

터널 화재원에서의 온도 및 smoke 농도 분석연구

김정욱, 김영섭, 이창우
 동아대학교

1. 서론

화재원 부근의 온도 및 smoke 농도 분포의 분석은 화재로 인한 구조물 및 인명피해 예측, 화재 진압 계획수립에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 장대터널 내에서 발생한 20MW 규모의 화재로 인한 화재원 인접 지역에서의 온도 및 smoke 발생량의 시간 분포를 3D CFD 분석함으로써 체계적인 터널 방재 시스템의 구축에 기초자료를 제공함을 목적으로 하였다.

2.CFD 분석

2.1 분석대상터널

본 분석은 광주우회도로상에 건설중인 도로터널 상·하행선 2개 터널을 대상으로 하였으며 터널의 주요 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 ²)	75.453	75.453
대표직경(m)	8.52	8.52
평균표고(m)	114.65	114.59
통행방법	일방통행	일방통행

2.2 CFD 분석 조건

CFD 분석은 미국 Innovative Research사의 터널 전용 시뮬레이터인 SOLVENT ver 1.0 (2000. 11) 모델을 이용하였다.

Table 2. 대상터널 화재 시뮬레이션 입력자료

터널	입력 데이터	비고
화재발생위치	입구로부터 1,810m	
화재규모	20MW Heating value: 4.26e+07 J/kg Fuel consumption rate: 0.6573 kg/s	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 (Ψ1250)	제트팬 가동시: 10대	입구부터 160m 간격 2대 1조설치
정체차량길이	입구로부터 1,760m	출구방향 차량은 모두 이동 가정
K _{blockage}	0.2387	차량정체구간의 마찰저항계수
자연환기속도	2.5m/s	역풍가정

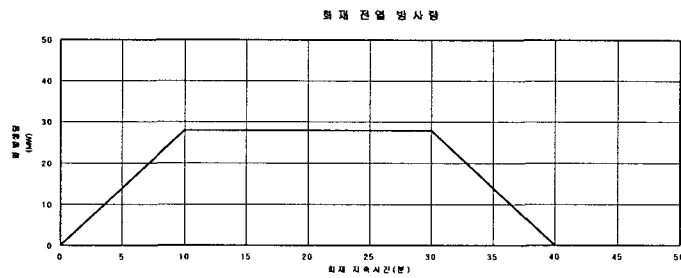


Figure 1. 전열 방사량

PIARC(국제도로상설회의) 보고서에서는 설계화재 크기를 승용차의 경우 5MW, 버스/트럭의 경우 20MW, 석유탱크로리의 경우 100MW로 제안하고 있다. 본 연구에서는 탱크로리를 제외한 일반적인 차량 화재를 고려하여 20MW를 화재크기로 가정하였다. 화재 발생 후 제트팬을 가동하여 배연을 할 경우 유입된 공기는 연소율을 2배정도 증가시키고 대류를 통한 열에너지손실이 약 70% 정도이므로 실제 화재크기는 28MW정도가 된다. 따라서 본 연구에서는 분석대상 화재크기를 28MW로 적용하였다.

3.CFD 분석결과

3.1 화재원내에서의 온도변화

상·하행 각 터널에서 팬 가동 전후의 최대 온도 및 평균 온도를 비교하였다.

