

D-10

장대터널 Spray System 노즐 개발(제1보 : 일반터널 구간)

김엽래, 최 용*

경민대학 소방안전관리과, *(주)우당기술산업

**Development of Spray System Nozzle in the Long Tunnel (1st Report :
General Tunnel)**

Kim. Y. R and Choi. Y*

*Kyungmin College, *Woodang Technical Industry Co, Ltd.*

1. 서론

본 연구는 국내 최대 장대터널인 죽령(영주↔제천, 왕복 약 9km)에 물분무 소화설비 설치에 대한 노즐의 연구이다. 국내에서 처음으로 도입되는 터널내 소화설비로 터널내의 화재 성장에 대하여 모델링을 설정한 후 터널 구조에 따라 화재 진압을 예측하기 위한 방법과 물분무 노즐의 설치조건을 제시한다. 터널의 화재 위치를 위험 매개 변수, 노즐의 방수량, 방수압, 터널 내 풍속 등등의 조건에 따라 화재의 위험에서 벗어날 수 있는 터널내 소화설비 노즐의 설치 조건을 제시한다.

산업이 고도화되어 감에 따라 도로의 운송 체계 또한 복잡하고 위험에 대해 많은 부분이 노출되고 있는 실정이다. 국내산업이 고도 성장함에 따라 운송 여건중 도로가 차지하는 비중이 날로 증가하고 있으며, 또한 차량의 증가로 도로 교통의 혼잡과 사고로 인한 인명 및 재산에 막대한 손실을 가져오고 있다.

이로 인해 도로의 체계가 내륙지방으로 확산되고 앞으로 더 많은 도로의 신설로 운송 체계를 간단히 하여 물류비용을 줄이고자 터널의 신설이 불가피한 실정이다. 이에 따라 최근 운송 및 관광산업에 도로와 기차 터널의 소방 안전에 대한 관심이 고조되고 있다.

터널내에서는 터널의 특성상 단열이 되기 때문에 연소물의 영향에 의하여 화재시 빠른 열원의 확산으로 인해 연기와 화원의 이동속도가 빠르므로 차량화재시 생명에 급속한 위험을 초래할 수 있다.

터널화재에 대해 선진국에서는 오래 전부터 많은 연구와 화재실험을 수행하고 있으며, 최근 일본 동경소방청사령부의 도로 터널내 화재의 소화활동 보고서와 Ota의 터널내에서 실제의 화재실험을 통해 위험을 예측하여 화재방어 체계에 대한 이해뿐만 아니라 터널화재의 위험성과 화재위험 수준까지 평가하는데 도움을 주고 있다.

표 1. 한국도로공사 방재시설 기준표

방재시설		터널연장(m)	4,000	2,000	1,000	800	500	200	200
			이상	이상	이상	이상	이상	이상	미만
소방설비	소화설비	소화기구	●	●	●	●	●	●	●
		옥내소화전	●	●	●				
		물분무설비	●						
	경보설비	비상경보설비	●	●	●	●	●		
		화재감지기	●	●					
		비상방송설비	●	●	●				
	피난설비	비상조명등	●	●	●	●	●	●	
		유도표지판	●	●	●				
	소화활동설비	제연설비	●	●	●				
		무선통신보조설비	●	●	●	●	●		
		연결송수관설비	●	●					
		비상콘센트설비	●	●	●	●	●		
기타설비	통보설비	비상전화	●	●	●	●	●		
		정보표지판(터널입구)	●	●	●	●			
	기타설비	비상전원설비	●	●	●	●	●	●	
		라디오재방송설비	●	●	●	●	●	●	
		CCTV	●	●	●				
		피난연락경	●	●	●				
비상주차대	●	●	●						

1.1 방재 설비의 기준

터널에는 자동차 화재나 기타 비상시에 있어서의 위험 방지를 위해 터널의 길이에 따라 <표 1>에 예시한 한국도로공사 방재시설 기준표의 방재 설비를 갖추어야 할 것이다. 터널 안에서 만일 화재 사고나 교통 사고가 발생했을 때는 큰 재해로 변할 가능성이 있다. 이 같은 비상시의 재해를 최소한으로 막기 위해 모든 설비를 갖추어 안전을 기하는 것이 최선의 방법이지만 모든 터널에 대하여 동일 규모로 설비를 갖춘다는 것은 투자 효과 측면에서도 합리적이지 않다. 즉, 해당 터널에 적합한 방재 설비의 요구도를 확인하고 그에 맞는 설비규모를 선정하는 것이 중요하다.

