

## 도로터널 환기관련 연구동향

이 창 우<sup>1)</sup>

### Worldwide Trends in the Research Topics for the Vehicle Tunnel Ventilation

Chang-Woo Lee

**Abstract.** Optimal design of the long tunnels with large cross sections essential for the effective development of the limited land in Korea becomes more and more difficult owing to the constantly changing social, economic, environmental and technological factors. Deficiency of the domestic research works till now on the elementary topics on tunnel ventilation retards progress on developing the key technologies urgently required for designing and managing the long and large tunnels. This paper aims at identifying the subjects on which research must be carried out for the construction and management of vehicle tunnels in Korea by means of scrutinizing the contents of the publications since 1991 at the International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels, the only international conference on the tunnel ventilation.

**KeyWords:** Vehicle Tunnel, Tunnel Ventilation, Research Subject, Tunnel Construction and Management, International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels

**초 록.** 협소한 국토의 효율적 개발을 위하여 필수적인 장대터널의 확충은 사회, 경제, 환경, 기술적 환경의 변화에 따라 최적 설계가 점차 어려워지고 있다. 특히 관련 기초분야 연구가 극히 미흡한 국내 사정을 감안할 경우, 장대터널 설계 및 운영에 필요한 요소기술의 개발은 시급한 과제가 아닐 수 없다. 본 논문에서는 터널 환기에 관련된 유일한 국제심포지움인 International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels에 1990년대 이후 발표된 연구분야 분석을 통하여 국내 연구가 반드시 필요한 과제의 제시를 목적으로 하였다.

**핵심어:** 도로터널, 터널환기, 연구과제, 터널 건설 및 유지관리, International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels

#### 1. 서론: 도로터널 환기 현황 및 중요성

##### - 장대터널 건설 증대

경제활동 및 여가활동을 위한 교통수요의 폭발적 증가에 따라 도로망 및 사회간접자본의 확충이 가장 시급한 현실적 문제로 대두되었다. 이에 따라 도로의 선형개선, 건설에 따른 환경 파괴를 최소화하기 위한 친환경적인 도로건설의 필요성에 따라 도로의 선형이 직선화하고 터널의 수가 증가하고 장대화 되어가고 있다.

##### - 환기의 최적화 필요성

터널내부 밀폐공간내에서 쾌적하고 안전한 운전환경을 유지하고 유사시의 피해를 최소화하기 위하여 환기

설비 및 방재설비는 중요한 기능을 담당하며, 터널 운영비용 중 환기설비의 운전 및 유지관리비용이 제일 큰 비중을 차지하므로 터널의 구조, 위치 및 용도에 적합한 환기시스템의 설계가 필요하다.

##### - 국내 설계기준의 제정 및 문제점

1980년대 이전까지의 국내 도로터널의 설계는 도심터널의 경우 일본 고속도로관리공단의 설계방법을 이용하였으며 고속도로 터널의 경우에는 일본도로공단이 제정한 설계방식을 적용하였다. 그러나 교통 및 도로 특성의 차이로 인하여 환기방식 및 설비용량에 대한 문제들이 제기되면서 1990년 들어서는 국제상설도로회의(PIARC)의 유럽식 설계방식을 일부 적용하기 시작하였다. 이에 따라 1997년 한국도로공사에서는 PIARC 설계방식을 국내 현장에 맞도록 수정 보완한 고속도로 환기설비 설계기준을 제정하게 되었다. 그러나 설계기준

<sup>1)</sup> 동아대학교 지구환경공학부 교수  
접수일: 2002년 6월 20일  
심사 완료일: 2002년 8월 12일

상의 기본 차량, 교통 및 도로자료는 그 적합성에 대한 검증이 되지 않은 가운데 적용됨으로써 많은 문제가 제기되어 현재 기준개정 작업이 진행 중에 있다.

