

## 도로터널에서 제트팬 근처의 재순환유동과 연기 역류현상의 상호작용 분석

### Analysis of Interaction Between Recirculating Flow Near The Jet Fan and The Backlayer of Smoke in a Road Tunnel

김 창 균<sup>\*</sup>    유 진 웅<sup>\*\*</sup>    김 성 준<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, Chang-Kyun    Ryu, Jin-Woong    Kim, Sung-Joon

---

#### Abstract

A numerical analysis was done for a tunnel fire in a 1000m road tunnel. A cartesian coordinate was adopted to make a computational grid sytem which has 448,000 computational cells. A transient flow phenomena in the tunnel was simulated by the commercial code of PHEONICS from the ignition of fire to 600 seconds by the interval of 100 seconds. Total computational time of about 44 hours was required to get a convered solution in each time step. The purpose of this research is to analyze of the backlayering pheonmena and recirculation flow in a tunnel. The compuational results say that the backlayering does not happens near the fire of vehicle in this case because the vehicle fire is located at the outside of recirculation zone of flow ocured near the jet fan. In this research, onset of backlayering pheonmena could be escaped if jet fan is set 95m in front of the the fire of vehicle.

키워드 : 도로터널, 수치해석, 화재, 재순환유동, 역류  
Keywords : road tunnel, numerical analysis, fire, recirculating flow, backlayer

---

#### 1. 서론

##### 1.1 연구배경

경제개발계획이 시행된 이후 우리나라 산업의 발달은 산업인구 증가와 더불어 물질적인 부를 축

적하였고 계속되는 산업의 발달은 필연적으로 물류 이동을 위한 자동차 사용의 증가를 야기하였다. 우리나라 자동차의 증가 추세는 매년 급격히 증가하여 80년도에 50만대, 85년도 100만대, 92년도에 500만대, 97년도에 1,000만대를 넘었으며, 04년 7월 1,480여만대에 이르게 되었다[1]. 결국 이렇게 증가하는 차량의 소통을 위해서는 도로 건설의 폭발적인 증가가 불가피하여 도로망이 급격히 확충되었고 전 국토의 70%이상이 산악지형인 우리나라에서는 터널건설이 필수적인 요소가 되었다.

터널에 있어서 환기는 터널 내에 신선한 공기

---

\* (주)한국수력원자력, 팔당댐 발전 발전 1과장  
\*\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 기계공학 전공  
\*\*\* 강원대학교 공과대학 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

를 공급하고 차량에서 배출된 가스를 희석하며 오염된 공기를 터널 외부로 방출시켜 쾌적한 환경을 유지하는 것은 물론 화재발생시 배연효과와 인명의 안전을 확보하여야 하므로 대기중의 오염물질을 기준치 이하로 낮추어야 하며 일방향 도로터널 화재 시에는 차량진행방향이 아닌 화재의 뒤쪽으로 차들이 정차함으로 인해 막히게 되고 화재지점으로부터 나온 매연이 사람이 피해나오는 터널입구 방향으로 역류하게 되면 많은 인명피해 및 차량, 환기시설등의 파괴로 인한 경제적 손실을 발생하므로 화재시 정차되어 있는 차량 쪽과 탈출하려는 사람에게 움직이는 유독가스를 억제하여야 한다. 전 세계적으로 발생한 대형도로터널화재로는 49년 Holland 터널화재(뉴욕-뉴저지), 79년 Nihonzaka 터널화재(일본), 82년 Caldecott 터널화재(캘리포니아), 99년 몽블랑 터널화재, 01년 St. Gotthard 터널화재, 오스트리아 타우언 터널 내부 대형화재사고 등이 있으며, 터널내 화재는 많이 발생하지는 않지만 화재가 발생하였을 경우 인명피해의 가능성은 상당히 크다. 예를들면, 01년 St. Gotthard 터널화재에서는 11명이 사망하고 23대의 차량이 전소되었고 99년 몽블랑 터널화재에서는 39명이 사망하고 40여대의 차량이 전소되었다. 한편 최근에는 개활지 도로보다 터널건설이 선호되어 장대터널 건설이 추세여서 터널 내 환기설비 중요성과 차량 추돌등으로 인한 화재와 같은 재난의 위험도가 증가할 것으로 예상되어 비상시를 고려한 환기설비의 설치가 필수적이다. 따라서 소방법시행령에서는 터널화재에 대한 방재 계획을 세우도록 규정하였고 한국도로공사에서는 터널 환기 시설 건설 및 유지관리 경험을 바탕으로 고속도로 환기시설 설계기준을 제정 운영하고 있다[2].

이러한 점을 고려하면 터널내에서 화재가 발생할 경우 적절한 대책이 필요하다. 본고에서는 일방향 터널내의 중간 위치에서 차량의 화재시나리오를 가정, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 화재발생 후 초기 600초동안 비정상상태의 연기 거동, back layer의 발생, 제트팬 근처의 재순환현상 등을 분석하였다.

## 1.2 연구동향

도로터널을 이용하는 유동인구가 증가하여 도로터널내부에서의 화재발생은 고온의 온도 상승과 함께 반밀폐적 구조로 인하여 효과적인 배연에 많은 어려움이 있으며 피난과 소화활동이 용이하지 않아 인명안전에 위협적으로 터널화재 안전 확보의 필요성이 제기 되었다., 이러한 환경에서 Growth 2000회의에서 FIT (European Thematic Networked Fire in Tunnels) Program이 기획되어 2001년 3월에 연구사업이 출범하였고 현재 유럽 12개국의 33개 기관이 참여하고 있고 UPTUN

(Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels)은 기존터널에 대해 비용면에서 효율적이고 지속가능한 새로운 화재안전확보방안을 개발하기 위하여 유럽협회의 지원하에 13개 회원국, 41개 기관의 참여로 수행되고 있다[3].