1.2 물분무설비

물분무설비의 방수 구간에 대해서는 화재의 영향 범위를 20~30m라 생각하고 여기에 다소의 여유를 두어 다른 설비와의 설치 간격을 고려하여 터널 중단 방향 50m를 1구간으로 한다. 구획의 경계에서 발생하는 화재에도 대처하기 위해 두 구간의 동시 방수가 되는 것을 표준으로 한다. 또, 가솔린 화재에 대한 살수기의 살수량은 실험 결과에서 노면 1㎡당 6ℓ/min 이상의 수량을 방수하면 충분한 억제 효과가 있다고 확인된 바 있고

이 수량을 가능한 한 노면에 균일하게 분산시켜 살수하기 위해 살수기 헤드를 주행, 추월 양차선 일체용으로 하는 것이 바람직하며, 설치 간격을 4~5m 정도로 한다. 살수기 헤드는 보수 점검을 쉽게 하기 위해 감시원 통로 옆벽 상부에 설치하고, 설치 높이는 차도면 위에서 차량통행에 방해가 되지 않고 살수분포를 얻을 수 있는 높이로 하면 될 것이다.

1.3 물분무헤드

물분무헤드는 방수압력 3.0kg/cm² 이상이며 차선폭 범위 내의 노면 1m²에 대해 6ℓ/min 이상의 수량이 균등하게 살수되도록 배치해야 한다.

(1) 살수 설비는 급수 본관에서 분리되는 살수기에 살수구를 만들고 살수구에서 물을 분산 살수하여 화재를 진압과 동시에 화재시 발생하는 열에 터널 시설이 손상하지 않도록 냉각 보호하고 복사열을 차단하여 소화 및 대피 작업을 용이하게 하고 아울러 다른 차량으로 불이 퍼지는 것을 방지하는 것이다.

(2) 살수 구간은 화재 지점과 어긋나지 않도록 하기 위해 화재 감지기의 동작으로 해당 구획의 자동 밸브가 열리는 제어 방식으로 하며, 구획의 경계에서 발생하는 화재에도 대처하기 위해 2구획 동시 방수가 가능한 것으로 한다.

(3) 살수기의 방수는 화재의 발생을 화재 감지기로 감지하고, 수신기로 자동 밸브의 선택 및 소화펌프를 가동시켜 관리자가 감시용 텔레비전(I.T.V.)으로 화재 지점을 확인한 후 자동 밸브로 살수하는 방식이 일반적이다.

자동 밸브의 개방 조작은 관리 사무소나 터널 환기소 또는 터널 안에서 할 수 있도록 하고 화재 지점의 이동에도 대처할 수 있도록 해두어야 한다.

1.4 살수량 및 열량

(1) 살수량

$$Q_1 = l \cdot w \cdot t \tag{1}$$

Q_1 : 살수량(ℓ/min) l : 살수 구간 길이
 w : 살수 대상 폭 t : 단위 살수량

(2) 열량

$$Q_2 = g \cdot c \cdot s \cdot \beta \tag{2}$$

Q_2 : 화재열량(MW) g : 연소물의 연소 속도
 c : 연소물의 발열량 s : 연소 면적 β : 열손실 계수

2. 액적거동

노즐에서 분사된 액막은 분열되어 액적으로 변하며 액적은 구의 형태로 되어 거동한다. 이때 공기에 의한 항력(Drag force) 및 질량에 작용하는 중력에 의해 운동량이 변한

다. 액적은 공간을 이동함에 따라 항력 및 중력과 같은 힘이 액적에 작용하게 되므로 Lagrangian conservation equation으로 구하였으며 운동량 방정식(Momentum equation)은 다음과 같다.

$$m_d \frac{d\bar{u}_d}{dt} = \bar{F}_{dr} + \bar{F}_b \quad (3)$$

여기서 \bar{F}_{dr} 은 항력에 의한 힘이며, 이동하려는 방향의 반대방향으로 작용하고 액적 주위의 속도에 의해서도 영향을 받으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_D \rho A_D |\bar{u} - \bar{u}_d| (\bar{u} - \bar{u}_d) \quad (4)$$

액적에 작용하는 항력은 구에 작용하는 항력으로 가정하여 시험으로부터 구하며 보정식을 이용하면 다음과 같다. 구의 항력은 Reynolds 수에 의해 결정되며 1000 이전까지 감소하다 1000이 넘으면 0.44로 유지된다.

