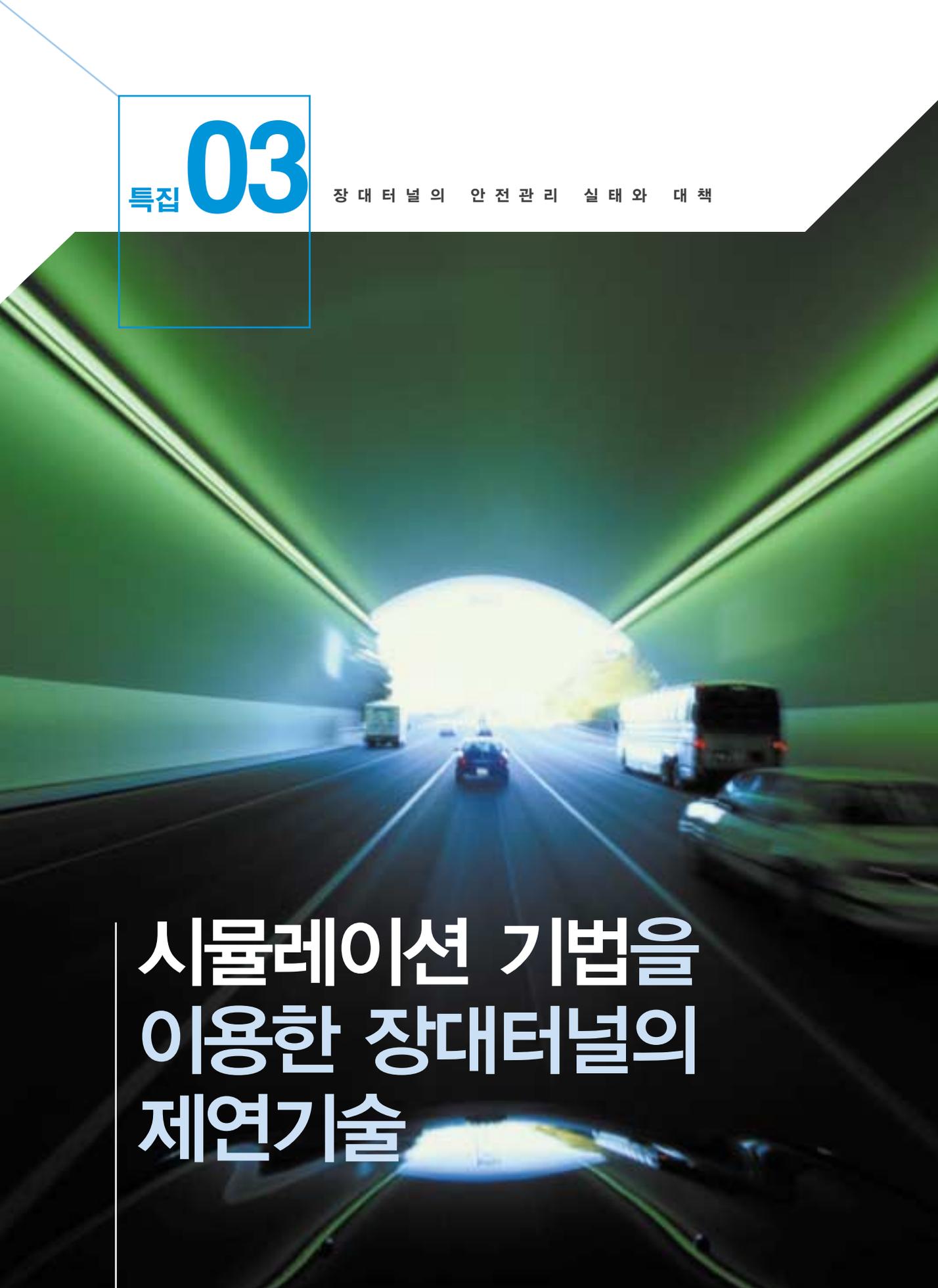


특집 **03**

장대터널의 안전관리 실태와 대책



시뮬레이션 기법을 이용한 장대터널의 제연기술

1. 머리말

일반인들의 머릿속에서 연상될 수 있는 터널화재는, 아마도 미국 뉴저지와 맨해튼을 연결하는 해저터널에서 발생한 화재로 터널이 폭파되는 상황을 그린 영화 '데이라잇'의 한 장면 정도가 아닐까 싶다. 하지만 국토의 70%가 산악지형인 우리나라는 터널 건설이 필수적이며, 최근에는 환경친화적인 도로 및 철도 건설정책 추진으로 1km 이상의 장대터널 건설이 급증하는 추세이다. 장대터널은 그 길이가 길기 때문에 방재계획 및 방재설비를 제대로 갖추지 않은 상태에서 화재가 발생하게 되면, 외국의 터널화재처럼 많은 인명피해가 발생할 수 있다. 본 고에서는 방재시험연구원 에서 기 수행한 「장대터널의 화재시물레이션 및 피난기술 개발에 관한 연구」내용을 요약하여 소개하고자 한다.

2. 국내 터널 방재시스템

2003년에 마련된 고속철도 터널 방재기준이 유일한 터널 관련 국내 법규이다. 소방시설이 부실해 '죽음의 블랙홀'이라 불리는 길이 500m 이상의 고속 및 일반철도 터널이 125여 개나 만들어졌지만 비상구, 제연시설 등은 거의 전무한 실정이다. 또 터널 내에서 승객의 피난 소요시간이 최대 70분이나 걸리는 것으로 보고되면서 화재 발생시 많은 인명피해가 예상되고 있다.

본 연구의 대상은 터널길이가 약 16km인 S장대 철도터널로서 터널 사이를 연결하는 횡갱이 있는 상·하행 터널방식이다.