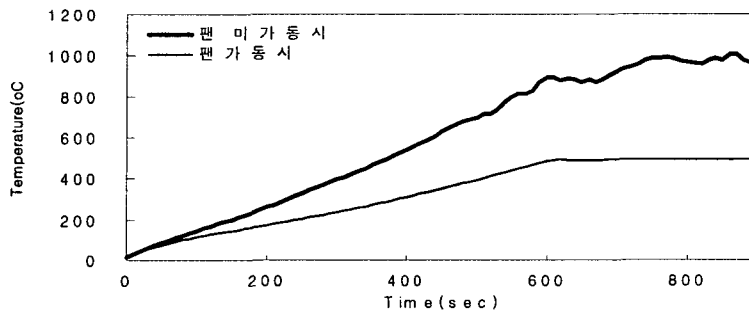


Figure 2a. 상행터널 최대온도 비교

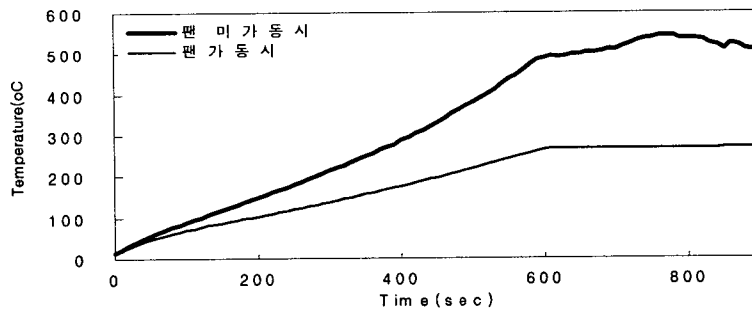


Figure 2b. 상행터널 평균온도 비교

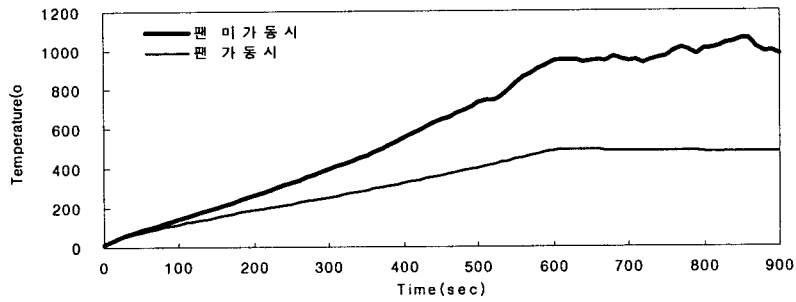


Figure 2c. 하행터널 최대온도 비교

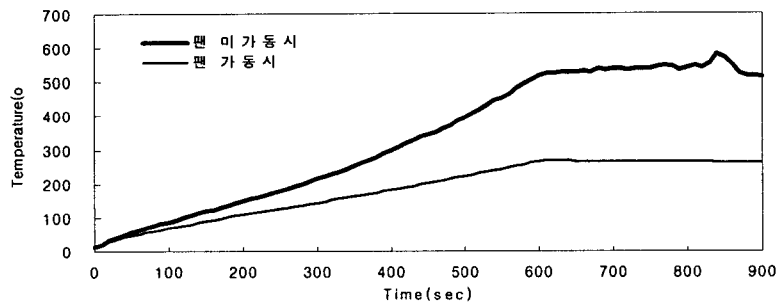


Figure 2d. 하행터널 평균온도 비교

상·하행 터널 모두 시간이 경과함에 따라 최대값과 평균값 모두 그 차이가 커지는 경향을 보이다가 전열 방사량이 최대가 되는 600초 이후에는 그 차이가 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

Table 3. 제트팬 가동에 따른 화재원 온도분포

상행터널						
경과시간	화재원 온도(℃)					
	Maximum			Average		
	팬 미가동시	팬 가동시	차이	팬 미가동시	팬 가동시	차이
100	145	88	57	115	69	46
200	261	148	113	172	102	70
300	395	214	181	237	137	100
400	542	288	254	311	176	135
500	699	381	318	394	219	175
600	985	490	495	486	265	221
700	923	511	412	492	268	224
800	969	535	434	493	269	224
900	973	514	459	496	269	227
하행터널						
경과시간	화재원 온도(℃)					
	Maximum			Average		
	팬 미가동시	팬 가동시	차이	팬 미가동시	팬 가동시	차이
100	145	88	57	116	69	47
200	263	148	115	187	108	79
300	397	214	183	253	144	109
400	553	297	256	324	182	142
500	729	396	333	403	222	181
600	940	517	423	488	266	222
700	944	536	408	486	266	220
800	1003	539	464	483	264	219
900	975	514	461	481	263	218

다음 그림은 각 터널의 화재원 중심 전후방 50m 지점의 온도분포를 환기설비 가동 전후로 구분하여 나타낸 그림이다. 상·하행 터널 모두 제트팬 가동 후 화재원 부근의 온도가 현저하게 감소한 것을 보여주고 있으며 팬을 가동하지 않은 경우 하향구배인 상행터널에서는 상대적으로 고도가 높은 갱구쪽으로 고온부의 확산이 우세하게 이루어지고 있고 상향구배인 하행터널에서는 그 반대의 경향을 보이고 있다.

