

## 터널 화재시 수분무 소화설비의 효용성 평가 Assessment of the Usefulness of the Water Spray for Fire Extinguishing in Case of Fire in Tunnels

이동호 · 임경범\*<sup>†</sup> · 유지오\*\*

Dong-Ho Rie · Kyung-Bum Lim\*<sup>†</sup> · Ji-Oh Yoo\*\*

인천대학교 안전공학과, \*한국소방안전협회, \*\*신홍대학 건축설비디자인과  
(2008. 11. 10. 접수/2008. 12. 12. 채택)

### 요 약

본 연구는 수분무 소화설비의 효용성에 대한 기초평가를 수행할 목적으로 FDS 수치시뮬레이션을 수행하였다. 화재강도(20 MW, 50 MW) 및 풍속의 변화에 따른 화재시 온도 및 연기농도에 대한 안전성 확보 효과를 분석하였다. 터널내 풍속이 없는 경우 수분무는 냉각효과에 의한 온도 및 연기농도 감소효과가 아주 우수하여 대피자의 안전성 확보에 효과적이었다. 화재강도가 커질수록 연기이동 억제효과는 감소한 결과를 나타냈다. 또한 터널내 기류가 존재하는 경우에는 냉각효과에 의해서 연기의 성층화를 교란하며, 대피자 가시도를 저하시키는 것으로 나타났다. 따라서 수분무 소화설비는 화재발생시 대피자가 대피한 후에 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### ABSTRACT

In this study, we conducted an FDS numerical simulation for the purpose of carrying out a basic assessment of the usefulness of the water spray for fire extinguishing. We analyzed the effect of securing the stability in temperature and smoke density in case of fire according to fire intensities (20MW, 50MW) and changes in wind speed. When there was no wind speed in tunnels, it was effective in securing the safety of people because the cooling effect of the water spray system had an excellent effect on reducing temperatures and smoke densities there. The higher a fire intensity is, the less effect it has on reducing smoke flows. When an air current exists in tunnels, its cooling effect disturbs the smoke stratification and lowers the visibility degree during evacuation. Therefore, the water spray for fire extinguishing should be put into action only after people take shelter during fire.

**Keywords :** FDS, Water spray system, Tunnels, Smoke density

### 1. 서 론

도로터널은 일반건물 구조물과는 달리 반밀폐 공간으로 화재 발생에 따른 연기 제배연 및 대피의 용이성이 매우 낮은 구조적 특성을 갖는다. 터널의 이러한 구조적 특성의 심각성으로 우리나라에서도 2006년도부터 지하터널의 방재기능 강화와 화재시 지하역사의 신속한 화재진압 및 대피를 위해 제연시스템과 자동제어설비 등 소방설비를 연차적으로 보강해 나가고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 터널화재 소화설비의 경우, 스프링클러 설비나 수분무 설비를 채용하고 있다. 대표적인 수계화재

제어 장치인 스프링클러는 화원 및 화염의 냉각효과에 주로 의존하는 반면, 수분무는 마이크로 이하의 입자 크기로 분사되어 액체 표면적의 증가로 인한 냉각효과의 증가 및 수증기로 기화될 때 부피팽창으로 인한 질식효과 등의 증가를 가져올 수 있다.<sup>2)</sup> 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 화재발생을 자동감지하여 소화하는 스프링클러 설비보다 수분무설비가 도입되고 있는 실정이다. 수분무 설비는 화재구간에 국한하여 수동으로 살수하는 설비로서 기존의 스프링클러의 헤드를 사용할 수 있다. 또

<sup>†</sup>E-mail: kblim@kfsa.or.kr

한, 터널내 살수범위 내의 대피자가 대피를 완료하는 시점으로 운전시간을 적용할 수 있는 운전상의 장점이 있으므로 대피안전 측면에서 스프링클러를 보강한 시스템으로 활용할 수 있다.<sup>3,5)</sup>

본 연구는 터널 화재시 화재구간의 수분무설비 작동에 따른 수치시물레이션을 통해 터널내 풍속의 유무 (0 m/s, 2.5 m/s)에 따른 화재시 온도 및 연기농도에 대한 특성 분석을 수행하여 수분무설비의 효용성에 대한 기초적인 평가를 제공하는데 있다.