3. 터널시스템 분석

가. 기본설계 개념

기본설계에서는 [그림 1]과 같이 본선 두 개를 건설하여 한 터널에

피난길이가 긴 장대터널에서 화재가 발생되면 생성된 연기가 상승하고 천장을 만나 터널의 길이방향으로 전파된다. 연기의 독성가스에 의해 질식하게 되는 인명피해를 줄이기 위해서는 발생한 화재의 크기에 따라 적절한 제연유속이 필요하며, 제연 팬의 용량과 신뢰성을 확보해야 한다.



글 | 김동석
방재시험연구원 소화연소팀장

서 화재가 발생하면, 본선에서 400m 간격으로 있는 횡갱을 통하여 다른 터널로 피난할 수 있다. 하지만 본 터널을 두 단계로 나누어 건설할 경우, 1단계에서는 대칭되는 절반만을 건설하므로 이 기간 동안에 화재가 발생하면 횡갱을 활용하지 못해서 피난에 어려움이 있다. 결국 터널의 길이방향으로 피난을 해야만 하는데 피난길이가 긴 장대터널에서는 사실상 피난이 불가능하게 된다.

터널의 기본설계 구조



기본설계 건설후 터널의 구조



■ 그림 1. 터널의 중단면도

나. 실시설계 개념

단계별 공사에 의한 문제점을 해결하고자 본 실시설계에서는 [그림 2]와 같이 본선 하나를 통하여 두 개의 궤도가 설치될 수 있는 공간으로 만들고, 1단계에서는 한 쪽 궤도만을 활용하며 나머지는 차도로써 활용할 수 있도록 하였다. 1단계 공사에서 피난대피용 횡갱을 사용하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 피난 연결갱 4개를 추가로 제공함으로써 환기갱의