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}_D^{0.687}) / \text{Re}_D & , \text{Re}_D \leq 10^3 \\ 0.44 & , \text{Re}_D \leq 10^3 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 Re_D 는 액적의 레이놀즈수로 다음과 같다.

$$\text{Re}_D = \frac{\rho |\bar{u} - \bar{u}_d| D_d}{\mu} \quad (6)$$

여기서 D_d 는 액적의 직경을 의미한다.

3. Swirl Nozzle의 분무

Swirl Nozzle의 경우 Nozzle로 부터 분사된 물은 표면장력 및 액막 내부 중심축 부근의 기체 재순환, 그리고 주위 기체 유입에 의한 액막의 분열현상 등에 의하여 액적으로 형성되어 분무되므로 Swirl에 의하여 분무되는 액적의 크기와 내부 중심부에서 분무되는 액적의 크기와 분무각(Full cone spray angle)은 서로 상이하다. 초기조건으로 노즐에서 분사되는 유체의 평균유속이 주어졌을 경우 식(3)에 표현된 힘의 평형방정식의 해를 구하기 위하여 Runge-Kutta Method가 이용되는데 Runge-Kutta Method의 경우 1개 이상의 함수계산을 포함하게 되며 일반적으로 표현식은 다음과 같다.

$$y_{i+1} \cong y_i + Q(x, y, h) \quad (7)$$

여기서 $Q(x, y, h)$ 는 다음 적분의 근사값이다.

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x, y) dx \tag{8}$$

4. 해석 결과

설치노즐 : Head 조합형 노즐
 설치높이 : 5.7m
 분사각 : 170°
 분사유량 : Swirl Nozzle 110 L/min + Deflector Nozzle 140 L/min
 설치각 : Swirl Nozzle 20° + Deflector Nozzle 120°

4.1 분무거리

5.7m에 위치한 노즐에서 물이 분사될 때 분사된 물이 어느정도 도달하는지 알아 보기 위해 액적 크기(Droplet size)와 분사각(Cone angle)의 변화에 따른 분사입자 도달거리를 계산하였다. 이때 설치각은 0°, 즉 수직 하방으로 분사되며 분사된 물은 26m/s의 속도로 노즐에서 Solid Cone Spray 형태로 분출되며 분무거리는 Fig. 1에 나타내었다.

4.2 분무분포

5.7m 높이에 20°로 기울어진 노즐에서 물이 분사될 경우 액적 크기에 따른 분무분포를 계산하여 Fig. 2에서와 같이 분무분포를 얻었다.

분무는 분사각이 일정하게 170° Solid Cone Spray로 가정하였고 액적 크기를 0.4mm 부터 0.1mm씩 증가시키면서 계산하였다.

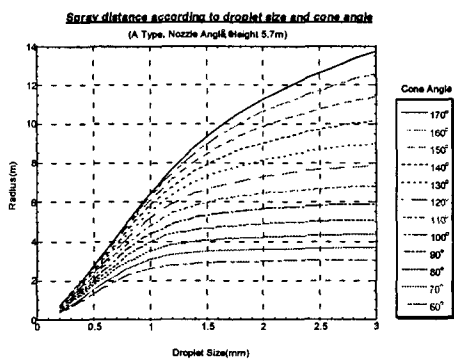


Fig. 1. 일반터널 구간 분무거리

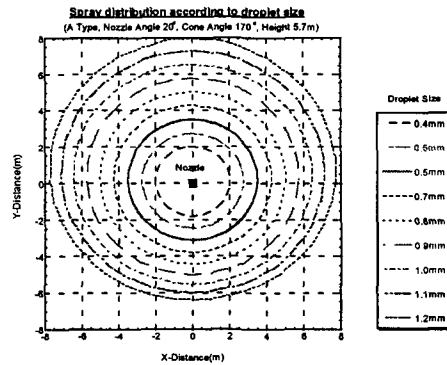


Fig. 2. 액적크기에 따른 분무분포

4.2.1 Swirl Nozzle의 분무분포

5m 간격으로 Nozzle이 설치되므로 x 방향으로 3.5m까지 도달할 때의 액적 크기를 구하였다. 이때 Cone Angle을 170°로 고정시키고 액적 크기를 0.5mm 부터 0.001mm씩 증가시키면서 x방향 3.5m까지 도달하는 액적 크기를 계산하였다.