## 2. 실험

화재에 미치는 수분무 기초해석은 화재강도에 따른 수분무 작동에 따른 터널내 기류 변화를 분석하였다. 따라서, 수분무에 의한 연기 및 온도전파특성을 풍속 유무 및 수분무설비의 작동 유무하에서 수분무설비의 효용성을 분석하였다. 본 연구의 해석은 미국 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 화재 전용 수치해석 프로그램으로서 화재에 의해 유도되는 연기와 온도의 유동예측에 사용되고 있는

**Table 1.** Heat release rate and fire curve

화재강도(MW)	20.0	50.0
총발생열량(GJ)	41	65
growth rate ( $\alpha$ )	0.1	0.215
감쇄율 ( $\beta$ )	0.001	0.001
성장시간(Sec)	450.0	490.0
누적열량 (GJ)	성장과정	3.14
	감쇄과정	28.64
	유지과정	9.22
유지시간(Sec)	455.3	102.9

FDS Ver.4.0<sup>6-8)</sup>을 사용하여 평가하였다.

수치해석조건은 종류환기방식으로 화재강도 20 MW 및 50 MW에서 터널풍속(0 m/s, 2.5 m/s)에 따른 분석을 수행하였으며, Table 1에 화재강도별 화재성상을 나타내었다. 수분무설비는 터널 중앙부에 5 m 간격으로 100 m 구간에 일렬로 헤드를 설치하였으며 250 lpm 방수량으로 3.43 bar(3.5 kgf/cm<sup>2</sup>)의 방수압력하에서 50~75°의 토출각도로 화재발생 180초 후에 작동하도록 설계하였다.

또한 수치해석 결과로부터의 위험성평가는 대피자의 호흡선 높이인 터널 바닥기준 1.5 m 상부의 대피공간 내 평면을 기준으로 하였으며 이에 따른 평가항목은 다음과 같다.

터널 내 위치에 따른 연기 농도 변화를 해석하기 위한 위치별 평균 연기 농도  $S_{m(y)}$ 는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$S_{m(y)} = \frac{\sum S_{i(y)}}{G_{n(y)}} \quad (1)$$

$S_{i(y)}$ 는 길이 방향 y 위치에서의 폭방향 각 격자의 연기농도를 나타내며  $G_{n(y)}$ 는 y 위치에서의 총 격자수를 나타낸다.

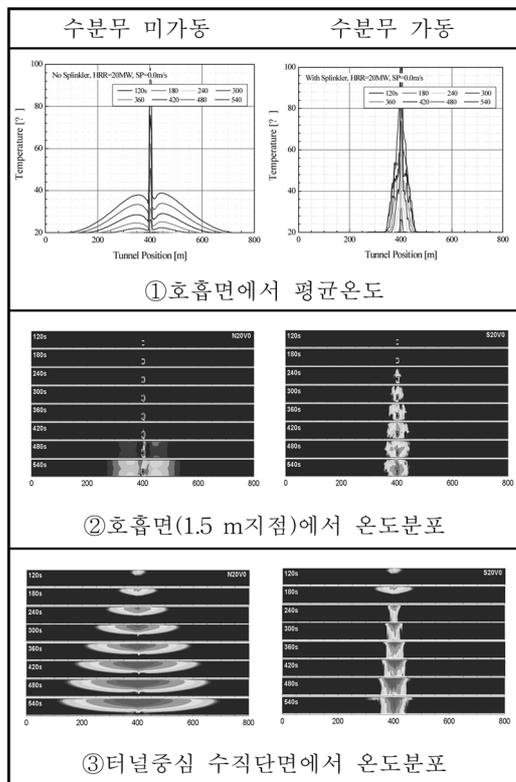
## 3. 시뮬레이션 분석 결과

터널내 화재발생시 수분무 소화설비의 안전성 평가를 위해 화재강도 20 MW 및 50 MW에서 수분무 소화설비를 가동하는 경우와 가동하지 않는 경우에 있어 온도 및 연기농도를 분석하여 화재발생시 수분무 소화설비에 대한 효용성 평가를 위해 수행하였다.

