

## 공동구내 분무분포에 관한 연구 A Study on the Water Spray Distribution in Underground Culvert

김엽래\*  
Kim Yeob Rae

### Abstract

In underground culvert are established main and basic facilities for electric power, communication, gas and heating pipe etc. In the future the use of underground culvert will be enlarged and the peril of fire will be increased. Thus it is necessary to make a general plan to prevent fire.

The skills to prevent fire in underground culvert will be accumulated by the spray distribution of the nozzle and domestic skills in fire fighting will be upgraded.

It will also contribute to the construction of common small fire fighting system suitable to the domestic surrounding and the growth of domestic skills for fire fighting and disaster prevention.

**Key words** : underground culvert, spray distribution, fire fighting system, nozzle

### 요지

지하공동구내에는 전력, 통신, 가스 냉·난방배관 등 생활에 필요한 공작물이 수용되어 있다. 미래에 지하공동구의 사용은 확대되며, 화재의 위험이 증가될 것이므로 미연에 화재에 대비해야 하며, 지하공동구내 최대한의 연소방지효과를 가져오게 할 수 있는 소화시스템의 연구가 필요하다.

본 논문은 지하공동구내 화재를 진압하기 위한 노즐의 분무분포를 해석하고, 이에 따라 지하공동구의 화재안전성을 확보하고자 한다. 앞으로 화재 및 재해예방을 위해 국내기술로서 국내 환경에 맞는 소화시스템 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

**핵심용어** : 지하공동구, 분무분포, 소화시스템, 노즐

### 1. 개요

물분무 소화설비에 대한 관심은 몬트리얼 협약의 발표에 따른 하론 소화약제의 사용금지과 함께 새로운 관심사로 떠오르고 있다. 소방관련 분야의 종사자는 물분무 소화설비가 환경 친화적인 요소를 가지고 있는 점과 소화설비로서의 우수성에 많은 관심을 가지고 있다. 또한 물을 미세하게 분사시켜 화재의 진압효과를 극대화하려는 노력을 하고 있다.

지하공동구는 지하매설물을 공동 수용하여 도시의 미관, 도로구조의 보전과 원활한 소통을 위하여 지하에 설치하는 시설물을 말한다. 국내의 지하공동구 구조는 대부분 철근콘크리트 박스형과 원형 구조가 대부분이

며, 도로의 지하에 각종 시설을 모아 수용시킨 간선도로 공동구, 한 종류의 시설을 수용하는 단독구, 아파트 단지 및 산업시설 등 민간시설 단지에 설치하는 단지내 공동구로 크게 구분된다.

우리 일상생활에 필요한 전화회선 등 각종 통신케이블, 전력케이블, 냉·난방 배관, 급·배수배관, 가스, 상·하수도 등 많은 시설물들이 지하공동구내에 수용되고 있다. 정보화 사회로 진입할수록 광케이블 등 통신망의 지하화는 가속화될 것이며, 따라서 지하공동구는 현대 정보화 사회의 필수 인프라를 수용하기 위한 기반시설로서 사회간접 자본으로서의 커다란 기능을 담당하고 있다. 이에 따라 지하공동구의 화재안전성을 반드시 확보하여야 할 것이다.

지하공동구 화재의 특징을 살펴보면 공간의 밀폐성,

\* 정희원, 경민대학 소방안전관리과 부교수·공학박사·E-mail : kyrae@kyungmin.ac.kr

연소확대의 위험성, 연기의 유독성 등 화재에 대한 대처 방안이 어려운 실정이다. 지하공동구의 화재는 지상화재에 비해 불완전 연소로 인한 다량의 연기 발생, 고열과 농연 및 유독성가스 발생과 같은 문제를 비롯하여, 복잡한 내부구조로 인한 지하공동구내 패닉(panic)현상 등 사회적·경제적으로 큰 영향을 가져올 수 있다.

기존의 소화설비 방식은 지하공동구 화재의 특징을 고려하지 않음으로써 화재시 연소방지 효과를 기대하기가 어려웠다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 화재시 굴뚝현상이 발생하는 트레이 부분의 열전도를 방지하기 위해 기존의 분무입자보다 작게 물을 미세화 시켜 물의 표면적을 크게 하여 빠른 증발을 일으킴으로서 잠열에 의한 냉각효과, 발생된 수막(수증기)에 의한 산소의 차단효과, 화염으로부터 주위 복사열 차단효과에 의해 지하공동구내 최대한의 연소방지 효과를 가져올 수 있는 소화시스템이 이루어져야 할 것이다.