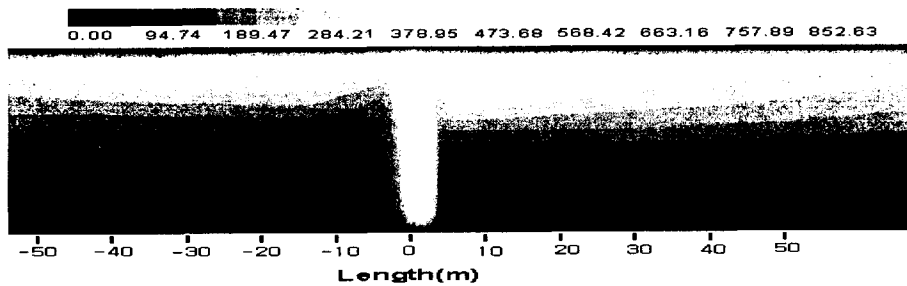


Figure 3a. 상행터널 팬 미가동시 화재원부근 온도분포

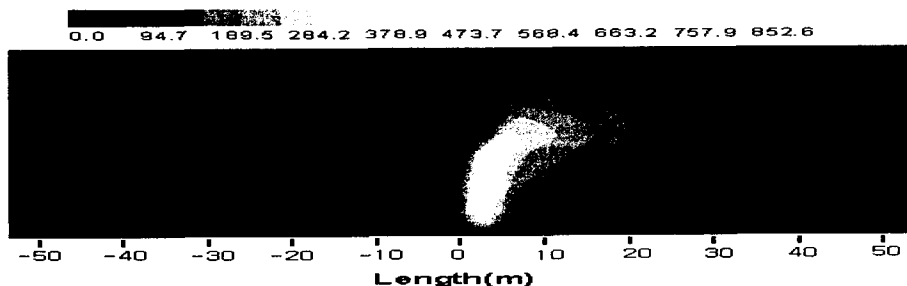


Figure 3b. 상행터널 팬 가동시 화재원부근 온도분포

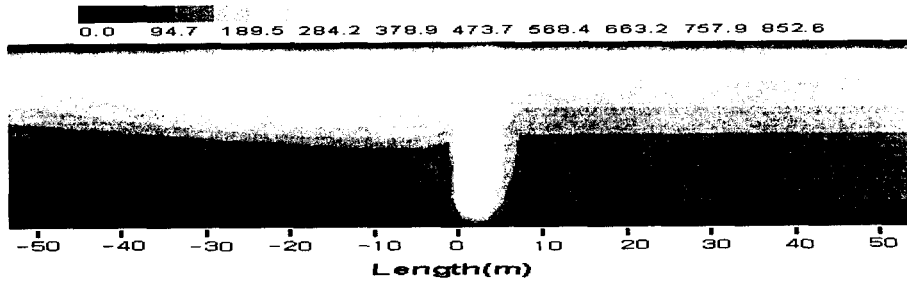


Figure 3c. 하행터널 팬 미가동시 화재원부근 온도분포

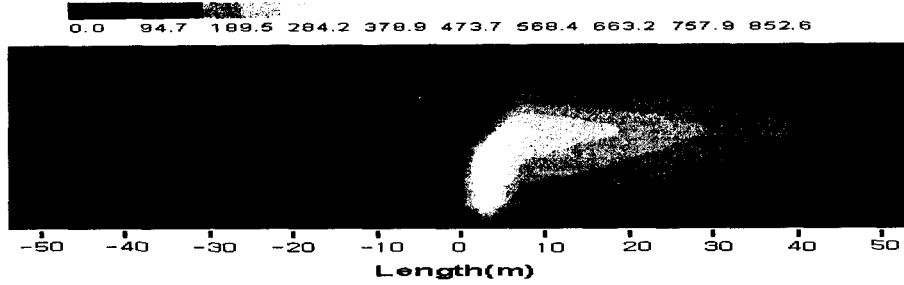


Figure 3d. 하행터널 팬 가동시 화재원부근 온도분포

3.2 화재원내에서의 smoke 농도 변화

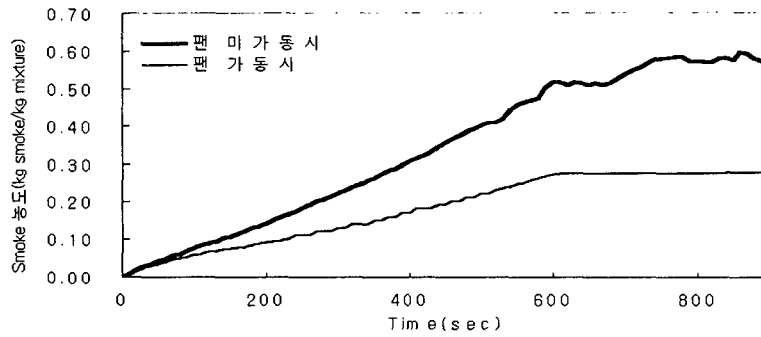


Figure 4a. 상행터널 최대 smoke 농도 비교

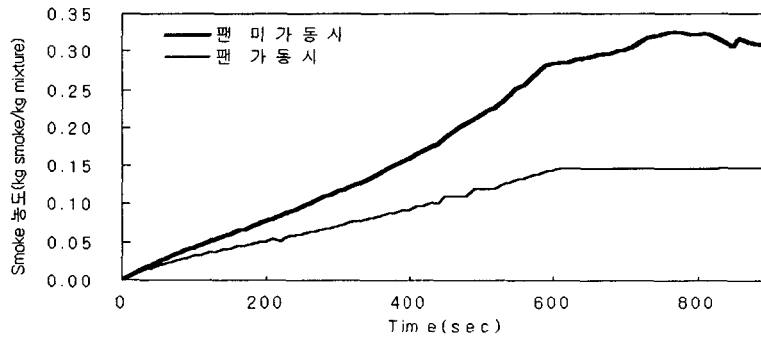


Figure 4b. 상행터널 평균 smoke 농도 비교

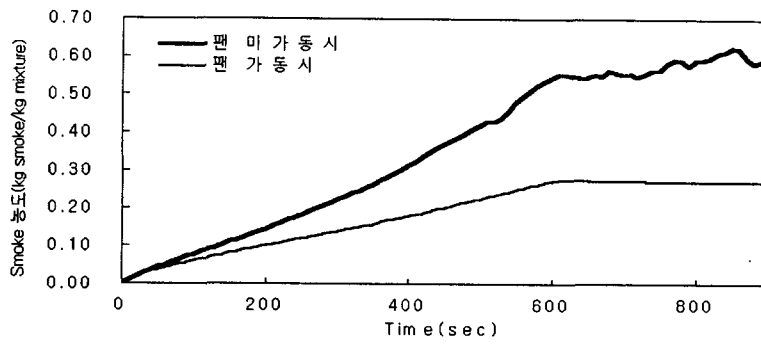


Figure 4c. 하행터널 최대 smoke 농도 비교

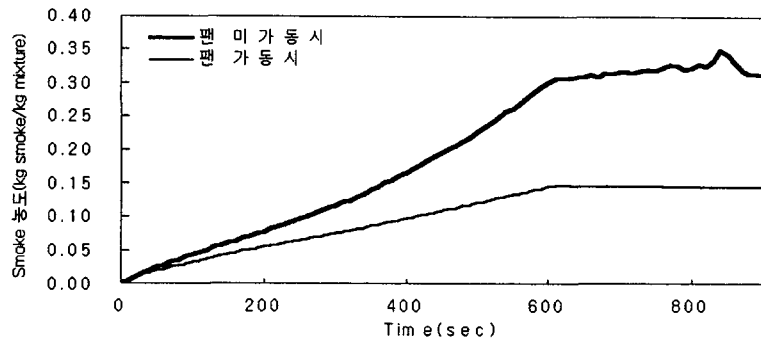


Figure 4d. 하행터널 평균 smoke 농도 비교

Table 4. 제트팬 가동에 따른 화재원 smoke 농도 분포

경과시간	상행터널					
	smoke 농도					
	Maximum			Average		
	팬 미가동시	팬 가동시	차이	팬 미가동시	팬 가동시	차이
100	0.08	0.04	0.04	0.06	0.03	0.03