터널 전체에 고르게 분포하기 위해서는 y 방향으로 약 5m까지 물이 도달하여야 하며 Full Cone Spray가 그 역할을 한다. Full Cone Spray는 Swirl Nozzle 중심부에 좁은 분사각과 굵은 입자의 액적으로 분무되는 형태를 의미한다. 따라서 Full Cone Spray에서 분사되는 액적 크기를 구하기 위하여 Cone Angle을 170°부터 2씩 감소시키고, 액적 크기를 0.7mm부터 0.001mm씩 증가시키면서 y방향 5m까지 도달하는 액적 크기를 계산하여 Fig. 3과 같이 Swirl Nozzle의 분무분포를 얻을 수 있다.

4.2.2 Deflector Nozzle의 분무분포

Swirl Nozzle과 Deflector Nozzle 사이의 각이 100°이므로 Deflector Nozzle의 설치각은 120°가 된다. 따라서 5.7m 높이에 120°로 기울어진 Deflector Nozzle로 부터 분사될 경우 Nozzle이 터널 중심에서 약 3.7m 거리에 설치되어 있으므로 터널 반대편까지 분무가 도달하기 위하여는 Deflector에 부딪친 물은 약 9m 이상 도달하여야 한다. y방향으로 약 9m이상 도달하기 위해서는 충돌각은 약 40°이며 이 때의 분무분포는 Fig. 3에 나타나 있다.

4.3 일반터널 구간에서의 분무 분포

Fig. 3에 나타났듯이 5.7m 높이에 5m 간격으로 설치된 Head 조합형 노즐의 분무 분포를 나타내고 있다. 터널 전 영역을 분무된 물이 고르게 분포되고 있음을 알 수 있다.

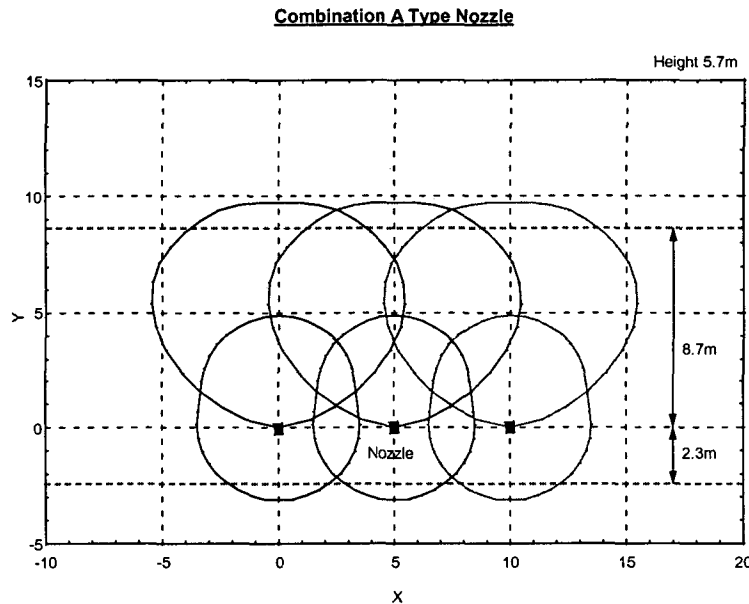


Fig. 3. 일반터널 구간에서의 분무분포

5. 결론

같은 Droplet size로 분사될 경우 분사각이 작아질수록 분무거리는 멀리까지 도달하지 못한다. 분사각이 약 100° 이내인 경우 액적 크기가 약 1.2mm 이상 커지게 되면 와류분무노즐의 효과가 거의 없어지며, 액적 크기와 관계없이 분무된 물 입자의 도달 거리는 일정하게 된다. 분사각이 170°인 Nozzle의 경우 액적 크기가 약 1.4mm 이내에서는 도달거리가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

분무분포는 Solid Cone Spray로 계산된 것이므로 x방향이 장축, y방향이 단축인 타원 형태의 분포를 나타낸다. 이는 y 방향으로 분사된 입자들이 공기저항에 의하여 먼 거리까지 도달하지 못함을 의미하므로 Full Cone Spray Nozzle 특성을 고려하여 계산하여야 함을 짐작할 수 있다.