## 2. 물분무 노즐의 설치조건

액적에 의해 발생한 유체의 분열의 분무분포를 해석하기 위하여 해석모델의 지하공동구 크기는 현재 지하공동구로서 가장 많이 사용하는 폭 2m, 높이 2.1m 크기로 설정하였다.

또한 물분무 노즐이 설치되어야 하는 높이는 지하공동구 상단 2m 중앙에 설치하여 분무분포가 대칭적으로 분사 되도록 조건을 제시하고, 설치 간격은 2m 좌·우로 하여 최대한의 분무분포를 얻을 수 있도록 하였다. 현재 지하공동구에 설치되는 스프링클러 헤드와 물분무 노즐을 비교하여 (표 1)에 나타내었다.

## 3. 분무분포 해석

### 3.1 분열 모델(홍준표, 1998, D.J. Tritton, 1997)

노즐(Nozzle)에서 분사된 액막은 이동거리가 증가함에 따라 불안정하게 되며 분열되어 액적(Droplet)으로 된다. 액막에 의해 발생한 액적도 주위 유체에 의해 분열하여 작은 액적으로 변환된다. 액적은 다음의 두가지 메커니즘(Mechanism)에 의해서 발생하는 공기 역학적 힘에 의하여 분열한다.

- 압력장에 의한 액적이 이동함에 따라 액적 주위의

균일하지 않은 압력분포가 표면장력보다 크면 분열

· 표면 전단응력에 의한 분열로서 액적 표면에서의 공기에 의한 전단응력이 표면장력보다 커지면 분열

각각의 경우에 이론적인 연구를 통해 분열과정과 주어진 조건하에서 안정화된 최대액적직경, 특정시간중 분에 대한 기준을 얻을 수 있으며, 압력장에 의한 액적 분열에 있어서는 불안정성은 임계 웨버수(Weber Number;  $We$ )에 의하여 결정된다.

$$We \equiv \frac{\rho |\vec{u} - \vec{u}_d|^2 D_d}{2\sigma_d} \geq C_{bt}$$

여기서  $\vec{u}$ 와  $\vec{u}_d$ 는 각각 유체의 속도와 액적의 속도를 의미한다.

$\sigma_b$ 는 표면장력계수이며  $C_{bt}$ 은 실험계수로서 3.684 값을 가진다. 또한 특정시간  $\tau_b$ 는

$$\tau_b = \frac{C_{b2} \rho^{1/2} D_d^{3/2}}{4\rho^{1/2}} \text{이며, 여기에서 } C_{b2} \approx \pi \text{이다.}$$

표면에서의 전단응력에 의한 액적분열에 있어서의 기준은 다음과 같다.

$$\frac{We}{\sqrt{Re_d}} \geq C_{s1} \text{ 여기에서 } C_{s1} \text{은 계수로서 0.5값을}$$

가지며,  $Re_d$ 는 액적레이놀즈수로서

$$Re_d \equiv \frac{\rho |u - u_d| D_d}{\mu} \text{로 정의된다.}$$

또한, 이 분열메커니즘에서의 특정시간  $\tau_b$ 는

$$\tau_b = \frac{C_{s2}}{2} \left( \frac{\rho_d}{\rho} \right)^{1/2} \frac{D_d}{|u - u_d|} \text{이며, 여기에서 } C_{s2} \text{는 실험계수로서 220 값을 가진다.}$$

### 3.2 액적 운동(김엽래, 이동명, 2004)

노즐에서 분사된 액막은 분열되어 액적으로 변하며 액적은 구의 형태로 되어 거동한다. 이때 공기에 의한 항력(Drag Force) 및 질량에 작용하는 중력에 의해 운동량이 변한다.(M. C. Yuen and L. W. Chen, 1976)

질량  $m_d$ 의 액적이 속도  $u_d$ 로 이동할 때 공간의 압력구배에 의한 힘과 작동유체의 속도변화 즉 가속도에 의한 힘을 고려하지 않고 단지 항력과 중력만을 고

표 1. 노즐설치 비교

구분	스프링클러 헤드	물분무 노즐
분사각	Zero(수직하방으로 분사)	Zero(수직하방으로 분사)
방사압	1kg/cm <sup>2</sup>	3.5kg/cm <sup>2</sup>
방수량	80 l/min	30 l/min(1개 노즐 15 l/min)
노즐직경	13mm	4.6mm

려하였을 경우 액적에 작용하는 운동량 방정식 (Momentum Equation)은 다음과 같다.