200	0.14	0.08	0.06	0.09	0.05	0.04
300	0.22	0.12	0.10	0.13	0.07	0.06
400	0.31	0.16	0.15	0.17	0.09	0.08
500	0.40	0.22	0.18	0.22	0.12	0.10
600	0.52	0.28	0.24	0.27	0.14	0.13
700	0.54	0.30	0.24	0.27	0.15	0.12
800	0.57	0.32	0.25	0.28	0.15	0.13
900	0.58	0.32	0.26	0.28	0.15	0.13
	하행터널					
100	0.08	0.04	0.04	0.06	0.03	0.03
200	0.14	0.08	0.06	0.10	0.05	0.05
300	0.22	0.12	0.10	0.14	0.08	0.06
400	0.32	0.17	0.15	0.18	0.10	0.08
500	0.42	0.23	0.19	0.22	0.12	0.10
600	0.55	0.30	0.25	0.27	0.15	0.12
700	0.55	0.32	0.23	0.27	0.15	0.12
800	0.59	0.32	0.27	0.27	0.14	0.13
900	0.58	0.32	0.26	0.27	0.14	0.13

화재원에서의 smoke 농도는 전열 방사량이 최대에 도달하는 화재 발생 후 600초에 온도 분포분석 결과와 같이 최대 수준에 도달하며 팬 가동시에는 54~58% 정도 수준으로 급감하고 있다. 화재원 중심 ±50m 범위 내에서의 smoke 거동은 온도 분포와 거의 유사한 패턴을 보여 주고 있으며 제트팬 가동으로 smoke의 역류 현상이 전혀 발생하지 않음을 보여주고 있다.

