
철도터널에 대한 환기 및 방재 시뮬레이션 연구

손 봉 세 교수

(경원대학 소방시스템학과)

철도터널에 대한 환기 및 방재 시뮬레이션 연구

경원대학 소방시스템학과

교수 손봉세

2005. 8. 26

Index

I. 미기압파 시뮬레이션

- Objectives
- Problem Definition
- Results & Conclusions

II. 터널 내부의 환기량 시뮬레이션

- Objectives
- Problem Definition
- Results & Conclusions

III. 공사 중 환기

- Objectives
- Problem Definition
- Results & Conclusions

I. 미기압파 시뮬레이션

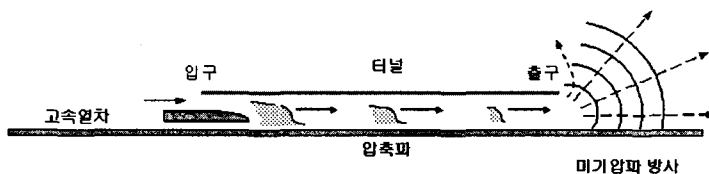
Objectives:

- ④ 본 과업구간은 일반철도 노반설계 1급선 기준의 철도터널로, 최대주행 속도가 200[km/h]로 복선터널의 단면의 경우, 공기압에 대한 영향이 크지 않지만, 정차 노선이 직선화 되고 열차의 고속화가 이루어지면서 공기압이 주요한 검토요소로 대두되게 되었다.
- ④ 본 연구에서는 철도 터널에 대한 공기압분야 검토를 통하여 문제점 발생여부를 파악하고, 문제점발생시 이에 대한 대책을 수립하는 것을 목적으로 한다.



미기압파의 개념 및 이론적 검토 :

- ④ 열차가 고속으로 터널에 진입할 때 유동 단면적의 급격한 변화로 인해 열차 전면의 압력상승에 따른 압축파(Compression Wave)가 형성되어 음속으로 터널 출구 쪽으로 전파되어 나가며 파형의 변형이 이루어지고, 터널출구에서 압축파는 팽창파(Expansion Wave)로 터널 입구로 반사되며 일부는 미기압파라 불리는 충격성(Impulsive) 압축파는 터널출구 주변으로 방사되면서 소음 및 진동문제를 야기한다.



미기압파에 대한 검토 기준 :

- ⊕ 현재 국내에서 미기압파에 대한 설계기준은 수립되어 있지 않으며, 우리나라와 지형조건이 유사하고 터널비중이 높은 일본의 기준을 도입하여 사용하는 것이 최근의 추세이다.
- ⊕ 일본의 경우에 터널입구 후드 시방설계 기준은 열차/터널 단면적비 $R=0.216$ 에서 후드를 설치하지 않은 발라스트 궤도 터널의 열차진입속도 $V=160[\text{km/h}]$ 일 때의 압력구배를 기준으로 각 노선에서의 후드를 실험으로 시방설계하고 있다.
- ⊕ 터널 출구면 중심에서 45 각도로 20[m]거리에서 지면위로 1.2[m] 위치에 미기압파의 피크 값이 20[Pa]이하가 되도록 하고 있다.

해석 프로그램의 개요 : FLUENT ver. 6.2.16

- ⊕ 본 과업대상인 하남터널의 압력분포 및 미기압파를 해석하기 위해서 2/3 차원 열유동 해석 상용 프로그램인 FLUENT(Version 6.2.16)을 사용하였다.
- ⊕ FLUENT는 복잡한 형상의 지형에서 유동과 열전달을 모델링하는 3차원 유동해석코드이다. FLUENT는 C 언어로 제작되었으며, 미국 Coreare사에서 개발하고, 자회사인 FLUENT사에서 1983년부터 판매하였으며, 지속적인 성능개량을 통하여 현재 Version 6.2.16이 사용되고 있다.

