

B-13

장대터널 Spray System 노즐 개발 (제3보 : 터널 FAN 구간)

김엽래, 이동명, 최 용*
경민대학 소방과학과, *(주)우당기술산업

Development of Spray System Nozzle in the Long Tunnel (FAN Tunnel)

Kim Y. R, Lee D. M, Choi Y*
Kyungmin College, *Woodang Technical Industry Co, Ltd.

1. 서론

최근 프랑스와 이탈리아를 알프스산맥으로 관통하는 몽블랑터널과 오스트리아 살츠버그의 빌라하 사이를 지나는 타우에른터널 등에서 발생한 화재로 인해 수십명이 사망한 사고 사례에 비추어 보면 터널은 밀폐된 공간이므로 터널내의 차량등 화재사고시 빠른 열원의 확산으로 인해 연기와 화원의 이동속도가 빠르므로 대형사고의 가능성이 높아 사람의 피난 유도를 포함한 터널 방재시설이 요구된다.

국내도로는 물류비용 절감 등의 여건으로 도로의 체계가 내륙지방으로 확산되고 있으며, 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.

본 연구는 험준한 산맥을 관통한 국내 최대 장대터널인 죽령(영주↔제천)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.

2001년 12월 개통한 대구~춘천간 중앙고속도로 건설구간 중 경북풍기~충북단양 사이에 위치하는 왕복 9km의 국내 최장대 터널인 죽령터널의 방재시설중 FAN구간의 물분무 소화설비에 관하여 소개한다.

표 1. 죽령터널 재원

도로구격		고속도로
위치	시점	0+217.200(영주방향), 0+220.000(제천방향)
	종점	4+737.200(영주방향), 4+730.000(제천방향)
연장 (m)		9030 m
터널폭원(m)		11 m
평면표고 (Sea Level)		400 m
차선수및교통방향		양방향 4차선 (일방향 2 차선)
설계속도		V = 100KM/H (환기설계상 80KM/H)
터널중심간격		30M
평면선형		R = ∞
종단선형		0.5% ~ - 0.5416%
내공단면적		64.099 m ²
검사원통로		주행선측 편측설치

2. 방재시설

본 방재시설 설치기준은 일방향 2차선(왕복 4차선) 터널을 표준으로 작성된 것으로 터널연장 및 차로수, 선형 등의 특수 여건 고려시와 소방법령에 적합하고 관할소방서와의 협의 도출시에는 보완(시설의 가감)하여 시설할 수 있다.

설치 대상기준에 따른 소방시설 물분무 소화설비를 반영한 터널 방재시설 기준(표 2,3)을 수립하였고, 본 죽령터널 방재시설 기준에 적용하고 있다.

표 2. 소화설비 설치기준

방재시설		설치기준	현황	정의
소화설비	소화기구	45m 간격으로 설치		사람이 직접 조작하여 소화약제를 방출하는 기구
	옥내소화전	45m 간격으로 설치	상·하행 각103개소	사람이 소화전함에 비치되어 있는 호스 및 노즐을 이용 물을 분사하여 소화작업을 행하는 설비
	물분무설비	일제방수구역은 45m로 설치	상·하행 각101개소	물분무헤드를 사용하여 물을 분무형상으로 분사하여 화재를 질식·냉각작용에 의해 소화하는 설비

표 3. 방재시설 기준

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	재연설비	●	●	●				
		무선통신보조설비	●	●	●	●	●		
		연결송수관설비	●	●					
		비상콘센트설비	●	●	●	●	●		
기타설비	통·경보설비	비상전화	●	●	●	●	●		
		정보표지판(터널입구)	●	●	●	●			
	기타설비	비상전원설비	●	●	●	●	●	●	
		라디오재방송설비	●	●	●	●	●	●	
		CCTV	●	●	●				
		피난연락개	●	●	●				
비상주차대	●	●	●						

3. 물분무 소화설비

물분무 소화설비는 터널천정 또는 측벽 상방에 급수관을 설치하는 것으로 자동밸브장치, 물분무헤드, 제어장치로 구성된다.

물분무 소화설비는 주배관에서 분기된 배관에 프리액션밸브를 설치하고, 가비배관에 물분무헤드를 설치하여 물분무헤드에서 물을 분사해 화재를 억제함과 동시에 화재발생으로 재생성되는 열로 하여금 터널시설이 손상하지 않도록 냉각보호를 하고 아울러 차량연쇄 화재를 억제하는 목적이 있다.