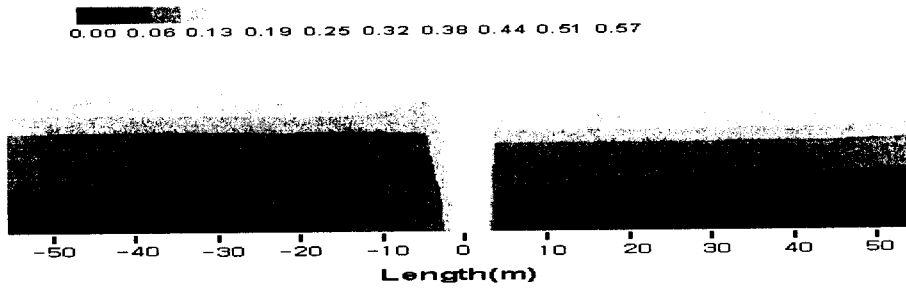


Figure 5a. 상행터널 팬 미가동시 화재원부근 smoke 농도분포

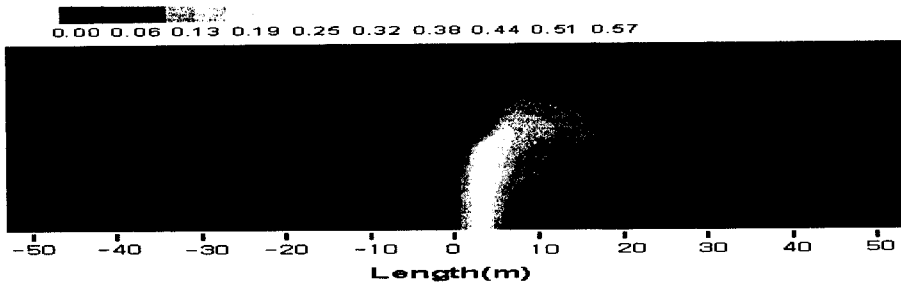


Figure 5b. 상행터널 팬 가동시 화재원부근 smoke 농도분포

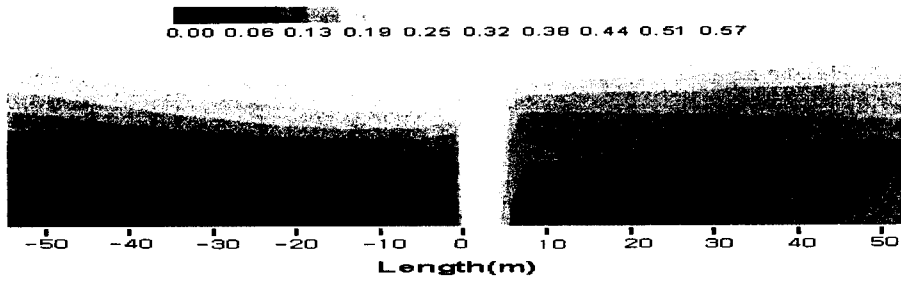


Figure 5c. 하행터널 팬 미가동시 화재원부근 smoke 농도분포

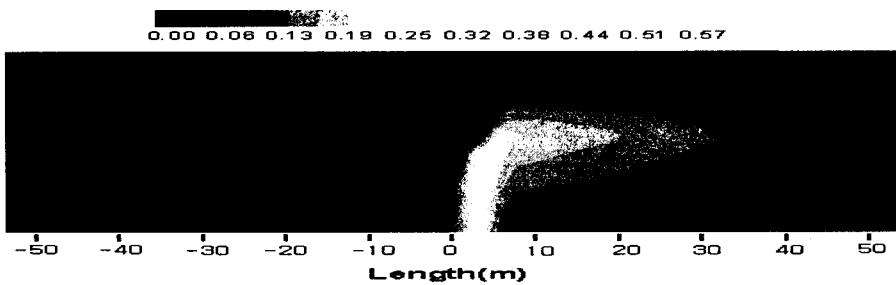


Figure 5d. 하행터널 팬 가동시 화재원부근 smoke 농도분포

