

B-10

장대터널 Spray System 노즐 개발 (제2보 : 비상주차대 구간)

김엽래, 이동명, 안민홍*, 최 용**

경민대학 소방과학과, * (주)해인 ** (주)우당기술산업

Development of Spray System Nozzle in the Long Tunnel (2nd Report : Emergency Parking Tunnel)

Kim Y. R, Lee D. M, An M. H*, and Choi Y**

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

1. 머리말

물류비의 절감에 위한 사회간접자본인 도로의 확충이 가속화됨에 따라 도로의 운송체계가 점차 복잡해지고 위험에 대해 많은 부분이 노출되어 있다. 국내산업이 고도의 성장함에 따라 운송 여건중 도로가 차지하는 비중이 날로 증가하고 있으며, 또한 차량의 증가로 인한 도로교통의 혼잡과 사고로 인한 인명 및 재산에 막대한 손실을 가져오고 있다.

최근 프랑스와 이탈리아를 알프스산맥으로 관통하는 몽블랑(Mont Blanc)터널과 오스트리아 살츠버그(Salzburg)의 빌라하(Villach) 사이를 지나는 타우에른(Tauern)터널에서 발생한 화재로 인하여 수십명이 사망한 사고 사례에 비추어 보면 터널은 밀폐된 공간이므로 터널내

표 1. 죽령터널 재원 ()은 하생선임

도로 규격		고속화 도로
위 치	시 점	0+217.200(영주방향), 0+220.000(제천방향)
	종 점	4+737.200(영주방향), 4+730.000(제천방향)
연 장		4520M (4510M)
터널폭원		11M
평면표고 (Sea Level)		400M
차선수 및 교통방향		양방향 4차선 (일방향 2 차선)
설계속도		V = 100KM/H (환기설계상 80KM/H)
터널중심간격		30M
검사원통로		주행선측 편측설치

의 차량 등 화재사고시 빠른 열원의 확산으로 인해 연기와 화원의 이동속도가 빠르므로 대형사고의 가능성이 높아 사람의 피난 유도를 포함한 터널 방재시설이 요구된다. 본 논문에서는 2001년 12월 개통한 대구~춘천간 중앙고속도로 건설구간 중 경북풍기~충북단양 사이에 위치하는 국내 최장대 터널인 죽령터널(연장 4,520M)의 방재시설로서 비상주차대 구간의 물분무설비에 관하여 소개하고자 한다.

2. 방재시설 기준

설치 대상기준에 따른 소방시설 뿐만 아니라 터널 화재나 기타 비상시에 있어서 재해방

표 2. 한국도로공사 방재시설 기준

방재시설	설치기준	현 황	정 의
소 화 설 비	소화기구	45m 간격으로 설치	사람이 직접 조작하여 소화약제를 방출하는 기구
	옥내소화전	45m 간격으로 설치	사람이 소화전함에 비치되어 있는 호스 및 노즐을 이용 물을 분사하여 소화작업을 행하는 설비
	물분무설비	일제방수구역은 45m로 설치	물분무헤드를 사용하여 물을 분무형상으로 분사하여 화재를 질식·냉각작용에 의해 소화하는 설비

방재시설		터널연장(m)	4,000 이상	2,000 이상	1,000 이상	800 이상	500 이상	200 이상	200 미만
방 재 설 비	소 화 설 비	소화기구	●	●	●	●	●	●	●
		옥내소화전	●	●	●				
		물분무설비	●						
	경 보 설 비	비상경보설비	●	●	●	●	●		
		화재감지기	●	●					
		비상방송설비	●	●	●				
	피 난 설 비	비상조명등	●	●	●	●	●	●	
		유도표지판	●	●	●				
	소 화 활 동 설 비	제연설비	●	●	●				
		무선통신보조설비	●	●	●	●	●		
		연결송수관설비	●	●					
		비상콘센트설비	●	●	●	●	●		

※ 상기 방재시설은 터널여건 및 주변상황에 따라 필요시에는 기준 터널연장 미만 터널에도 설치할 수 있음.

지와 이용객의 안전확보를 위해 화재의 신속한 감지를 위한 화재 감지기와 터널 내·외부 상황, 전파를 위한 시설(터널전화, 전광안내판, CCTV, 라디오 재방송설비) 및 소화설비인 물분무설비를 반영한 터널 방재시설 기준(표 2)을 수립하였고, 본 죽령터널 방재시설기준에 적용하고 있다.