### 3.1 화재 강도 20 MW 해석 결과

#### 3.1.1 터널내 풍속 0 m/s인 경우 분석결과

Figure 1과 Figure 2는 터널내 풍속 0.0 m/s일 때 온



**Figure 1.** Temperature distribution (20 MW, 0.0 m/s).

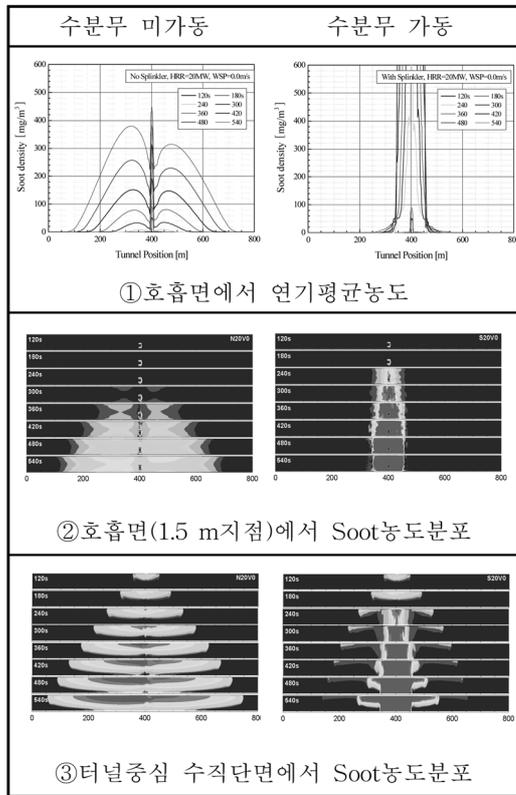


Figure 2. Smoke density distribution (20 MW, 0.0 m/s).

도 및 연기농도를 나타낸 것이다. Figure에서 ①은 호흡면에서의 터널내 위치별 평균값을 120초 부터 540 초까지 나타낸 그래프이며 ②는 호흡면(터널 하부로부터 1.5 m 지점)에서의 분포를 나타낸 것이며, ③은 터널중심 수직단면에서의 분포도를 나타낸 것이다.

Figure 1에 나타낸 바와 같이 수분무를 가동하지 않더라도 호흡면에서 평균온도는 수분무 가동에 관계없이 화재지점에 아주 근접한 지점을 제외하고는 40°C이하로 나타나고 있다. 따라서 터널내 화재시 온도가 대피안전에 미치는 영향은 아주 작을 것으로 평가된다. 그러나 수분무를 가동하는 경우에는 화재지점에서 온도가 40°C를 초과하여 화재근접지점에서는 60°C를 초과하나 화재를 벗어난 지점(150~200 m)에서는 온도상승이 전혀 없는 것으로 평가된다. 수분무를 가동하는 경우에 온도가 낮은 것으로 평가된다. 특히 수직단면에서의 온도분포는 수분무를 가동하는 경우에 현저하게 낮은 것으로 나타나고 있다.

또한 연기농도분포는 화재지역(수분무분사지역)에만 존재하는 것으로 나타나고 있어 수분무 가동으로 인해

서 연기의 전파는 완전히 제어되는 것으로 나타나고 있다. 그러나 수분무가 가동되는 지역의 연기농도는 수분무를 가동하지 않는 경우보다 현저하게 높게 나타나고 있다.

따라서 터널내 풍속 0.0 m/s일 때 수분무를 가동하는 경우에는 수분무지역의 온도 및 연기농도가 수분무를 가동하지 않는 경우보다 현저하게 높게 나타나고 있으나 분무지역을 제외한 지역에서는 수분무를 가동하지 않는 경우보다 현저하게 낮은 결과를 보여 수분무의 설치가 온도 및 연기이동 억제에 효과적인 것으로 분석되었다.<sup>9)</sup>

3.1.2 터널내 풍속 2.5 m/s인 경우 분석결과

Figure 3과 Figure 4는 터널내 풍속 2.5 m/s일 경우의 온도 및 연기농도를 나타낸다.