Global CFD Presence
16 offices in 10 countries, nearly 700 employees

Fluent Headquarters
● Offices
○ Development Staff
▲ Distributors

© 2005

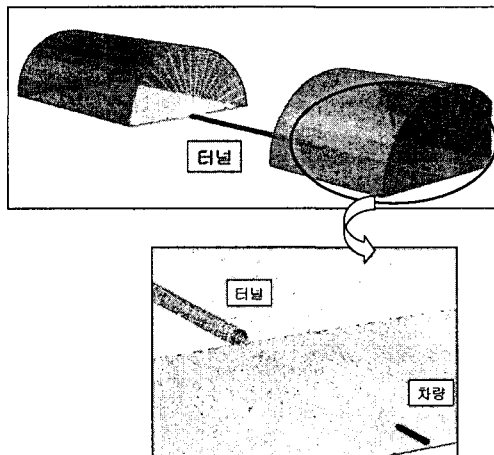
FLUENT의 Physical Models

- ◆ FVM Code
- ◆ Structured, unstructured, hybrid mesh
- ◆ 압축성 / 비압축성 유동 해석
- ◆ Inviscid / Laminar / Turbulent flow model
- ◆ Conjugate Heat transfer
 - Conduction, Convection, Radiation
- ◆ Mixing & Chemical reaction
- ◆ Rotating Machinery
 - Single / Multiple reference frames, mixing planes, sliding mesh
- ◆ Multi-phase flow model
 - VOF, discrete phase, mixture, Eulerian, Cavitation
- ◆ Lumped parameter model
 - Porous media model, Macro-based heat exchanger model
- ◆ Acoustic model / MHD model
- ◆ Integration with 1-D simulation code : Flowmaster, Wave, Aspen...

Problem Definition

Computational Domain :

- ▶ 예) 터널:
 - 터널연장: 1,999 m
 - 내공단면적: 80.70 m²
 - 터널 둘레길이: 34.182 m
 - 터널경사(시점->종점):
-3.6 ‰
- ▶ 열차의 출발위치:
터널 폭의 6배 이상
- ▶ 격자의 종류:
Only hexahedral meshes
- ▶ 격자의 개수: 약 9만 개

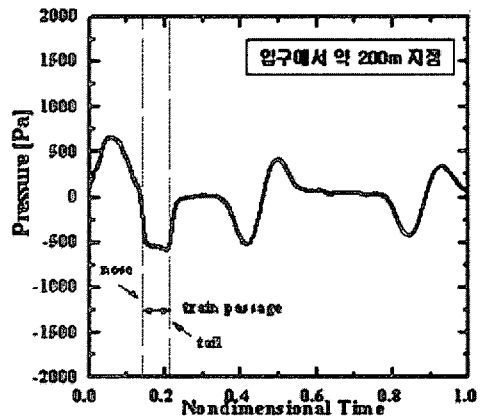


Thermo fluid models & B.C. :

- ⊗ FLUENT Version 6.2.16 사용
- ⊗ Flow solver:
3D Coupled Unsteady model
- ⊗ Turbulence models:
Standard k-ε (2 equation) model
- ⊗ Time Step Size : 1e-05 second
- First order implicit
- ⊗ 밀도 : 이상기체 방정식
- ⊗ 초기조건: 터널 내/외부 기본온도 15℃, 대기압(101,325Pa)
- ⊗ 터널 벽면: 단열조건
- ⊗ 열차속도 200km/h: FLUENT의 MDM으로 처리

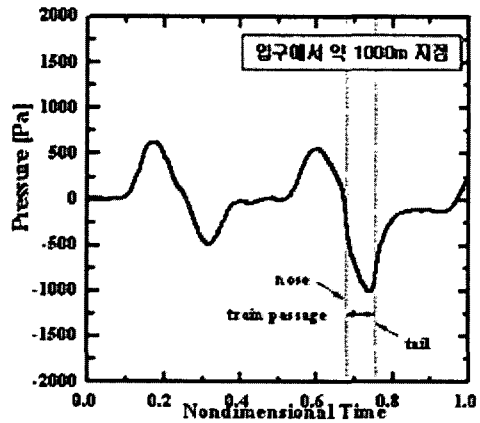
Results: 터널 내부의 압력분포

- ◆ 터널 입구로 열차가 200km/h의 속도로 진입할 경우에 입구에서 약 200m정도 떨어진 위치에서 무차원시간(열차가 터널을 통과하는 시간을 1.0으로 나타냄)에 대한 압력변동을 나타내고 있으며, 터널 내부로 첫 번째 압축파가 진행되고 열차의 통과로 인하여 터널내 압력이 음압으로 낮아졌다가 후미부가 통과한 다음에 압력이 회복되는 것을 나타내고 있다.