3. 방재시설 현황

경북과 충북을 분단하는 험준한 지세의 죽령을 관통하는 연장 4,520M의 국내 최장대 터널인 죽령터널의 방재시설의 배치도는 (그림 1)과 같다.

3.1 물분무설비

물분무설비는 배수본관에서 부터 분리된 가지관에 자동밸브를 설치하며, 자동밸브 다음에 물분무헤드를 설치하여 물분무헤드에서 물을 분사해 화재를 억제함과 동시에 화재발생으로 재생성되는 열로 하여금 터널시설이 손상하지 않도록 냉각보호를 하고 아울러 차량연쇄 화재를 억제하는 목적이 있다.

● 설비 구성

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

1) 자동밸브 장치 : 자동밸브장치는 가압개방형의 자동밸브 본체에 제어용의 파일로트밸브, 보수용의 버터플라이밸브, 방수표시용 압력스위치 등을 조립한 것으로 터널측벽에 소화전과 병행 설치하는 것이 표준이다. 본 터널에서는 $\phi 150$ 프리엑션밸브를 설치하였다.

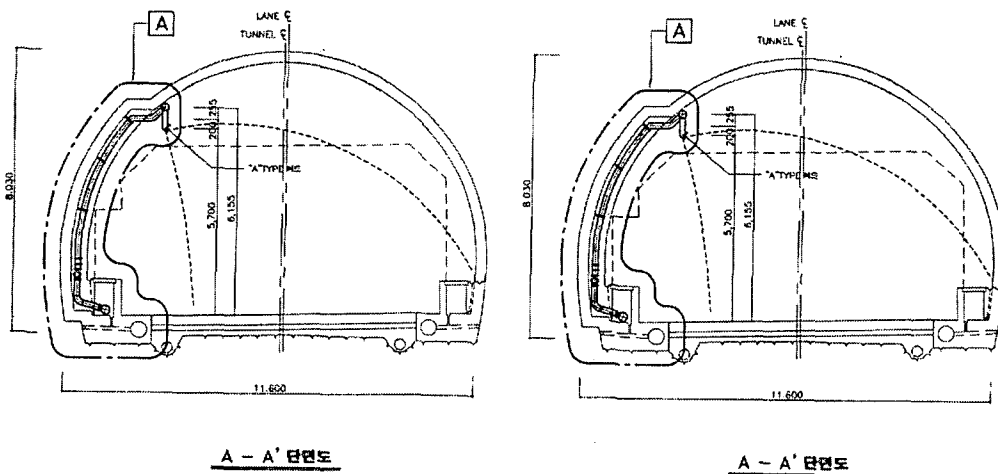


그림 1. 방재시설 배치도

표 3. 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

2) 물분무헤드 : 물분무헤드는 방수압력 3Kgf/cm² 이상에서 노면 1m²에 대해 6 ℓ/min 이상의 물을 방수되도록 배치하고, 건축한계선에 가능하면 똑같이 분포하도록 헤드의 종류 및 설치 간격등을 선정하였다.

- ① 표준단면 편측방수노즐 : A형 헤드 적용
- ② 젯트팬 취나부 편측방수노즐 : B형 헤드 적용
- ③ 광폭단면 (비상주차대) 편측방수노즐 : A+D형 헤드 적용
- ④ 광폭단면(비상주차대) 편측방수노즐 : B+D형 헤드 적용(젯트팬 설치구간과 비상주차대 일치구역 입출구 부근)

3) 제어장치 : 제어장치는 수동 및 자동 모두 가능해야하며 터널 관리소내에서 화재감지에 의해 자동분사할 수 있는 장치가 필수다.

● 물분무설비 방수량 설정

1) 설정 조건 : 물분무헤드는 방수압력 3kgf/cm² 이상으로 노면 1m²에 대해 6 ℓ/min 이상의 물량이 방수되도록 배치하고, 가능하면 건축한계 높이가 되도록 헤드의 종류 및 배치간격 등을 결정한다.

2) 물분무설비의 방수량 : 1구역당 방수량은 1)항과 같이 설치 계획된 헤드 수량과 표준 방수량으로부터 산정한다.