이상에서 기술한 바와 같이 국내 장대터널의 수요가 증대하고 있으며 사회적, 경제적, 기술적 환경 또한 급변하고 있으므로 국내 실정에 맞는 설계기준에 대한 연구는 환기 자체에 대한 연구와 동시에 요구되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 외국의 도로터널 환기관련 연구과제의 변화 추이를 분석함으로써 이에 관련된 기초연구가 거의 전무한 국내에서 시급한 연구가 요구되는 중점 분야를 제시함을 목적으로 한다.

## 2. 세계적 연구 동향

도로, 지하철 및 철도터널의 환기관련 연구결과만을 발표하는 세계 유일의 학술발표대회인 International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels는 영국의 BHR Group에서 주관 및 후원을 하고 있으며 1973년 1회가 개최된 후로 3년마다 개최되어 2000년 10회 심포지움이 가장 최근에 개최되었으며 2003년 11회 심포지움이 준비단계에 있다.

Table 1은 최근 10년동안 (1991년 7회 심포지움 부터 2000년 10회 심포지움까지) 발표된 도로터널 관련 논문의 분야 및 분포를 보여주고 있다. 주요 분야별 연구경향의 년도별 추이를 정리하면 다음과 같다.

### (1) 터널 내외부 환경

관련 연구분야는 오염물질의 확산, 저감대책방안 및 모니터링으로 세분된다.

#### - 터널 내외부에서의 오염물질, 열, 소음에 의한 환경 문제

배기탑 및 갱구를 통하여 배출되는 오염물질의 대기 확산 실험 및 시뮬레이션 분야에 관련된 연구는 배기수갱이 건설된 도심터널을 많이 가지고 있는 유럽 및 일본 연구자들에 의하여 수행되었으며 1900년대 중반이 전에는 배기탑을 통한 대기확산이, 최근에는 갱구를 통한 확산이 상대적으로 높은 비율을 차지하고 있다. 도심터널 배기탑 소음 문제에 관한 연구는 1997년도에, 쌍굴인 경우 출구로 배출된 오염된 공기가 인접터널로 재유입되는 재순환 문제에 관한 연구결과는 1991년에 발표되었다.

#### - 터널내 오염물질의 저감대책

정화시스템(air purification system), CO 및 NOx 제거 시스템이 연구발표 되었으며 배기물질 중 가장 억제가 어려운 유해물질인 NOx의 억제장치에 관한 연구는 지속적인 관심을 끌고 있다.

#### - 모니터링

환기설비의 자동제어를 위하여 오염물질 농도의 모니터링 시스템에 관한 연구는 최근 관심대상이 되고 있다.

### (2) 환기설비

제트팬, 축류팬, 집진기, 환기덕트, 인젝터, 송배기 노즐, damper, smoke trap door 등에 관한 연구로 구분할 수 있다. 최근에는 전혀 채택하고 있지 않는 Saccardo ejector의 환기효과에 대한 연구가 2000년에 발표되어 다시 관심 대상이 되고 있다.

#### - 제트팬

가장 일반적인 환기설비로 최근까지도 가장 많은 연구논문이 발표되고 있다. 년도별 관련 연구과제를 정리하면 아래와 같다.

(1991년)

- 제트류 벽면 마찰손실
- 제트팬 설치 방안

(1994년)

- 제트팬에 의한 와류 형성
- 제트팬 소음 저감방안
- 제트류의 3D 시뮬레이션 분석

(1997년)

- deflection blade 장착 대형 제트팬 환기효과
- 인접 제트팬간의 간섭효과
- 제트팬 소음 저감방안

(2000년)

- 제트팬 설치간격
- 인접 제트팬간의 간섭효과
- 제트팬 추력 평가

#### - 집진기

최근 집진기에 관련된 연구는 천정형 집진기 개발, 집진기의 화재시 제연효과, 고속 집진기 개발 분야에 집중되고 있음을 보여주고 있다.