유럽의 경우 1992년 노르웨이에서 실시한 Eureka 499 Project[4]가 있으며 또한 미국의 Massachusettes Highway Department and Federal Highway Administration에서 실시한 Memorial Tunnel Fire Ventilation Test (MTFVT)[5]가 있다. 이 실험은 연장 853m 단면적 36.2m<sup>2</sup>의 페터널에서 20MW에서 100MW의 화재하중과 다양한 환기방식에 대하여 화재하중과 임계속도에 관한 실험등 98종의 실험을 실시하였다. 방재시뮬레이션의 연구로는 kumar and cox는 즈웬버그터널에서 화재가 발생하였을때 화염전과 경로를 실험 및 해석적 방법으로 연구한 결과 환기팬의 운전속도가 높을때 측정된 자료와 수치해석결과가 잘 일치하고 있다고 발표하였다.

Biollay and Chass는 오펜버그터널에 대한 화재현상 시험과 해석결과를 비교한 결과 2차원 해석과 3차원해석으로 구한 해는 거의 일치하여 터널 축방향으로 2차원 해석을 수행하는 것도 타당함을 발표하였으며 Wu and Bakar등은 터널의 높이와 터널의 형상을 변화시켜 Back layer가 발생하지 않는 임계속도를 실험적으로 고찰하였다. 터널 높이가 증가함에 따라 임계속도가 증가하는 것으로 발표하였다.

Karki와 Patankar는 제트팬을 이용한 종류환기 시스템과 횡류환기시스템의 전산유체모델개발과 모델 검증을 목적으로 연구하였고 Bellasio는 도로터널에서 차량으로 인한 공해물질 분포를 표현할 수 있는 두가지 오일러리안 모형을 소개했는데 하나는 Box 모델이고 다른 하나는 유한 체적법을 이용한 모델이다[6][7][8]. Insrehus 와 Vassbotn은 7.5km의 도로터널에서 CO, NO와 NO<sub>2</sub>의 분포를 측정하고 가시거리와 공기유동속도를 도로 양방향에서 측정하였다. Glynn, Eckford와 Pope[9]는 터널 안에서 발생한 화재로 정지한 기차를 대상으로 강제환기와 공기유동을 연구하였다. 터널 안 공기유동 즉 온도분포, 속도분포, 그리고 연기분포를 수치해석하고 대피하고자하는 승객이 접하는 조건을 분석하였다.

또한 소방학회에서는 터널화재시 환기속도와 Back layer의 길이변화에 대하여 고찰하였다[10].

## 2. 터널 환기의 일반 이론

### 2.1 터널환기설비 개요

일반적으로 터널내 환기설비의 소요 환기량 산출방식으로 PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) 방식을 적용하거나 일본 도로공단방식을 사용하며 고속도로에는 PIARC방식을 지방국도터널에는 일본 도로공단방식이 사용되고 있다.

PIARC방식에서의 환기대상 오염물질은 매연, 일산화탄소, 질소산화물이며 개별 오염물질을 허용기준 농도로 희석시키는데 소요되는 환기량 중 가장 많이 소요되는 환기량을 설계 소요 환기량으로서 선정한다. 터널환기 시스템의 설계는 터널내 오염물질의 희석으로 터널내 쾌적한 환경유지와 화재발생시 연기를 제어하여 안전성을 확보하는데 그 목적이 있으며, 환기설비는 터널의 길이, 교통조건, 환경조건, 기상조건, 시공성, 경제성을 검토하여 목적에 부합되도록 최적조건을 찾아 결정되어야 한다. 특히, 일방향 터널에서의 화재시 안전성의 관점에서 설계를 적용하여야 할 기준은 다음과 같다.

- 1) 연기의 역방향 확산(Back layer)을 최소화하여 인명이 신속히 비상구 또는 대피소로 이동할수 있어야 하며 연기에 의한 질식과 발생열에 의한 화상으로부터 안전하여야 한다.
- 2) 환기시스템은 대피통로 등으로 연기가 접근하지 않도록 가동되도록 설계되어야 한다.
- 3) 환기시스템은 화재진압을 신속히 처리할 수 있도록 가동되어야 한다.
- 4) 유류등 연료유의 화재시 불완전연소로 인한 2차 연소가 일어나지 않도록 충분한 공기를 공급하여야 한다.

### 2.2 환기방식

환기방식은 크게 자연환기방식과 기계환기방식으로 대별되며 연장 500m 이내의 터널은 터널 내를 주행하는 자동차의 피스톤 효과 등에 의해 자연환기가 가능하며 그 이상의 터널에서는 기계환기방식을 채택한다. 기계환기방식은 종류식, 반회류식, 횡류식, 기타 조합식 등으로 구분된다. 본 연구의 연구대상 터널은 길이가 1km인 장대형 터널이므로 종류식 기계환기방식을 채택하였다.

### 2.3 환기량 계산

터널 내 화재시 발생연기의 역류를 억제하여 대피 공간을 확보하기 위해 적절한 풍속이 요구되는데 이를 임계속도라 하며 임계속도는 화재강도, 터널의 형상, 기물기에 영향을 받으며 일반적으로 다음의 Kennedy식을 사용하여 계산하고 임

계속도에 의해서 제연용 팬 용량이 결정되어 진다. 따라서 환기설비 설계시 우선최악의 화재규모를 가정하고 Kennedy식에 의해서 터널제원 및 화재 크기에 대응하는 임계속도를 구하며 이를 만족하기 위한 제연 환기 용량을 결정한다. 임계속도란 제연기류를 거슬러 연기가 전파되는 현상인 역기류를 발생하지 않도록 붙어주는 최소한의 유속을 의미하다.

$$V_c = K_g \cdot K \cdot \left( \frac{g \cdot H \cdot Q}{\rho_\infty \cdot C_p \cdot A \cdot T_f} \right)^{1/3}$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty \cdot A \cdot V_c \cdot C_p} + T_\infty$$

