

# 터널 화재 발생시 가시거리분포 CFD 분석

김정욱, 서기윤, 이창우  
동아대학교 지구환경공학부

## 1. 서론

본 분석에서는 터널 내에서 발생한 차량화재시의 터널 내부 smoke 농도 및 가시거리분포를 분석하여 방재용 환기설비 성능의 적정성과 터널이용자의 안전한 대피 가능 여부를 검토하기 위한 기초 자료의 제공을 목적으로 한다.

## 2. 시뮬레이션 분석

### 2.1 대상터널

본 연구 대상 터널의 제원은 다음과 같다.

Table 1. 대상터널 제원

구분	상행	하행
연장(m)	3587	3599
차선수	2	2
구배(%)	-0.74(100m), -0.5008(3487m)	0.74(100m), 0.5008(3499m)
내공단면적(m <sup>2</sup> )	75.453	75.453
대표직경(m)	8.52	8.52
평균표고(m)	114.65	114.59
통행방법	일방통행	일방통행

### 2.2 시뮬레이션 모델 개요

터널환기 전용 CFD 모델로 개발된 미국 Innovative Research사의 SOLVENT ver 1.0 (2000. 11)을 분석모델로 사용하였다.

### 2.3 시뮬레이션 분석 조건 및 입력 자료

PIARC의 1995년도 report는 승용차 화재의 경우 5MW, 버스/트럭화재의 경우 20MW, 석유탱크로리 화재의 경우 100MW를 설계 화재크기로 제안하고 있다. 본 연구에서는 탱크로리를 제외한 일반적인 차량 화재를 고려하여 국내 터널 화재 분석시 가장 일반적으로 적용하고 있는 화재크기인 20MW를 화재크기로 가정하였다. 화재 발생 후 제트팬을 가동하여 배연을 할 경우 유입된 공기는 연소율을 2배정도 증가시키며 대류를 통한 열에너지손실이 약 70% 정도이므로 실제 화재크기는 28MW정도가 되므로 본 연구의 분석 대상 실제 화재크기는 28MW를 가정하였다. 화재 시뮬레이션 분석은 현재 건설중인 국내 고속도로터널 1개소(쌍굴)를 대상으로 수행하였다.

Table 2. 대상터널 화재 시뮬레이션 입력자료

터널	상행		하행		비고
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
화재발생위치	입구로부터 1,810m				
화재규모	28MW Heating value: 4.26e+07 J/kg Fuel consumption rate: 0.6573 kg/s				화재크기 길이 5m 폭 2.8m 높이 3.5m
Radiation loss factor	0.3				
시뮬레이션 시간	900 sec				$\Delta t=10$ sec
터널내 초기온도	12.8 °C				
제트팬 가동대수 ( $\phi 1250$ )	0	10	0	10	입구부터 160m 간격 2대 1조설치 출구방향으로 가동
정체차량길이	입구로부터 1,760m				입구와 화재발생 위치 사이 출구방향 차량은 모두 이동 가정
K blockage	0.2387				차량정체구간의 마찰저항계수
자연환기속도	2.5m/s				역풍가정

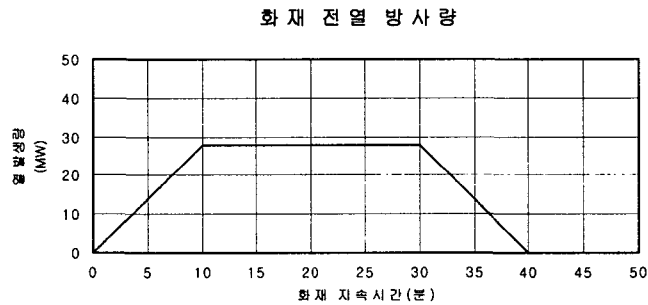


Figure 1. 전열 방사량

### 3. 시뮬레이션 분석결과

900초간의 시뮬레이션 결과 예측된 시간대별 풍속, smoke 농도, 가시거리의 bulk 값의 변화와 3-D분포값을 정리하였다. bulk 값은 터널 단면상의 평균값을 의미한다.