■ 그림 2. 실시설계 건설 후 터널의 중단면도

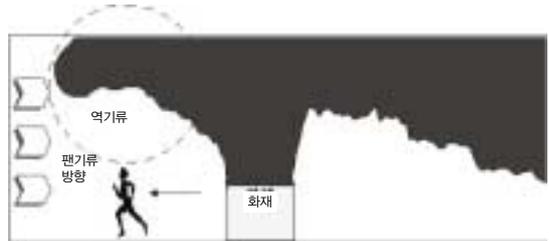
배기구를 피난로로 활용하고, 제연유속이 2.1m/s 이상으로 일본 여객열차 화재 시험시 최대 발열율인 14MW 이상을 제어할 수 있도록 함으로써 신속한 구조활동이 가능하도록 하였다. 2단계 건설시에도 횡갱과 서비스갱을 건설하여 피난이 용이하도록 할 수 있다.

해외의 화재하중 설정사례를 보면, 열차의 화재하중은 15~20MW 범위에서 주로 정해진다. 본 연구에서 화재하중은 일본 여객화재 실험자료를 기준으로 하여 최대 발열율은 14MW이고, 최대 발열율에 도달하는 데 약 15분이 소요되는 것으로 가정하였다.

4. 터널의 화재현상 및 제연

가. 역기류(backlayering)

터널에서 화재가 발생하면 [그림 3]과 같이 화재에 의하여 생성된 연기가 부력에 의하여 상승하고 천장을 만나면 터널의 길이방향으로 전파된다. 피난방향으로 연기가 전파되지 못하도록 피난방향에서 화재방향으로 기류가 형성되게 할 경우, 이 기류를 이기고 피난방향으로 연기가 전파되는 현상을 역기류라고 한다. 역기류가 형성되면 피난하던 사람들이 연기의 독성가스에 의하여 질식하게 되므로 인명피해가 발생하게 된다. 이러한 역기류 발생을 억제하는 유속은 터널의 조건과 화재하중에 의하여 결정되는데, 최소 유속을 임계속도(Critical Velocity)라고 한다.



■ 그림 3. 터널화재와 역기류

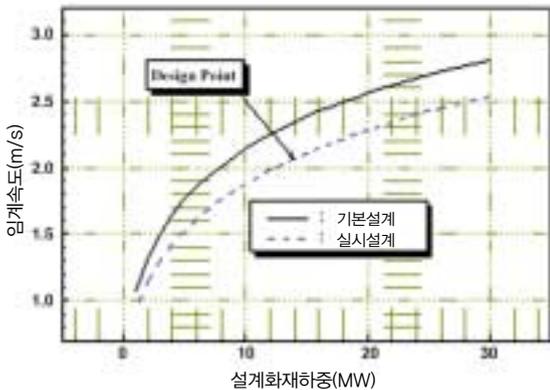
나. 임계속도(Critical Velocity)

임계속도는 아래 식에 의하여 계산될 수 있는데 화재지점의 온도 및 터널의 구배와 연계되어 있어 반복계산(iteration)을 통하여 계산해야 한다. 화재하중이 동일한 경우 터널의 높이가 낮고, 면적이 클수록 임계속도는 작아지며, 터널의 단면구조가 동일한 경우에는 화재하중이 클수록 임계속도가 커지게 된다. 따라서 기본설계의 단면이 실시설계의 단면보다 작으므로 동일한 화재하중에 대하여 더 큰 임계속도가 요구됨을 예측할 수 있다.

다. 화재하중과 임계속도

앞 절의 임계속도 관계식을 이용하여 기본설계의 단면과 실시설계의 단면에 대하여 임계속도를 계산하여 아래 [그림 4]와 [그림 5]에 나타내었다. 본 터널에 대해서는 일본의 차량연소 실측치인 14MW를 기준으로 제연풍량을 설계하였으며, 요구되는 임계속도는 2.1m/s 이상이다. 안전율을 고려하여 제연유속이 2.5m/s 이상 되도록 팬의 사양을 선택하였다.