여기서

- Vc : 임계속도 [m/s]
- g : 중력가속도, 9.8 [m/s<sup>2</sup>]
- H : 터널높이  
[평균직경 - 차량의 화점높이  
(승용차 0.7m, 트럭 1.0m)]
- Q : 화재의 크기 [W]
- ρ<sub>∞</sub> : 주위의 공기밀도 1.189 [kg/m<sup>3</sup>]
- Cp : 정압비열, 1005 [j/kg°C]
- A : 단면적[m<sup>2</sup>]
- Tf : 화점온도 [K]
- K : 상수
- Kg : 터널구배 [%]
- T<sub>∞</sub> : 공기온도 [K]

## 3. 지배방정식 및 수치해석

### 3.1 사용 프로그램 소개

PHOENICS는 Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series의 약자로서 1977년에 D. B. Spalding교수와 그의 제자들이 만든 영국의 CHAM이라는 회사에서 처음 개발된 프로그램이다. 처음에 PHOENICS는 CHAM회사내에서 자체적으로 사용한 프로그램으로서 1980년까지 상용 소프트웨어 패키지로서 인정을 받지 못했다. 그러나 수치해석과 컴퓨터 프로그래밍에 익숙치 않은 엔지니어와 과학자들 사이에 큰 호응을 얻게 되어 1981년에 범용 유동 해석 프로그램으로 인정을 받게 되었다.

PHOENICS는 2.2 Version까지 Dos용 환경에서 사용하다가 VR (Virtual Reality)이 추가된 3.2 Version부터는 Window 환경에서도 사용이 가능하게 되었으며 현재는 3.5 Version까지 발전되어졌다. 현재 사용되고 있는 대부분의 전산 유체 프로그램은 각각의 프로그램마다 기능과 해석면에서 약간의 차이는 있으나 그 기본적 형식은 전산 유체 프로그램의 모체라 할 수 있는 PHOENICS와

거의 비슷하다. PHOENICS를 이용한 전산 해석은 실험 시간과 비용의 절감, 수치적 정확도측면에서 크게 인정을 받고 있으며 지금까지의 발전속도로 보아 앞으로 PHOENICS에 대한 프로그램 신뢰성은 상당 수준까지 이를 것으로 보인다.

전산 유체 프로그램은 크게 수치해석할 대상을 설계하고 경계조건을 설정하는 Pre-processor와 수치계산하는 Main-processor(solver), 그리고 수치결과를 직접 확인하는 Post-processor로 나눌수 있다. PHOENICS 에서 Pre-processor는 Satellite와 VR-editor가, Main-processor는 Earth, 그리고 Post-processor는 Photon과 VR viewer, Autoplot, Result등이 수행하고 있다.

### 3.2 지배방정식과 경계조건

운동량, 연기분포 그리고 난류에 관한 지배방정식을 인텍스를 사용해 다음과 같이 일반 형으로 표시 할 수 있다[11].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S$$

$\phi$  는 스칼라량을 표시하는 종속변수이고  $\rho$  는 유체밀도,  $\Gamma$  는 확산계수이고  $S$  는 소스항 이다. 위의 방정식에서 나타나는 확산계수와 소스항의 표현방법은 Cox<sup>[12]</sup>에 잘 소개되어있다. 본 연구의 경우  $\phi$  는 속도(u, v, w), 연기분포(c), 난류운동에너지( $\kappa$ )와 난류에너지소산률( $\epsilon$ )을 각각 의미한다. 난류모델로는 그 유용성이 비교적 확인된  $\kappa$ - $\epsilon$  모델을 사용하였다.

입구와 출구에서 운동량 방정식의 경계조건은 압력조건을 사용하였고 두 개의 제트 팬이 입구에서 140m 에 위치하는 것으로 하였다. 이것은 한국도로공사 터널환기시설 기준[Table 1]에 따른 설치간격이며 분류에너지가 주기류의 에너지로 충분히 전환되는 믹싱거리를 확보하도록 하기 위해서 제트팬설치 간격을 140m로 한 것이다. 제트 팬의 출구 풍속은 기본 속도인 30m로하고 화재 차량의 위치는 최악의 조건인 터널 중심에 위치하는 것으로 하였다.

Table 1 Intervals of jet fans<sup>2)</sup>

Type of jet fan	Inside diameter of jet fan	Cross sectional area of jet (m <sup>2</sup> )	Velocity of jet (m/s)	distance from tunnel inlet (m)	Intervals of jet fans (m)
600	630	0.27	30	80	80
1000	1030	0.83	30	140	140
1250	1250	1.23	30	160	160
1500	1530	1.83	30	180	180

### 3.3 수치해석조건

#### 3.3.1 터널의 형상과 수치계산 격자망

본 연구에 적용된 터널의 물리적 제원은 장대 터널의 화재 현상을 분석하기위하여 터널연장 1,000m로 하였으며 일방향 2차선 터널의 단면적은 Fig 1과 같이 실제 도로터널에 적용되어진 78.26m<sup>2</sup>로 선정하였다.

환기방식은 현재 도로터널에 가장 많이 적용되는 제트팬 종류환기식으로 터널 입구쪽에 설치하여 적용하였으며, 화재발생 지점은 터널의 중간 지점으로, 입구쪽으로부터 500m 지점에서 차량화재를 가정하였고 수치계산격자는 Fig 2와 같이 x축으로 28개, y축으로 16개, z축으로 1,000개(총 계산격자수 : 28×16×1,000 = 448,000)로 하였다.