#### 3.1 제트팬 미가동시(case 1 및 3)

입구로부터 900m지점에서 28MW 규모의 화재가 발생한 후 출구편의 차량은 터널을 빠져나가고 입구편 차량만 정체된 상황 하에서 제트팬을 가동하지 않은 경우를 분석하였다.

<Case 1> 하향구배인 상행 터널에서 화재원에서의 smoke농도는 900초 경과 후 0.576 kg · smoke/kg · mixture로 최대가 된다.

Table 3. smoke농도변화 (상행, 제트팬 미가동)

시간(sec)	smoke 농도 (kg · smoke/kg · mixture)	
	평균	최대
60	0.0283	0.0493
300	0.1160	0.2205
600	0.2841	0.5174
900	0.3121	0.5758

터널내의 기류는 화재 초기에 갱구 양쪽으로 0.027~0.051m/s 범위의 풍속으로 빠져나가는 형태를 보이다가 600초 부근에서 전구간에 걸쳐 고도가 높은 입구편으로 유동하기 시작하며 이후 환기속도는 점차 증가하여 900초 경우 후에는 출구에서 불어 들어오는 환기속도가 0.58m/s 정도이다. 이에 따라 초기에 양방향으로 확산되던 smoke도 부양력에 의하여 입구편으로 이동하기 시작하여 600초 경과 후 화재발생 양편 ±400m 범위 내 대부분의 지점에서 가시거리가 4m이하로 감소하여 900초 경과 후에는 가시거리 4m이하인 범위가 화재 위치로부터 입구쪽 500m, 출구쪽으로 300m 지역으로 확대된다.

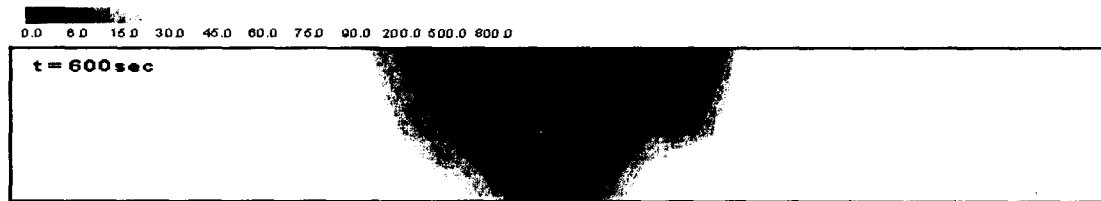


Figure 2.a 가시거리 분포 변화 (상행, 제트팬 미가동시 600초 후)

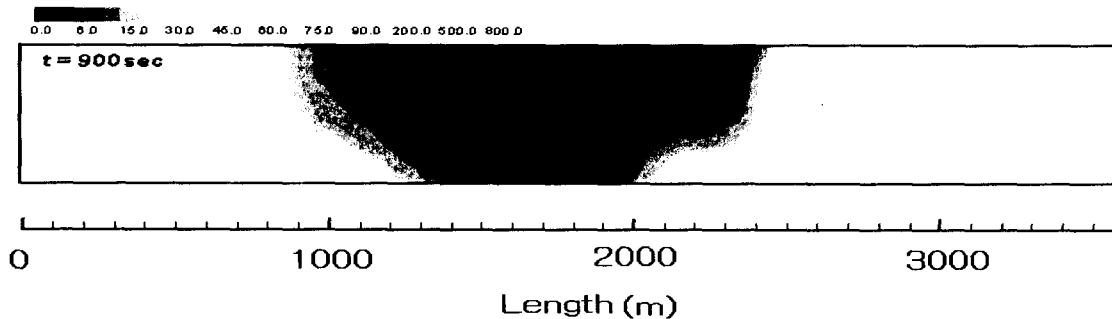


Figure 2.b 가시거리 분포 변화 (상행, 제트팬 미가동시 900초 후)