**Table 1.** International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels에 발표된 논문의 분야별 연구과제 구성비 (1991년 이후) (단위: %)

분야	항목	1991	1994	1997	2000	
환경 (오염, 열, 소음)	확산이론/시뮬레이션	출구		5.3	2.8	6.9
		대기	7.1	5.3		
		오염물질 재유입	3.6			
	저감대책	air purification			2.8	
		CO			2.8	
		NOx		2.6	2.8	3.4
	모니터링	방법			5.5	3.4
설비	제트팬		14.3	10.7	8.3	10.6
	축류팬			5.3	2.8	3.4
	집진기	일반			5.5	
		ceiling type	3.6	2.6		
	덕트		3.6			
	ejector					3.4
	blowing/exhaust nozzle		3.6			
	damper			2.6	2.8	
	smoke trap door			2.6		
정상환기	시뮬레이션	일자 터널	3.6	5.3	2.8	3.4
		slip tunnel	3.6	2.6	5.5	
	환기실험		3.6	2.6	2.8	
	환기이론	환기방식	10.7	7.9		
		자연환기력	7.1			
		가시도	7.1			
	내부 열전달		2.6			
화재	시뮬레이션		3.6	7.9	16.8	17.2
	화재이론/실험			7.9	13.9	6.9
	비상대처방안				2.8	
유지 관리 및 제어	유지관리			7.9		3.4
	제어	정상환기		7.9	2.8	6.9
		화재	10.7			10.6
설계	기준	정상		2.6		
		비상		2.6	5.5	6.9
	사례	정상	7.1	2.6	5.5	3.4
		비상			5.5	3.4

(1991년)

■ 천정형 집진기 개발 (일본)

(1994년)

■ 천정형 집진기 개발 (일본)

(1997년)

■ 정상환기 시의 집진효과

■ 화재시 제연효과

■ 천정형 집진기 개발 (노르웨이)

■ 고속 집진기 개발 (일본)

### - 축류팬

(1994년)

- 축류팬 소음발생
- blade pitch 각도 조절

(1997년)

- 터널 환기용 축류팬 blade pitch 각도 및 속도에 관한 규제

(2000년)

- 저소음 GRP Howden 팬의 터널환기 효과

### (3) 정상 환기분석

정상 환기실험, 환기이론 연구, 시뮬레이션분석, 환기 방식 비교분석 등에 관한 연구는 1997년도 이전에는 활발히 수행되었으나 2000년에는 단 1편에 불과하였다. 반면 화재와 같은 비상시 환기에 관한 연구는 상대적으로 증가하고 있는 경향을 보이고 있다.

### - 시뮬레이션 분석

시뮬레이션 분석은 대상터널이 일자형인 경우와 진입 및 진출 터널이 접속된 복잡형태인 경우로 구분할 수 있으며 일자형 터널에 관한 시뮬레이션 분석은 최근까지도 지속적인 연구과제가 되고 있다.

### - 환기방식 비교분석

관련 연구는 모두가 1994년도 이전에 수행되었으며 그 후에는 한 편도 발표되지 않고 있다.

(1991년)

- 반횡류식 환기 장대터널 (영국)
- air interchange를 고려한 신개념 환기방식 (스위스)
- 반횡류식 환기방식의 개선방안 (소련)

(1994년)

- air interchange 환기방식 (타이완)
- injection을 통한 종류식 환기방식 (러시아)

### - 환기력

환기력에 관련된 연구는 1970 및 80년대에 활발히 진행되었다. 1991년에 발표된 논문 2편이 유일한 환기력에 관련된 논문으로 모두 자연환기력을 연구과제로 하여 외부풍에 의한 환기효과에 관한 내용을 보여주고 있다.

### - 기타

가시도 측정장비, 가시도와 부유분진 농도 관계, 터널 내 비정상 열분석 등에 관한 연구결과가 1991년과 1994년에 발표되었다.

### (4) 화재분석

최근 가장 많은 연구결과가 발표되고 있는 분야로 터널화재 실험과 시뮬레이션분석 관련 논문 발표 비율이 가장 높은 편이다.

