%에 해당하는 분사거리(D)를 산출한 결과이다. 분사거리는 UL2167 시험 규격에 따라서 액적크기를 측정하기 위한 기준 거리를 선정하기 위한 것으로, 그림에서 보듯이 가 증가할수록 D 의 크기가 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다.

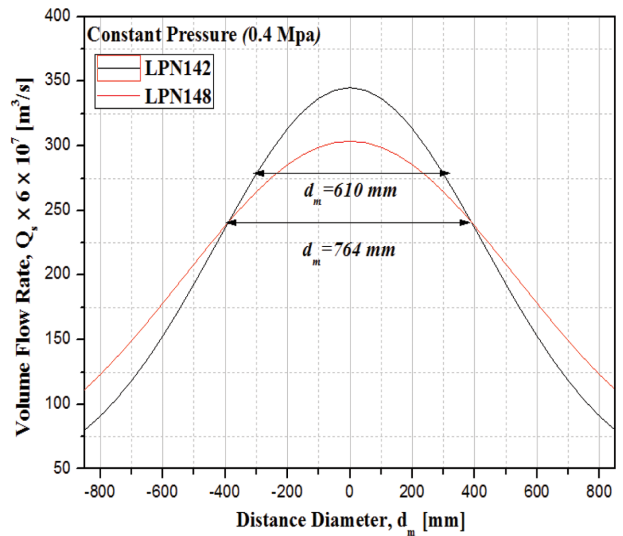


Figure 3. Volume flow rate VS distance (LPN142 and LPN148).

$$Q_s(r) = \left(A_0 + A_1 \times \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{r - A_2}{A_3} \right) \right] \right) \frac{1}{6 \times 10^7} \quad (2)$$

여기서, A_0 , A_1 , A_2 , A_3 는 살수분포 실험결과를 곡선 적합에 의해서 구한 상수이며, Q_s 와 r 은 채수통에 채워지는 체적유량(m^3/s)과 노즐에서부터의 반지름 방향 거리(mm)를 각각 의미한다. 따라서 식(1)과 (2)에 의해서 $r = D$ 일 때 $Q_s(D) = 0.8Q_{tot}$ 인 지점을 구할 수 있다.

Figure 4은 LPN142와 LPN148 노즐 각각에 대해서 작동압력 증가에 따른 D 의 크기를 식(3)과 같이 2차 곡선으로 적합한 결과이다.

$$D = A + B \times P + C \times P^2 \quad (3)$$

여기서 A , B , C 는 작동압력에 따라서 D 을 구하기 위한 실험상수이며, 약 1.0 MPa에서 변곡점이 형성된 이유는 작동압력이 증가할수록 중심부에 분사되는 유량이 상대적으로 증가하여 총 유량의 80%에 해당하는 거리가 감소한 결과이다.

Table 3. Distribution Coefficients with Various Working Pressure

Nozzle	Pressure (MPa)	A_0	A_1	A_2	A_3
LPN142	0.4	36.9413	2.41E-15	428.6528	308.3187
	0.7	19.0858	-1.24E-15	633.5702	428.9364
	1.0	-3.73171	8.89E-15	678.7168	520.3071
	1.3	-9.9978	-5.51E-16	670.2302	662.3843
LPN148	0.4	3.72E+01	4.92E-15	531.5592	266.5131
	0.7	-3.19E+01	-3.56E-15	849.8155	388.7447
	1.0	-114.09854	2.13E-14	938.215	590.4159
	1.3	-67.97891	-9.03E-15	783.635	628.4436