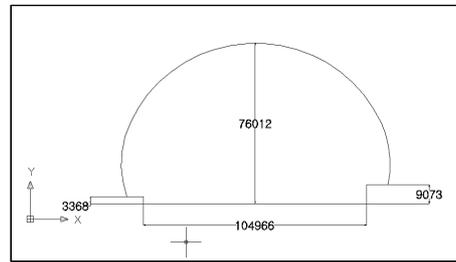


Fig 1 Cross section of tunnel(mm)

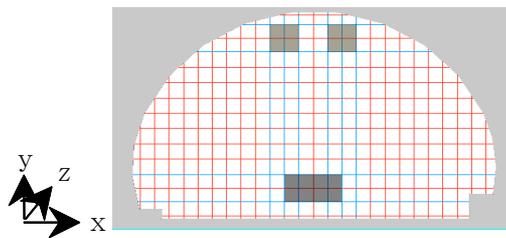
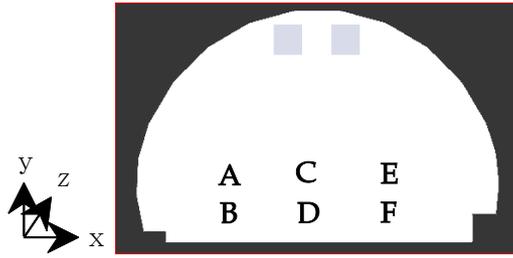


Fig 2 Computational grid system of tunnel in x-y plane



Position	A	B	C	D	E	F
X(m)	2	2	7	7	12	12
Y(m)	2	1.5	2	1.5	2	1.5

Fig 3 Monitoring postions of flow

모니터링 위치를 Fig. 3에 도시하였다. A, B, E 와 F는 인도가 있는 쪽으로 터널 벽의 영향을 많이 받는 위치이고 C와 D는 터널의 중간위치로 터널 벽의 영향을 적게 받는 위치로 터널 벽이 연기의 유동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 선정하였다. Y 값을 1.5m와 2m로 한 것은 어른과 어린이의 키를 고려하여 선정된 값이다. 본 연구는 비정상현상을 분석하였으며 Table 2와 같이 화재 발생 후 600sec동안을 100sec 간격으로 나누어 수치해석하였다.

Table 2 Time intervals

Step	1	2	3	4	5	6
Sec.	100	200	300	400	500	600

### 3.3.2 화재규모 및 제트팬 배연 제어자료

터널 입구에서 500m 지점에서 HGV(Heavy Goods Vehicle) 1대에서 화재가 발생하는 것으로 가정하여 Table 3에서의 기준으로 CO<sub>2</sub> 가스발생량을 14kg/s로 가정하였으며, 방제시 환기기 용량은 터널 내 화재시 발생연기의 back layer를 억제하기 위하여 Kennedy식을 적용, 임계속도를 계산한 결과 2.25m/s로 산정하여 2대의 제트팬 토출속도는 30m/s로 유지하고 100초 단위로 600초까지 6 step의 back layer현상, 속도분포를 분석하였다.

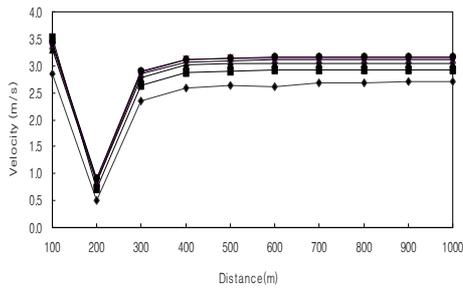
Table 3 Generation of toxic gases during the EUREKA experiments<sup>13)</sup>

Vehicle Category	Gas Production (kg/s)	
	CO <sub>2</sub>	CO
Passenger(Plastic)	0.4 ~ 0.9	0.020 ~ 0.046
Bus/lorry without dangerous	1.5 ~ 2.5	0.077 ~ 0.128
Heavy goods vehicle	6.0 ~ 14.0	0.306 ~ 0.714
Mixed load	1.5	-

## 4. 수치해석 결과

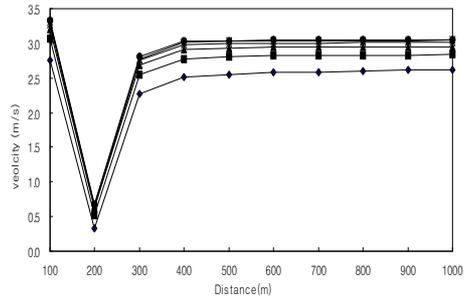
1km의 장대터널에서 터널입구로부터 140m 지점에 제트 팬을 설치하고 30m/s의 토출 풍속을 유지할 때 화재발생 후 화재시점으로부터 시간의 경과에 따라 변화하는 환기용 공기 및 연기의 거동, 특히 역류현상 과 재순환현상을 중심으로 수치해석하였다. 사용한 컴퓨터의 cpu는 3.2GHz(Pentium 4)이고 수치계산 격자수는 448,000개이며 수렴조건은 질량유동량의 0.1%로 하였다. 수렴해를 얻는데 3000번 정도의 반복계산이 필요하였고 걸리는 계산시간은 44시간이었으며 1회 반복 계산에 52.8초가 소요되었다.

수치계산 결과를 터널 전 구간(Z방향)에 걸쳐 측벽으로부터의 거리(X방향), 바닥으로부터의 높이(Y방향)에 따라 분석하였다. Fig 4은 터널벽에 가까운 A지점에서의 터널 측방향 W 속도 변화를 나타내고 있다. 터널 측벽부근의 성인의 키 높이 수준인 A지점에서 100m 간격으로 속도변화를 분석하여 본 결과 200m 지점에서 0.49m/s로 급격히 감소하였다가 300m 지점에서 2.34m/s로 환기에 충분한 속도로 회복하여 400m 지점 이후에는 2.5m/s 이상의 완만한 증가세를 나타내며 시간별 변화로는 시간이 증가할수록 전 구간에 걸쳐 속도는 증가하였으나 200m지점에서는 0.9m/s로 발화 후 600sec 에서도 임계속도 이하로 나타났다. 속도가 급격히 감소한 200m 근처 120 ~ 230m 구간에서의 속도분포를 보다 자세히 Fig 5에 도시하였다. 제트 팬 이 설치된 140m 지점에서 0.29m/s로 급격히 감소하였으며 160m 지점에서는 역류가 발생하여 속도값이 -1m/s로 230m 지점까지도 임계속도에 도달하지 못하였다.



