

터널 화재시 연기확산 차단을 위한 양방향 토출 에어커튼 시스템에 대한 연구

양상호* · 최영석** · 김정엽*** · 김남구**** · 김경엽*****†

The Study on the Bi-directional Ejection Air Curtain System for Blocking Smoke Diffusion in case of Tunnel Fire

Sang-Ho Yang*, Young-Seok Choi**, Jung-Yup Kim***, Nam-Goo Kim****, Kyung-Yup Kim*****†

Key Words : Blocking Smoke Diffusion(연기확산차단), Tunnel Fire(터널 화재), Heat Flow(열기류), Back layering(역기류), Bi-directional Ejection(양방향 배출), Air Curtain(에어커튼), Critical Velocity(임계속도), Centrifugal Type(원심형) Turbo Fan(터보 팬), Spiral Nozzle(나선형 노즐)

ABSTRACT

This paper presents a the study on air curtain system of top and bottom bi-directional jet air discharge for blocking the spread of smoke in case of tunnel fire. The five kinds different air curtains of A, B, C, D, and E of models for various performance tested after manufactured. A results of the various performance test obtained the best efficiency from E model air curtain. And optimize the injection angle of the air curtain nozzle through the three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis and analyzed the effects of external pressure of tunnel. and also single factor design have been applied. At present, our attention is focused on the velocity distribution(flow width and flow position) of 1.5m on the ground in tunnel. Also, analyzed the influence of draft in the tunnel. Detailed effects of discharge angle of air curtain and velocity at nozzle exit are discussed.

1. 서 론

터널 방연 에어커튼이란 터널 내부에서 화재가 발생했을 때 운전자들이 안전하게 대피할 수 있는 피난공간을 확보하기 위해 고압 공기를 분사해 화재시 발생하는 유독성 연기를 차단하는 시설이다. 현재 전국 고속도로 상에 있는 500~1,000m 터널 123개소 가운데 93개소의 터널에는 피난연결 통로가 설치되지 않은 것으로 파악됐다.⁽¹⁾⁽²⁾

터널은 반 밀폐공간으로 터널 이용자에게 화재 등 예기치 못한 사고에 대한 공포감을 유발하며, 실제로 화재가 발생하

는 경우, 대형 인명피해를 야기할 우려가 매우 크다. 이로 인해 사회적으로 안전한 터널환경 확보에 대한 요구가 증가하고 있는 실정이다.

터널 방연 에어커튼 및 유사 연구사례를 살펴보면 폴란드의 Grzegorz Krajewski 등⁽³⁾⁽⁴⁾ 등이 '화재시 제연구역(smoke free zone)분리에 사용되는 에어커튼의 효율'에 대한 연구를 수행하였고, 막슈다 주레바(Makhsuda Juraeva) 등⁽⁵⁾은 지하철도에 설치되는 에어커튼의 수치최적화 연구를 하였다. 또한 Andrei Dragomirescu 등⁽⁶⁾은 수치해석을 통하여 도시형 자동차터널에 사용되는 모듈화 된 환기방식에 사용되는 에

* 한국산업기술대학교 지식기반기술 · 에너지대학원, (주)삼원이앤비 기술연구소(Graduate School of Knowledge-based Technology and Energy, Korea Polytechnic University, Samwon E & B Co., Ltd.)

** 한국생산기술연구원 열유체시스템연구실(Korea Institute of Industrial Technology, KITECH)

*** 한국건설기술연구원 화재안전연구소(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, KICT)

**** 한국도로공사 (Korea Expressway Corporation)

***** 한국산업기술대학교 기계공학과(Dep't of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : kykim@kpu.ac.kr

어커튼을 연구하였다. ALAIN DROTZ 등⁽⁷⁾은 프랑스 파리 순환 A86 서부도로에 대해서 이론적인 전산유체역학(CFD)을 바탕으로 방연 에어커튼의 화재연기 차단 가능성을 시뮬레이션으로 검증하고 이를 실제 지하도로 터널의 화재연기 차단 및 환기를 목적으로 설치하였다. 여기서는 화재발생시 에어커튼이 작동하여 화재연기가 자연스럽게 순환이 이루어질 수 있도록 유도하였고, 대피로의 경우 에어커튼 및 가압 송풍 또는 배기구를 통하여 화재발생시 화재연기가 대피로에 유입되지 않도록 설계하였다. 유용호 등⁽⁸⁾이 터널 화재시 연기 확산방지를 위한 국소제연설비의 성능평가연구를 실시하였다. 여기서⁽⁹⁾는 피난 통로의 에어커튼 공기분사속도가 0.25 m/s 이상이면 연기확산을 정지할 수 있는 것으로 보고되었다. 방연 에어커튼의 설치 목적은 중규모터널(연장 500~1,000 m)에서 방재시설 목적으로 설치되며, Fig. 1 및 Fig. 2에서와 같이 터널 내 화재 발생시 연기 확산을 지연시켜 인명피해를 줄이기 위한 피난환경 개선용으로 설치된다.

터널은 반 밀폐공간으로 터널 이용자에게 화재 등 예기치 못한 사고에 대한 공포감을 유발하며, 실제로 화재가 발생하는 경우, 대형인명피해를 야기할 우려가 매우 크다. 이로 인해 사회적으로 안전한 터널환경 확보에 대한 요구가 증가하고 있다.

2. 연기이동에 대한 고찰 및 실험결과

2.1. 화재발생시 터널의 열기류 흐름 패턴의 고찰

터널 화재시 발생하는 연기는 가시도(visibility)를 떨어뜨리기 때문에 대피자들이 탈출로를 찾지 못하여 짧은 시간동안이라도 연기에 직접 노출되면 호흡곤란으로 의식불명 또는 사망에 이르게 되므로 초기에 화재연기를 효과적으로 제어하는 것이 매우 중요하다.

화재가 발생하여 터널 내에서 자동차를 정차하는 경우 승객이 연기에 의한 질식위험으로부터 빠른 시간 내에 대피해야 한다. 화재 발생 연기는 강한 부력과 이동성에 의해 화염이 확산되는 속도보다 매우 빠른 속도로 화재발생 공간을 오염시키며 확산된다. 터널내의 배연설비 용량이 부족하거나, 피난방향의 반대쪽에서 바람이 부는 경우 피난방향으로 연기가 전파되면서 연기층 높이가 낮아지고 연기역류(back layering)⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾ 현상이 발생하여 피난자는 연기층 하강에 의한 질식사의 가능성이 크다.