화재하중	임계 유속	
	14MW [일본의 실험값]	기본설계
	실시설계	2.1m/s 이상

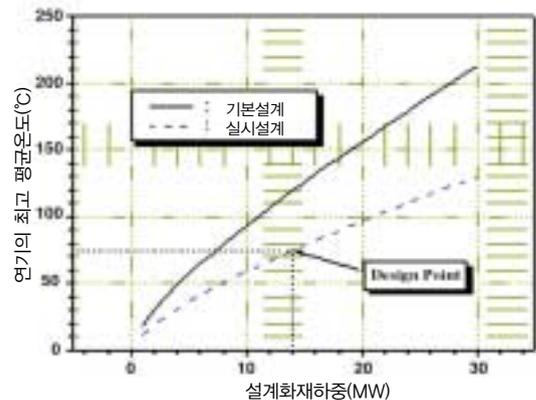


■ 그림 4. 화재하중과 임계속도의 관계

5. 제연 시뮬레이션

본 터널에서 설치되는 환기방식은 터널의 4개 지점에 외부와 연결된 갱을 설치하고 갱과 본선이 만나는 환기소에 각각 급기부와 배기부를 이용하여 터널의 길이방향으로 기류를 생성시키는 종류식 환기방식을 채택하고 있다. 역방향 제연이 필요한 경우를 대비하여 터널에 수직인 방향으로 제연 팬 1대를 추가로 설치함으로써 빠른 시간 내에 제연유속을 생성하도록 하였다. 본 연구에서는 단위구간의 제어 방식과 전구간 제어방식으로 나누어 제연유속을 평가하였는데, 초기 화재인 경우 제연유속이 모두 필요한 것은 아니므로 단위구간의 제어방식을 사용하고, 더 큰 제연유속이 필요한 경우에는 전구간 제어방식을 사용하게 된다.

각 제어방식에 따른 구간별 유속을 평가하기 위하여 1차원 시뮬레이션 프로그램인 SES(Subway Environment Simulation)를 사용하였고, 설계 화재하중에 대하여 제연이 제대로 이루어지는지 여부를 확인하기 위하여 범용 CFD 프로그램인 Fluent V.5를 사용하였다.



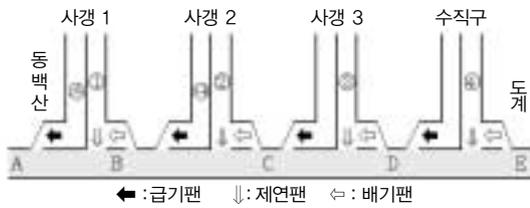
■ 그림 5. 화재하중에 따른 연기의 평균온도

가. SES

SES 컴퓨터 프로그램은 복잡한 지하철도 시스템의 유동, 열전달 습도 및 공조 시스템의 해석을 위해 미국 교통부의 Volpe National Transportation Systems Center의 지원 하에 Parson Brinckerhoff에 의해 개발되었다. SES는 크게 4가지의 모듈로 구성되어 있다.

- Train Performance Subprogram
- Aerodynamic Subprogram
- Humidity/Temperature Subprogram
- Heat Sink/Environmental Subprogram

위의 서브모듈들은 서로 연결되어 전체적인 시스템을 해석한다. [그림 6]과 <표 1>은 터널 내 각 구



■ 그림 6. 각 팬 및 위치의 기호와 팬의 정방향

■ 표 1. 각 구간의 위치 및 기호

기호	구분	위 치
A	본선	터널입구와 사갱1 사이
B		사갱1과 사갱2 상이
C		사갱2과 사갱3 사이
D		사갱3과 수직구 사이
E		수직구와 터널 종점 사이
㉠	환기갱의 급기구	수직구
㉡		사갱2
㉢		사갱3
㉣	환기갱의 배기구	수직구
①		수직구
②		사갱2
③		사갱3
④		수직구

간의 위치를 나타내고 있다.