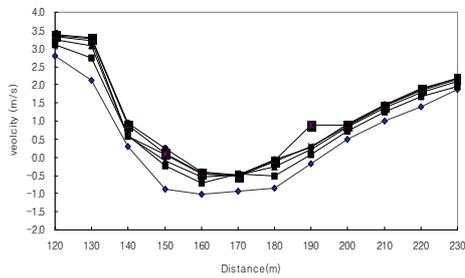
STEP 1 STEP 2 STEP 3 STEP 4 STEP 5 STEP 6

Fig 4 Variation of W velocity at A



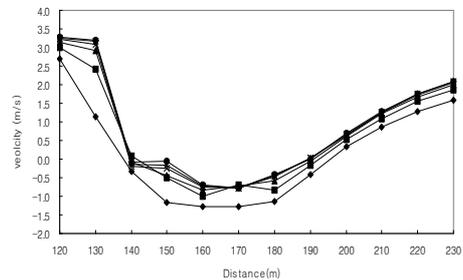
STEP 1 STEP 2 STEP 3 STEP 4 STEP 5 STEP 6

Fig 6 Variation of W velocity at B



STEP 1 STEP 2 STEP 3 STEP 4 STEP 5 STEP 6

Fig 5 Variation of W velocity in detail at A



STEP 1 STEP 2 STEP 3 STEP 4 STEP 5 STEP 6

Fig 7 Variation of W velocity in detail at B

터널 점점 통과 구간이며 아동의 키 높이 수준인 B (X=2, Y=1.5) 지점에서의 속도변화를 Fig 6과 7에 도시하였다. 100m 간격으로 보면 200m 지점에서 A 지점에서의 0.49m/s보다 낮은 0.32m/s 나타났으며 300m 지점에서 2.26m/s로 임계속도 이상으로 증가한 이후로 400m 지점 이후에는 완만한 증가세를 나타내며 시간별 변화로는 시간이 증가할수록 전 구간에 걸쳐 속도는 증가하였으나 200m지점 최고속도는 600sec에서도 임계속도 이하인 0.68m/s로 나타났다. 재순환 구간을 검토하여 보면 130m 지점에서의 풍속은 100sec에서 1.13m/s로 임계속도 이하로 나타났으나 200sec에서는 2.41m/s로 임계속도 이상으로 증가하였고 출구방향으로 진행할수록 속도는 증가하였다. 이 지점에서 A의 경우와 같이 제트팬 설치 시점인 140m 지점에서 -0.33m/s로 역방향의 속도가 나타났으며 160m 및 170m 지점에서 -1.28m/s로 최저속도를 기록하였다.

Fig 8와 9는 X축 방향으로 터널 중앙 위치이고 성인 키 높이 지점인 C에서 100m 간격으로 속도분포를 검토하면 200m 지점에서 A 지점의 0.49m/s보다 큰 2.2m/s의 속도로 임계속도에 근접하였으며 200sec에서는 2.52m/s로 임계속도 이상의 속도를 나타냈다. 또한 500m 지점까지 속도가 증가하여 3.22m/s의 최대속도 이후 화재차량의 영향으로 600m에서 3.13m/s로 감소하였다. A지점에서와 같이 시간이 흐를수록 속도가 증가하였다. 재순환 구간의 속도를 검토하면 100sec, 170m지점에서 최저속도인 1.15m/s인 반면 200sec ~ 600sec 시간대에서는 180m지점에서 낮은 속도를 기록하였고 음의 풍속은 없었다.

X축 방향으로 터널 중앙 위치이고 아동의 키 높이 지점인 D에서의 속도분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 도시하였다. 100m 간격으로 속도를 검토하면 200m 지점에서 1.97m/s의 속도로 최저를 기록하였으며 이후 증가하여 전 구간에 걸쳐 임계속도