Table 4. 대상터널(상행) 팬 미가동 시의 bulk 풍속, smoke, 가시거리 분포 (900초 후)

위치(m)	풍속(m/s)	Smoke (kg · smoke/ kg · mixture)	가시거리(m)
1602	-0.977	0.1235	1.7
1681	-1.082	0.1323	1.7
1760	-1.15	0.1493	1.7
1810	-1.17	0.1860	1.4
1876	-0.531	0.0825	1.5
1915	-0.544	0.0658	1.8
2110	-0.568	0.0242	3.8
2343	-0.581	0.0078	8.3
2790	-0.576	0	∞
3143	-0.589	0	∞
3587	-0.576	0	∞

<Case 3> 상향구배인 하행 터널에서 화재원에서의 smoke농도는 900초 경과 후 0.576 kg · smoke/kg · mixture로 최대가 된다.

Table 5. smoke농도 변화 (하행, 제트팬 미가동)

시간(sec)	smoke 농도 (kg · smoke/kg · mixture)	
	평균	최대
60	0.0282	0.0493
300	0.1163	0.2213
600	0.3009	0.5451
900	0.3117	0.5763

화재초기에 화재발생점으로부터 양 갱구쪽으로 확산되는 smoke는 높은 온도에 의한 부양력으로 인하여 600초 경과 부근부터 전구간에 걸쳐 입구에서 고도가 높은 출구쪽으로 확산된다. 확산속도는 점차 증가하여 900초 경과 후에는 출구에서의 환기속도가 0.8m/s 정도이다. smoke의 확산에 의하여 감소하는 가시거리는 300초 경과 후 화재발생지점으로부터 입구쪽 50m, 출구쪽 30m 이내 범위에서 4m이하가 되며 900초 경과 후에는 이 범위가 입구쪽 300m, 출구쪽 700m 정도이내 범위로까지 확대되고 있다.

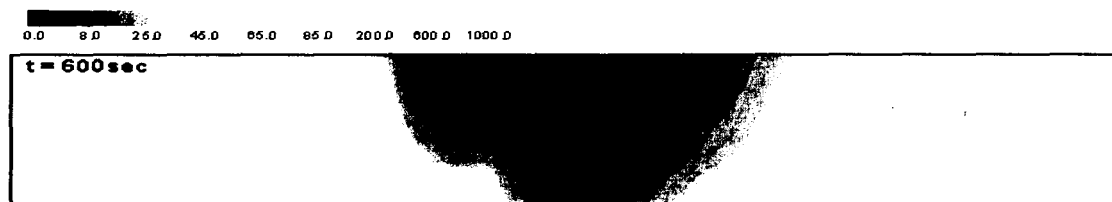


Figure 3.a 가시거리 분포 변화 (하행, 제트팬 미가동시 600초 후)

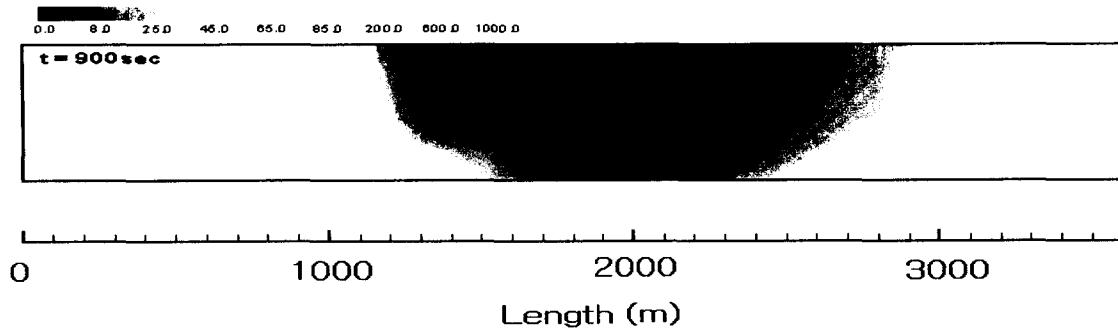


Figure 3.b 가시거리 분포 변화 (하행, 제트팬 미가동시 900초 후)