예) 표준 단면부

$$Q = 1\text{구역당헤드수(개)} \times \text{표준방수량(ℓ/min)} = 9\text{개}(5\text{m}) \times 250 \text{ℓ/min} = 2250 \text{ℓ/min}$$

3) 2구역 동시 방수량 : 방수량 = [표준단면부 방수량 × 2] 또는 [표준단면부 방수량 + 비정상단면 (비상주차대)부 방수량 의 합계]로 방수량과 비교하여 큰쪽으로 한다. 본 즉령 터널설비는 [표준단면부 방수량 × 2]기준의 방수량으로 산출하였다.

3.5 비상주차대

터널에서 고장 혹은 사고를 유발하거나 다른 차량의 주행을 방해하지 않도록 일시주차시키기 위해 설치한다.

● 비상주차대 구조

1) 폭원 : 비상주차대의 폭원은 3.0m로 측대가 있는 경우는 측대를 포함한 폭으로 한다. 대형차의 경우 그 폭을 2.50m로 하면 0.5m의 여유가 있으며 이는 주행차선을 주행하고 있는 대형차가 차선을 침범하지 않는 조건보다 약간 작은 수치이다.

2) 접속길이 및 유효길이 : ① 접속길이 : 일본의 중앙고속도로에서 행한 주행시험 결과에 따르면 접속길이는 비상주차대의 진입 속도를 60km/h로 본 경우 본선과 평행이 되는데

까지는 약 20m가 필요하였다.

도로의 구조 및 시설기준에 관한 규정에서는 시험결과에 따라 일반도로구간의 경우 접속 길이를 20~30m로 규정하고 있다. 그러나 터널에서 이와 같은 기준 확보가 곤란하고 실제 고장차량이 60km/h의 속도로 진입한다고 보기 어렵기 때문에 일본도로 설계요령 및 기 설계 적용 예를 토대로 5.0m로 적용하였다.

② 유효길이 : 유효길이는 설계차량이 주차할 수 있는 길이면 되므로 설계차량 연장을 참고로 20m를 적용하였다.

● 비상주차대 설치 간격 및 길이

① 비상주차대 설치간격 결정시 고려할 사항

- 비상주차대 설치 규정(700~800m)을 초과하지 않으며,
- 방재시설 규정에 의거 피난연결통로와 비상주차대를 병렬로 설치하고,
- 지질조건등에 따라 설치장소가 한정된 경우 기준간격에서 가까운 곳에 설치 본 즉 령터널에서는 상기는 고려사항을 감안하고, 기 설계 시공된 국내외 터널들의 설치 예를 참조하였으며, 560m~740m 간격으로 13개소를 계획하였다. 이중 1개소는 수직 갱 지하환기소 위치에 설치하여 대단면 굴착을 최소화하였고, 하행선측 지하환기소에 위치하는 1개소는 환기 요소량이 부합하는 위치 특성상 피난연락갱과 분리설치 하되, 지하환기소 소요공간, 관리요원의 출입 용이성, 환기실에 입구부의 급기덕트 설치공간 확보 차원에서 설치연장을 60m로 계획하였다.

② 비상주차대 설치개소

- 상행 : 6개소 - 하행 : 7개소

③ 설치간격 : 560~740m

④ 수직갱 환기소 위치의 비상주차대 특성

- 수직갱내에 전기실이 위치하여 전기실을 하나의 비상주차대로 통합 관리하므로 유지관리가 용이하고 비상주차대로의 제기능 확보가 용이함.

4. 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.

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

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

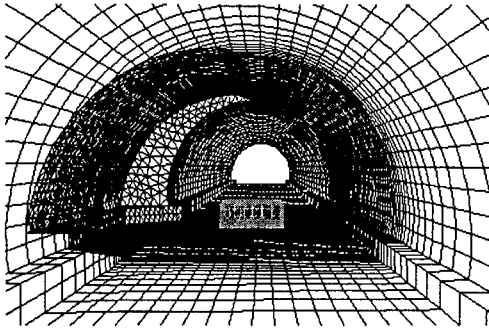


그림 2. 터널형상 및 수치해석 구간.

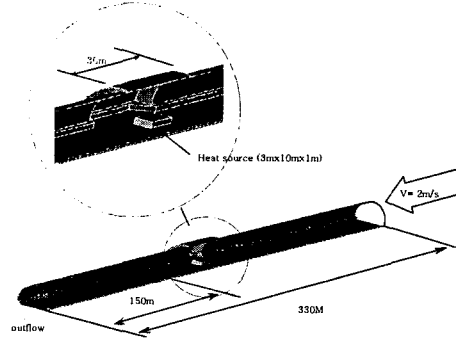


그림 3. 비상주차대 구간의 Mesh.