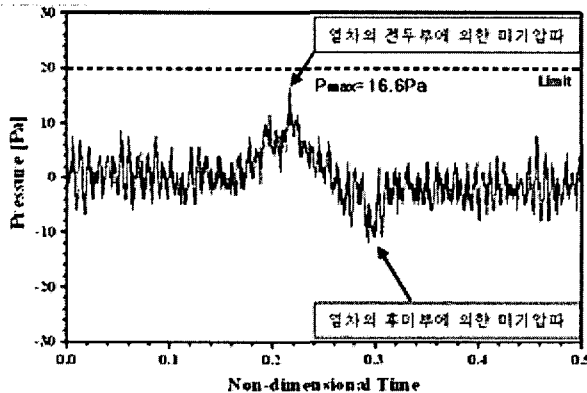


Results: 터널 내부의 압력분포

- ◆ 입구에서 약 1000m정도 떨어진 위치에서 압력변동을 나타내고 있으며, 터널 내부로 첫 번째 압축파가 진행되고 이어서 팽창파에 의하여 압력이 낮아지고 다시 두 번째 압축파에 의하여 압력이 높아지다가 열차의 통과에 의하여 터널내 압력이 음압으로 낮아지는 것을 나타내고 있다.



Results: 터널 출구에서 미기압파 분포



- ◆ 터널출구에 발생한 미기압파는 미기압측정 기준 지점인 터널 출구로부터 20[m]지점, 열차 방향으로부터 45도 각도, 지면으로부터 1.2m에서 약 16.6[pa]을 보여 검토기준을 만족할 것으로 사료됨.

Conclusions

- Ⓢ 터널에 대한 공기압분야 검토를 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 통하여 수치해석을 수행하였으며, 이를 통하여 문제점 발생여부를 파악하였다.
- Ⓢ 해석결과에 의하면, 터널 입구로 열차가 200km/h의 속도로 진입할 경우에 터널출구에 발생한 미기압파는 미기압측정 기준 지점인 20[m]지점, 열차 방향으로부터 45도 각도, 지면으로부터 1.2m에서 약 16.6[pa]을 보여 검토기준을 만족할 것으로 판단된다.



II. 터널 내부의 환기량 시뮬레이션

Objectives:

- Ⓢ 본 연구에서는 터널 운영 중 환기시 열차발생 오염물질에 대한 터널 내 최고농도분석을 통하여 사강의 설치필요성을 여부를 파악하고, 문제점 발생시 이에 대한 대책을 수립하는 것을 목적으로 한다.



검토 개요 :

㉠ 터널 제원

구 분	하남터널	진월터널	
터널연장(m)	1,999	2,328	
내공단면적(m ²)	80.70	75.81	80.70
터널 둘레길이(m)	34.182	33.041	34.182
터널경사(%) (시점→종점)	-3.6	+7.7	

㉡ 열차 제원

- 열차구성(2013년)

- a. 여객열차 : KTX(10량) - 동력차 2량 + 단부객차 2량 + 객차 6량
 디젤열차 - 디젤기관차 1량 + 객차 8량 + 발전차 1량
- b. 화물열차(일반화물) : 디젤기관차 1량 + 화차 27량



열차운행량 :

- ㉠ 열차운행계획은 「차량 복선화 사업 교통영향평가」의 교통수요예측, 문제점 및 개선방안부분을 적용하여 산출하였으며, 터널 운행구간 연도 별 열차 통행량과 구간수송량이 많은 2013년을 설계목표연도로 삼고, 설계목표연도의 교통량에 따른 환기계획을 수립하도록 하였음.