Table 6. 대상터널(하행) 팬 미가동 시의 bulk 풍속, smoke, 가시거리 분포(900초 후)

위치(m)	풍속(m/s)	Smoke (kg · smoke/ kg · mixture)	가시거리(m)
1602	0.591	0.0367	2.8
1697	0.584	0.0618	1.9
1760	0.549	0.0855	1.5
1810	0.531	0.119	1.1
1866	1.2	0.178	1.5
1914	1.13	0.135	1.7
2103	0.944	0.0928	1.9
2346	0.832	0.0427	2.8
2782	0.843	0.0063	9.7
3139	0.808	0	∞
3599	0.808	0	∞

### 3.2 제트팬 가동시(case 2 및 4)

입구로부터 1810m지점에서 28MW 규모의 화재가 발생한 후 출구편의 차량은 터널을 빠져나가고 입구편 차량만 정체된 상황 하(정체길이 1760m)에서 화재발생과 동시에  $\phi$ 1250 제트팬 10대를 출구쪽으로 운전한 경우를 분석하였다.

<Case 2> 제트팬을 가동하지 않은 경우에 비하여 화재원에서의 smoke농도가 900초 경과 후 제트팬을 가동하지 않은 경우에 비하여 낮은 값인 0.227 kg · smoke/kg · mixture로 최대가 된다.

화재발생과 동시에 제트팬을 출구쪽으로 가동한 경우 신속하게 출구쪽으로 환기방향이 형성되어 60초 경과시 환기속도가 1.5m/s을 약간 상회한다. 이때에도 화재발생점으로부터 입구쪽으로 역류하는 smoke가 거의 없음을 알 수 있다. 300초 경과 후에는 환기속도가 3.4m/s이상이 되어 900초 경과시에는 3.7m/s에 이르게 된다. 화재발생점으로부터 출구쪽으로의 smoke 농도가 지속적으로 증가하여 900초 경과시에는 출구부근 지역을 제외하고는 모든 지점에서의 가시거리가 4m이하가 된다.

Table 7. smoke농도 변화 (상행, 제트팬 가동)

시간(sec)	smoke 농도 (kg · smoke/kg · mixture)	
	평균	최대
60	0.0220	0.0405
300	0.0714	0.1284
600	0.1449	0.2715
900	0.1472	0.2767

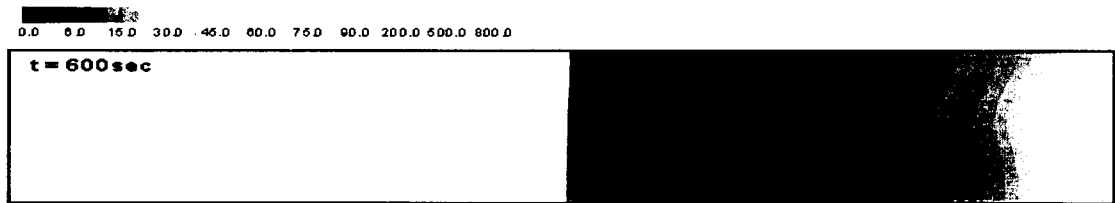


Figure 4.a 가시거리 분포 변화 (상행, 제트팬 가동시 600초 후)