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_D \rho A_D |\vec{u} - \vec{u}_D| (\vec{u} - \vec{u}_D)$$

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.

$$C_D = 24(1 + 0.15 \text{Re}_D^{0.687}) / \text{Re}_D, \text{Re}_D \leq 10^3$$

여기서 Re_D 는 액적의 레이놀즈수로 다음과 같다.

$$\text{Re}_D = \frac{\rho |\vec{u} - \vec{u}_d| D_d}{\mu}$$

여기서 D_d 는 액적의 직경을 의미한다.

4.1 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.

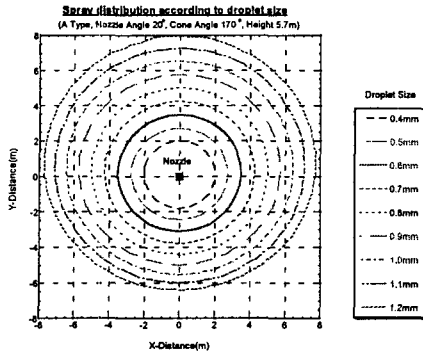


그림 4. 액적크기에 따른 분무분포.

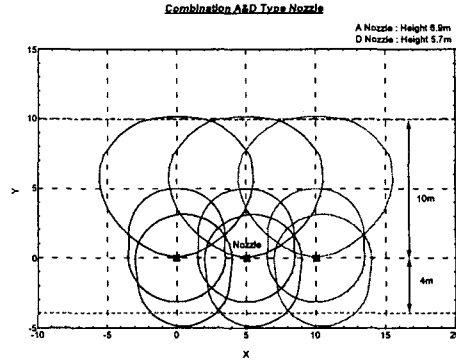


그림 5.비상주차대구간에서의 분포.

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

4.2 해석 결과

● 설치노즐 : A & D Head조합형 노즐

* A Head 조합형

- 설치높이 : 6.9m - 분사각 : 170°
- 분사유량 : Swirl Nozzle 110 L/min + Deflector Nozzle 140L/min
- 설치 각 : Swirl Nozzle 20° + Deflector Nozzle 120°

* D Head 형

- 설치높이 : 5.7m - 분사각 : 170°
- 분사유량 : Swirl Nozzle 110 L/min
- 설치 각 : Swirl Nozzle -20°

(1) A Head 조합형 : A Head 조합형은 일반터널구간에서와 같은 형식으로 노즐 설치 높이만 6.9m로 변경하여 분무분포를 구하였다.

(2) D Head 형 : 비상 주차대의 경우 분무 Nozzle은 터널 중심으로부터 약 3m에 설치되므로 D Head형 노즐로부터 분사된 물은 y(-)방향으로 약 4m 이상 도달하여야 한다. 따라서 Deflector가 없는 A형 Nozzle을 그대로 사용하였다.

(3) 주차대 구간 분무분포 : 1) 5m 간격으로 6.9m 높이에 A Head 조합형 노즐이, 그리고 5.7m 높이에 D형 노즐이 설치되어 분무될 때의 분무 분포는 (그림 5)에 나타나 있다.

2) 5.7m 높이에 설치된 A형 노즐은 x 방향으로 0.5m 떨어져서 설치되어 있다.

3) 그림에서 보듯이 터널 전 영역을 분무된 물이 고르게 분포되고 있음을 알 수 있다.

5. 맺는말

이상으로 국내 최장대 터널인 죽령터널의 방재시설 현황을 살펴보았다. 터널에서의 화재

발생 빈도는 낮으나, 화재발생시 최근 몽블랑 터널등 터널화재 사고에 비추어 수많은 인명 피해와 재산손실을 가져올 가능성이 높다.

특히 국내에서 처음으로 도입되는 터널내 물분무 소화설비를 터널내의 화재 성장에 대하여 컴퓨터로 모델링을 설정한 후 터널 구조에 따라 화재 진압을 예측하기 위한 방법과 물분무 노즐의 설치조건을 제시하였다. 터널의 화재 위치를 위험 매개 변수, 노즐의 방수량, 방수압, 터널 내 풍속 등등의 조건에 따라 화재의 위험에서 벗어날 수 있는 소화설비의 설치조건을 제시하였다.

터널내 화원의 모델을 설정하여 여러 가지 조건에 대한 유동모델 Package를 사용하여 Computer Simulation을 통해 소화 시스템의 분무노즐에 대한 조건을 제시하여 터널 화재의 소방 안전에 목적을 둔다.

