

P-08

도로터널내 수분무 시설 설치에 따른 화재 위험성 평가

김하영, 이동호*, 유지오**, 김정엽***

인천대학교 안전공학과 대학원, 인천대학교 안전공학과*
 신흥대학 건축설비과**, 한국건설기술연구원***

Fire risk assesment for water spray system in road tunnel

Ha-Young Kim, Dong-Ho Rie*, Ji-Oh Yoo**, Jung-Yup Kim***

Graduate School of Safety Engineering, University of Incheon
 Department of Safety Engineering, University of Incheon*
 Department of Building Mechanical Engineering, Shinheung College**
 Korea Institute of Construction Technology***

1. 서론

도로터널은 화재 발생에 따른 연기 제배연 및 대피의 용이성이 매우 낮은 구조적 특성을 갖는다. 건설교통부는 이러한 구조적 특성의 심각성으로 2006년도부터 지하터널의 방재기능 강화와 화재시 지하역사의 신속한 화재진압 및 대피를 위해 제연시스템과 자동제어설비 등 소방설비를 연차적으로 보강해 나가고 있다. 이와 관련하여 연장 1000 m이상의 구조를 갖는 도로터널은 화재에 대비하여 제연시설을 설치하도록 정하고 있다¹⁾. 이러한 터널화재 소화설비의 경우, 유럽은 터널에 스프링클러를 적용하지 않으며 일본은 10000m 이상의 터널 또는 3000m 이상의 통행량이 비번한 도로에 적용하고 있다. 노르웨이는 화재시 터널구조물의 안전을 목표로 터널 라이닝 재료를 보호하기 위하여 건식 스프링클러를 채용하고 있다. 스웨덴은 한 개소의 터널에 적용하였으며 미국의 경우 3개소의 터널에 스트링클러 설비가 설치되어 운영되고 있다. 스프링클러를 설치하는 이유는 화재 차량을 냉각하여 다른 차량으로의 전파를 막고 터널 라이닝 재료에 대한 2차 화재를 막아 소화활동을 돕는 효과가 있다. 그러나, 스프링클러의 사용은 연기의 성층화를 교란하여 공기와 혼합되므로 화재구간 내에 있는 대피자의 충분한 대피가 확보되지 않은 상황에서 작동함으로써 원활한 대피가 이루어지지 못하는 단점이 있다. 따라서, 터널의 특성상 화재 발생을 자동감지하여 소화하는 스프링클러 설비보다 수분무설비가 도입되고 있는 실정이다. 수분무설비는 화재구간에 국한하여 수동으로 살수하는 설비로서 기존의 스프링클러의 헤드를 사용할 수 있다. 또한, 터널내 살수범위 내의 대피자가 대피를 완료하는 시점으로 운전시간을 적용할 수 있는 운전상의 장점이 있으므로 대피안전 측면에서 스프링클러를 보강한 시스템으로 활용할 수 있다. 그러나, 터널화재시 대피안전 및 화재확대방지 확보 수단으로 사용되고 있는 방안으로 제연설비와 수분무설비의 공동운동을 들 수 있으나 수분무설비 사용에 따른 배연설비운영 방안에 대한 지침이 전무하므로 수분무설비와 제연설비의 상호 연동작동에 따른 운영방안에 대한 가이드가 시급히 요구된다.

본 연구는 터널 화재시 화재구간의 수분무설비 작동에 따른 화재성상 변화와 연기이동 특성 분석을 통하여 화재강도(passenger car : 5MW, bus : 20MW, lorry : 50 MW) 변화에 따른 전산시뮬레이션을 수행하여 제연설비운전 지침의 기초자료를 제공한다.

2. 국내의 수분무설비 운영기준

국내 터널내에서의 수분무 설비에 대한 운영은 도로터널 방재시설 설치 지침(1)을 기준으로 한다. 세부적인 사항으로 총 연장 3,000m이상의 터널로 일방통행 터널의 경우 일평균 교통량이 90×10^3 대/km/day+tube 이상인 터널, 대면통행의 경우에는 60×10^3 대/km/day+tube 이상인 터널에 대해서 위험도 및 화재로 인한 터널폐쇄에 따른 경제성 등을 검토하여 설치토록 권고하고 있다. 설치간격은 4~5m의 이격거리로 규정하고 있다. 살수구역은 50m이하로 2구역을 동시에 방수될 수 있도록 하며 살수량은 $6\ell/\text{min}/\text{m}^2$ 이상의 수량을 노면에 균일하게 방수하도록 규정하고 있다.¹⁾