화재 발생시 정지하고 있는 공기 내에서 속도 V_c 로 진행하는 연기를 저지하기 위해서 필요한 환기풍속 u [m/s]는 대략 $u \approx V_c$ 라고 하고 있다.⁽¹²⁾

발열량 Q 와 열기류의 임계속도 V_c , 열기류의 온도의 상승 Δt 사이의 관계는, 이론적으로는 차원해석에 의해서 구한다.⁽¹³⁾ 차원해석으로 V_c 는 발열량의 1/3 승에 비례하고 Δ

t 는 발열량의 2/3 승에 비례한다. 한편, 실험적으로도 발열량과 열기류의 관계가 얻어져 있어, 화원부근에 있어서의 평균배 열기류의 임계속도의 속도 V_c 는 다음 식 (1)과 같다.⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

$$V_c = cK \left(\frac{0.75 Q g T}{C_p \rho_o T_o^2 W} \right)^{1/3} \quad (1)$$

여기서,

V_c : 열기류의 임계속도 [m/s]

c : constant, (≈ 0.8)

C_p : 공기의 비열, 0.24 [[kcal/(kg °C)]

g : 중력가속도 9.8 [m/s²]

K : constant, (≈ 1)

Q : 발열량[kcal/s]

T : 열기류의 절대온도, [K]

T_o : 주위의 절대온도, [K]

W : 터널의 폭 [m]

ρ_o : 주위 공기밀도[kg/m³]

또한 열효율은 0.75로 하여 화원 수직상의 천장 면에서 공기온도상승 Δ_t [°C]는 아래 식(2)⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾로 구할 수 있다. Table 1에 NFPA 502에서 지정한 터널의 화재 강도를 나타냈으며 Table 2는 화재 종류별 임계속도를 나타낸 것이다.

$$\Delta_t = 44 \left\{ \left(\frac{0.75 Q}{h^5} \right)^2 \right\}^{1/3} \quad (2)$$

여기서 h 는 터널 천장까지의 높이[m]이다.

또한, 연기층의 초기두께 d [m]는 식 (3)^{(a)(11)(12)}과 같다.

$$d = \frac{M}{\rho v w} \quad (3)$$

단, M [kg/s]은 발열 속도를 나타내며 아래 식 (4)와 같다.

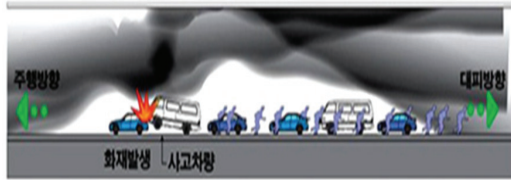
$$M = \frac{0.75 Q}{C_p \Delta_t} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 열기류의 공기밀도로 아래 식 (5)와 같이 표시된다.

$$\rho = 1.293 \times 273 / (273 + t_o + \Delta_t) \quad [kg/m^3] \quad (5)$$

또한 화재규모가 상대적으로 작은 경우, 화원주의에서 터널 단면의 일부분만 연기가 존재한다는 사실로부터 Tetzner 등⁽¹⁶⁾은 Kennedy 식에 보정계수 (β)를 제안하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 화재발생시 에어커튼이 화재연기를 차단하여 대피시간을 늘려주는 개념도이다. Fig. 3은 구배가 없는 평탄한 터널일 경우 화재발생시 열기류(연기층)의 흐름 패턴을 나타내었다.



(a) Fire smoke diffusion on tunnel fire



(b) Smoke spread prevention on tunnel fire

Fig. 1 Prevent the diffusion of smoke in the event of a tunnel fire for air curtain concept⁽¹⁾

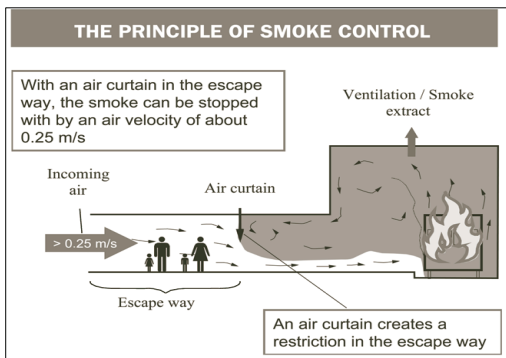


Fig. 2 Air curtain for smoke control in tunnels. (SINTEF NBL)⁽⁹⁾

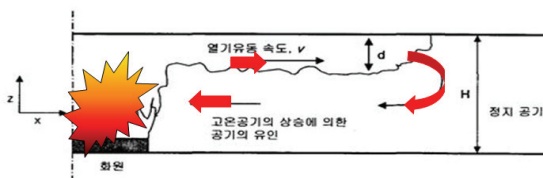


Fig. 3 Tunnel fire flow pattern of the heat flow⁽¹⁰⁾

Table 1 Fire intensity of tunnel⁽¹¹⁾

kind of car	Passenger Car	Bus & Truck	Tank lolly
Fire Intensity (MW)	5	20	100
Smoke Generation (m ³ /s)	20	60~80	100~200

Table 2 Critical velocity according to PIRAC^[5]

No.	Cause of fire	Critical Velocity, V_c [m/s]
1	passenger vehicle	1.0
2	bus or truck	2.7

$$V_c = K_y \left(\frac{g h Q}{\rho_o C_p A T_f} \right)^{1/3} \cdot Fr_c^{-1/3} \quad (6)$$

$$T_f = \frac{Q}{\beta \rho_o C_p A V_c} + T_o \quad (7)$$

$$K_y = 1 + 0.0374 \gamma^{0.8} \quad (8)$$

여기서, K_y 는 구배보정계수, H 는 터널 높이, [m], γ 는 터널 구배, [%], Fr_c 는 임계 Froude 수, T_f 는 연소가스의 발열온도, [°C], β 는 보정계수(0.2~0.5),⁽¹⁹⁾ A 는 터널 단면적, [m²]을 나타낸다. 그러나 현재 세계적으로 터널 임계속도 산출을 위한 여러 가지 식이 이용되고 있으나 화원 전체가 연기로 충전하다는 가정에서 유도된 Kennedy 식이 가장 많이 쓰이는 것으로 조사되었다.⁽¹⁸⁾ 한편 최근 한국도로공사의 “고속도로 방재시스템 연구용역” 등에서는 Kennedy 식을 보완한 D. Tetzner 식이 실제 상황에 가장 부합하는 것으로 보고하고 있다.⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾

2.2. 방연 에어커튼 및 송풍기 특성

에어커튼 원리는 터보형 원심 송풍기에서 발생하는 고속 분출 공기로 공기막을 형성하여 화재발생시 터널 단면의 연기흐름을 차단하고 피난 연결통로를 확보하여 대피시 인명 피해를 줄이기 위한 목적이다. 매현 2 터널에 설치된 방연 에어커튼(Fig. 5)의 최소사양은 60 m³/min 이상의 풍량과 노즐선단 0.1 m위치에서 고품속으로 분출하기 위한 동압이 필요하다. 노즐 분출속도가 30 m/s 이상이므로 송풍기의 동압은 아래 식 (9)와 같이 계산된다. 그러므로 에어커튼 송풍기는 아래 식과 같이 계산된 값에서 약 10%정도의 여유를 주어 전압을 597 Pa (60 mmAq)로 설계하였다. 또한 송풍기 1대가 담당하는 에어커튼 노즐의 전체 길이(L_{Noz} , [m])는 2.45 m 이므로 공기분사 노즐 폭(Noz_w , [mm])은 아래 식 (10)을 이용하여 계산하면 약 14 mm가 된다. 여기서 P_{d2ac} 는 노즐의 동압을 V_{Noz} 은 노즐 풍속을 나타낸다.