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \vec{F}_{dr} + \vec{F}_b$$

여기서  $\vec{F}_{dr}$ 은 항력을 나타내며 이동하려는 방향의 반대방향으로 작용하고 액적 주위의 속도에 의해서도 영향을 받으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |\vec{u} - \vec{u}_d| (\vec{u} - \vec{u}_d)$$

여기에서  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $A_d$ 는 액적의 단면적,  $\vec{u}$ 는 외부공기의 속도를 의미한다.  $C_d$ 는 항력계수 (Drag Coefficient)로서 액적 레이놀즈수의 함수이다.

Body Force  $\vec{F}_b$ 는 작동유체의 회전에 의한 원심력 및 자기장의 영향, 중력에 의한 힘을 나타내는 것이며, 여기에서 중력에 의한 영향만을 고려할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_b = m_d \vec{g}$$

$\vec{g}$ 는 액적에 작용하는 가속도를 나타내며 중력만이 작용하는 경우 높이 방향으로  $-9.81$ 이 작용하게 된다.

$$m_d \frac{d\vec{u}_d}{dt} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |\vec{u} - \vec{u}_d| (\vec{u} - \vec{u}_d) + m_d \vec{g}$$

따라서 미분방정식의 해를 구함으로써 액적의 속도 벡터  $\vec{u}_d$ 를 구할 수 있다. 그리고 액적의 속도벡터로부터 순간위치벡터  $\vec{x}$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{u}_d$$

노즐로부터 원하는 거리만큼 떨어져 있는 위치에서의 분무분포는 위치벡터  $\vec{x}$ 의 z-방향 성분이 그 거리에 도달할 때까지의 해를 구한 후 x-방향 성분, y-방

향 성분이 구하고자 하는 분무분포가 되는 것이다.

#### 4. 해석 결과(Nozzle Angle 0°)

분사노즐이 가져야할 액적크기와 분사각을 구하기 위해서는 중앙 상단에 위치한 노즐로부터 분사된 물이 어느 정도 도달하는지를 계산하여야 한다. 따라서 분사된 물의 액적크기와 분사각을 변화시켜 분사된 물의 도달 거리, 즉 분사거리를 구하였다. 직경 4.6mm 노즐에서 분사된 물의 평균유속을 구하면 약 15m/s의 속도로 노즐에서 분사된다. 또한 분무는 Full Cone Spray 형태로 이루어진다고 가정하였다. Full Cone Spray는 동일한 평균속도로 같은 입자크기가 분사되는 형태를 말한다.

또한, 공동구 특성상 바닥뿐만 아니라 공동구 상단에 분사된 물이 도달하여야 하므로 높이에 따라 분사 반경의 변화를 계산할 필요가 있다. 따라서 바닥에서부터 높이 1.8m, 1.6m에서의 분무분포를 구하였다.

노즐 설치 간격이 2m 라면 (그림 1)과 같이 반경  $\sqrt{2}$ m 이상 되는 분무분포가 요구되며, 공동구의 특성상 상단 부위까지 물이 분무되어야 한다. 또한 분무분포는 분사각(Spray Angle)과 분무되는 물 액적크기(Droplet Size)의 함수이므로 수직하방으로 분무하는 1개의 노즐로부터 물이 분무될 때 분사각과 액적크기를 변화시켜 어느 정도까지 분사된 물이 도달하는지를 구하였다. 물이 수직하방으로 분무되도록 노즐이 설치되어 있기 때문에 분무된 물은 원뿔(Circular Cone)형태를 이루게 되므로 분사반경으로 나타내었다.

##### 4.1 바닥에서의 분무분포

직경 4.6mm의 노즐에서 물이 분사될 때 분사된 물이 바닥면에서 어떻게 분포되는지 알아보기 위하여 분사각과 액적크기를 변화시켜 바닥에서의 분무분포를 구한 것을 (그림 2)에 나타내었다.