3.2 화재원 부근 터널 내벽 온도 변화

가장 큰 구조물 피해가 예상되는 화재원 주변 터널내벽 온도를 Fig. 6a와 Fig. 6b에 도시하였다. 화재원 직상부 천정 온도는 상행 터널의 경우 900초 경과후 천정 중앙지점에서 최대 295℃에 도달하며 측벽부는 상부로 올라갈수록 증가하는 경향을 보여주고 있으며 온도는 90초 경과후 천정부에서의 경계점에서 최대 134℃에 달하고 하행터널의 경우에는 각각 296℃, 131℃의 값을 나타낸다.

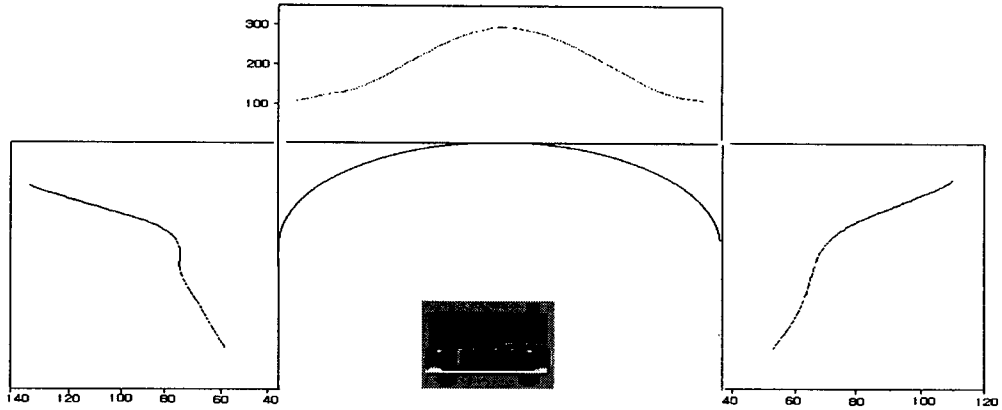


Figure 6a. 상행터널 화재원 부근 터널 내벽 온도분포(900초 후)