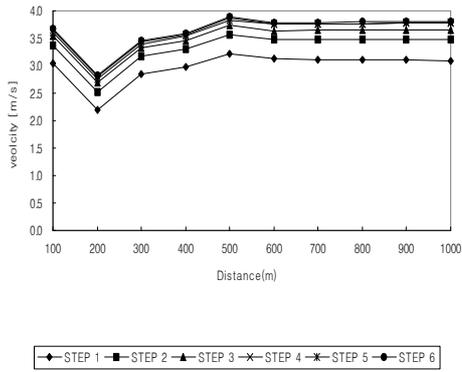


Fig 8 Variation of W velocity at C

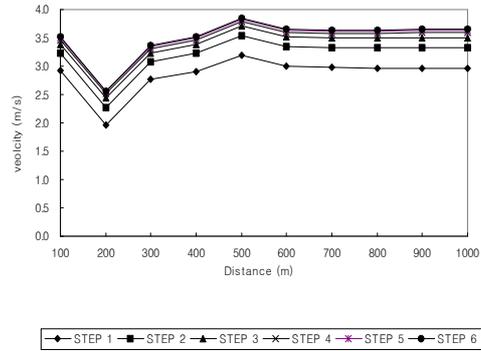


Fig 10 Variation of W velocity at D

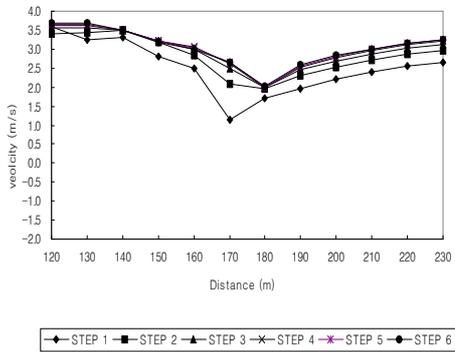


Fig 9 Variation of W velocity in detail at C

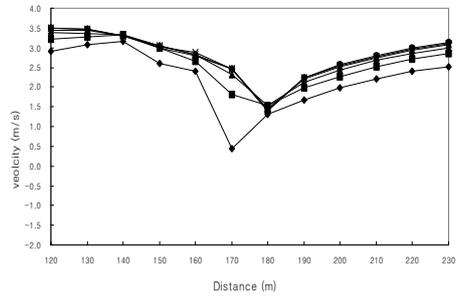


Fig 11 Variation of W velocity in detail at D

이상을 기록하였다. 500m 지점에서는 화재차량의 영향으로 인하여 최고속도를 기록한 이후 감소하였다. 재순환 구간의 속도를 검토하면 제트팬이 설치된 140m 지점에서는 3m/s 이상의 속도를 기록하였으나 100sec, 170m 지점에서 0.45m/s 속도로 최저를 기록한 이후 증가하였으며, 일반적으로 시간이 증가할수록 속도는 증가하였으나 600sec, 180m 지점에서는 1.40m/s를 기록하여 200sec의 1.53m/s, 300sec의 1.52m/s, 400sec의 1.45m/s, 500sec의 1.41m/s 보다 감소하였다. 또한 C의 지점에서와 같이 음의 풍속은 없었다.

Fig 12와 13은 X축 방향으로 터널 좌측 위치이고 성인 키 높이 지점인 E의 좌표에서 100m 간격으로 속도를 검토하면 200m 지점에서 0.53m/s로 A의 지점의 0.49m/s보다 조금 빠른 속도를 나타냈으며 300m 지점에서는 2.36m/s로 임계속도 이상을 나타냈다. 또한 시간이 증가할수록 속도는 증가하였으나 A의 지점에서와 같이 600sec에서의 속도 역시 임계속도 이하로 나타났다. 재순환 구간의 속도를 검토하면 제트팬이 설치된 140m 지점에서 음의 속도를 기록하였으며 160m 지점에서 최저속도인 -0.99m/s를 기록하였다. 150~160m 구간에서는 각 시간 별로 속도가 일정한 형태로 변화하지 않았다.

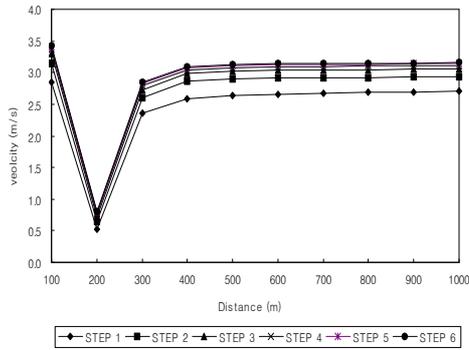


Fig 12 Variation of W velocity at E

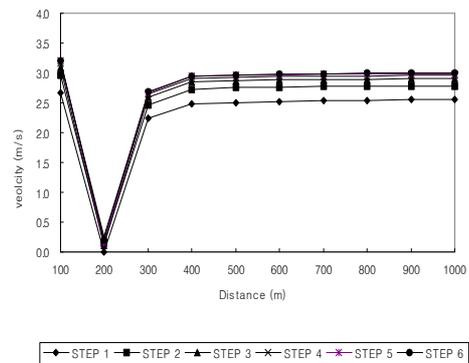


Fig 14 Variation of W velocity at F

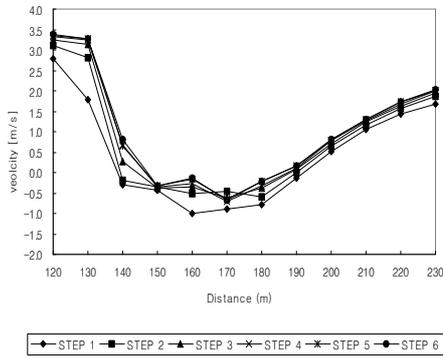


Fig 13 Variation of W velocity in detail at E

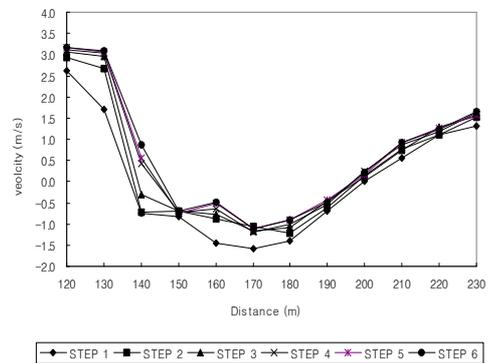


Fig 15 Variation of w velocity in detail at F

Fig 14과 15는 X축 방향으로 터널 좌측 위치이고 아동의 키 높이 지점인 F의 좌표에서 100m 간격으로 풍속을 검토하면 200m 지점에서 0.06m/s로 급격히 감소하여 지점 최저속도를 나타냈다. 300m 지점에서는 임계속도에 근접하는 2.23m/s로 증가하였다.

이 좌표에서는 일반적인 형태인 Step이 진행할수록 속도는 증가하였다. 채순환 구간의 속도를 검토하면 제트팬이 설치된 140m의 100sec에서 -0.74m/s로 음의 속도를 기록하여 역류가 발생하였으나 600sec에서는 0.87m/s로 증가하였다. 160 ~ 170m 구간에서는 각 시간 별로 속도가 일정한 형태로 변화하지 않았다.

Fig 16은 화재 발생 100초 후 1000ppm이상 연기분포지역을 나타내고있으며 수치해석 결과를 분석한 결과 화재지점에서부터 하류 방향으로 연기가 흐르고 상류 방향으로의 흐름을 볼 수 없어 연기의 역류가 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 수치해석 전 시간구간에 걸쳐 거의 변화없이 유사하여 역류 현상이 전혀 발생하지 않았음을 볼 수 있다.