나. 제연모드 계획

환기방식과 공급되는 전력용량을 고려하여 최대 6대의 팬을 가동시키고 작동과 성능의 신뢰성을 가질 수 있도록 제연모드를 설정하였다.

(1) 기본 제연모드 방식 [1단계 제연모드]

열차가 정차하기 전이나 정차한 초기에는 [그림 7]과 같이 구간에 상관없이 터널 기점과 종점방향 중 어느 한 방향이 결정되면 작동해야 하는 팬과 작동방향이 결정된다.



■ 그림 7. 기본 제연모드 방식의 예

(2) 설계 제연모드 방식 [2단계 제연모드]

6대의 팬을 사용하여 구간별 설계 제연유속이 나오도록 적절한 팬을 가동함으로써, 터널에서 발생할 수 있는 모든 화재의 연기를 제어할 수 있다.

화재가 성장하여 화재하중이 커지게 되면 1단계 제연모드에 의하여 연기를 제어할 수 없게 된다. 따라서 1단계 제연모드 작동 후에 2단계 제연모드로 팬을 전환해야 한다.

[그림 8]은 설계 제연모드의 한 예를 보여주고 있다.



■ 그림 8. 설계 제연모드 방식의 예



다. 구간별 제연유속 분석

SES를 이용한 각 구간의 제연유속을 [그림 9]에 나타내었다. 터널 시점방향 제연이면서 기본 제연 모드인 경우 모든 구간에서 설계 제연유속 2.5m/s 이상(흰 화살표⇐부분)이 나왔으나, 터널 종점방향 제연유속의 경우 수직구와 터널종점 구간 외에는 설계 제연유속 이하의 유속(검은 화살표→부분)이 생성된다.

설계 제연모드인 경우 모든 구간이 2.5m/s 이상으로 생성된다.

따라서 기본 제연모드에서 설계 제연유속이 나오지 않는 구간을 설계 제연모드로 대체하면 된다. 전체 제연모드는 다양한 팬의 구동에 대하여 생성될 수 있는 유속을 알아보기 위하여 시도되었다.

수많은 경우의 팬 구동모드가 있을 수 있으나 본 연구에서는 각 구간별 한 가지 경우에 대하여 결과를 제시하였으며, 일부 구간은 기본 제연모드와 설계 제연모드에 비하여 높은 제연유속이 나왔지만 더 많은 팬을 구동하였기 때문에 나온 결과이며, 필요한 전력이 설계값 이상인 경우이다.

단위 m/s	←터널시점	←사갱1	←사갱2	←사갱3	←수직구 터널종점→
		⇐	⇐	⇐	⇐
기본	2.76	2.49	2.62	3.11	3.02
제연모드	➡	➡	➡	➡	⇐
	1.98	1.96	2.20	2.27	2.51
설계	⇐	⇐	⇐	⇐	⇐
	4.18	3.04	2.80	3.63	5.24
제연모드	⇐	⇐	⇐	⇐	⇐
	4.21	2.81	2.65	2.74	4.9
전체	⇐	⇐	⇐	⇐	⇐
	3.77	3.01	3.28	4.94	4.61
제연모드	⇐	⇐	⇐	⇐	⇐
	2.86	2.65	2.57	2.79	4.03

■ 그림 9. 제연모드에 따른 각 구간의 제연유속 비교

6. CFD를 이용한 제연 시뮬레이션

장대터널의 화재시뮬레이션을 위하여 미국 FLUENT사에서 개발한 범용 CFD(Computational Fluid Dynamics) Code인 Fluent 5.0을 사용했다.