(1991년)

- 하향터널 천정부위에서의 화재연 확산
- 화재시 횡류식 환기터널에서의 환기속도 제어

(1994년)

- 화재연층(smoke layer)의 환기효과
- smoke trap door 효과
- 화재 및 화재연 확산 시뮬레이션

(1997년)

- 배연용 수갱 설치 종류식 환기터널의 화재 시뮬레이션
- 터널단면 형태 및 크기가 화재확산에 미치는 영향
- 네트워크형 터널에서의 화재확산
- 화재연층의 안정성(stability)

(2000년)

- 설계기준으로서 임계속도와 임계 질량유동속도의 상대적 비교
- 종류식 및 횡류식 복합 환기터널에서의 화재 시뮬레이션
- backlayering 유동 특성
- 횡류식 환기터널에서의 화재 시뮬레이션
- 종류식 환기터널에서의 임계속도 결정
- virtual reality system을 이용한 화재 시뮬레이션

### (5) 유지관리 및 제어

연구분야 중 최근들어 점진적인 증가 경향을 보이는 분야가 환기설비 유지 및 제어이며, 특히 화재발생시의 환기설비 제어에 관련된 연구 결과의 발표건수가 많은 편이다.

(1991년)

- 스위스 Plabutsch 터널 화재시 환기제어
- 동경만 터널의 비상환기 제어

#### ■ 횡류식 환기터널에서의 배연효과

(1994년)

- 스케일 모델을 이용한 정상환기시의 환기제어 실험
- 대면통행 고속도로 터널에서의 퍼지이론을 이용한 제어시스템
- 지능공학 및 퍼지이론을 이용한 환기제어 시스템의 에너지 절감효과 분석
- 환기제어 시스템의 효율 분석
- 복잡형 터널에서의 자동제어시스템

(1997년)

- 환기제어 시스템 효율 평가기준

(2000년)

- 3D 그래픽 시뮬레이터
- 교통량 측정치에 기초한 환기제어 전문가시스템
- 종류식 환기터널에서의 에너지 비용 비교분석

#### (6) 설계기준

터널 환기설비 결정, 설치 및 운영관리에 관련된 기준의 설정은 국내외 모든 국가에서의 관심 과제이다.

(1994년)

- PIARC(국제상설도로회의)의 방재설비 설계권고
- 영국 터널 환기설비 설계기준

(1997년)

- 프랑스 터널 방재설비 설계기준
- 방재설비 설계기준 및 환기방식별 방재효과 비교 분석

(2000년)

- 미국 NFPA Standard 502가 터널환기설계에 미치는 영향
- 홍콩 Western Harbour 터널 환기 설계기준

### 3. 국내 연구과제에 대한 제언

환기, 방재설비 설계 및 유지관리 시스템은 기술, 환경 및 경제적 측면에서의 최적화가 요구되며 이를 위한 국내 연구과제의 선택을 위하여서는 최근의 세계적 연구동향에 대한 충분한 검토가 반드시 요구된다.

도로 터널환기 관련 국내 연구는 터널환경 측정, 정상환기 시뮬레이션, 화재확산 시뮬레이션, 배기탑 및 갱구

확산 시뮬레이션, 제어 시스템 개발 등의 분야에서 소수의 연구인력에 의하여 진행되어왔으나, 화재 확산 및 대기확산 시뮬레이션은 연구결과의 현장 검증이 이루어지지 않은 CFD분석에 국한되고 있으며 제어 시스템의 경우도 극히 초기 단계의 연구에 불과한 실정이다. 한편 차량 오염물질 배출특성, 도로형태별 교통특성 등에 관련된 기초 연구가 미흡하여 현재 시급한 마련이 요구되고 있는 국내 도로터널 환기설비 설계기준의 연구에는 많은 어려움이 따르고 있다.