Figure에서 ①은 호흡면에서의 터널내 위치별 평균값을 120초 부터 540초까지 나타낸 그래프이며 ②는 호흡면(터널 하부로부터 1.5 m 지점)에서의 분포를 ③

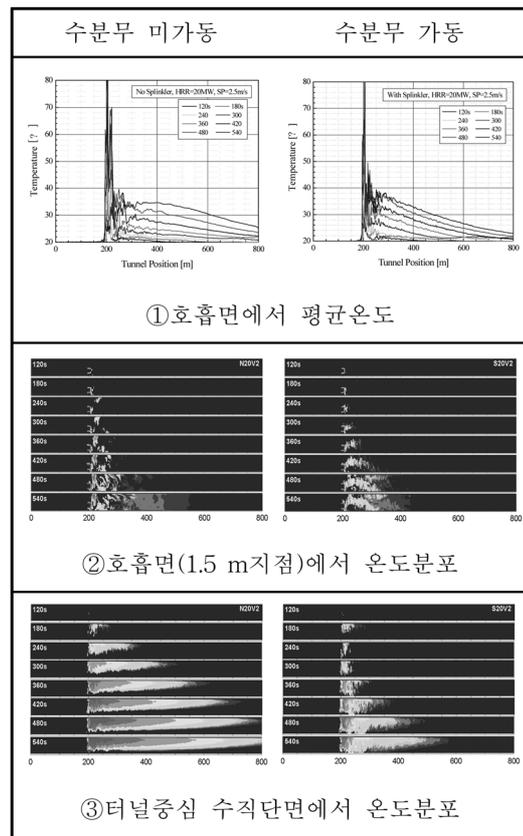


Figure 3. Temperature distribution (20 MW, 2.5 m/s).

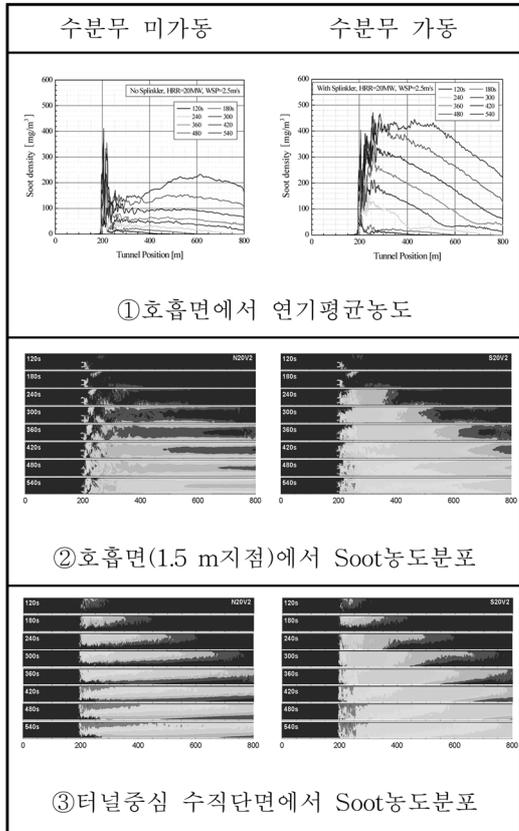


Figure 4. Smoke density distribution (20 MW, 2.5 m/s).

은 터널중심 수직단면에서의 분포도를 나타낸 것이다.

Figure 3에 나타난 바와 같이 호흡면에서 평균도는 수분무를 가동하는 경우가 조금 저하하는 것으로 나타나고 있으나, 수분무설비 가동에 관계없이 화재지점에 아주 근접한 지점을 제외하고는 40°C 이하로 나타나고 있다. 따라서, 터널내 화재시 온도가 대피안전에 미치는 영향은 아주 작을 것으로 평가된다. 또한 화재지점에서의 온도는 수분무가 가동할 경우가 높으나 없으나 분무영역(150~200 m)을 벗어난 지점에서는 수분무를 가동하는 경우에 온도가 낮은 것으로 평가된다. 특히 수직단면에서의 온도분포는 수분무를 가동하는 경우에 현저하게 낮은 것으로 나타나고 있으며, 화재 근접한 지점에서 부력에 의한 영향이 나타나지 않음을 알 수 있다.