$$P_{d2ac} = \frac{V_{Noz}^2 \rho_o}{2} [Pa] \quad (9)$$

$$Noz_w = \frac{Q/60}{V_{Noz} \times L_{Noz}} \quad (10)$$

2.3. 에어커튼의 성능 및 형상, 송풍기의 형식 결정

방연 에어커튼은 2차선 이상의 고속도로 터널에 설치되어야 하므로 내구성이 가장 중요하다. 터널 내 에어커튼 설치 개략도는 Fig. 4, 실제 매현 2터널에 설치된 방연 에어커튼은 Fig. 5와 같다. 에어커튼의 분사노즐 설치높이는 터널 안전 제한높이를 반드시 준수해야 하며 터널 노면 바닥으로부터 최저 4.8 m 이상 높이에 설치되어야 한다. 터널의 구조에 따라 다르지만 에어커튼이 설치되는 상부측(천장측)은 케이블 트레이 및 조명시설이 설치되어 있어 바람막이를 설치하는 것이 곤란하기 때문에 에어커튼은 공기가 상하로 분출되어 연기를 차단할 수 있는 양방향 토출형식으로 설계를 하였다. 에어커튼 상부 노즐로부터 터널 천장까지의 최고높이는 1,522 m이며, 분사 노즐 하단부는 터널 바닥면에서 4.8 m 높이이므로 노즐 선단으로부터는 약 3.3 m 지점에서의 풍속을 기준으로 화재발생시 연기를 막을 수 있는 최저 풍속은 1.5 m/s 이상으로 설정하였다. 이는 화재 연기가 하강할 때 성인의 호흡선을 기준으로 에어커튼의 방어풍속을 정한 것이다. 노르웨이 화재시험연구소(SINTEF NBL)에서는 에어커튼의 화재연기 방어풍속은 밀폐된 공간에서 0.25 m/s⁽⁹⁾ 이상을 기준으로 하였지만 터널의 길이가 비교적 짧은 1 km 미만의 터널을 기준으로 터널 양방향의 역풍을 고려하여 방연 에어커튼의 연기제어 풍속을 6 배 정도로 늘려 안전율을 잡은 것이다.

A, B, C, D, E 까지 각각 형식이 다른 송풍기를 부착한 다섯 가지 에어커튼을 제작하여 시험한 결과 노즐선단 0.1 m에서의 풍속과 터널 바닥에서 1.5m의 호흡선 높이(노즐선단으로부터 3.3 m)에서의 분출풍속, 분사각도에 따른 스트립 라인, 포그머신에 의한 자연풍 방어력 시험에서 모델 E 타입 에어커튼이 가장 우수한 결과를 얻었다. 여기에 사용된 송풍기는 원심형으로 임펠러는 저압형이고 후향 직선깃 7 매를 사용하였으며, 60 m³/min x 600 Pa x 2.2 kW x 3,520 rpm - 6 대(360 m³/min / 1 구간)로 비속도(specific speed)가 1,265 이고 2 차선 1 구간(250 m)을 제연할 수 있는 에어커튼으로 최종 선정 하였다. Fig. 6에서 Fig. 9는 에어커튼 시스템의 구조를 나타낸 것이다.

2.4. 테스트 리그 방연 에어커튼의 토출풍속 시험

실 터널(매현 2 터널)에 설치 될 목적으로 제작된 방연 에어커튼은 크게 두 가지 구조로 나뉜다. 그 첫 째 형상은 Fig. 6-①f 같이 터널 양측의 아치 부분과 접하는 에어커튼은 송풍기 1 대로 상·하 양방향으로 공기가 분출되는 구조(Fig. 7)로 설계하였으며 Fig. 6-②c, ③d 에어커튼과 같이 터널 중앙부에 설치되는 형상은 각각의 송풍기를 사용하여 상부와 하부로 공기가 분출되도록 한 구조이다. (Fig. 8).

Fig. 10은 Fig. 7 모델 에어커튼의 양방향 노즐 거리에 따른 풍속 시험 결과이며, Fig. 11은 에어커튼 노즐 선단 0.1 m와 3.3 m에서 평균 풍속을 측정한 그래프이다. 풍속측정에 사용된 계측기는 검교정 된 열선풍속계(TSI 9665P-USA) TA 프로브형을 사용하였다.

Fig. 12에서 Fig. 15까지는 에어커튼의 포그머신(Z-3000 II)연기확산 방어 및 스트립 라인분포를 시험하는 사진이다.

2.5. 백레이어링(Back layering, 역기류) 저항시험

터널에서 화재가 발생하면 화재에 의하여 생성된 연기가 부력에 의하여 상승하고 터널의 천장을 만나면 터널의 길이 방향으로 전파된다. 피난방향으로 연기가 전파되지 못하도록 피난방향에서 화재방향으로 기류를 불어주게 되는데 이 기류를 이기고 피난방향으로 연기가 전파되는 현상을 백레이어링 현상이라고 한다. 이러한 현상을 차단하기 위하여 실물시험을 하였다. 우선 에어커튼을 설치 제한높이(EL 4.88 m)에서 가동을 한 후 호흡선 높이인 GL + 1.5 m 지점에서 에어커튼에서 분출되는 공기와 만나는 지점으로부터 수평으로 약 2 m 떨어진 위치에서 Z-3000 II 포그 머신을 가동하였으며, 실험결과 Fig. 13 및 Fig. 14와 같이 2.3~2.8 m/s로 분사되는 포그를 완벽하게 방어하였다.