3. 수치시물레이션에 의한 수분무 해석

화재에 미치는 수분무 기초해석은 무배연 조건을 기준으로 화재강도 별 수분무 작동에 따른 터널내 기류 변화를 분석하였다. 따라서, 수분무에 의한 연기 및 온도전파특성을 배연설비 무작동 조건하에서 파악함으로써 배연운전과의 비교 데이터로 활용하였다. 본 연구의 해석은 FDS Ver.4.0²⁾을 사용하여 화재강도에 따른 비정상(unsteady) 연기농도, 온도, 이산화탄소, 일산화탄소 농도를 ASCII값으로 데이터베이스화하여 평가를 수행하였다. FDS는 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 화재 전용 수치해석 프로그램으로서 화재에 의해 유도되는 연기와 온도의 유동예측에 사용되고 있다.

3.1 수분무 가동조건 및 대피시나리오

국내 도로터널 방재지침에는 수분무를 50m의 살수구역 2지점을 동시에 살수하도록 되어있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 터널 화재지점을 기점으로 전후방 50m구간을 살수영역으로 설정하였다.

화재발생 시점과 병행하여 수분무를 작동하였을 경우 수분무에 의해 터널 상단부의 연기 하락을 유발하여 대피자에게 연기에 노출될 수 있을 있다. 따라서, 대피자가 수분무 지역을 모두 대피한 이후 가동하는 것을 원칙으로 한다. 본 연구에서는 이러한 수분무 가동 지연시간을 고려하여 대피시간 지연에 따른 연기 및 열 유동의 전파특성을 분석하였다. 대피시간의 해석은 영국 IES사의 Simulux를 사용하였으며 지연시간의 발생이 대피자의 대피안전성에 미치는 영향을 분석하였다.

대피 인원 산정 및 대피 경계조건은 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다. 본 연구에서는 대피의 단순비교를 위해 터널 내에 피난연락갱 등과 같은 비상 탈출시설이 존재하지 않는 것으로 설정하였다.

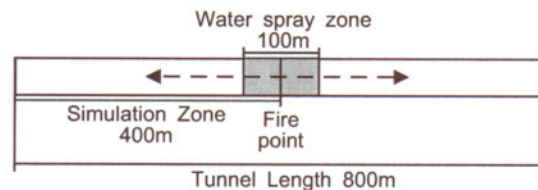


Fig. 1. Schematic diagram of water spray zone and simulation zone(Simluex)

Table 1. Simulation conditions of evacuation

| sort | contents | | | | | | etc. |
|-------------------------|---------------|-----|-----|--------------|---------------|--------------|--------------------------|
| tunnel width | 13.2m | | | | | | 3 laen |
| length | 400m | | | | | | |
| Kind of vehicle | passenger car | Bus | Van | Truck(large) | Truck(middle) | Truck(small) | Driving Speed: 10km/h |
| Number of Vehicle | 96 | 7 | 9 | 21 | 21 | 16 | |
| number of passenger | 4 | 40 | 14 | 2 | 2 | 2 | |
| Number of total evacuee | 904명 | | | | | | |

3.2 수분무 조건

본 해석에서 사용된 수분무 조건은 FDS에서 기본적으로 제공이 되어있는 K-11을 사용하였으며 해당 노즐의 물리적 특성은 다음과 같다.

터널내 총 수분무 노즐 설치 대수는 설치지침에 의거 m² 당 6.309ℓ/min의 양이 방수 되도록 44개소로 설정하였으며 화재발생 지점을 중심으로 2개의 살수구역(각 50m)으로 나누어 총면적 1320m²의 구역을 살수하도록 설정하였다.

Table 2. Water spray dimension

| | |
|----------------------------|------------------------------|
| Operating Pressure | 1.3 bar |
| K-factor | 166 ℓ/min/bar ^{1/2} |
| Velocity | 10.0 m/s |
| Median volumetric diameter | 900 μm |

3.3 터널 및 화재경계조건

Table 3과 Fig. 2는 터널의 개략도를 나타낸다. Table 4는 화재 강도별 화재성상을 나타내며, 화재에 따른 배연계산에는 Table 5의 수치해석조건으로 계산을 수행하였다. 또한 수분무 작동시간 지연이 연기의 이동에 미치는 영향을 분석하기 위해 지연시간을 0, 60, 120, 180초로 설정하였다.