가. 적용 모델 및 조건

(1) 적용 모델

- Unsteady Flow
- Heat Transfer에 따른 자연대류 효과 고려 (공기를 이상기체로 가정)
- k-ε Turbulent Model
- CO에 대한 수송방정식
- Source항 처리

(2) 경계 조건

- 제연유속 2.5m/s, 1.5m/s 조건에 대하여 각각 계산
- 터널 출구에 유속 및 온도에 대하여 Outflow 조건($\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$)
- 터널 벽면 및 기차 표면에서 no-slip condition
- 터널 벽면 및 기차표면에서 단열조건
- 지구 중력 G=9.8
- 초기조건 유속은 0, 온도는 27도

(3) 화재 조건

- 화재하중 최대 14MW (선형적으로 증가)
- Level Off 시간 : 15분
- 연료에 대한 CO발생율 : 0.02g/g
- 화재의 체적 (1,514m³)
- 화재위치 : 기차 기관실

나. 계산에 사용한 터널과 기차 형상 및 격자

장대 터널의 화재 시뮬레이션을 위해 대략 60,000여 개의 격자를 사용했으며 계산 영역은 기차 전방으로부터 160m, 기차 전방부에서 뒤쪽으로 320m를 포함하고 있다. [그림 10]은 외부에서 보는 터널과 열차의 격자를 보여주고 있으며, [그림 11]은 터널 내부에서 보는 열차와 터널의 격자를 보여주고 있다.

다. 제연시뮬레이션 결과 및 분석

(1) 설계조건에 대한 시뮬레이션 결과 및 분석

설계 화재하중인 14MW에 대하여 2.1m/s 이상의 임계유속이 필요하다. 하지만 임계유속은 필요한 최소한의 유속이므로 2.5m/s 이상의 제연유속이 생성될 수 있는 팬을 선정하였으며, SES 프로그램을 사용하여 모든 구간에서 2.5m/s 이상의 유속을 생성할 수 있음을 확인하였다.

따라서 제연유속 2.5m/s인 경우에 설계화재를 제어할 수 있는지를 확인하기 위하여 CFD code를

이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 온도분포와 CO 농도분포를 [그림 12]에 나타내었다.

제연유속 2.5m/s에서 역기류 없이 제연됨을 볼 수 있으며, 화재의 크기가 성장함에 따라 기차기관 실 주위에서 고온에 의한 밀도 차이로 강한 상승 기류가 형성되고 터널의 천장을 따라 하류로 흘러감을 알 수 있다. CO농도는 ppm 단위로 표현하였으며, 시간에 따른 농도분포가 온도분포와 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 화염 자체가 팬의 동작에 의하여 제어될 수 있다면 CO도 제어될 수 있을 것이다.

(2) 화재하중과 제연유속 비교

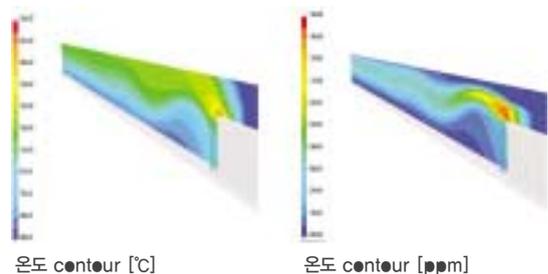
제연유속 2.5m/s의 필요성을 증명하고, 제연유속이 낮을 경우에 나타나는 역기류 현상을 파악하고



■ 그림 10. 터널과 열차의 격자(외부)



■ 그림 11. 터널과 열차의 격자(내부)



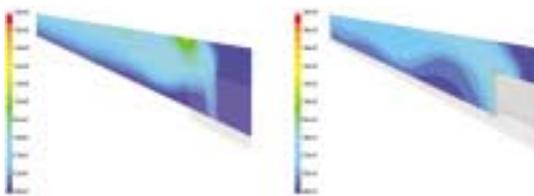
■ 그림 12. 화재하중 14.0MW일 때의 온도 및 CO농도분포 (15분 경과)

자 2.5m/s 외에 1.5m/s 와 2.0m/s인 경우에도 시뮬레이션을 수행하였다. 화재에서 방출되는 연기는 높은 온도를 가지므로 밀도가 작은 기체이다. 따라서 지구중력에 의하여 상승하면서 강한 기류를 형성하게 되고 터널의 천장에 부딪치면 터널 양쪽 길이방향으로 전파되려는 성향이 생긴다. 제연유속이 없는 경우 터널 양쪽 방향으로 연기가 전파되지만 충분한 유속의 공기를 불어주면 한쪽 방향으로 연기를 제어할 수 있다.