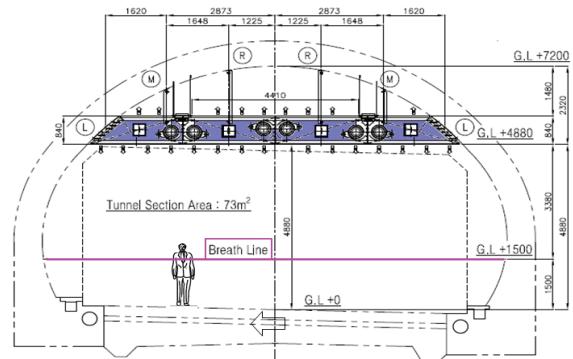


Fig. 4 Installation overview of air curtain system



Fig. 5 Air curtain system in Maihyun No. 2 hiway tunnel

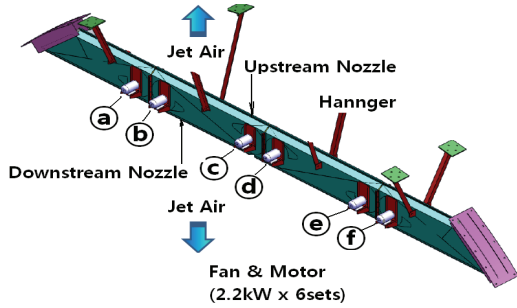


Fig. 6 3D Construction of air curtain system

포그머신은 히터 용량이 3,000 W이고 포그 분출량은 1,133 m³/min (40,000 cfm) 이다. 그러나 포그머신에 의한 백레이어링 저항시험만으로는 최대 저항력을 파악 할 수가 없어 매현 2 터널 방연 에어커튼 모델을 기준으로 수치해석 (21), (23)을 하였다.

Fig. 16 및 Fig. 17은 한국건설기술연구원 화재안전연구센터에서 보유하고 있는 모형터널(2 차선 x 40 m)에서 2.5 MW 화재를 10 분간 발생하여 방연능력을 시험하는 광경으로 에어커튼 노즐에서 상·하로 분출되는 공기벽에 의해 연기가 90% 이상 차단되는 것을 육안으로 확인하였으나 시험용 화원의 연소시간이 10 분간으로 짧아 화원지점과 공기 벽 밖의 차단지점의 CO 가스농도 변화 등은 수치해석(Fig. 28~Fig. 31)⁽²³⁾을 통하여 확인하였다.

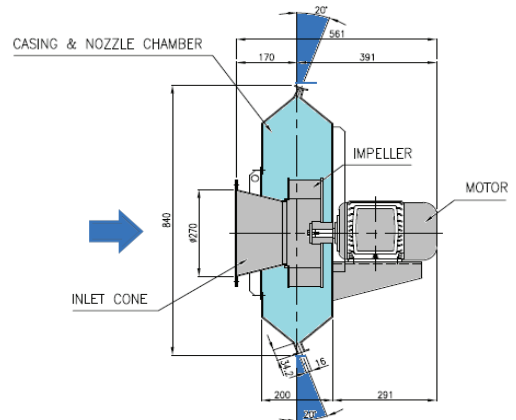


Fig. 9 Sectional view of air curtain

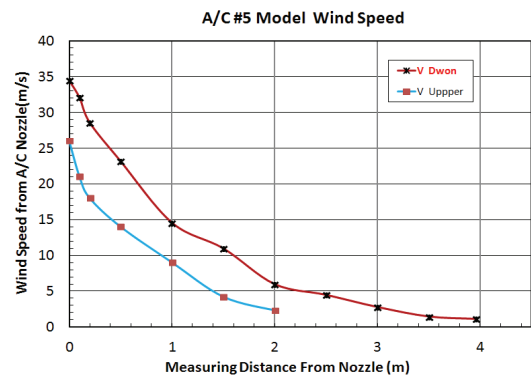


Fig. 10 Up and down nozzle wind speed (Fig. 7 type)

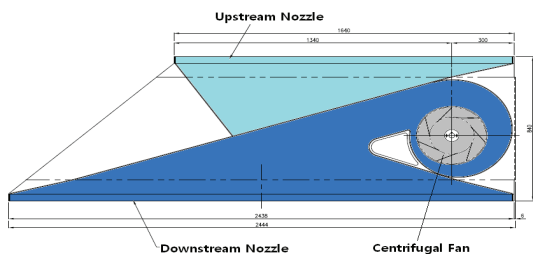


Fig. 7 Up and down 2 way discharge air curtain nozzle

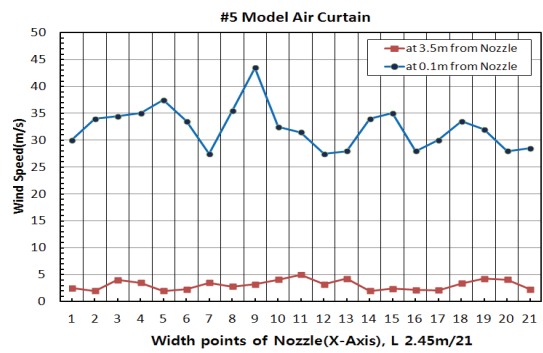


Fig. 11 Nozzle wind speed (Fig. 8 type)

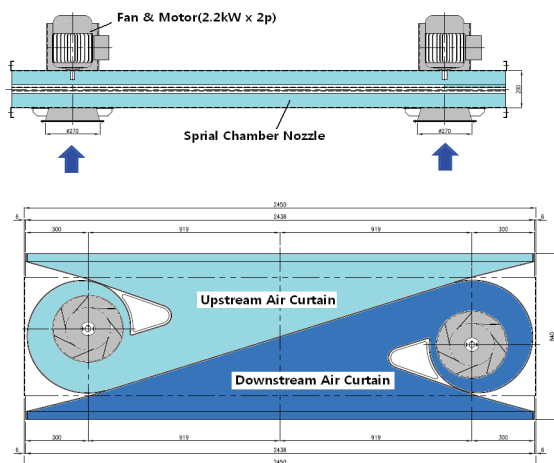


Fig. 8 Upstream and downstream air curtain nozzle



Fig. 12 Air curtain stream line counter

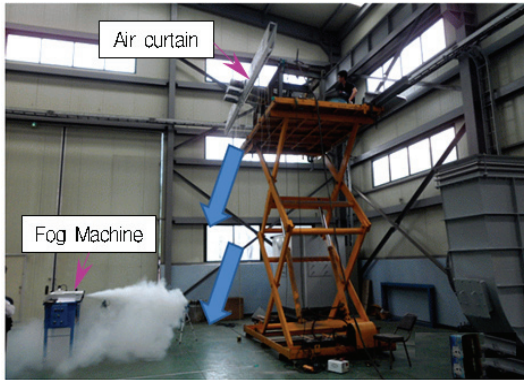


Fig. 13 Air curtain smoke blocking test by fog machine



Fig. 17 Smoke blocking test of 2.5MW live tunnel fire (at KICT Hwasung fire research center)



Fig. 14 Air curtain smoke blocking test by fog machine



Fig. 15 Air curtain down stream air velocity check



Fig. 16 Smoke blocking test case of 2.5MW live tunnel fire (at KICT Hwasung fire research center)

3. 노즐 설계 및 역풍 영향력에 대한 분석

3.1. 전산유체역학(CFD) 수치해석적 방법

A~E 모델 에어커튼을 제작하고 여러 가지 실험을 거쳐 최종 모델(E Type)을 선정하였으나 실제 터널에 설치하여 화재강도에 따른 에어커튼의 화연 방어능력을 재검증하기 위해 실제와 동일한 형상을 모사하여 수치해석을 수행하였다. 에어커튼의 노즐 토출구각도와 토출유속 변화에 따른 유동특성과 터널 외부에서 발생하는 외풍에 의한 에어커튼의 차단성능을 확인하였다. 에어커튼의 노즐을 통해 분출되는 공기는 흡입구와 반대방향으로 일정한 각도(100°~110°)를 가지면서 토출된다. 에어커튼 노즐 토출구가 일정한 각도를 가지고 있는 이유는, 화재발생으로 생성된 터널 내 유독가스의 차단효과를 극대화하기 위해서이다.