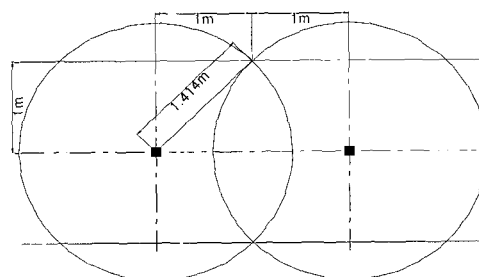


그림 1. Nozzle Angle 0°의 분무분포 조건

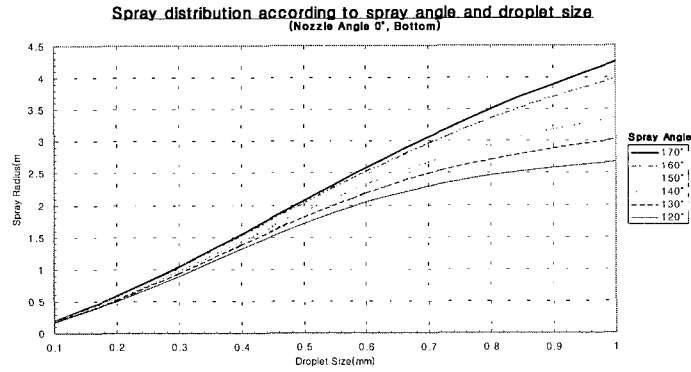


그림 2. 바닥에서의 분무분포(Nozzle Angle 0°)

액적크기가 커질수록 분사된 물의 도달거리는 선형적으로 증가하여 분사 반경이 넓어지게 되며, 같은 액적 크기로 분사될 경우 분사각이 커질수록 분사반경이 커지게 되지만 액적크기가 0.1mm 이내로 미세한 경우는 액적의 운동량이 상대적으로 작기 때문에 분사각의 변화에 크게 영향을 받지 않게 된다.

#### 4.2 1.8m 상단 분무분포

공동구의 높이 1.8m 상단까지 물을 분무할 필요가 있을 경우 분무조건을 알아보기 위하여 분사각과 액적 크기를 변화시켜 (그림 3)에 나타내었다.

분사각이 150° 이하일 경우는 액적크기가 0.25mm 이상이 되더라도 거의 일정한 분사반경을 갖게 된다. 이는 노즐로부터 거리가 너무 가깝기 때문에 발생하는 것이며, 따라서 노즐로부터 가까운 거리에서 원하는 분사반경을 얻기 위해서는 액적크기 보다는 분사각을 변화시켜야 함을 알 수 있다.

따라서 분사각이 170° 미만의 경우는 액적크기와 관계없이  $\sqrt{2}$ m 이상의 분사반경을 가질 수 없다. 분사각 170°, 약 0.66mm 이상의 액적크기로 분사해야만  $\sqrt{2}$ m

이상의 분사반경을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 조건일 때 바닥면에서는 약 2.8m의 분사반경을 가지는 분무분포를 나타내므로 Wall Wetting양이 많게 되어 분무된 물의 절반이상이 손실됨을 (그림 4)에서 알 수 있다.

#### 4.3 높이 1.6m 상단 분무분포

공동구의 높이 1.6m 상단까지 물을 분무할 필요가 있을 경우 분무조건을 알아보기 위하여 분사각과 액적 크기를 변화시켜 (그림 5)에 나타내었다. 분사각 150° 이하의 경우 액적크기와 관계없이  $\sqrt{2}$ m 이상의 분사반경을 가질 수 없다.

분사각 170° 약 0.4mm 이상의 액적크기로 분사할 경우  $\sqrt{2}$ m 이상의 분사반경을 얻을 수 있으며, 이때 바닥면에서는 약 1.6m의 분사반경을 갖게 되는 것을 (그림 6)에 나타내었다. 또한 분사각 160°, 약 0.5mm 이상의 액적크기로 분사할 경우  $\sqrt{2}$ m 이상의 분사반경을 얻을 수 있지만 이때 바닥면에서 약 2m의 분사반경을 가지는 분무분포를 나타내므로 (그림 7)과 같이 Wall Wetting양이 상대적으로 많아지게 된다.

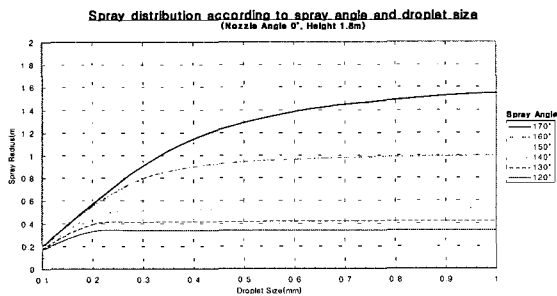


그림 3. 높이 1.8m 상단 분무분포

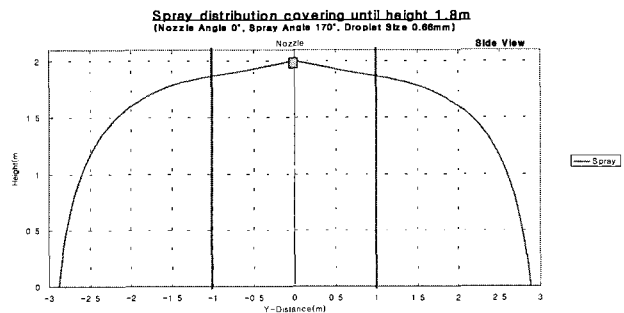


그림 4. 높이 1.8m 상단까지 분무 (Side View, 분사각 170°)