3.1 물분무헤드

물분무헤드는 방수압력 3kgf/cm² 이상에서 노면 1m²에 대해 6ℓ/min이상의 물을 방수되도록 배치하고, 살수분포를 얻도록 헤드의 종류 및 설치 간격 등을 선정하였다.

터널 FAN 구간 물분무헤드의 노즐형상은 B형 헤드(근거리 및 원거리)를 적용하였다.

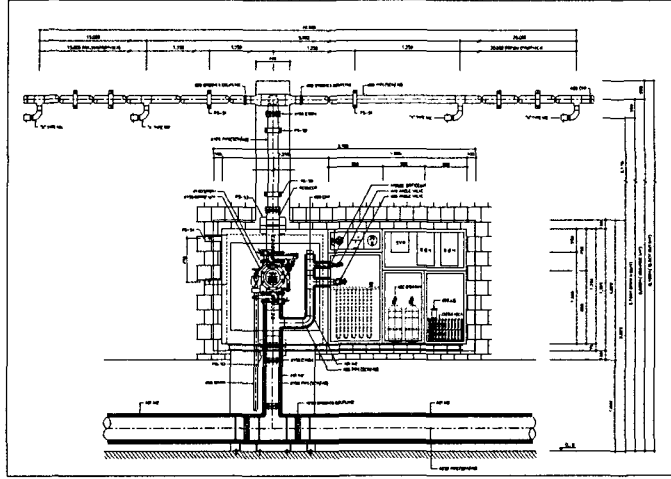


그림 1. 물분무 소화설비 구성도

3.2 물분무헤드 방수량 설정

물분무 소화설비의 1구역당 방수량은 설치 계획된 헤드 수량과 표준 방수량으로부터 산정한며, $Q=1$ 구역당 헤드수(개) \times 표준 방수량(ℓ/min) $=9$ 개(5m) $\times 250 \ell/\text{min}=2250 \ell/\text{min}$ 로 방수량을 산출하였다.

표 4. 노즐 표준 방수량

노즐 종류	천정없는데 사용시	천정있는데 사용시
원역용 노즐	140 ℓ/min	160 ℓ/min
근역용 노즐	110 ℓ/min	90 ℓ/min

4. FAN 구간 설비

4.1 화재시 제연설비 운영계획

본 죽령터널은 장대터널이면서 수직구 부착 젯트팬 종류식으로 각방향 터널이 설계되어 있어, 화재시 환기의 운영계획은 기본적으로 상, 하행터널 모두 동일하다고 할 수 있다.

각 터널 모두 방재용 젯트팬을 터널 전구간에 걸쳐 분산 배치하였으므로 다양한 운영을 시행할 수 있을 것으로 판단된다. 방재설계시 고려된 사항은 저항자연풍(역풍개념) 2.5m/s로 감안했으며, 터널 전 연장에 걸쳐 통행차량이 정지된 것이 장애물로 간주하여 제연풍속을 2m/s이상으로 설계하였다.

4.2 제연용 젯트팬 산정

- 영주방향(4,520m) 및 제천방향 터널(4,510m)

- 화재시 터널내에 존재하는 자동차 대수(n)

$$n = N \cdot L/Vt + N \cdot 3/60$$

여기서, Vt : 설계속도, 3/60 : 3분 후에 “진입금지” 의 표시판이 들어오기까지의 대수,
n = 496대

- 터널내에 지체하는 차에 대한 저항(Pt)

$$Pt = Ae/Ar \times \rho/2 \times n \times Vr^2$$

여기서, Vr :터널내풍속(2.0 m/s)

- 자연풍 2.5 m/s 에 대응하는데 필요한 압력(Pm)

$$Pm = (1 + \xi e + \lambda \times Lr/Dr) \times \rho/2 \times Vn^2$$

- 차의 진행방향으로 2.0 m/s 의 풍속을 발생하는데 필요한 압력(Pr)

$$Pr = (1 + \xi e + \lambda \times Lr/Dr) \times \rho/2 \times (Vr)^2$$

- 승압력 합계(ΔPq)

$$Pq = Pr + Pm + Pt$$

- 제트팬 1대당 승압력(Pj) [Ø1030 모델]

$$Pj = \rho \times Vj^2 \times Aj/Ar \times (1 - Vr/Vj)$$

- 제트팬 소요대수 Z [Ø1030 모델]

$$Z = Pq/Pj$$

표 5. 제연을 위한 설비류 및 안전계수

구 분		영주방향 터널	제전방향 터널
FAN(제연팬은 정상적인 환기용과 겸용임)		제트팬 Ø1030x 12대	제트팬 Ø1030x 12대
안전계수	저항자연풍	Vn = 2.5 m/s (역풍 : 자동차와 맞바람 조건)	
	저항차량수	연장 : L = 4520 m 터널내 차량수 : 496대	연장 : L = 4510 m 터널내 차량수 : 496대
	최소풍속	2m/s 이상	2m/s 이상