구분	KTX	새마을	무궁화	통일	일반화물	합계	적용
2013년	8	5	11	5	13	42	○
2017년	8	4	11	4	13	40	
2022년	8	5	11	4	13	41	

※ p358 ~ p359, 복선화 사업 교통영향평가 참조

오염물질 발생량 :

- ⊕ 열차의 운행모드별 발생하는 유해물질량은 다음과 같다. CO, NOx의 경우에 국내 실측자료를 인용하였으며, PM의 경우에 국내 실측자료의 객관성 확보가 어려워 미국 EPA(Energy Protection Agency)의 Tier 0 (Line-Haul)기준을 준용하였다.
- ⊕ 발전차에서 발생하는 오염물질량

	BHP	CO [g/(BHP.h)]	NOx [g/(BHP.h)]	PM
Idle	47×2	16.1	16.0	0.3938
Normal	308×2	2.62	3.19	0.2128
Load	385×2	3.94	12.81	0.8512

* 발전차 상. 하행 주행(Normal) 적용

오염물질 발생량 :

- ⊕ 기관차에서 발생하는 오염물질량

Notch	BHP	CO [g/(BHP.h)]	NOx [g/(BHP.h)]	PM
Idle		-	-	
1	179.06	4.41	16.84	
2	423.19	3.78	15.06	
3	805.05	4.81	18.00	
4	1,064.45	5.97	18.59	0.6
5	1,438.98	9.63	20.29	
6	1,830.16	14.45	20.37	
7	2,431.60	21.84	19.31	
8	2,991.10	17.71	18.58	

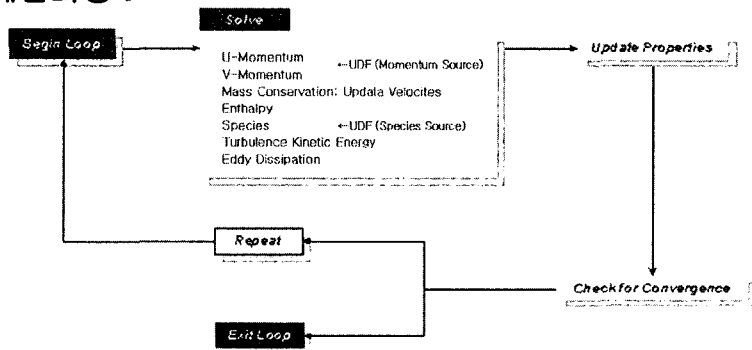
* 디젤기관차 상행 주행(7Notch), 하행주행(5Notch) 적용

오염물질에 대한 검토 기준 :

구 분		검토기준	선정근거	
평 상 시	기류 속도	터널내	10 [m/s]	
	유해물질 허용농도	매연 (Klim)	0.007	PIARC '95, 국내 도로터 널 기준
		CO	100 [ppm]	"
		NOx	25 [ppm]	"

Problem Definition

계산과정 :



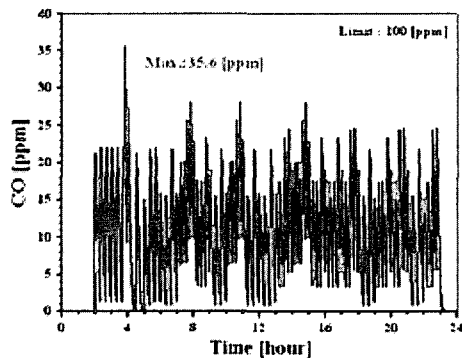
- ◆ FLUENT의 UDF(User Defined Function)을 이용하여 열차운행에 따른 Momentum Source(열차에 의한 공기 관성 처리등) / Species Source(오염물질 생성량 처리)를 고려한다.