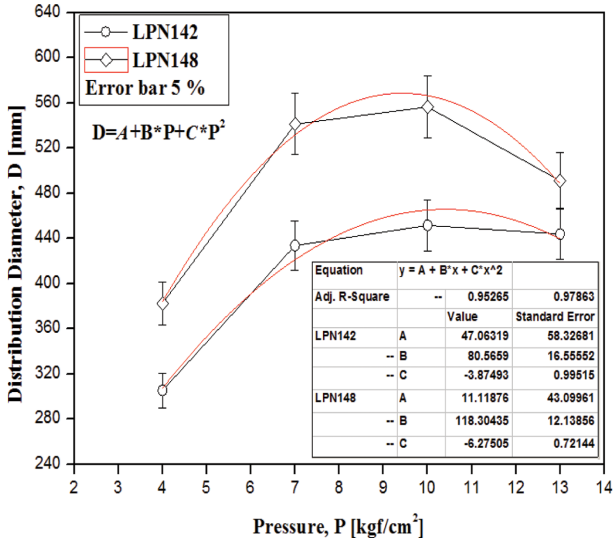


Figure 4. Distribution diameter VS pressure (LPN142 and LPN148).

2.2.3 분포 액적 측정

본 연구에서 사용한 이중구조의 노즐은 최외각과 중심부의 액적크기가 다른 구조로 (D/2)의 거리 전체에서 분사되는 액적 크기를 측정하였다. 액적의 크기는 Helium-Neon 레이저에 의한 광학적 분석 방법과 Frauhoffer의 이론을 적용한 HELOS 장비를 사용하여 분포함수(distribution function)와 누적분포(cumulative distribution)를 측정하여 산술-평균에 의한 방법을 적용하였다.

Heskestad et al.의 연구사례에서 보듯이 액적의 크기는 관성력에 대한 점성의 비를 의미하는 웨버 수의 -1/3 형태로 표현할 수 있다^(8,9).

$$d_m = C_{we} We^{-1/3} = C_{we} \left(\frac{\rho U^2 D_h}{\sigma_s} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

여기서 d_m , C_{we} , We , ρ , U , D_h 그리고 σ_s 는 각각 평균액적 직경, 웨버 계수, 웨버 수, 유체 밀도, 노즐 출구 유속, 수력직경 그리고 물의 표면장력을 각각 의미하며, 본 연구에서는 수력직경($D_h^2 = [D_1^2 + (D_3^2 - D_2^2)]$)을 사용하여 식(4)와 같은 Sauter mean diameter(SMD)에 의해서 식(5)의 관계를 분석하였다.

$$d_m (= SMD) = \frac{\int_{r_d=0}^{\infty} f(r_d) \times r_d^3 dr_d}{\int_{r_d=0}^{\infty} f(r_d) \times r_d^2 dr_d} \quad (5)$$

여기서, $f(r)$ 과 r_d 은 분포함수(distribution function)와 측정 체적 내에서 분포하고 있는 액적의 직경을 각각 의미한다⁽¹⁰⁾.

Figure 5는 웨버 수 증가에 따라서 LPN142 및 LPN148 노즐 각각에 대해서 측정된 d_m 의 관계를 나타낸 것으로 작동압력이 증가함에 따라서 노즐 출구 유속의 크기가 증

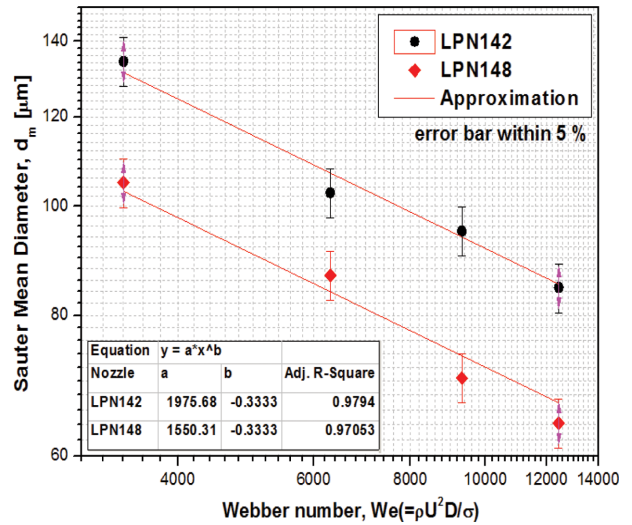


Figure 5. Droplet diameter (SMD) VS. Webber number.