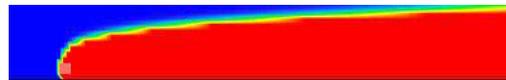
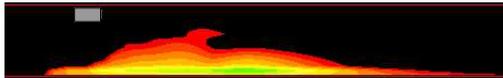


Fig 16 Shape of smoke distribution at 100sec. after fire

터널안에 발생하는 재순환 현상을 Fig. 17에 나타내었으며 제트팬 근처에서 발생하고 있음을 볼 수 있다. 터널 벽근처( $X=2m$ )를 관찰한 결과 화재 발생 100sec후의 경우 터널 입구로부터 129m에서 231.5m까지 재순환유동이 발생하였고 그 구간 길이는 102.5m이었다. 제트팬이 터널 입구로부터 140m에 위치하고 있으므로 제트팬 10m 앞쪽부터 재순환유동이 발생하여 제트팬 하류쪽으로 90m 지점에서 재순환 유동이 끝나는 것을 볼 수 있다. 그리고 그 위치는 제트팬 하부 즉 터널 상부가 아닌 바닥쪽에 형성되었다. 시간이 흐르면서 재 순환 영역의 범위가 점차 감소하였으며 화재 발생 600sec후의 경우 재순환 구간의 길이가 88m로 100sec때 보다 14.5m가 감소하였다. 또한 반대편 벽( $X=12m$ )에서도 104m 길이의 재순환 유동이 발생하였다. 그러나 터널 중앙부( $X=7m$ )의 경우 재순환유동현상의 발생 범위가 100sec에서 43m이고 600sec에서 29.5m로 재순환영역이 터널 벽 근처에 비해 현격하게 짧음을 볼 수 있었다. 이는 터널 벽 근처가 터널 중앙부에 비해 단위 체적당 표면적이 커서 표면 유동 저항이 크기 때문 인 것으로 믿어진다. Fig. 18는 사람의 대피속도 0.85m/s 보다 큰 역류 현상이 발생하는 영역을 표시한 것이다. 이 그림에서도 사람의 대피 속도 보다 큰 연기 역류현상 영역이 터널 양쪽 벽 근처가 터널 중앙부 보다 넓게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 즉 화재시 안전환 대피를 위해서는 터널 중앙부를 이용하는 것이 터널 벽을 이용하여 대피하는 것보다 안전함을 확인 할 수 있다.



X=2m, (zone of recirculation : 129m - 231.5m)  
100sec. after fire



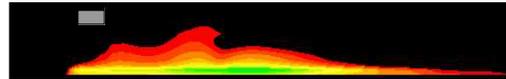
X=2m, (zone of recirculation : 137m - 225m)  
600sec. after fire



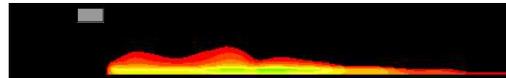
X=7m (zone of recirculation : 167m - 210m)  
100sec. after fire



X=7m (zone of recirculation : 176m - 205.5m)  
600sec. after fire

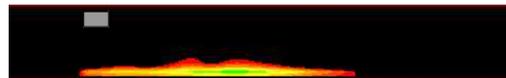


X=12m (zone of recirculation : 131m - 235m)  
100sec. after fire



X=12m (zone of recirculation : 140.5m - 235m)  
600sec. after fire

[Fig 17] Variation of recirculation zone with x position and time on y-z plane



X=2m, (zone of recirculation : 133.5m ~ 202m)  
100sec. after fire



X=2m, (zone of recirculation : 138 ~ 203m)  
600sec. after fire



X=7m, (zone of recirculation : 168m ~ 188m)  
100sec. after fire



X=7m, (zone of recirculation : 177m ~ 183m)  
600sec. after fire

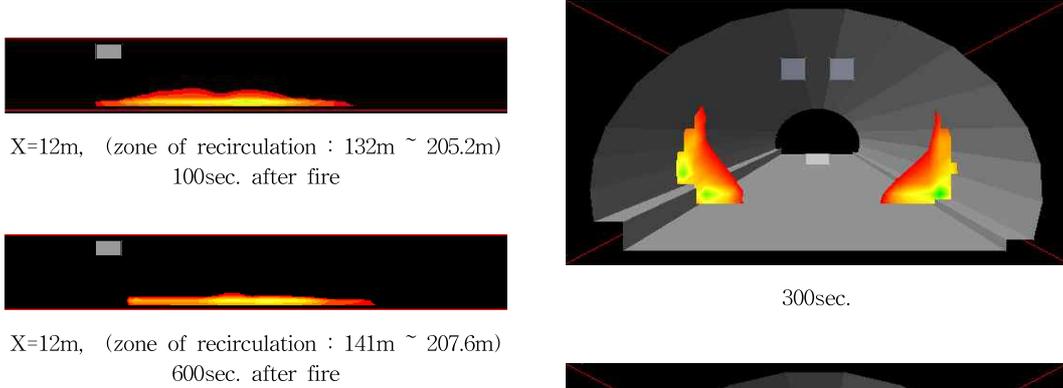


Fig 18 Region of reverse flow velocity greater than the escape speed of people

역류가 발생하고있는 터널입구로부터 168m지점에서의 시간대별 재순환 영역의 변화를 Fig. 19에 나타내었다. 100sec.에서는 터널 중앙부에 역류가 있음을 볼수 있으나 200sec.이후부터는 터널벽 근처에만 역류가 발생하고 터널 중앙부에 재순환 현상이 발생하지 않음을 볼 수 있다. 이 그림에서 재순환영역이라함은 터널축 방향 속도성분(w)이 음의 속도 즉, 터널 입구쪽으로 속도값을 갖는 영역을 의미하고 있다.