Thermo fluid models & B.C. :

- ⊗ FLUENT Version 6.2.16 사용
- ⊗ Flow solver:
2D Segregated Unsteady model
- ⊗ Turbulence models:
Standard k-ε (2 equation) model
- ⊗ Time Step Size : 5 second
- First order implicit
- ⊗ Multi-phase flow model : mixture
- ⊗ 밀도 : Incompressible ideal gas law
- ⊗ 초기조건: 터널 내/외부 기본온도 15℃, 대기압(101,325Pa)
- ⊗ UDF를 이용하여 열차운행에 따른 Momentum Source(열차에 의한 공기 관성 처리등) / Species Source(오염물질 생성량 처리)를 고려

Results: 터널의 일산화탄소 농도 분포

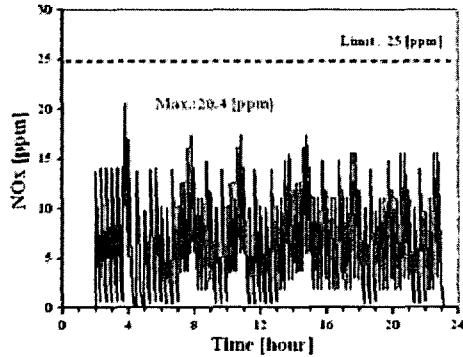
- ◆ 환기구가 없는 경우에 열차 운행에 따른 최대농도는 35.6ppm으로 검토 기준치인 100ppm을 만족하는 것으로 나타나며, 화물열차의 운행 횟수가 많은 새벽시간에 오염물질농도가 높아지는 것으로 나타남. 환기구가 없는 경우에도 차량의 교통 환기력으로 인하여 검토기준치를 만족함.



환기구(사갱) 없는 경우

Results: 터널의 질소산화물 농도 분포

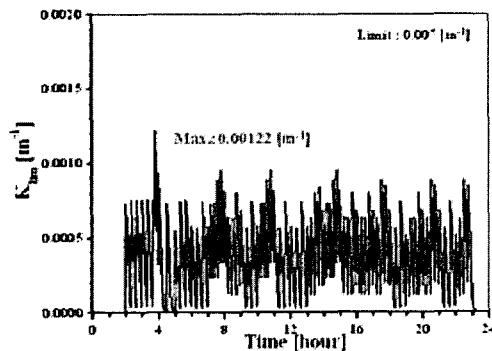
- ◆ 환기구가 없는 경우에 열차 운행에 따른 최대농도는 $0.00122[m^{-1}]$ 으로 검토 기준치인 $0.007[m^{-1}]$ 를 만족하는 것으로 나타나며, 화물열차의 운행횟수가 많은 새벽시간에 오염물질농도가 높아지는 것으로 나타남.



환기구(사갱) 없는 경우

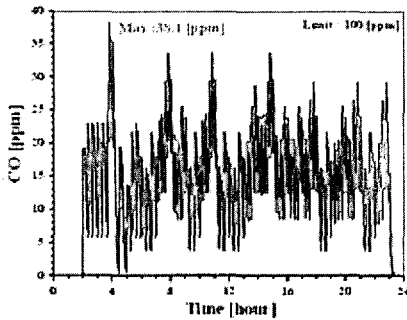
Results: 터널의 매연 농도 분포

- ◆ 환기구가 없는 경우에 열차 운행에 따른 최대농도는 $0.00122[m^{-1}]$ 으로 검토 기준치인 $0.007[m^{-1}]$ 를 만족하는 것으로 나타나며, 화물열차의 운행횟수가 많은 새벽시간에 오염물질농도가 높아지는 것으로 나타남. 환기구가 없는 경우에도 차량의 교통환기력으로 인하여 검토기준치를 만족함.