또한 호흡면에서 연기농도분포는 그림②에서 알 수 있는 바와 같이 수분무를 가동 하지 않는 경우보다 현저하게 높게 나타나고 있으며, 연기농도는 수분무를 가동하는 경우가 부력의 영향의 감소로 인해서 540초 경

과 후에 약 1.9배 정도 높게 나타나고 있다.

### 3.2 화재 강도 50 MW 해석 결과

#### 3.2.1 터널내 풍속 0 m/s인 경우 분석결과

Figure 5, Figure 6은 화재강도 50 MW에서의 터널내 풍속 0 m/s에서 수분무 가동 및 미가동시 호흡선에 평균온도와 온도분포 및 연기농도분포를 나타낸 것이다.

Figure 5에서 호흡선에서 평균온도분포는 수분무를 가동하는 경우에 분무영역에서만 상승하는 것으로 나타나고 있으며, 분무영역외에서 온도는 거의 상온에 이르는 것으로 나타나고 있다. 수직 온도분포 또한 온도의 전파가 수분영역만으로 제한되는 특징을 보이고 있어 풍속이 없는 경우에는 수분무에 의한 냉각효과가 아주 우수한 것으로 판단된다.

Figure 6은 연기농도를 나타낸 것으로 수분무를 가동하는 경우에도 연기의 전파가 터널의 양방향으로 이루어지고 있으나 수분무영역을 제외하면 성층화가 유지되는 것으로 나타나고 있다. 이 경우에도 수분무를 가동하지 않는 경우와 비교할 때 분무영역외의 지역에

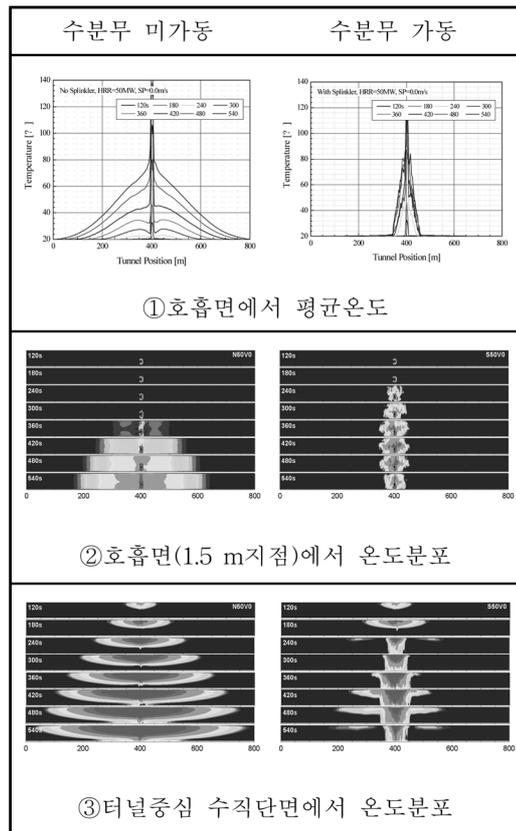


Figure 5. Temperature distribution (50 MW, 0.0 m/s).

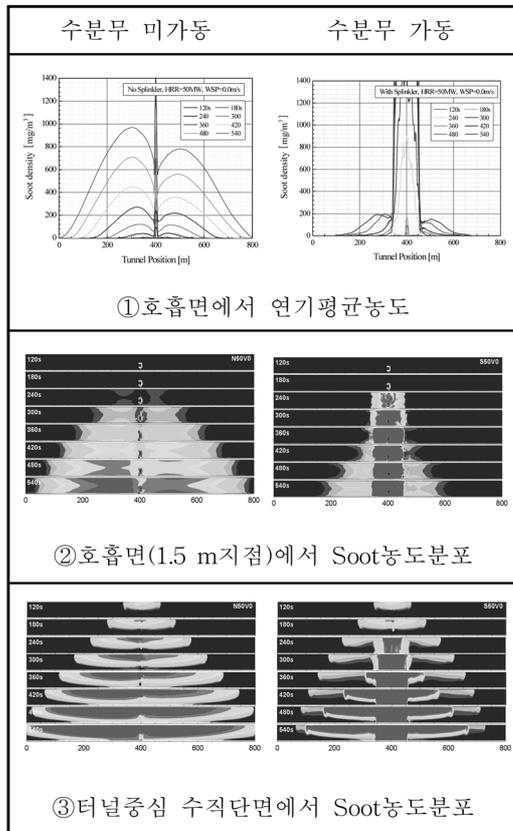


Figure 6. Smoke density distribution (50 MW, 0.0 m/s).