본 연구에 사용된 터널은 단면적 73m²의 2차선 고속도로, 직사각 아치(rectangle arched)형으로, 좌우 대칭 형상을 하고 있다. 터널 단면의 최대 폭은 대략 13m, 분사 노즐에서 지면까지의 높이는 대략 4.8m이다. 일반적으로 방연용 에어커튼의 경우 터널길이 250m 당 1대가 설치된다. 해석에 적용된 에어커튼의 간략화 모델을 Fig. 18, Fig. 19에 나타내었다. 수치해석에 사용된 터널 유동장 분석을 위해 노즐 토출구 부분에 격자를 몰아주었다.

작동유체는 비압축성 표준상태의 공기(at 20 °C)를 기준으로 하였다. 또한 길이는 터널내부에서 형성되는 유동패턴에 영향을 미치지 않는 노즐 전·후단의 최소 길이로 30m와 35m를 형상조건으로 결정하였으며, 터널형상의 대칭조건을 고려하여 Fig. 18과 같은 3D 형상으로 모사하여 수치해석을 수행하였다. 3D 터널 격자생성을 위한 격자수는 대략 3,000만 노드(node)이며, 해석시간이 많이 소요된다는 단점이 있어서 Fig. 19와 같이 2D 터널로 형상을 모사하여 설계인자에 대한 영향력을 분석하였다. 그리고 Fig. 20과 같이 3D 터널과 2D 터널의 수치해석 결과 값 비교를 통하여 2D 터널 해석

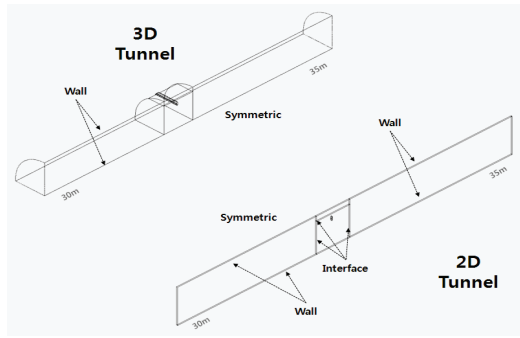


Fig. 18 3-D & 2-D geometry of tunnel

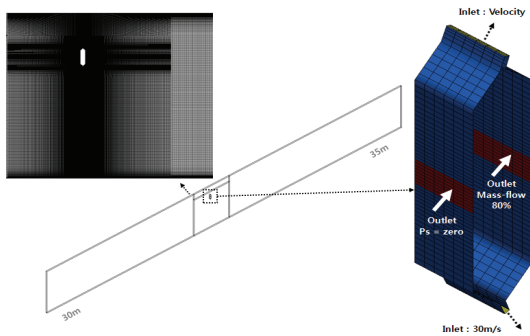


Fig. 19 Detailed mesh & boundary condition of 2-D tunnel

결과의 신뢰성도 검증하였다. 수치해석을 위한 격자계는 원형의 터널 형상을 그대로 모사하기 위해 사면체(tetra) 격자계를 사용하였다. 경계조건을 부여하는데 있어 가장 쟁점이 되었던 부분은 에어커튼의 노즐 토출구와 공기 흡입구이다. 에어커튼의 입장에서 볼 때, 노즐은 에어커튼의 토출구이지만 에어커튼으로부터 공기를 공급받는 해석 영역(터널)의 입장으로 보면 노즐은 특정 속도를 가지고 터널에 공기를 공급하는 입구가 된다. 노즐의 속도는 실험에서 도출된 30 m/s를 적용하였다. 난류모델(turbulence model)은 standard k-ε 모델과 standard k-ω 모델의 장점을 혼합하여, 유동 박리현상을 비교적 정확하게 예측하는 SST k-ω를 사용하였다.

3.2. 에어커튼 노즐형상의 영향력 분석

에어커튼의 적절한 유동폭 확보는 터널 내부의 역풍 및 기류 차단을 위해 필요하다. Fig. 21은 노즐 선단부터 4 m 거리에서의 유동폭의 경향을 정확히 확인하기 위하여 2D와 3D 모사를 하였다. 이는 테스트리그 노즐 풍속시험과도 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 에어커튼의 노즐 각도 변화에 따른 유동장 변화를 분석하고 최적의 각도를 찾기 위해 Fig. 22와 같이 노즐 각도를 정의하였다. 노즐 각도는 수직 방향을 기준으로 10°에서 5°간격으로 30°까지 설정하였고 노즐의 토출구폭은 동일하게 유지하였다. Fig. 23에 노즐 각도 변화에 따른 터널 측면 속도분포 결과를 비교하여 나타내었다. 노즐의 토출 속도가 30 m/s 인 경우에 노즐 각도가 10°에서

30°로 증가함에 따라 지면과 터널의 상부를 향하는 유동방향이 노즐의 각도에 따라 휘어짐을 확인 할 수 있다. 이러한 경향은 노즐의 각도가 증가할수록 속도가 1.5 m/s 이상인 영역의 폭 및 위치가 변화한다. 이러한 변화를 노즐 각도에 따라 정량적으로 비교한 그래프를 Fig. 24에 나타내었다. 유동폭(flow width)은 지면에서 1.5 m 떨어진 곳에서 유속이 1.5 m/s 이상인 유동의 폭을 의미하고 유동폭 중심거리는 노즐 토출구에서 유동폭 중심까지의 거리이다. 두 변수에 대한 변화를 노즐의 각도가 증가함에 따라 유동폭 및 중심거리가 증가하는 경향을 보인다.

3.3. 터널 내 외풍 차단 성능분석

지금까지는 터널의 입구에서 출구로 흐르는 추가적인 유동이 없고 모든 유동이 방연 에어커튼의 노즐에서 토출되어 다시 흡입구로 100% 흡입되는 조건을 대상으로 연구를 진행하였다.

그러나 터널의 경우 자동차의 흐름 및 자연적인 요인으로 인하여 유동이 발생하게 된다. 이것을 외풍이라고 하며 이러한 외풍은 화재와 같은 유사시에 방연을 위한 에어커튼에 악영향을 미치게 된다. 따라서 외풍이 존재하는 조건을 대상으로 에어커튼이 효과적으로 차단을 하는지에 대한 평가가 필요하다.