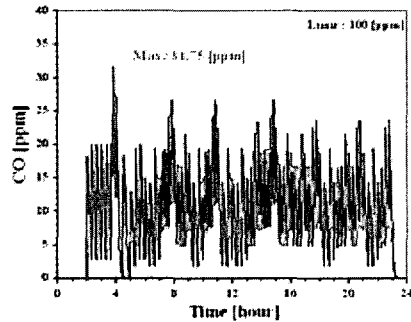


환기구(사갱) 없는 경우

Results: 터널의 일산화탄소 농도 분포



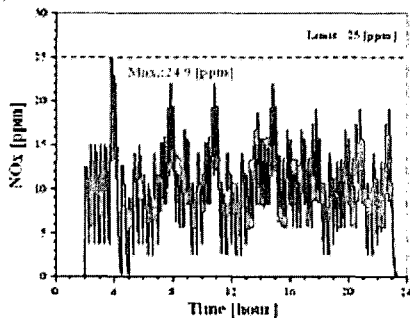
환기구(사갱) 없는 경우



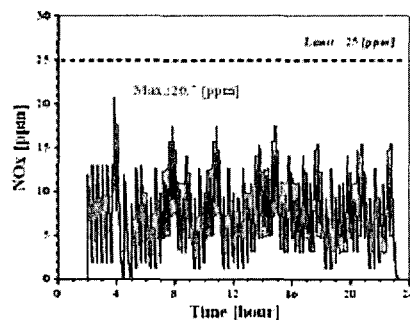
환기구(사갱) 1개소 설치시

- ◆ 환기구가 없는 경우에도 차량의 교통환기력으로 인하여 검토키준치를 만족하나, 화재에 의한 피난등을 고려하여 환기구 1개소 설치 시에 최대농도는 31.75ppm으로 전반적인 농도하락으로 최대농도가 기준치 이하를 나타냄.

Results: 터널의 질소산화물 농도 분포



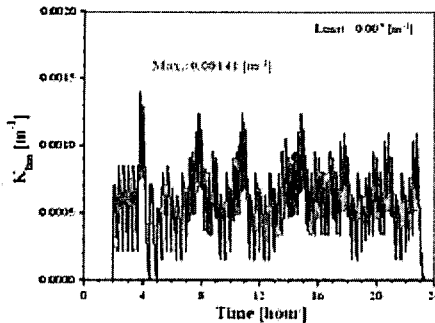
환기구(사갱) 없는 경우



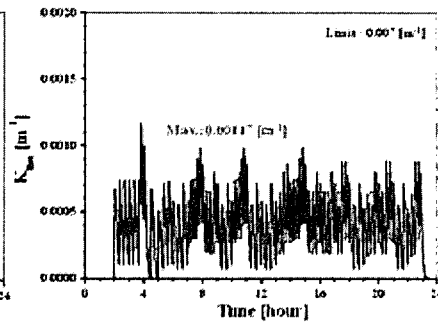
환기구(사갱) 1개소 설치시

- ◆ 환기구가 없는 경우에도 부력효과와 차량의 교통환기력으로 인하여 검토키준치를 만족하나, 화재에 의한 피난등을 고려하여 환기구 1개소 설치 시에 최대농도는 20.7ppm으로 전반적인 농도하락으로 최대농도가 기준치 이하를 나타냄.

Results: 터널의 매연 농도 분포



환기구(사갱) 없는 경우



환기구(사갱) 1개소 설치시

- ◆ 환기구가 없는 경우에도 차량의 교통환기력으로 인하여 검도기준치를 만족하나, 화재에 의한 피난등을 고려하여 환기구 1개소 설치 시에 최대 농도는 $0.00117[m^{-1}]$ 으로 전반적인 농도하락으로 최대농도가 기준치 이하를 나타냄.

Conclusions

- ⊕ 터널의 환기량 시뮬레이션을 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 통하여 수치해석을 수행하였으며, 이를 통하여 문제점 발생여부를 파악하였다.
- ⊕ 해석결과에 의하면 터널인 경우, 환기구(사갱) 미설치 시 질소산화물의 최대농도는 20.4ppm으로 검도 기준치인 25ppm을 만족하는 것으로 판단됨.
- ⊕ 해석결과에 의하면 진월터널인 경우, 환기구(사갱) 미설치 시 질소산화물의 최대농도는 24.9ppm으로 검도기준치인 25ppm을 근접하여 만족하지만, 안전율을 고려할 때 환기력 증가를 위한 1개소의 사갱설치시 농도는 20.7ppm으로 나타냄으로 검도기준치를 만족함. 따라서 터널의 원활한 자연 환기력 보장과 대피피난의 안전성을 고려할 때 사갱 1개소설치를 제시하고자 함.