화재 해석에 사용된 격자는 총 1,126,400(44×1600×16)개³⁴⁾를 사용하였으며 해석 격자의 크기는 동일하게 설정하였다.

초기 터널내 온도는 23.5℃로 설정하였으며 외부 기류 및 차량의 이동으로 인한 초기 내부기류의 형성은 고려하지 않았다.

다음은 터널제원을 나타낸다.

Table 3. Simulation dimension(FDS)

| | |
|--------------------|----------------------|
| Tunnel length | 800 m |
| Cross section area | 54.94 m ² |
| Tunnel height | 4.8 m |
| Fire size | 2.5×3.2×12.0 m |
| Grid | 44×1600×16 |

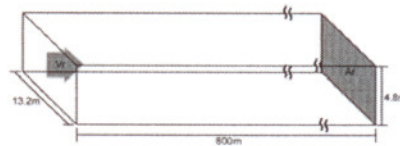


Fig. 2. tunnel dimension

Table 4. Heat release rate and fire curve

| | | |
|------------------|-------|-------|
| 화재강도(MW) | 20.0 | 50.0 |
| 총발생열량(GJ) | 41 | 65 |
| growth rate (α) | 0.1 | 0.215 |
| 감쇄율 (β) | 0.001 | 0.001 |
| growth time(Sec) | 450.0 | 490.0 |
| 유지시간(Sec) | 455.3 | 102.9 |

Table 5. Simulation cases

| 배연조건 | 화재강도 | water spray delay time(sec) | | | | |
|------|------|-----------------------------|---|----|-----|-----|
| 무배연 | 20MW | not install | 0 | 60 | 120 | 180 |
| | 50MW | not install | 0 | 60 | 120 | 180 |

4. 시뮬레이션 결과

터널내 화재시 수분무 작동에 따른 연기 및 열유동 현상을 분석하기 위해 수분무 작동 시 터널내 기류 흐름을 분석하고 터널 전 구간에서의 연기이동 전과특성을 분석하였다. 또한 수분무의 지연시간이 연기 이동에 미치는 영향과 연계하여 피난 시뮬레이션을 수행함으로써 종합적으로 터널내피 위험성을 수행하였다.

4.1 수분무에 의한 기류 흐름의 변화

본 연구에서는 수분무의 작동이 화재 기류에 미치는 영향을 알아보기 위해 수분무 지점에서의 기류패턴과 온도 및 연기농도를 분석하였다.

Fig. 3은 수분무 작동 유무에 따른 온도를 분석한 결과를 나타낸다. 화재 발생 900sec 이후 수분무의 영향으로 수분무 지역 내 최대 18℃의 온도가 하락하는 특징을 나타내었다. Fig. 4는 수분무 작동 유무에 따른 연기농도를 분석한 결과를 나타낸다. 수분무 살수 영역에서는 수분무로 인한 터널 길이방향으로의 연기전과 교란으로 최대 400mg/m³의 상승된 결과를 나타냈다. 그러나 수분무 지점 이후 부터는 살수 영역에서의 연기의 이동 억제 효과로 인해 화점기준 132.0m 이후에는 수분무시설이 작동한 경우의 연기농도가 낮은 양상을 보였다.

Table 6은 화재 강도 20MW의 화재발생 900sec후 수분무 지점에서 수분무의 유무에 따른 온도 및 유동 특성을 나타낸다. 또한 Fig .3은 화재발생후 900초가 경과된 상태에서 1.5m상부의 위치별 온도 및 연기농도를 나타낸다.

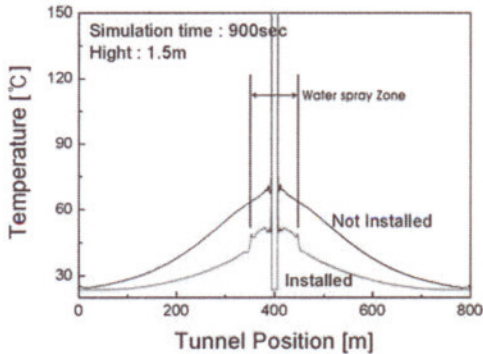


Fig. 3. Temperature distributions(900sec)