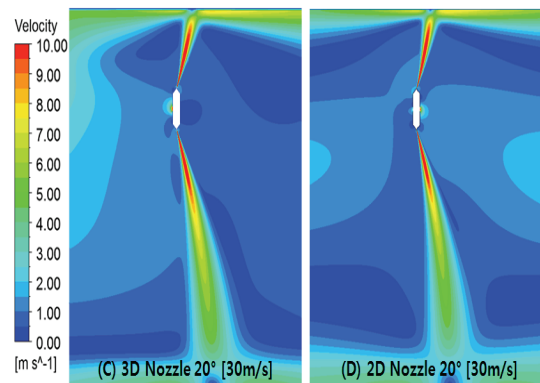


Fig. 20 3-D vs. 2-D tunnel velocity contour (flow pattern)

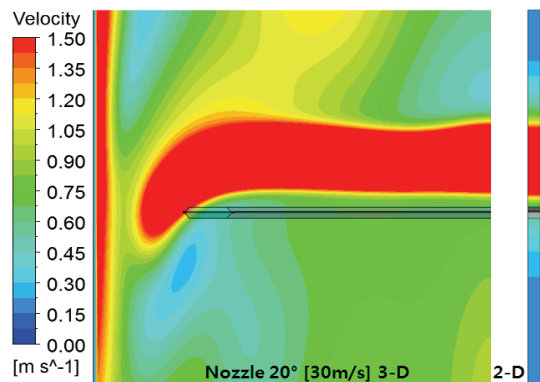


Fig. 21 3-D vs. 2-D tunnel velocity contour (flow width)

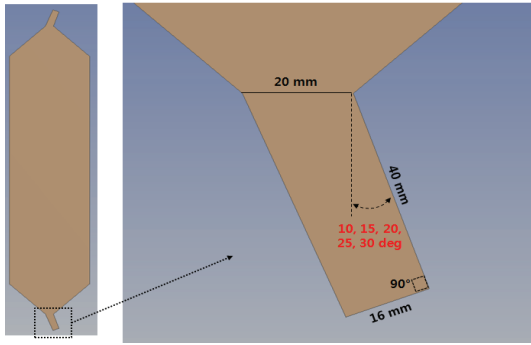


Fig. 22 Geometric parameters of nozzle exit

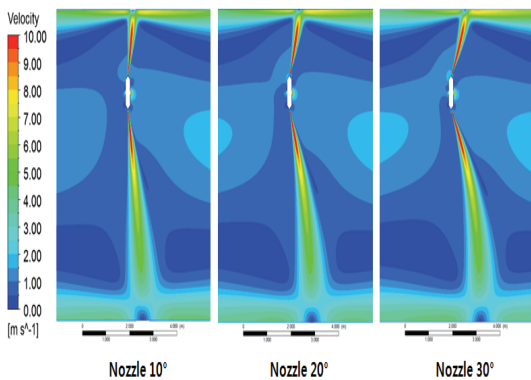


Fig. 23 Comparison of velocity according to nozzle angle

실험적인 방법으로는 에어커튼을 작동시키는 상황에서 송풍기 및 기타 유동을 발생 시킬 수 있는 장비를 활용하여 특정 속도에 해당되는 외풍을 생성하고 이로 인한 에어커튼의 성능을 확인하는 방법이 있다. 그러나 실험적인 접근은 실제 터널에서 평가를 하지 않는 경우에 많은 오차를 수반하기 때문에 본 연구에서는 수치해석을 통해 터널 내부에 외풍이 발생하는 조건을 모사하여 에어커튼의 성능을 확인하였다. 본 연구는 터널 내부에 대한 수치해석을 수행하는 경우 어떻게 정의를 해야 하는지를 확인하기 위해 터널의 토출구를 정압(대기압 조건)으로 고정된 상태에서 입구부를 전압 및 속도로 부여하여 그 차이를 비교하였다. 외풍 차단 효과를 확인하기 위한 외풍의 기준 속도는 2.0 m/s 로 하였다.

외풍에 의한 효과를 확인하기 위해 우선적으로 에어커튼을 작동시키지 않은 상황에서 외풍이 발생하는 조건을 확인해 보았다. Fig. 25의 입구 전압 변화에 따른 비교 결과를 보면 입구 전압이 변화함에 따라 터널내 유동 속도가 변화하는데 전압이 3 Pa 정도가 되는 상황에서 입·토출구의 정압차가 약 0.71 Pa이며 입구 속도가 1.97 m/s로 외풍 기준 속도(2 m/s)와 유사한 값을 보였다.

터널내부 외풍의 생성조건, 즉 정압차(ΔP_s)에 의해 발생하는 터널내 외풍 유속값을 찾기 위해서 Fig. 25에서 얻어진 결과 값들을 최소자승법(least squares method)으로 근사하여 Fig. 26과 같은 그래프를 도출하였다. Fig. 26의 결과를

확인해 보면, 정압차가 0.74 Pa에서 터널내 외풍 2 m/s가 발생할 수 있으며, 이 정압차 조건은 에어커튼의 외풍 차단성능을 확인하는 지표로 사용하였다.

Fig. 27은 에어커튼 작동시 외풍 차단성능을 알아보기 위한 수치해석 결과이다. 이때 에어커튼의 형상 및 작동조건은 노즐 출구각도 20° 및 노즐 상·하단 토출유속은 0.1 m에서 30 m/s 이며, 터널 입·출구는 속도-대기압(정압 0 Pa) 조건으로 설정하여 해석을 수행하였다.

수치해석 결과를 비교해 보면 에어커튼이 작동하고 있는 상태에서 터널 입구유속을 강제로 0.1 m/s로 부여한 경우 정압차가 1.58 Pa로서, 터널 입·출구 압력차에 의해 발생하는 외풍유속 2 m/s에 해당되는 0.74 Pa 보다 큰 값으로 외풍 유속 2 m/s 에 대한 차단효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 27의 수치해석 결과에서 확인할 수 있듯이, 터널 입구유속이 약 0.5 m/s 이상(이때의 유속은 강제로 설정된 수치해석 경계조건임)이 되면 에어커튼 노즐 출구하단의 중앙부분에서 공기벽 형성에 문제가 있는 것을 알 수 있다. Fig. 27의 수치해석 결과를 바탕으로 E 모델 방연 에어커튼의 차단성능을 예측해 보면 Fig. 26에 도시된 것과 같이 에어커튼이 작동하고 있는 상태에서 차단 가능한 외풍 유속은 대략 0.4 m/s 정도이다.