따라서 환기방식의 결정, 정상환기용 환기설비 및 방재 설비 결정, 운영 관리 및 제어 시스템의 설계 등의 최적화를 위하여서는, 다음과 같은 분야에서의 국내 연구가 적극적으로 추진되어야 한다고 판단된다.

#### (1) 환경

- 배기수갱을 통한 오염물질 대기확산 시뮬레이션 분석 및 현장실험
- 출구를 통한 오염물질 확산 시뮬레이션 분석 및 현장실험
- 대기확산 모니터링 시스템 개발

#### (2) 설비

- 반횡류식 환기터널에서의 적정 환기량 배분을 위한 damper 조절 기준 연구
- 제트팬 설치 기준 연구
- 천정형 및 고속 소형 집진기 설치 가능성 연구

#### (3) 환기

- 환기분석 전용시뮬레이션 모델의 현장 검증 연구
- 국내 기상 및 지형특성을 고려한 자연환기력의 영향분석을 통한 활용방안 연구

#### (4) 화재

- 반횡류식 환기터널의 배연효과 분석
- 국내 터널 특성을 고려한 임계속도 결정
- 방재시스템 설비 및 모델 연구

#### (5) 유지관리 및 제어

- 환기설비 자동제어 시스템 설비 및 모델 연구
- 방재설비 자동제어 시스템 설비 및 모델 연구
- 환기설비 유지관리 지침 연구

#### (6) 설계

- 환기 및 방재 시스템 설계기준 연구

#### 4. 결 론

협소한 국토의 효율적 개발을 위하여 필수적인 장대 터널의 확충은 사회, 경제, 환경, 기술적 환경의 변화에 따라 최적 설계가 점차 어려워지고 있다. 특히 관련 기초분야 연구가 극히 미흡한 국내 사정을 감안할 경우, 장대터널 설계 및 운영에 필요한 요소기술의 개발은 시급한 과제이다.

본 논문에서는 터널 환기에 관련된 유일한 국제심포지움인 International Symposium on Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels에 1990년 이후 발표된 연구분야 분석을 통하여 국내 연구가 반드시 필요한 과제의 제시를 목적으로 하였다. 환경, 설비, 환기, 화재, 제어, 설계 분야에서 연구가 필요한 분야로는 (1) 배기수갱 및 갱구를 통한 오염물질 대기확산 분석 및 모니터링, (2) 제트팬 설치기준, 반횡류식 환기터널의 damper 조절 기준, 천정형 집진기 설치 가능성, (3) 터널환기 전용시뮬레이션 모델의 현장 검증, (4) 국내 터널 특성을 고려한 임계속도 결정 및 반횡류식 환기터널의 배연효과, (5) 유지관리 및 제어시스템, (6) 환기 및 방재 시스템 설계기준 등을 들 수 있다.

#### 참고문헌

1. Stephens, H.S., Dowden, R.R., King, A.L. and M.P. Patel, Eds., 1976, Proc 2th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Cambridge, UK.
2. Vardy, A.E., Ed., 1985, Proc 5th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Lille, France.
3. Wood, P. and R. Pickford, Eds, 1988, Proc 6th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Durham, UK.
4. Haertaer, A., Ed., 1991, Proc 7th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK.
5. Cockram, I.J., Ed., 1994, Proc 8th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool, UK.
6. Gillard, J.R., Ed., 1997, Proc 9th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy.
7. PIARC, 1998, Main reports published by the World Road Association between 1991 and 1997.
8. PIARC, 1999, All the reports published by the World Road Association for the 21st World Road Congress.
9. Casterta, A.S., Ed., 2000, Proc 10th Int Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, USA.

#### 이 창 우



1978년 서울대학교 자원공학과 공학사  
 1983년 미국 펜실베이니아주립대학교 대학원, 자원공학 및 OR전공, 석사  
 1986년 미국 펜실베이니아주립대학교 대학원, 자원공학 및 OR전공, 박사  
 Tel: 051-200-7769  
 E-mail: cwlee@mail.donga.ac.kr  
 현재 동아대학교 지구환경공학부 교수