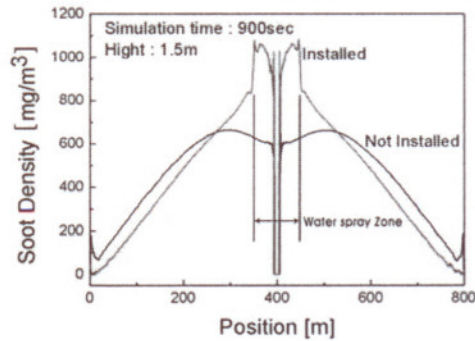


Fig. 4. Soot density distributions(900sec)

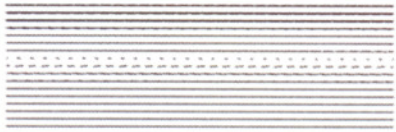
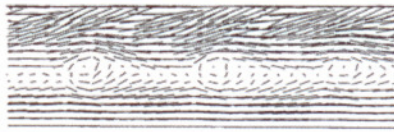
Table 6은 터널을 길이방향 단면으로 본 속도벡터를 나타낸다. 수분무 시설이 설치되지 않았을 경우에는 길이 방향으로의 속도벡터에 의해 연기의 흐름이 지배되는 경향을 보이지만 수분무 작동시에는 수분무에 의해 발생하는 높이 방향의 속도벡터가 발생함에 따라 수분무 구간에서는 연기의 하락이 발생하게 된다.

이러한 연기의 하락으로 인해 본 연구에서 설정된 터널에서는 호흡선 높이인 1.5m상부에서의 연기농도가 수분무시설이 미설치된 터널에 비해 최대 64.8%가 상승하는 것으로 나타났다.

따라서 수분무 시설이 동작하면 물입자의 냉각효과로 인해 온도의 하락을 돕게 되지만 외류의 영향으로 연기 입자의 교란이 발생하여 가시거리를 악화시키는 것으로 나타났다.

따라서 화재시점에 맞춘 수분무 작동은 연기의 하강을 돕게 되며 살수지역 내에 대피자가 존재할 경우 가시거리의 확보가 용이하지 않게 되므로 탈출 위험성이 증대된다.

Table 6. Water Spray flow movement characteristics

| | not installed | installed |
|--|---|--|
| spray point | | ↓ ↓ ↓ |
| Flow vector for the Part of spray zone |  |  |

4.2 수분무가 연기이동에 미치는 영향

수분무 설비의 설치에 연기의 이동을 억제하여 수분무 지점 이후의 대피자 안전성을 확보하는데에 주안점을 두고 있다. 따라서 본 연구에서는 수분무의 설치여부와 대피자를 고려한 살수 지연시간이 연기이동에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 화재발생 시간 T_f 와 수분무의 개시 시간 T_w 의 시차를 수분무의 지연시간 ΔT_d 로 나타내어 식(1)로 정의하였다.

$$\Delta T_d = T_w - T_f \quad (1)$$

아래의 Table 7~8은 화재강도별 수분무 설치여부와 수분무 설치시 수분무의 지연시간 ΔT_d 에 따른 결과를 나타낸다.

각각의 결과는 연기농도가 $65\text{mg}/\text{m}^3$ 이상인 연기가 이동한 거리를 나타내며 이에 따른 분석결과이다.

또한 수분무 작동 지연시간 ΔT_d 는 연기의 이동에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났으며 이는 화재 곡선이 정상상태에 도달하기 전 연기의 이동의 많은 진행이 되지 않은 상태에서 수분무를 작동시켜 이러한 결과가 나타난 것으로 분석된다.

20MW 화재시 Table 7에서 나타난 바와 같이 수분무 설비의 설치가 연기의 이동을 효과적으로 억제하며 시간이 지남에 따라 약 360sec 이후에는 약 80m의 거리차가 발생하였으며 시간이 흐름에 따라 약 45m까지 일정하게 거리차가 줄어드는 것으로 나타났다.

또한 수분무 작동 지연시간에 따른 연기의 이동거리는 작동이 지연됨에 따라 연기의 이동거리가 증가하지만 일정한 시간이 지남에 따라 지연시간이 짧은 경우와 이동거리가 거의 일치하는 특성을 보였다.

50MW 화재시 Table 8에서 나타난 바와 같이 수분무 설비의 설치가 연기의 이동을 효과적으로 억제하며 시간이 지남에 따라 약 360sec 이후에는 약 65m의 거리차가 발생하였으며 시간이 흐름에 따라 약 30m까지 일정하게 거리차가 줄어드는 것으로 나타났다.