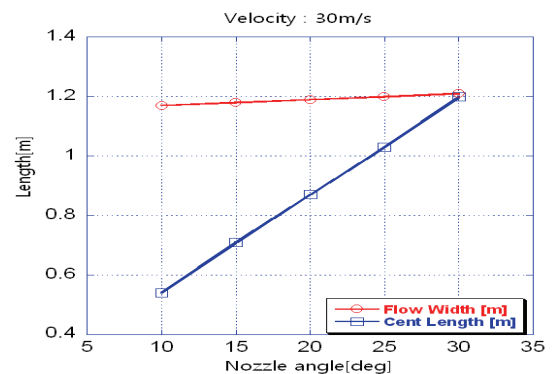


Fig. 24 Flow width according to nozzle angle change

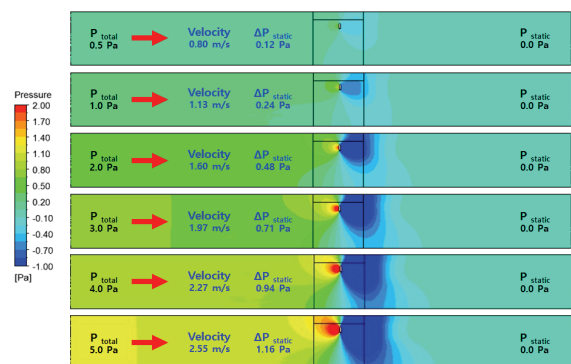


Fig. 25 Generating condition of revers flow (pressure)

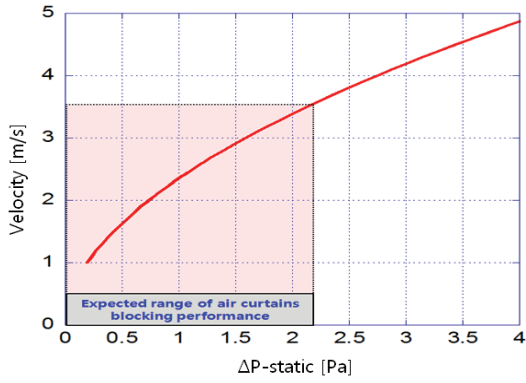


Fig. 26 Expected range of air curtains blocking performance

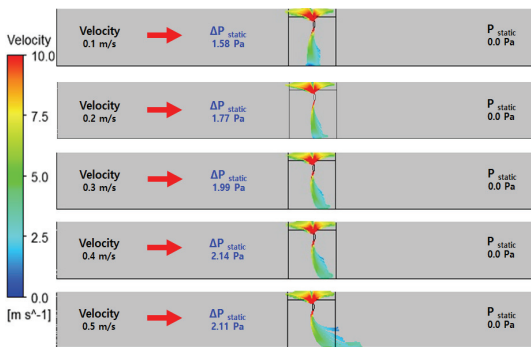


Fig. 27 Comparison of air curtain blocking ability (according to back-layering or reverse flow)

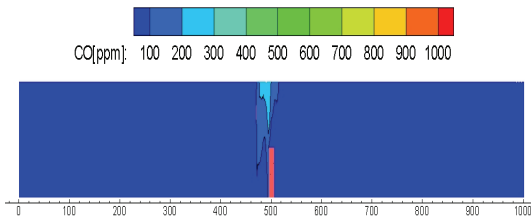


Fig. 28 The 2 MW scale fire, longitudinal section slope 1.779% (Case 1)

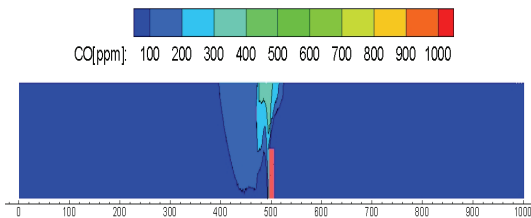


Fig. 29 The 3 MW scale fire, longitudinal section slope 1.779% (Case 1)

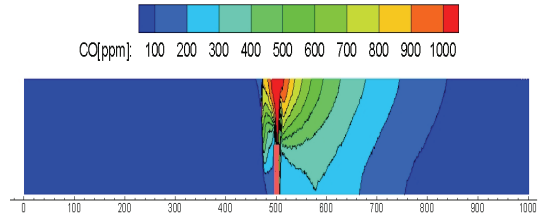


Fig. 30 The 7 MW scale fire, longitudinal section slope 0% (Case 2)

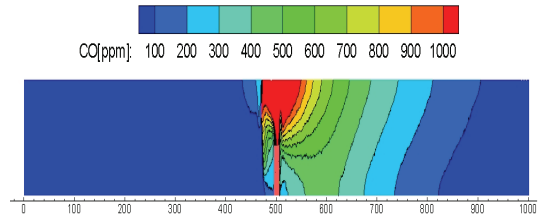


Fig. 31 The 10 MW scale fire, longitudinal section slope 0% (Case 2)

Fig. 27부터 Fig. 31은 에어커튼 1대가 버틸 수 있는 화재 강도별 방연능력을 검토하기 위해 1 km 터널의 중앙에 에어 커튼 1대를 설치하고 에어커튼 30m 전방에서 화재가 발생한 것을 가정하고 매현 2터널의 종단구배가 +1.779% 일 때 (Case 1)와 종단구배가 +0% 일 때(Case 2)를 구분하여 화재강도별로 연기의 확산거동과 CO 농도분포를 분석⁽²³⁾하였고 연기가 에어커튼을 통과하여 터널 입구방향으로 이동하는지를 검토하였다.

Case 1은 매현 2터널의 종단구배인 1.779%를 적용하여 수치해석 한 결과, 화재규모 2.0 MW(Fig. 28)까지는 화재발생 10분 이후까지 연기 확산을 차단할 수 있으며, 화재강도 3 MW(Fig. 29) 이상에서는 화재연기가 에어커튼을 통과하여 터널 입구 방향으로 확산되는 것을 확인하였다.

Case 2의 해석결과 매현 2터널의 종단구배인 1.779%를 적용하여 수치해석한 결과로 화재규모 7.0 MW(Fig. 30)까지는 화재 발생 10분 이후까지 연기 확산을 차단할 수 있으며, 화재강도 10 MW(Fig. 31) 이상에서는 화재연기가 에어커튼을 통과하여 터널 입구 방향으로 확산되는 것을 확인하였다.⁽²³⁾

4. 결 론

본 연구는 양방향 토출 방연에어커튼으로서 최적의 성능으로 평가된 E 모델 (원심형 송풍기를 이용한 스파이럴 노즐형)을 대상으로 풍속 시험과 방연능력 시험, 실화재 방연시험 등을 하였고, 수치해석을 통해 성능을 검증하고 에어커튼의 핵심 요소인 노즐의 각도 및 분출속도 등을 최적화 하였다.