5. 물분무 노즐의 설계

5.1 액적거동

노즐에서 분사된 액막은 분열되어 액적으로 변하며 액적은 구의 형태로 되어 거동한다. 이때 공기에 의한 항력(Drag force) 및 질량에 작용하는 중력에 의해 운동량이 변한다. 액적은 공간을 이동함에 따라 항력 및 중력과 같은 힘이 액적에 작용하게 되므로 Lagrangian conservation equation으로 구하였으며 운동량 방정식(Momentum equation)은 다음과 같다.

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

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

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

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

$$C_D = 24(1 + 0.15 Re_D^{0.687}) / Re_D, \quad Re_D \leq 10^3$$

여기서 Re_D 는 액적의 레이놀즈수로 다음과 같다.

$$Re_D = \frac{\rho |\bar{u} - \bar{u}_D| D_d}{\mu}$$

여기서 D_d 는 액적의 직경을 의미한다.

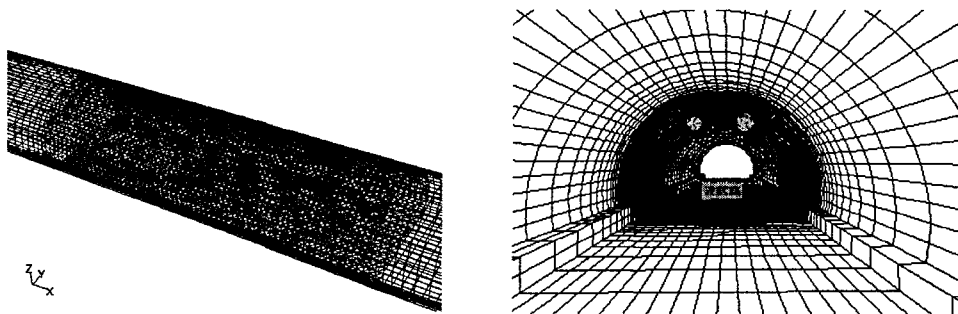


그림 2. 터널 FAN 구간의 Mesh

5.2 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 힘의 평형방정식의 해를 구하기 위하여

Runge-Kutta Method가 이용되는데 Runge-Kutta Method의 경우 1개 이상의 함수계산을 포함하게 되며 일반적으로 표현식은 다음과 같다.

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

여기서 $Q(x, y, h)$ 는 다음 적분의 근사값이다.

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

5.3 Deflector Nozzle의 분무

Deflector Type 분무는 원형 또는 타원형 Deflector면에 물을 강하게 분사하여 Deflector면에 얇은 막을 형성시키고 막이 액적으로 분열되어 분무되는 Type을 말한다.

이때 운동량보존에 의해 Deflector면에서 이탈되는 액막의 속도는 분사속도와 같으며, 액적의 초기속도 또한 분사속도와 같다.

액막의 두께는 Nozzle 유량과 Deflector면과의 충돌각에 의해 결정되며, 충돌각이 작게 되면 분사각이 적어지고 중심에서 액막의 두께가 두꺼워진다.

액적의 형성은 와류노즐(Swirl Nozzle)과 같이 청공과 불안정에 의해 분열되면서 발생하는 것이며, 액적의 크기는 액막의 두께에 의해 결정된다. 따라서 액적직경의 최대 크기는 액막의 초기 두께에 해당되므로 액적 평균직경을 구할 수 있다.