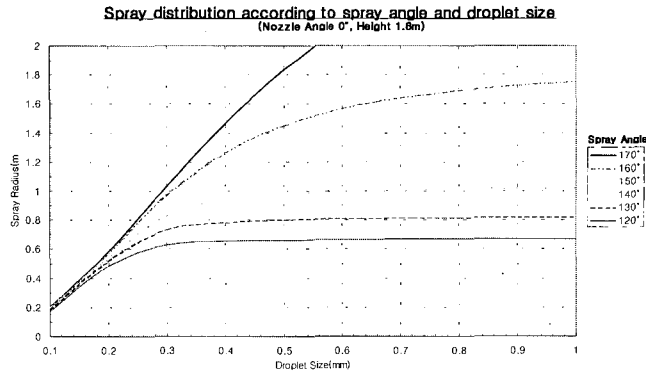


그림 5. 높이 1.6m 상단 분무분포

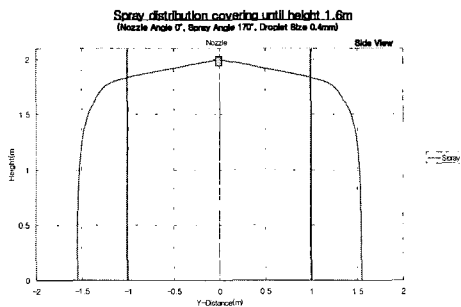


그림 6. 높이 1.6m 상단 분무(분사각 170°)

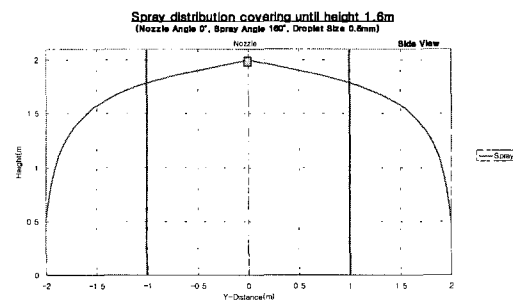


그림 7. 높이 1.6m 상단 분무(분사각 160°)

## 5. 결론

- 1) 높이 1.8m 상단까지 분무할 필요가 있을 경우 분사각 170°, 액적크기 0.66mm로 물을 분사하여야 하지만 액적크기가 0.66mm 보다 커지게 되면 비례적으로 바닥면에서의 분사반경이 더욱 커지게 되며, 액적크기를 정확하게 제어하기 어렵기 때문에 1개의 노즐로는 사실상 어려울 것으로 판단된다. 또한 분사각도 170° 이상이 요구되므로 너무 제한적일 뿐만 아니라 분사각이 더 커질 경우는 바닥면에서의 분사반경이 더욱 커지게 되어 손실되는 물의 양이 많아지게 된다.
- 2) 높이 1.6m 상단까지 분무할 필요가 있을 경우 분사각이 160°, 액적크기 0.5mm 또는 분사각 170°, 액적크기 0.4mm로 물을 분사할 경우 원하는 분사반경을 얻을 수 있게 되지만 마찬가지로 제한적이기 때문에 가능성이 적어 보인다.

## 참고 문헌

- R. D. Reitz and R. Diwaker(1986) "Effect of drop breakup on fuel sprays", SAE paper, 860469, 홍준표(1998) "컴퓨터 수치해석", 문운당
- D. J. Tritton(1997) "Physical Fluid Dynamics", Van Nostrand Reinhold Co., New York
- M. C. Yuen and L. W. Chen(1976) "On drag of evaporating liquid droplet", Comb. Sci. & Tech., pp. 147-154
- 김엽래, 이동명(2004) "지하공동구 물분무분포에 관한 연구" 한국방재학회 학술발표대회논문집. 한국방재학회. p.433-438

© 논문접수일 : 2004년 8월 20일

© 심사의뢰일 : 2004년 8월 23일

© 심사완료일 : 2004년 9월 21일