(1) 방연에어커튼 흡입구는 화원 반대방향으로 위치할 때 가연기 재순환에 따른 가시도 확보에 효과가 있음을 확인하였으며, 송풍기는 화재발생시 250 °C에서 60 분 이상 운전이 가능한 구조로 설계하고 원심형 송풍기를 적용하였다.

(2) 터널 설치제한높이(4.8 m 이상) 및 양방향으로 공기가 분사되는 유속을 고려할 때 방연에어커튼의 총 높이는 900 mm 이하로 설계하는 것이 좋을 것으로 판단하였다.

(3) 매현 2터널 중단구배를 적용하여 방연에어커튼의 연기차단 성능에 대하여 전산유체역학(CFD)으로 수치해석결과, 중단구배 0%에서는 7 MW의 화재강도에, 중단구배 1.779%에서는 2 MW의 화재강도에 각각 화재 발생이후 10 분간 연기 차단이 가능한 것을 확인하였다.⁽²³⁾

(4) 백레이어링 및 터널 내 역풍 저항에 대하여 전산유체역학(CFD)으로 수치해석 결과 노즐각도는 20°, 에어커튼의 노즐선단 0.1 m에서 풍속 30 m/s를 기준으로 화원의 반대방향에서의 입구 속도 조건으로 0.5 m/s를 부여한 경우 터널 내 정압차가 대략 2.11 Pa로 예측되었다.

(5) 방연에어커튼 풍속 및 포그머신 실험결과 호흡선 높이 (GL+1.5 m)에서의 방연에어커튼 유속은 1.5 m/s 이상 측정되었으므로 5 MW 정도 규모의 화재발생시 열기류 상승에 따른 1 m/s 정도의 연기이동 속도에 충분히 차단효과를 발휘할 수 있는 것으로 확인하였다.

(6) 매현 2 터널에 설치된 E모델(원심식 후향익 송풍기, 스파이럴 노즐형식) 방연 에어커튼이 가동될 때, 차단이 가능한 터널의 외풍 유속은 대략 0.4 m/s 정도이다. 이는 터널의 평균배 일 때를 기준으로 한 것이며 화재강도 및 터널 경사도에 따른 방어능력의 검증은 향후 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2012년 한국도로공사 “중부내륙선 매현 2 터널 방재시설 (방연에어커튼)보완” 프로젝트 수행에 따른 연구결과이며, (주)삼원이앤비, 한국도로공사, 한국생산기술연구원, 한국건설기술연구원의 관계연구진에게 깊은 감사를 드립니다.

References

(1) 한국도로공사, “보도자료-국내 최초 터널 방연 에어커튼개발,” 2011. 10. 5.
 (2) 한국도로공사, “도로터널 제연용 체트팬 산정기준 개선연

구 최종연구보고서, 부록,” 2012. 12.

(3) Grzegorz Krajewski, Grzegorz Sztarabala, “Air Curtains used for Separating Smoke Free Zones in case of Fire,” 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 Nov. 2011, pp. 2773~2777.
 (4) Grzegorz Krajewski, “Efficiency of Air Curtains used for Separating Smoke Free Zones in case of Fire,” 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013.
 (5) M. Juraeva, K. J. Ryu, S-H Jeong, D. J. Song, 2014 “Numerical optimization study to install air curtain in a subway tunnel by using design of experiment,” C Journal of KSME, Vol. 1, No. 2, pp. 183~190.
 (6) Andrei Dragomirescu, Adrian CIOCĂNEA, 2008, “Modular Ventilation of Urban Road Tunnels using Air Curtains-part I: Concept and Behavior of the Curtains,” U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 70, Iss. 4.
 (7) Alain Drotz, Bob Greiveldinger, “Numerical Flow Simulation of an Air Curtain for Road Tunnel Fire Security,” EPFL Supercomputing Review Jan. 2004.
 (8) 유용오, 박상현, 한상주, 신현준, 2014, “터널 화재시 연기 확산 방지를 위한 국소제연설비의 성능 평가 연구,” 한국방재학회논문집, 제 14권 3호, pp. 171~175.
 (9) Steven Ernst, et al. “Underground Transportation Systems in Europe: Safety, Operations, and Emergency Response,” American Association of State Highway and Transportation Officials National Cooperative Highway Research Program, Report No : FHWA-PL-06-016, June 2006, pp. 23.
 (10) P. L. Hinkley “A Preliminary Note on the Movement of Smoke in an Enclosed Shopping Mall,” BRE Trust (UK), Ministry of Technology and Fire Offices Committee, Fire research Note No. 806. March 1970.
 (11) National Fire Protection Association, “NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways,” 2004, Quincy, MA.
 (12) 김동현, 신민호, 2003, “철도터널에서의 화재방재 최적설계를 위한 시험기술 동향,” 한국철도기술연구원 웹진 테마기획.
 (13) Quintiere, J. “Analytic Methods for Firesafety Design,” Fire Technology, 1988, Vol. 24, pp. 333~352.
 (14) Miloš Banjac, Barbara Nikolić. 2008, “Numerical Study of Smoke Flow Control in Tunnel Fires Using Ventilation Systems,” FME Transactions, Vol. 36, No. 4, pp. 145~150.
 (15) K. Brahim, B. Mourad, E. C. Afif and B. Ali, 2013, “Control of Smoke Flow in a Tunnel,” Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1, pp. 49~60.
 (16) D. Tentzer, R. Pollak and M. sippel, 1999. “Critical Velocity-Comparative assesment of test results and

- CFD simulation,” International Conference on Tunnel fire and Escape from Tunnels, pp. 181~190.
- (17) Wu, Y., 2010, “The Critical Velocity and the Fire Development,” Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, pp. 407~417.
- (18) S. C. Kot, Raymond M. H. Yau and Dennis C. W. Tang, 1999, “Design and Operation of Tunnel Ventilation System under Fire Scenario,” International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 1, No. 3, pp. 168~177.
- (19) 윤창훈, 윤성욱, 유용호, 김진, 2006, “장대 교통터널 화재시 입계속도 결정에 관한 실험적 연구,” 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제16권 제 1호, pp. 85~94.
- (20) 양상호, 김경엽, 최영석, 김남구, 2012, “터널 화재발생시 연기 확산 지연을 위한 에어커튼 시스템에 대한 연구,” 유체기계공업학회 유체기계 연구개발발표회.
- (21) 정육희, 최영석, 이경용, 양상호, 김경엽, 2013, “CFD를 활용한 터널용 방연 에어커튼 노즐설계,” 대한기계학회춘추학술대회.
- (22) 김정엽, 양상호, “제트팬에 의해 형성되는 터널 내 유동의 실험 및 수치적 해석연구,” 2010, 유체기계공업학회, 유체기계저널 제13권 제3호, pp. 59~64
- (23) 한국도로공사 “중부내륙선 매현2터널 방재시설 보완 제조·구매(설치포함) 보고서 및 계산서(기계),” 2012. 03, pp. 1~47.