III. 공사 중 환기

Objectives:

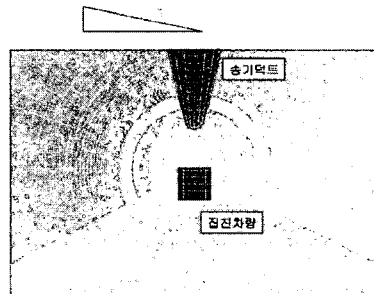
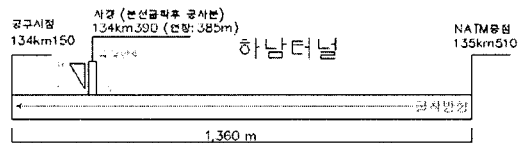
- Ⓞ 본 연구에서는 터널에 대한 화약 발파시 터널내 오염농도 분포를 통하여 공사중 환기설계에 따른 적정성 여부를 파악하고, 문제점발생시 이에 대한 대책을 수립하는 것을 목적으로 한다.



Problem Definition

Computational Domain :

- ▶ 하남터널:
터널연장: 1,999 m
내공단면적: 80.70 m²
- ▶ 격자의 종류:
Only hexahedral meshes
- ▶ 격자의 개수: 약 10만개



형상 및 계산격자

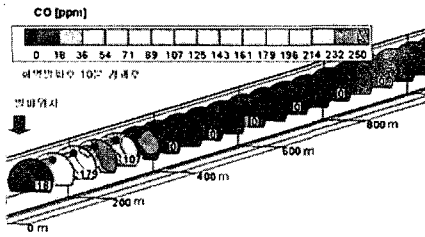
Thermo fluid models & B.C. :

- ⊗ FLUENT Version 6.2.16 사용
- ⊗ Flow solver:
 - 3D Segregated Unsteady model
- ⊗ Turbulence models:
 - Standard k-ε (2 equation) model
- ⊗ Time Step Size : 1 second
 - First order implicit
- ⊗ 밀도 : Incompressible ideal gas law
- ⊗ 초기조건: 터널 내/외부 기본온도 15℃, 대기압(101,325Pa)

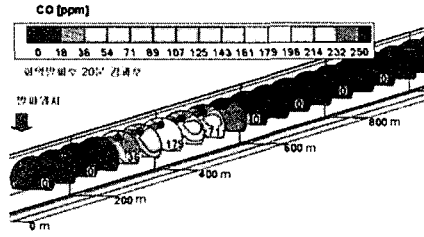
Thermo fluid models & B.C. :

- ⊗ 환기방식: 송기식 급기축류팬 1600CMM x 100mmAq x 45kW x 1대,
풍관 사이즈 1800mm, 집진차량 1350CMM
- ⊗ 오염물질발생량:
 - 최대 발파 화약량: 다이나마이트 330kg
 - 화약에 의한 CO 가스 발생량: 0.008m3/kg
 - 화약에 의한 NOx 가스 발생량: 0.0015m3/kg
- ⊗ 기타: 유입 자연 풍은 없는 것으로 가정.
내외부 온도 차에 따른 부력은 감안하지 않음.

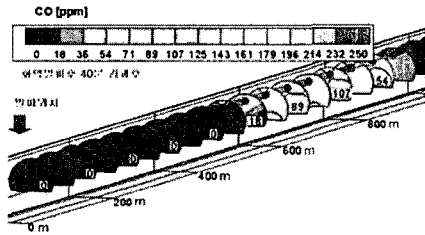
Results: 일산화탄소의 농도분포



발파 10분 경과후



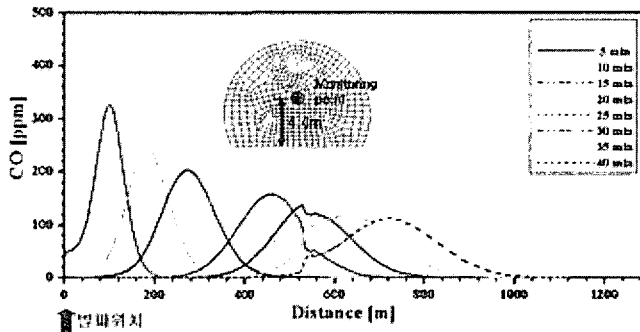
발파 20분 경과후



발파 40분 경과후

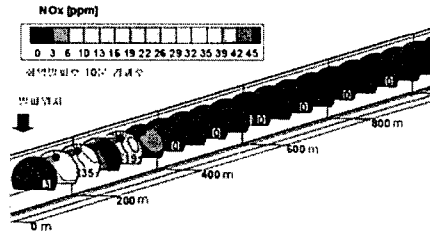
- 시간의 경과에 따라 신선공기의 유입에 따른 농도의 희석이 발생되며, 최대분포 영역이 출구 방향으로 이동됨.