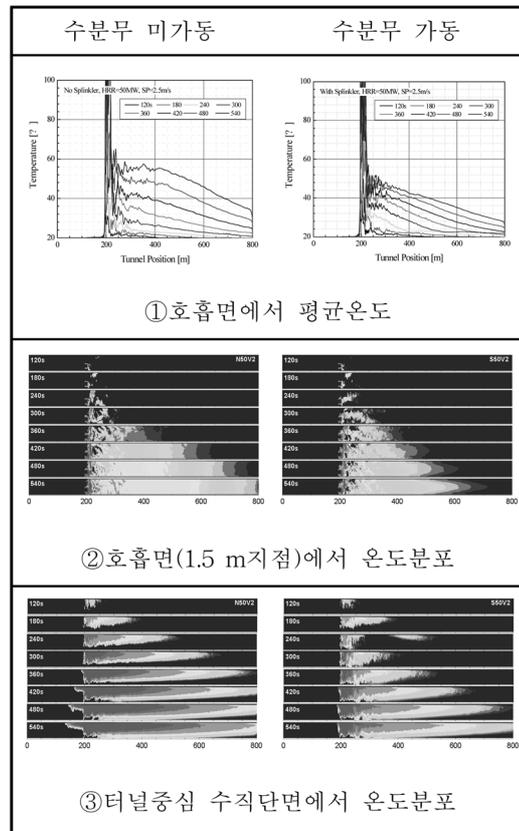


Figure 7. Temperature distribution (50 MW, 2.5 m/s).

서는 연기농도의 감소효과도 아주 우수한 것으로 평가된다.

3.2.2 터널내 풍속 2.5 m/s인 경우 분석결과

Figure 7은 화재강도 50 MW인 경우, 터널내 풍속이 2.5 m/s일 때 온도특성을 나타낸 것이다. 수분무를 가동하는 경우, 호흡선에서 최대온도는 50°C 정도이며, 수분무를 가동하지 않는 경우에는 58°C 정도 나타내었다. 또한 40°C를 초과하는 영역이 수분무를 가동하지 않는 경우에는 500 m 구간 정도에 이르나 수분무를 가동하는 경우에는 약 230 m 정도로 고온의 영역이 현저히 감소하는 것으로 나타나고 있다.

또한 수직단면에 대한 온도분포에 의하면 수분무를 가동하지 않는 경우에는 백레이어 형상이 나타나고 있으며, 수분무를 가동하는 경우에는 백레이어 길이가 현저하게 감소하는 것으로 나타나고 있다.

Figure 8은 화재강도 50 MW인 경우, 터널내 풍속이 2.5 m/s로 존재하는 경우에 연기농도 특성을 나타낸 것이다.

이 경우, 화재강도가 20 MW인 경우와는 달리 연기 발생량의 증가로 최대농도는 수분무 가동하는 경우, 약 850 mg/m<sup>3</sup>, 수분무를 가동하지 않는 경우, 약 500 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 그러나 화재초기에 해당하는 300 초 정도에서는 수분부를 가동하는 경우에는 약 200 m 구간에서 300 mg/m<sup>3</sup>을 초과하나 수분무 가동하지 않는 경우에는 약 100 mg/m<sup>3</sup> 정도로 나타나고 있다. 따라서 수분무를 가동하는 경우에는 연기의 성층화가 교란되어 화재부근에서 연기농도가 수분무를 가동하지 않는 경우보다 약 3배 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 터널내 풍속이 없는 경우, 수분무는 분무의 냉각효과에 의한 온도 감소가 아주 우수한 것으로 평가되며, 세정효과에 의해서 연기농도 감소효과 또한 아주 우수한 것으로 판단된다. 그러나 터널내 기류가 존재하는 경우에는 냉각효과에 의해서 연기의 성층화를 교란하며, 이로 인해서 대피시 가시도를 저하할 수 있는 것으로 판단된다.