2000년 10월 현재 개통된 고속도로 장대터널은 마성터널 등 8개소에 불과하나 향후 계획된 1000m 이상의 장대터널은 40개소가 넘어서고 있어, 터널내 화재 등 비상사태에 대한 방재시설의 효율적인 설치방안 강구와 방재시스템에 대한 체계적인 운영관리가 이루어져야 할 것이다.

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, 전기보고),” 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>

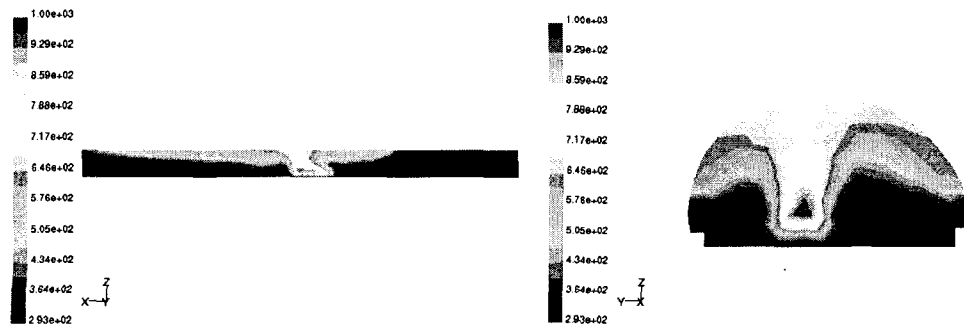


그림 6. 60MW급 화재시 주차대 중심단면 온도(제연풍속=2.0 화재발생 14초 후).

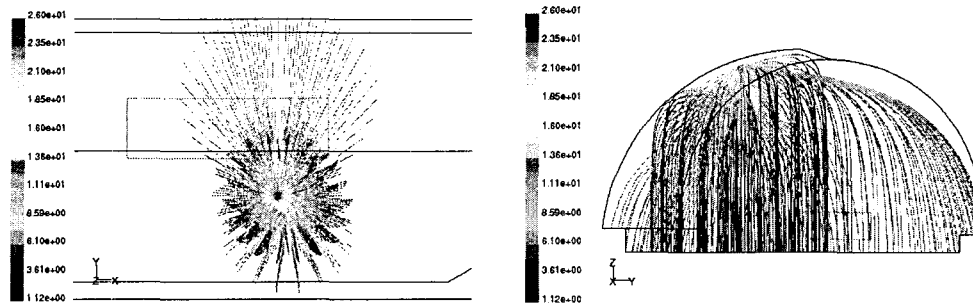


그림 7. 주차대 구간에서의 단독 물분무(제연풍속 없음).

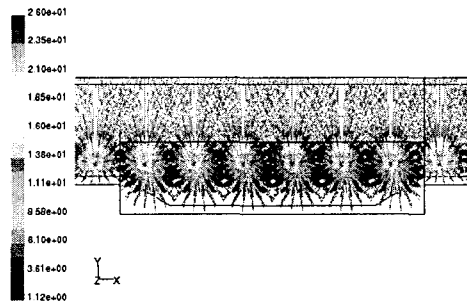


그림 7. 주차대 구간에서의 물분무(제연풍속 없음).

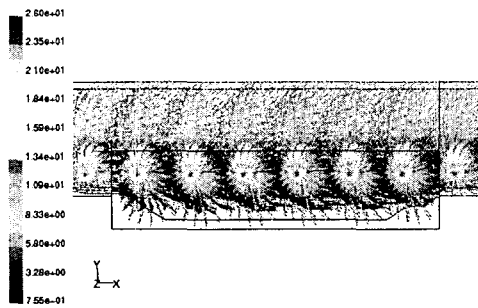


그림 8. 제연풍속 2m/s.

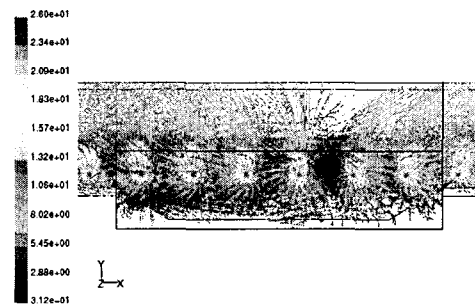


그림 9. 제연풍속 2m/s(화재 발생시).