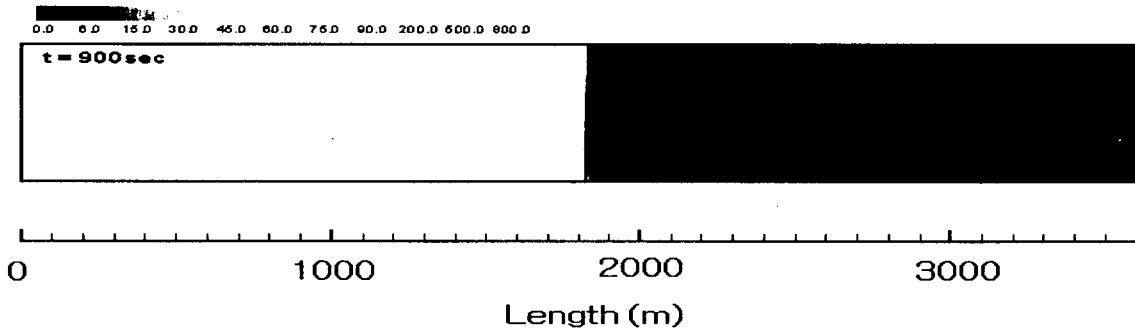


Figure 4.b 가시거리 분포 변화 (상행, 제트팬 가동시 900초 후)

Table 8. 대상터널(상행) 팬 가동 시의 bulk 풍속, smoke, 가시거리 분포(900초 후)

위치(m)	풍속(m/s)	Smoke (kg · smoke/ kg · mixture)	가시거리(m)
1602	3.672	0	∞
1681	3.672	0	∞
1760	3.672	0	∞
1810	3.712	0	∞
1876	4.337	0.0319	3.5
1915	4.306	0.0319	3.5
2110	4.17	0.0318	3.4
2343	4.064	0.0316	3.4
2790	3.884	0.0304	3.4
3143	3.9	0.0252	3.8
3599	3.764	0.0165	5

<Case 4> 화재원에서의 smoke농도는 600초 경과 후 제트팬 미가동시보다 낮은 값인 0.273 kg · smoke/kg · mixture로 최대가 된다. 제트팬을 가동한 경우, 상·하행터널의 smoke 농도 변화는 거의 같은 값을 가짐을 보여준다.

Table 9. smoke 농도 변화 (하행, 제트팬 가동)

시간(sec)	smoke 농도 (kg · smoke/kg · mixture)	
	평균	최대
60	0.022	0.0411
300	0.0751	0.1375
600	0.1453	0.2725
900	0.1438	0.2684

하향구배의 상행 터널과 비교하여 상향구배인 하행 터널은 풍속의 변화가 특징적이다. 화재초기에 제트팬을 작동시키면 smoke의 역류를 효과적으로 억제할 수 있는 점과 시간이 경과함에 따라 환기속도가 점진적으로 증가하여 출구쪽으로 smoke 농도가 증대되어 가시거리가 감소하는 경향은 일치한다. 그러나 두 터널의 환기속도 변화를 살펴보면 600초 경과시까지는 하향구배 상행터널의 환기속도가 상대적으로 크나 900초 경과시에는 출구까지 확산된 비교적 고온의 smoke의 부양력에 의한 환기효과에 의하여 상향구배인 하행터널의 환기속도가 커지고 있음을 알 수 있다. 출구 환기속도는 60, 300, 600, 900초 경과시 1.3, 3.4, 3.9, 3.9 m/s로 증가하며 900초 경과 후의 가시거리는 터널출구 부근 지역을 제외하고는 화재발생점으로부터 출구쪽으로 전구역에 걸쳐 4m이하가 됨을 보인다.

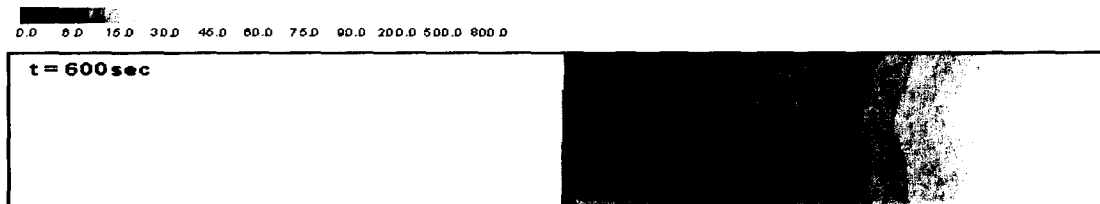


Figure 5.a 가시거리 분포 변화 (하행, 제트팬 가동시 600초 후)