노즐이 5m 간격으로 설치되므로 분무된 물이 터널 전체 면적에 고르게 분포되기 위해서는 x방향(노즐 설치방향, 터널 길이 방향)의 도달거리가 3.5m 정도 되어야 하므로 가장자리의 액막으로부터 분열되는 액적 크기는 대략 0.6mm 정도임을 알 수 있다. y 방향으로 5m까지 도달하기 위하여 Full Cone Spray에서 분무되는 액적의 크기는 0.972mm이어야 하며, Full Cone Angle은 74° 정도 되어야 한다.

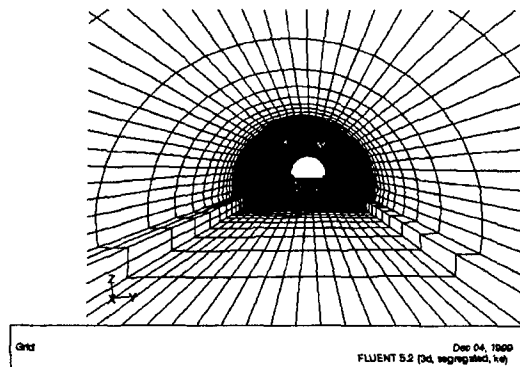


Fig. 4. 일반터널 구간 및 FAN구간에서의 Mesh

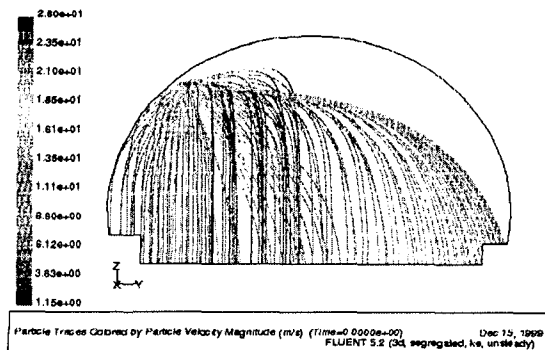


Fig. 5. 일반터널 구간에서의 물 분무(정면)

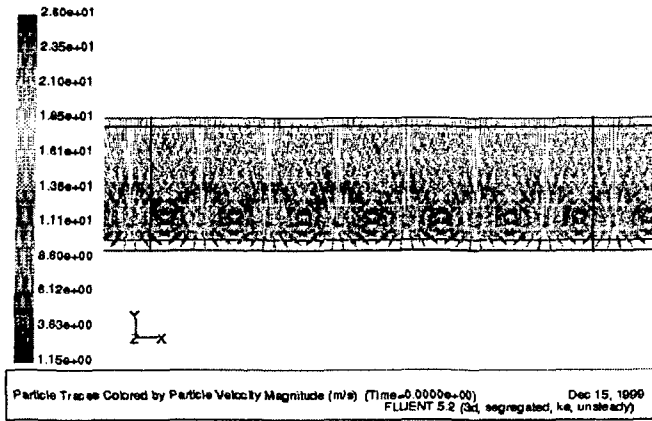


Fig. 6. 일반터널 구간에서의 물 분무(평면)

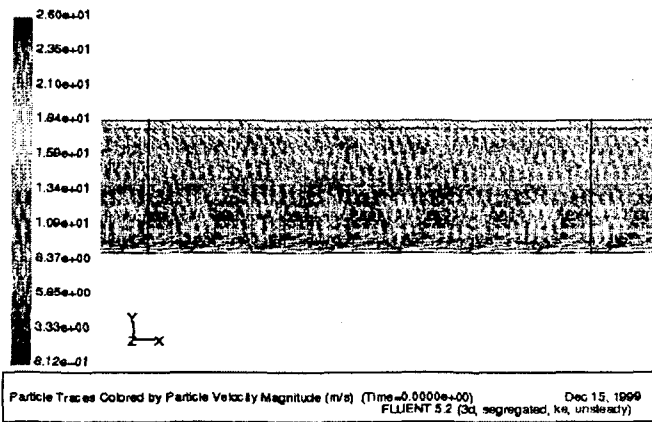


Fig. 7. 일반터널 구간에서의 물 분무(제한풍속 2m/s)