가하여 웨버 수는 증가하지만 액적의 크기는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 식(4)에서 유속의 크기에 식(1)의 유량계수를 고려하면 웨버 계수(C_{we})는 형상 인자(θ_2)에 식(6)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$C_{we}(\theta_2) = 12042.77 - 70.9 \times \theta_2 \quad (6)$$

2.2.4 유동특성과 화재 강도

노즐의 유동특성에 따른 복사열 감쇄 효과는 다음과 같이 복사열 전달 방정식에 의해서 표현된다⁽¹¹⁾.

$$\left[\begin{matrix} \text{Radiant} \\ \text{energy} \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} \text{Absorption} \\ \text{scattering} \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} \text{Emission} \\ \text{by volume} \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} \text{Scattering phase} \\ \text{function} \end{matrix} \right] \quad (7)$$

식(8)의 오른쪽 항은 복사열에 의한 에너지 변화는 소멸항(extinction: absorption + scattering), 복사항 그리고 미소 입체각(solid angle) 내에서의 산란 함수(scattering phase function)에 의한 에너지 증가량과 균형을 이루고 있음을 의미한다. 이 중에서도 산란 함수는 소멸항의 산란항과 반사계수(reflective index) 및 액적크기와 의존 함수 형태를 갖고 있으며, 미소 입체각에서의 복사 강도 분포가 각각 독립적이라고 가정하는 경우 식(7)은 식(8)와 같은 Two-flux 형태로 정리된다⁽¹²⁾.

$$\frac{d}{dx} (I^\pm) = -(\sigma + \kappa) I^\pm + \kappa E_b + \frac{\sigma}{3} (I^+ - I^-) \quad (8)$$

여기서, I^\pm , σ , κ , β , E_b 는 복사강도, 산란계수 흡수계수, 소멸계수, 방사를 각각 의미하며, C. C. Teseng and R. Viskanta는 수막이 있는 노즐의 분사형태 중 액적의 크기 변수(size parameter, χ)가 Mie 산란과 Rayleigh 산란 영역에 있는 경우($\chi \ll 1$) 식(9)과 같은 경험식을 제시한 바

있다⁽¹³⁾.

$$\beta = (\sigma + \kappa) = \frac{3.4d_m}{\chi F(n, k)} \quad (9)$$

여기서, $\chi = d\pi/\lambda$ 이며, $F(n, k)$ 는 참고문헌⁽¹³⁾에서 Mie 산란의 첫 번째 항을 고려한 경우 파장(wavelength, λ)에 따라서 반사계수(n, k)로부터 결정되는 값을 의미한다. 식(9)에서 보듯이 노즐의 유동 특성 중 액적의 크기는 화재 강도를 감쇄시키기 위한 복사열 유속의 주요 인자이다. 특히, 소멸항은 분포에 있는 크기변수에 따라서 달라질 수 있으며, 이러한 분포 형태가 동일한 경우 액적의 크기에 비례할 것으로 판단된다. 따라서 최소허용유량범위(minimum allowable flow range, Q_{tot})가 결정된 경우 식(1)에 의해서 작동압력에 따른 유량을 측정하고 식(3)의 분사거리와 식(4)의 액적 직경을 산출하여 최종 식(9)와 같은 경험식에 의해서 소멸 항과 액적크기의 관계를 분석함으로써 화재특성을 고려한 노즐 선정이 가능할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 개방형 구획공간에서 노즐의 방사각도 변화에 따른 방사유량, 살수분포 그리고 액적크기를 측정하였다. 이를 위해서 중심부 직경이 6.0 mm이고 반지름 방향 방사각도(θ_2)가 142°와 148°인 LPN142와 LPN148 노즐을 제작하였으며, 작동압력 변화에 따른 실험결과 유량계수는 15.49 L/min/MPa^{1/3}이고 지수상수는 0.55로 동일한 것을 확인하였다.