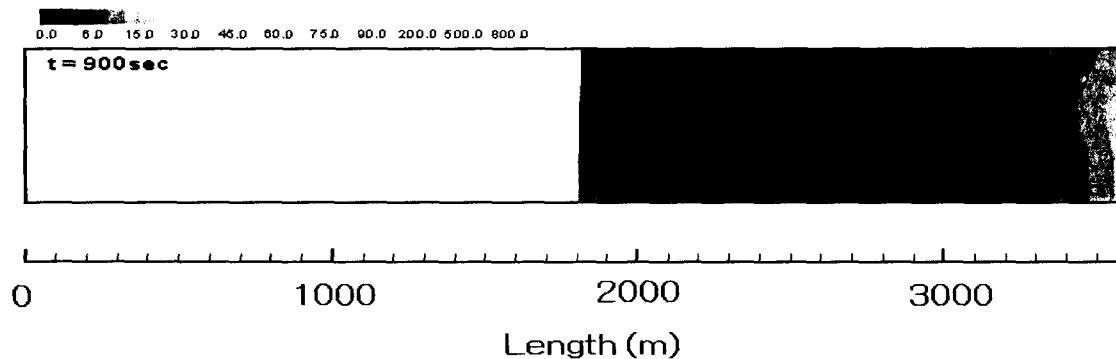


Figure 5.b 가시거리 분포 변화 (하행, 제트팬 가동시 900초 후)

Table 10. 대상터널(하행) 팬 가동 시의 bulk 풍속, smoke, 가시거리 분포(900초 후)

위치(m)	풍속(m/s)	Smoke (kg · smoke/ kg · mixture)	가시거리(m)
1602	3.811	0	∞
1697	3.811	0	∞
1760	3.811	0	∞
1810	3.852	0	∞
1866	4.483	0.0312	3.6
1914	4.446	0.0312	3.5
2103	4.321	0.0313	3.5
2346	4.197	0.0314	3.4
2782	4.051	0.0302	3.4
3139	3.965	0.0244	3.9
3599	3.902	0.0105	6.8

#### 4. 결론

설계단계의 장대 고속도로 터널의 화재 분석 결과를 정리하면 다음과 같다. 제트팬을 가동하지 않은 경우에는 smoke의 부양력에 의한 공기유동은 900초 경과 후 최대가 되며 출구 풍속이 양 터널 모두 0.6~0.8m/s이나 이와 같은 저속에서도 smoke의 역류현상은 나타나지 않았다.  $\phi$ 1250 8대 제트팬을 가동한 경우 즉시 smoke의 역류를 억제할 수 있었으며 300초 경과 후의 출구점 환기속도는 상행 터널의 경우 3.8m/s, 하행 터널의 경우 3.9m/s 로 비교적 신속하게 smoke의 유동이 가능하므로 smoke의 역류는 문제가 되지 않는다.

제트팬을 가동한 경우 smoke의 역류가 발생하지 않으므로 입구쪽으로의 대피경로상에서의 가시거리 확보는 문제가 되지 않는다. 또한 smoke가 확산되는 출구편에서도 300초 경과 후 상행 터널의 경우 출구로부터 1260m 정도 거리, 하행 터널의 경우 거의 화재발생점까지 가시거리 4m 이상이 유지되므로 출구로부터의 화재진압 또는 인명 구조 목적의 접근이 가능한 정도이다.

CFD 분석 모델을 이용한 3-D 화재분석은 장대터널의 방재설비 시스템의 설계 및 대피경로의 확보 방안의 마련에 필수적인 과업으로 진행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. B.Mohammadi and O. Pironneau, 1994, Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model, John Wiley & Sons
2. Innovative Research, 2000, User's manual for SOLVENT
3. John D. Anderson, Jr. Computational fluid dynamics.
4. R.N. Schlang, and T.J. Carlin, Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels, Science Application, Inc., La Jolla, California, 1979.
5. 이창우 등, 2001년, 4, 터널화재시 온도 분포 CFD 분석 연구, 한국자원공학회.