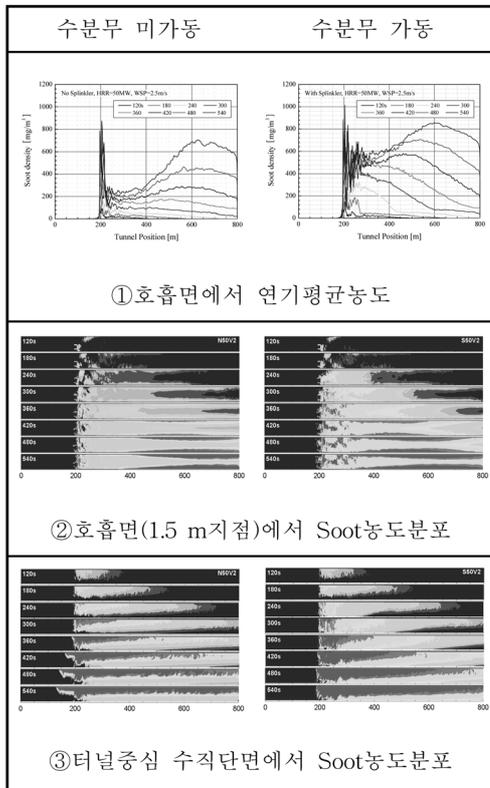


Figure 8. Smoke density distribution (50 MW, 2.5 m/s).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수분무 소화설비가 터널내 화재특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 수치시뮬레이션에 의하여 기류에 따르는 수분무 소화설비의 효용성에 대해 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 수분무 소화설비는 냉각효과가 우수한 것으로 나타나고 있으나 호흡선을 기준으로 하는 평균온도는 수분무를 가동하지 않는 경우에도 대피환경에 영향을 미치지 못하는 것으로 평가된다. 따라서 수분무에 의한

온도에 대한 안전 확보 효과는 크지 않은 것으로 평가된다.

2. 수분무 소화설비의 가동에 따른 호흡선에서의 연기농도는 증가는 화재초기에 약 3배 이상으로 대피환경을 현저하게 악화시킬 우려가 있는 것으로 판단되며, 수분무의 가동은 대피자가 대피한 후에 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Y. Wu, "Assessment of the Impact of Jet Flame Hazard from Hydrogen Cars in Road Tunnels", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.16, Issue 2, pp.246-254(2008).
2. 김운형, 김종훈, 박승민, 김태수, 민인홍, 전동일, 김상욱, "지하구 미분무수 소화설비 적용에 관한 연구", 한국화재·소방학회, Vol.16, No.1, pp.66-76(2002).
3. Haukur Ingason, "Model Scale Tunnel Tests with Water Spray", Fire Safety Journal, Vol.43, Issue 7, pp.512-528(2008).
4. 황철홍, 김한수, 이창언, 장영남, 신현준, "도로터널에서 자연풍에 의한 미세물분무의 화재제어 특성에 관한 수치해석 연구", 한국화재소방학회논문지, Vol.22, No.3, pp.221-227(2008).
5. 건설교통부, "도로터널 방재시설 설치지침"(2004).
6. Kevin McGrattan and Glenn Forney, "Fire Dynamics Simulator(Version 4) User's Guide"(2005).
7. T.G. Ma and J.G. Quintiere, "Numerical Simulation of Axi-symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations", Fire Safety Journal, Vol.38, pp. 467-492(2003).
8. H.R. Baum and B.J. MaCaffery, "Fire Insuced Flow Field-Theory and Experiment", Fire Safety Science Proceedings of the Second International Symposium, pp.129-148(1989).
9. V. Novozhilov, D.J.E. Harvie, J.H. Kent, V.B. Apte, and D. Pearson, "A Computational Fluid Dynamics study of Wood Fire Extinguishment by Water Sprinkler", Fire Safety Journal, Vol.29, pp. 259-282(1997).