5.4 FAN 구간 분무분포 해석 결과

- 설치노즐 : B Head조합형 노즐
- 설치높이 : 3.7m
- 분 사 각 : 120°
- 분사유량 : Swirl Nozzle 90 L/min + Deflector Nozzle 160 L/min
- 설 치 각 : Swirl Nozzle 45° + Deflector Nozzle 135°

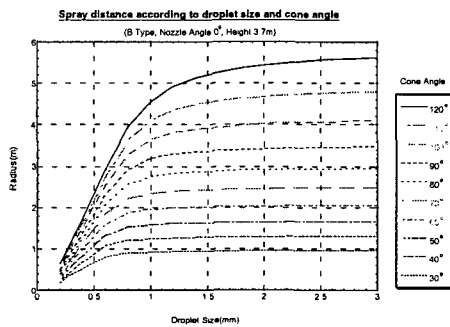


그림 3. FAN 구간의 분무거리

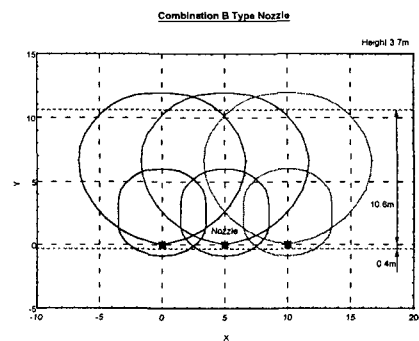


그림 4. FAN 구간의 분무분포

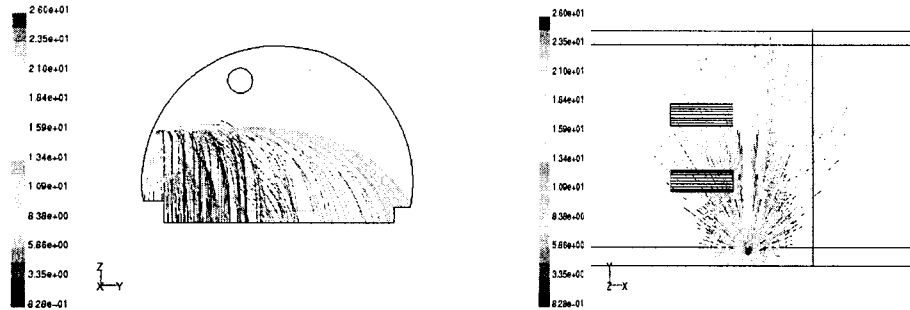


그림 5. FAN 구간에서의 분무형상

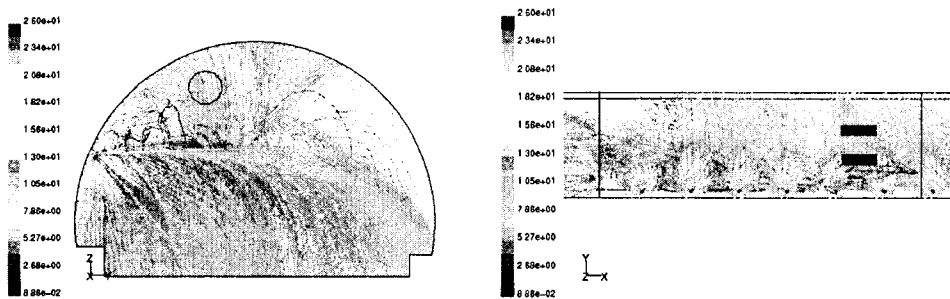


그림 6. FAN의 제연풍속 2m/s(화재발생시)

6. 결론

이상으로 3회(제1보 : 일반터널 구간, 제2보 : 비상주차대 구간, 제3보 : 터널 FAN 구간)에 걸쳐 국내 최장대 터널인 죽령터널의 소화시스템에 관한 방재시설 현황을 살펴보았다. 터널에서의 화재발생 빈도는 낮으나, 화재발생시 수많은 인명피해와 재산손실을 가져올 가능성이 높다.

본 연구를 통해 국내에서 처음으로 도입되는 터널내 소화설비 시스템에 대하여 터널화재의 소방안전에 목적을 두어 물분무 노즐의 설치조건을 제시하였다.

터널의 화재 위치를 위험 매개 변수, 노즐의 방수량, 방수압, 터널 내 풍속 등등의 조건에 따라 화재의 위험에서 벗어날 수 있는 소화설비 시스템의 설치조건을 제시하여 터널화재의 소방안전에 목적을 둔다.

죽령터널 등 현재 개통된 고속도로 장대터널은 10여개소에 불과하나 향후 계획된 1000m 이상의 장대터널은 40개소가 넘어서고 있어, 터널내 화재등 비상사태에 대한 방재시설의 효율적인 설치방안과 방재시스템에 대한 체계적인 운영 및 관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

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, 1998.10, pp.17-21
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
<특허(실용신안 등록 0211541호) : 터널소화용 스프레이 노즐 시스템>