LPN142와 LPN148 노즐 각각에 대해서 작동압력 변화에 따른 웨버 수와 액적 크기의 상관관계를 분석하였으며, 그 결과 방사각도가 작을수록 노즐의 중심부에 총 유량이 보다 많이 분사되어 분사거리는 감소하고 액적의 크기가 증가하는 경험식을 구하였다.

노즐의 유동특성에 따른 복사열 감쇄 효과를 분석한 결과 전달방정식의 주요 인자인 소멸항에 의해서 화재 강도는 크기 변수가 동일하게 존재하는 영역에서 액적의 크기에 비례할 것으로 판단되며, 화재 진압을 위한 단위면적당 최소 설계 허용 유량범위가 결정된 경우 작동압력, 분사거리 그리고 액적의 크기를 예측하여 소멸 항과의 상관관계를 분석함으로써 최종 화재특성을 고려한 노즐의 선정이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. C. H. Hwang, "Effects of Change in Heat Release Rate on Unsteady Fire Characteristics in a Semi-Closed Compartment", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 26, No. 2 (2012).

2. S. Y. Mun, C. H. Park, C. H. Hwang and S. H. Park, "Effects of the Geometry and Location of an Vertical Opening on the Fire Characteristics in the Under-Ventilated Compartment Fire", J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng., Vol. 27, No. 3, pp. 20-29 (2013).
3. G. H. Ko and C. H. Hwang, "Mixture Fraction Analysis on the Combustion Gases of the Full-Scale Compartment Fires", J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 24, No. 5 (2010).
4. A. Yu. Snegirev, G. M. Makhviladze, V. A. Talalov and A. V. Shamshin, "Turbulent Diffusion Combustion under Conditions of Limited Ventilation: Flame Projection through an Opening", Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 39, No. 1, pp. 1-10 (2003).
5. M. Makhviladze, A. V. Shamshin, S. E. Yakush and A. P. Zykov, "Experimental and Numerical Study of Transient Compartment Fires", Combust. Expl. & Shock Waves, Vol. 42, No. 6, pp. 723-730 (2006).
6. A. Chen, J. Francis, X. Dong and W. Chen, "An Experimental Study of the Rate of Gas Temperature Rise in Enclosure Fires", Fire Safety J., Vol. 46, pp. 397-405 (2011).
7. S. C. Kim, "A Numerical Study of the Effect of Sprinkler Spray on the Flow Characteristics Induced by Fire", Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 105-110 (2012).
8. UL2167, Standard for Water Mist Nozzle for Fire Protection Service (2002).
9. NEMA, "Approval and Inspection Standard of Sprinkler", 2012 - 63, Administrator at National Emergency Management Agency (2012).
10. NEMA, "Approval and Inspection Standard of Water Mist Nozzle", 2012 - 63, Administrator at National Emergency Management Agency (2012).
11. C. Clayton, S. Martin and T. Yutaka, "Multiphase Flows with Droplets and Particles", CRC Press (2011).
12. R. Viskanta, "Radiative Transfer in Combustion Systems: Fundamentals and Applications", New York Begell House (2005).
13. C. C. Tseng and R. Viskanta, "Absorptance and Transmittance of Water Spray/Mist Curtains", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 106-114 (2007).
14. H. Z. You, "Investigation of Spray Patterns of Selected Sprinklers with the FMRC Drop Size Measuring System", In: Fire Safety Science -. Proceedings of the First International Symposium. London, International Association for Fire Safety Science, pp. 1165-1176 (1986).
15. G. Heskestad, "Proposla for Studying Interaction of Water Sprays with Plume in Sprinkler Optimization Program", FMRC Interoffice Correspondence (1972).