Results: 터널의 위치별 시간변화에 따른 일산화탄소의 농도분포

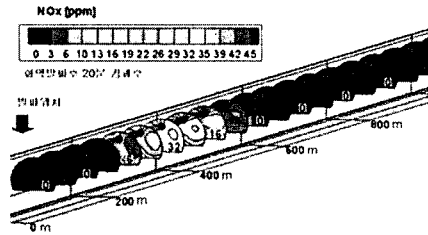


- 시간의 경과에 따라 신선공기의 공급에 의해서 오염농도의 중심축이 발파위치에서 출구 방향으로 이동하며, 이동하면서 최대 농도의 크기도 감소됨.
- 발파위치에서 기준치이하로 오염농도가 떨어지는 시간은 발파 종료 후 약 5분이 지난 시점이며, 터널 내부의 최대 오염농도가 기준치 이하로 내려가는 시점은 약 60분 이후로 판단됨.

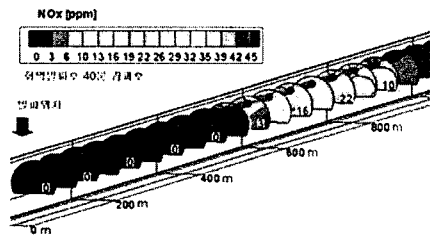
Results: 질소산화물의 농도분포



발파 10분 경과후



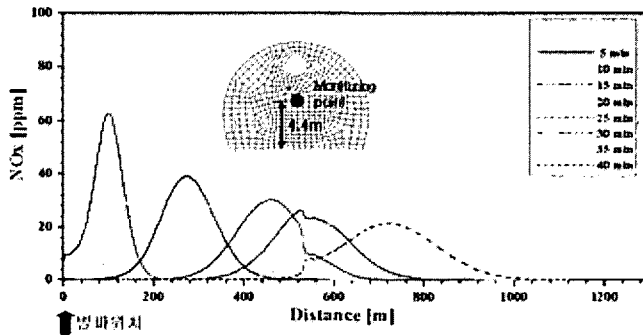
발파 20분 경과후



발파 40분 경과후

- ◆ 시간의 경과에 따라 신선공기의 유입에 따른 농도의 희석이 발생되며, 최대분포 영역이 출구 방향으로 이동됨.

Results: 터널의 위치별 시간변화에 따른 질소산화물의 농도분포



- ◆ 시간의 경과에 따라 신선공기의 공급에 의해서 오염농도의 중심축이 발파위치에서 출구 방향으로 이동하며, 이동하면서 최대 농도의 크기도 감소됨.
- ◆ 발파위치에서 기준치이하로 오염농도가 떨어지는 시간은 발파 종료 후 약 5분이 지난 시점이며, 터널 내부의 최대 오염농도가 기준치 이하로 내려가는 시점은 약 30분 이후로 판단됨.

Conclusions

- ⊕ 터널에 대한 공사중 환기 검토를 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 통하여 수치해석을 수행하였으며, 이를 통하여 문제점 발생여부를 파악하였다.
- ⊕ 해석결과에 의하면, 화약 발파량이 최대인 경우에 일산화탄소(CO) 발생량이 많으며 20분(1,200초)경과시 발파위치로부터 약 260m 위치에서 터널 내부의 오염물질 농도가 기준치(50[ppm])을 만족하는 것으로 나타난다.
- ⊕ 해석결과에 의하면, 화약 발파량이 최대인 경우에 질소산화물(NOx) 발생량이 많으며 20분(1,200초)경과시 발파위치로부터 약 300m 위치에서 터널 내부의 오염물질 농도가 기준치(25[ppm])을 만족하는 것으로 나타난다.