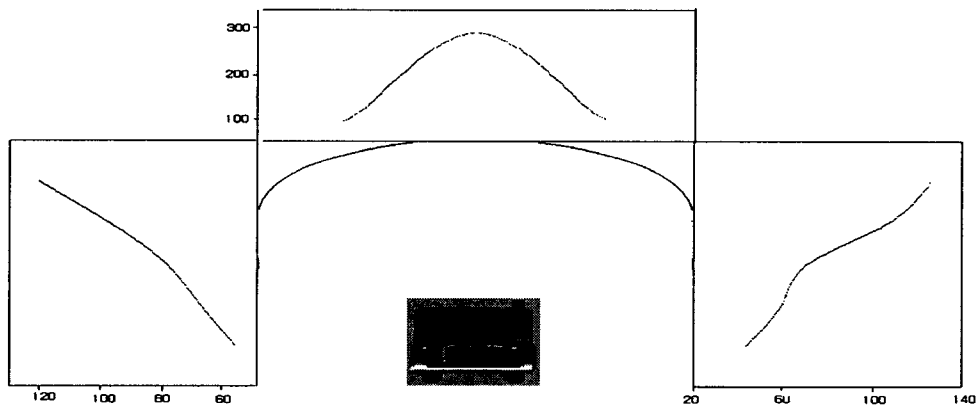


Figure 6b. 하행터널 화재원 부근 터널 내벽 온도분포(900초 후)

Table 5. 터널내벽 최대온도 변화

시간	상행터널		하행터널	
	천정부온도(°C)	측벽부온도(°C)	천정부온도(°C)	측벽부온도(°C)
100	45	14	41	15
200	71	26	87	29
300	97	42	102	46
400	126	65	121	68
500	172	75	178	76
600	229	104	224	106
700	252	112	250	107
800	288	118	280	113
900	295	134	296	131

4. 결론

20MW 규모의 화재원 부근에서의 온도, smoke 농도, 터널 내벽 온도분포를 CFD 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 화재원내의 온도는 전열 방사량이 최대가 되는 시점에서 최대 수준인 상행터널의 경우 985°C, 하행터널의 경우 1003°C에 도달하며, 제트팬을 가동한 경우 급격히 감소하여 상행터널 535°C, 하행터널 539°C의 값을 나타내었다.

(2) 화재원 내에서의 smoke 농도는 온도와 동일한 시간 분포를 보이며 제트팬을 가동하지 않은 경우 최대 smoke 농도는 상행터널에서 0.58 kg smoke/kg mixture, 하행터널 0.59 kg smoke/kg mixture이며 제트팬을 가동한 경우에는 상·하행터널 모두 0.32 kg smoke/kg mixture 값으로 감소하였다.

(3) 터널 내벽에서의 온도는 화재원 직상부 천정에서 최대가 되며 상·하행 터널에서 모두 900초 경과후 295, 296°C로 최대온도에 도달하였다. 측벽에서의 최대 온도 지점은 천정부와의 경계점으로 900초 경과후 각각 134, 131°C를 나타내었다. 제트팬을 가동한 경우는 급격히 감소하여 내벽 경계점에서의 온도는 입기온도 12.8°C에 불과하였으며 제트팬 설치 위치에서의 온도는 33 ~ 67°C이었다. 따라서 20MW 규모의 화재시 터널 구조물의 피해는 우려할 정도가 아니며 더욱이 제트팬의 신속한 가동을 통하여 설비 및 구조물의 피해를 방지할 수 있음을 보여 주고 있다.

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, 1979, Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels, Science Application, Inc., La Jolla, California,
5. Patankar, S.V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor and Francis
6. 이창우 등, 2001, 터널 화재시 온도분포 CFD 분석연구, 한국자원공학회
7. 이창우 등, 2001, 터널 화재 발생시 가시거리분포 CFD 분석, 한국암반공학회