50MW의 결과도 20MW와 같은 양상으로 수분무 작동 지연시간에 따른 연기의 이동거리는 작동이 지연됨에 따라 연기의 이동거리가 증가하지만 일정한 시간이 지남에 따라 지연시간이 짧은 경우와 이동거리가 거의 일치하는 특성을 보였다.

Table 7. Simulation result (20MW)

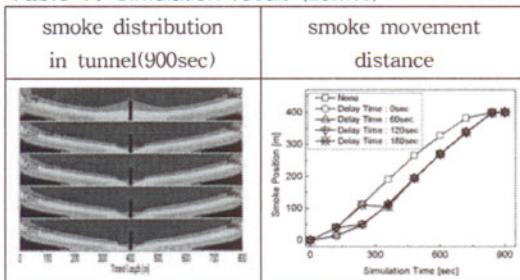
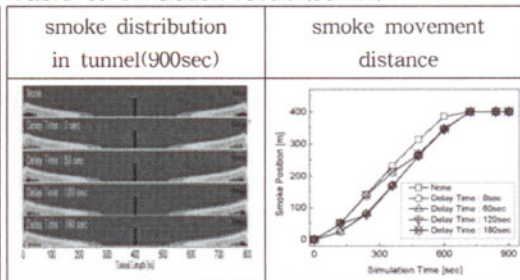


Table 8. Simulation result (50MW)



5. 결 론

본 연구에서는 터널내 수분무 설비가 터널내 기류에 미치는 영향 및 안전성 확보를 위해 수분무 지연시간을 고려한 운전모드가 연기이동에 미치는 영향에 대해 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 터널내의 수분무는 연기 하락을 돕게 되며 수분무 작동시 살수구역내에 대피자가 존재할 경우 대피자의 위험성을 증대시킨다.
2. 수분무의 지연시간을 설정하였을 경우 수분무가 작동하는 시간에 따라 화재발생 초기에는 조건별 거리가 발생하지만 화재 발생 이후 480sec가 경과하면 지연시간별 연기의 이동거리가 1.6%이내로 근접된다.
3. 터널내 수분무 시설의 설치는 화재시 연기의 이동을 억제시켜 대피자의 안전성을 확보하는데 효과적인 것으로 나타났으나, 화재의 강도가 커질수록 이러한 연기이동 억제효과는 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 건설교통부, 도로터널 방재시설 설치지침, 2004.12
- 2) Kevin McGrattan, Glenn Forney, "Fire Dynamics Simulator(Version 4) User's Guide", NIST, 2005.
- 3) T.g.Ma, J.G.Quintiere, "Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations", Fire Safety Journal 38, pp. 467-492, 2003.
- 4) Baum H.R., B.J.MaCaffery, "Fire Insuced Flow Field-Theory and Experiment", Fire Safety Science Proceedings of the Second International Symposium , 1989, pp. 129-148
- 5) Sergiu, F., Task force for technical investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc vehicular tunnel - Status Report of April 13, 1999", 2-8-2000.
- 6) B. Bettelini, A. Henke, "Upgrading the Ventilation of the Gotthard road tunnel", 11th Int. Sym. on the Aero. and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.29-45, BHRGroup, 2003.
- 7) 이동호등, "반회류식 환기설비를 활용한 화재시 터널 방재연구", 2005년 한국화재소방학회 춘계학술 논문발표 논문집, pp.131-137, 2005.5.27
- 8) FHA, Memorial Tunnel : Fire Ventilation Test Program, CD-ROM and Comprehensive Test Report, Messachusetts Highway Dept. 1996.
- 9) NFPA, NFPA 502 standard for road tunnel, Bridges and other limited access highways, Quincy, Massachusetts, 1998 Edition, 1998.
- 10) RABT, "Richtlinien fur die Ausstattung und den Betrieb von StraBentunneln (RABT)", Germany, 2002.
- 11) CETU, "Circulaire Int. N° 2000-82 DU relative à la réglementation de la circulation des véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels routiers du réseau national", 30 NOV. 2000, France.
- 12) O. Vauquelin and D. Telle, "Smoke control in tunnel fires - should we talk about critical velocity or critical mass flow rate ?", 10th Int. Sym. on the Aero. & Vent. of Veh. Tunnels, pp.97-103, 2000.
- 13) 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, 2004, "도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구", 한국터널공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 129-140.