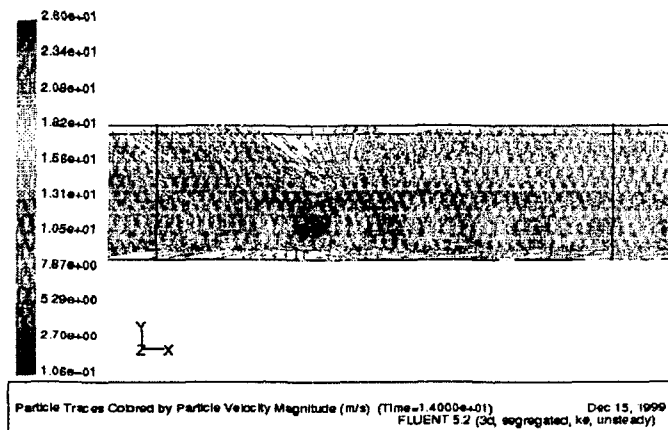


Fig. 8. 일반터널 구간에서의 물 분무(제한풍속 2m/s, 화재발생시)

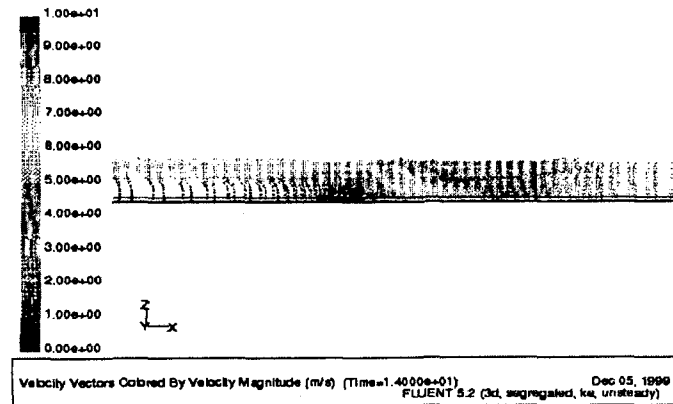


Fig. 9. 일반터널 중심단면의 속도(제연풍속= 2.0, 화재발생 14초후)

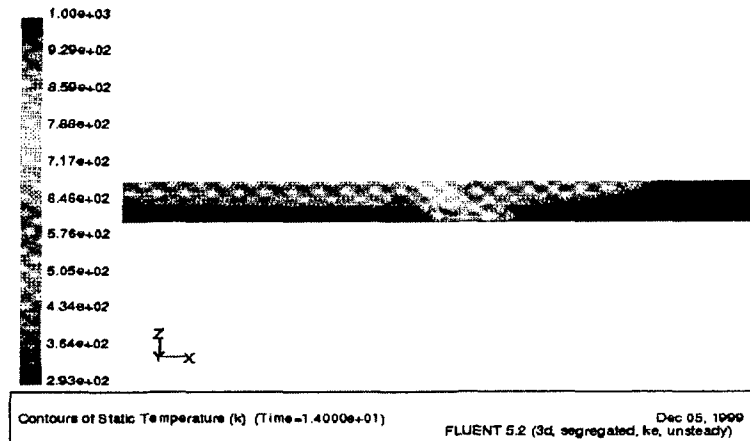


Fig. 10. 일반터널 중심단면의 온도(제연풍속 = 2.0 , 화재발생 14초후)

참고문헌

- 1) 東京消防廳司令部, “道路トンネル内 火災の消防活動について”, pp. 85-87.
- 2) 太田 義和(Yoshikazu Ota), “トンネル火災に関する最近の研究開発について”, Vol. 48 No. 5, pp. 17-21, (1998. 10)
- 3) 터널화재 위험성 평가를 위한 컴퓨터 모델.
- 4) 한국도로공사, “터널 방재시설 기준”, (1999)
- 5) 한국도로공사, “중앙고속도로 영주~제천간 건설공사 9공구(기계설비, 토목, 전기보고서)”, (1999)
- 6) R. D. Reitz and Diwaker, “Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays”, SAE paper, 860469, (1986)

본 연구과제로 개발된 장대터널용 물분무노즐(헤드)은 죽령터널(영주↔제천)에 설치
(실용신안 등록 0211541호 : 터널소화용 스프레이 노즐 시스템)