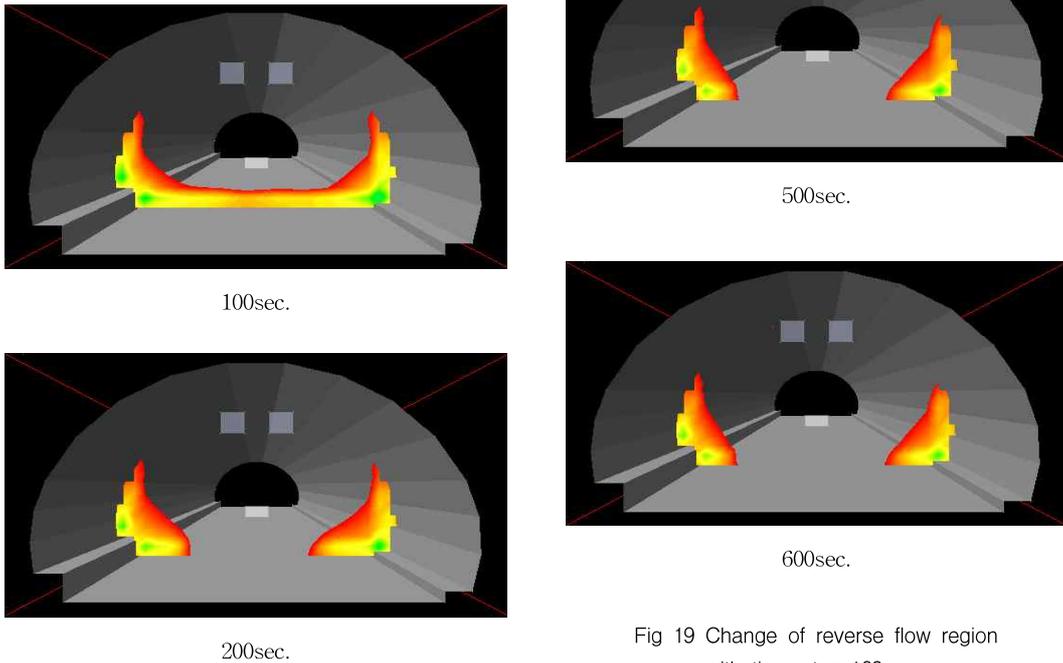


Fig 19 Change of reverse flow region with time at z=168m

## 5. 결 론

1km의 실제터널을 대상으로 고속도로 터널 환기 시설 설계기준을 적용하여 터널입구로부터 140m에 환기용 제트팬을 위치시켰다. 터널안 환기용 공기유동과 연기거동을 CFD를 사용하여 해석하고 화재 시 인명의 안전한 대피 공간 확보가 가능한지 여부를 분석하였다. 수치해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 입구로부터 500m에 위치한 터널 화재 발생지점에서 환기용 공기속도가 2.55m/s ~ 3.88m/s로 임계속도 2.25m/s 이상이였다. 따라서 이 지점에서 연기의 역류현상은 발생하지 않았고 출구 방향으로 연기를 배출하였다.
- 2) 제트 팬이 설치된 140m 지점 부근의 터널 하부에서 재순환유동이 발생하였다. 터널 상부에는 고속의 터널 출구 방향 유속이 있었지만 터널 하부에는 재순환 현상이 발생하였다. 즉 입구방향으로의 공기흐름이 발생하였고 그중 일부구간에서는 화재 시 사람의 대피 속도인 0.85m/s를 초과함으로써 인명피해의 위험이 심대함을 확인하였다. 시간이 경과할수록 재순환 구간의 범위는 다소 축소되었지만 없어지지는 않았다. 따라서 화재 발생지점에서 일정거리(재순환 구간) 이내에서는 제트 팬의 운전을 정지시키는 제어시스템이 필요한 것으로 확인 되었다
- 3) 터널 벽과 바닥에 가까울수록 터널 중앙부에 비하여 재순환 유동구간이 길었다. 따라서 터널 중앙으로 대피하는 것이 양쪽 측면으로 대피하는 것 보다 안전하다고 판단되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 통계청 홈페이지 (<http://kosis.nso.go.kr>)
- [2] 고속도로 터널 환기시설 설계기준, 한국도로공사, pp.10-34(2002.10)
- [3] 건설기술정보 도로터널 환기시설 설계기준, 2004.1
- [4] Eureka EU499 Project, "Norway HGV Fire test at Hammerfest", 1992
- [5] Highway Department and Federal Highway Administration, "Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Report" pp.255-270(1995)
- [6] K.C. Karki and S.V.Patankar, "CFD model for jet fan ventilation system", *Proceedings of the 10th international symposium on aerodynamics and*

*ventilation of vehicle tunnels: Principles, Analysis and Design* Boston, USA, BHR Group Ltd. 2000.

- [7] R. Bellasio, "Modelling traffic air pollution in road tunnels", *Atmospheric environment*, Vol. 31, No.31, pp.1539-1551(1997).
- [8] O.Indrehus and P. Vassbotn, "CO and NO<sub>2</sub> pollution in a two way traffic road tunnel: investgation of NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio and modelling NO<sub>2</sub> concentration", *J. Environ. Monit.*, Vol. 3, pp. 220-225(2001).
- [9] D. R. Glynn, D.C. Eckford and C. W. Pope, "smoke concentrations and air temperatures generated by a fire on a train in a tunnel", *PHOENICS J.*, Vol. 9, No 1, pp.157-168(1996)
- [10] The change of backlayer length with the ventilation air velocity in the tunnel fire, *한국화학·소방학회*, 제17권, pp.9-13(2003)
- [11] Patanker,S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taylor and Francis, 1980
- [12] Cox, G. 1995, *Combustion Fundamentals of Fire*, Academic Press, 1995
- [13] Ventilation for fire and smoke control : recommended design fires, PIARC '99