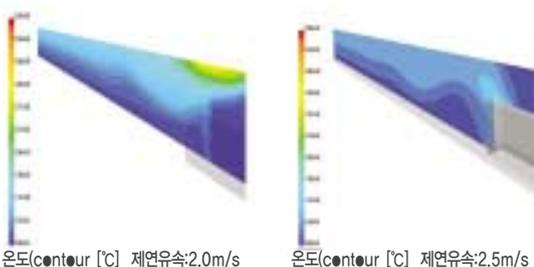
열차의 기관차에서 화재가 발생한 경우 연기를 열차의 진행 방향으로 유도하면 승객이 피난하는 객차 방향으로 연기가 전파되지 않아 피난로를 확보할 수 있게 된다. 하지만 공기의 유속이 부족하면 객차 쪽으로 연기가 역류하게 된다.

제연유속 크기의 영향을 고찰하기 위하여 약 4.7MW 화재에 대하여 제연속도 1.5m/s, 2.0m/s인 경우의 연기거동을 [그림 13]에 나타내었다. 2.0m/s 이상인 경우 화재에서 발생한 연기가 열차 진행방향으로 제어된다. [그림 14]은 약 10.3MW 화재에 대하여 제연속도 2.0m/s, 2.5m/s 인 경우의 연기거동을 보여주고 있다. 2.0m/s인 경우 역기류가 발생하여 열차 쪽으로 기류가 형성되고, 2.5m/s인 경우 화재로 인한 연기가 열차 진행방향으로 제어되고 있다.

연기 중의 일산화탄소는 화재로 인한 질식사의 가장 주요한 원인이며, 농도차이에 의한 확산과 대류이동에 의하여 전파된다. 2.5m/s의 제연유속에서



온도 contour [°C] 제연유속:2.0m/s 온도 contour [°C] 제연유속:2.5m/s
 ■ 그림 13. 화재하중 4.7 MW일 때의 제연유속에 따른 연기거동



온도(contour) [°C] 제연유속:2.0m/s 온도(contour) [°C] 제연유속:2.5m/s
 ■ 그림 14. 화재하중 10.3 MW일 때의 제연유속에 따른 연기거동

화재성장에 따른 온도분포와 일산화탄소의 농도분포 경향이 비슷하므로 일산화탄소의 경우도 역기류가 생길 경우 열차 쪽으로 연기가 전파될 것이라고 예상할 수 있다.

7. 맺음말

연장 16km의 장대터널 내에서 화재가 발생될 때 온도 및 CO농도 특성을 수치적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ㄱ. 장대터널 내에서 발생한 화재크기에 따라서 적절한 제연유속이 필요함을 확인하였다. 연기를 제어하기 위한 제연 팬의 용량과 신뢰성을 확보하는 것은 장대터널의 인명안전 측면에서 가장 중요하다.
- ㄴ. 설계 화재하중 14MW일 때 임계유속은 2.1m/s이지만, 임계유속이 최소한의 유속임을 고려하여 제연유속 2.5m/s에 대하여 SES 프로그램과 CFD code를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.
- ㄷ. 역기류 없이 제연되는 유속은 2.5m/s이며, 이보다 낮은 유속에서는 역기류 현상에 의하여 연기 제어가 어렵다는 것을 예상할 수 있다.
- ㄹ. 제연유속 2.5m/s에서 계산한 시간경과에 따른 온도분포와 CO 농도분포는 서로 경향이 비슷하므로, 역기류가 생기는 지점을 CO 농도분포에서도 예측할 수 있다. (☺)