

제트팬의 이격거리에 따른 터널내 환기특성에 관한 수치적 연구

김정엽*

Effects of the Distance between Jet Fans on the Ventilation Performance in a Road Tunnel

Jung Yup Kim*

Key Words : Tunnel flow(터널유동), Jet fan(제트팬), Ventilation(환기), Numerical analysis(수치해석), Road Tunnel(도로터널)

ABSTRACT

The jet fan is generally used to add thrust in the longitudinal ventilation system of road tunnel and the geometric conditions of jet fan such as the distance from tunnel wall have an effect on the performance of ventilation system. Numerical analyses on the flow in tunnel caused by operation of jet fan are presented to study the ventilation characteristics in tunnel. While the distance between jet fans in parallel installed in tunnel is changed 0.5 L/D to 3.0 L/D, the flowrate and mean velocity through tunnel are calculated for each cases. As the distance between jet fans increases, the flowrate through tunnel increases asymptotically and the momentum of tunnel flow is alike.

1. 서론

교통량의 급격한 증가에 대응하기 위하여 신규 도로의 건설과 기존 도로의 직선화 공사가 진행됨에 따라 도로터널이 지속적으로 증가하고 있다. 국내에서는 2007년 현재 총 터널 수가 1,000여 개소를 넘어서고 있으며, 연장이 750여 km에 달하고 있다. 이는 1997년 대비 40% 이상의 연평균 증가율을 보여주는 수치이다. 도로터널이 급증하면서 안전하고 쾌적한 터널환경의 조성에 대한 사회적 요구가 증가하고 있다. 특히 연장이 1,000 m가 넘는 장대터널의 경우는 화재에 취약하고 환기가 용이하지 않아서 이에 대한 대책이 요구된다.

국내에서는 90년대부터 도로터널의 환기 및 화재안전에 대한 연구가 진행되었으며, (1)~(3) 이러한 연구결과와 관련 전문가 그룹의 노력으로 국내 도로터널에 대한 환기 및 제연시스템의 설계기술이 확립되어 활용되고 있다. 그러나 국내에서 적용되는 설계기술 중 상당부분이 선진외국에서 도입되었고, 관련된 주요 변수값들에 대한 기초연구가 미약한 상태로 현장에서 이용되고 있기 때문에 국내의 독자적인 기술발전에 걸림돌로 작용하고 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

한편 고속국도에 설치된 터널과 같이 차량의 교통 환기력이 크고 일방향 구조의 터널에서는 주요 환기설비로 제트팬을 사용하는 종류식 터널 환기시스템이 많이 사용된다. 제트팬에 의한 종류식 터널 환기시스템은 Fig. 1에서와 같이 터널 종방향에 작용하는 교통 환기력 및 자연 환기력을 보충하도록 제트팬 분류 효과에 의한 압력상승을 발생시켜 소요 환기량을 확보하게 하는 방식이다. 제트팬에 의한 종류식 터널 환기시스템에서의 압력평형식은 식 (1)와 같다. (4) 현재 국내에서 수행하는 터널 환기시스템의 설계는 이러한 압력평형식을 바탕으로 하고 있으며, 터널특성, 제트팬 사양 및 차량속도 등 주요 설계인자를 기반으로 환기량을 충족시킬 수 있도록 시스템을 구축하고 있다.

$$\Delta P_r + \Delta P_{MTM} = \Delta P_i + \Delta P_j \quad (1)$$

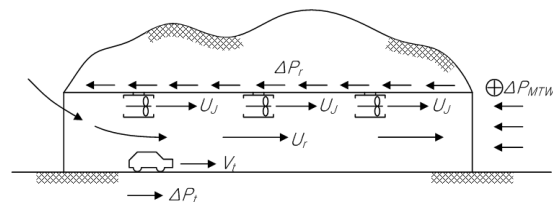


Fig. 1 Schematic diagram of pressure force in road tunnel

* 한국건설기술연구원 화재안전연구실
E-mail : jykim1@kict.re.kr

여기서 ΔP_r 은 통기 저항, ΔP_{MTM} 은 자연풍 저항, ΔP_t 은 교통 환기력, ΔP_j 은 제트팬 승압력을 각각 나타낸다.

터널내 설치되는 제트팬은 제트류를 분출시켜 터널내 유동에 승압력을 생성시키는 역할을 수행하며 환기시스템의 설계시 주요한 부분이 제트팬의 설치 대수와 설치 방법을 결정하는 것이다. 제트팬에 의해 생성되는 기류는 터널내 평균 풍속에 비해 속도가 매우 높기 때문에 터널벽면과의 마찰 등에 의한 압력손실이 발생하고 이는 승압효과가 달라지는 원인이 된다. 즉, 동일한 사양의 제트팬이라도 터널에 설치되는 방법에 따라 승압효과가 달라지기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다.

N. Costeris⁽⁵⁾는 종류식 터널 환기시스템에서 제트팬을 포함하는 송풍설비의 승압력을 정량적으로 나타내는 방안을 제시하였으며, 일반적인 터널구조에서 송풍설비의 효율과 관련된 다양한 설계변수와 측정방법에 대해 검토하였다. F. Wang et al.⁽⁶⁾은 곡선형태의 터널에서 제트팬의 설치조건에 따른 터널내 유동특성을 파악하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 제트팬은 원기둥 형태의 격자를 사용하여 모델링하였으며, 제트류를 형성하기 위하여 팬 출구면에 일정한 유출속도를 경계조건으로 설정하였다. 해석결과로서 터널벽면과 제트팬의 간격 및 제트팬간의 간격에 따른 제트팬의 승압효과를 분석하였으며 최적의 설계를 위한 자료를 제공하고 있다. A. D. Martegani et al.⁽⁷⁾은 제트팬의 풍량과 터널천장에서의 거리에 따른 터널의 환기특성을 분석하기 위해서 개방형 풍동시설을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 제트팬을 모사하기 위하여 터널내 공기의 유입과 유출 기능을 가진 노즐을 활용하였는데, 특히 제트팬 분출류의 회전효과를 반영하기 위하여 노즐 후단부에 블레이드(Blade)를 포함하는 가이드베인(Guide vane)을 부착하였다. 논문에서는 제트팬 분출류의 회전효과가 터널내 유동과 분출류간 혼합을 촉진시키고 이는 승압력의 감소로 이어지는 실험결과를 제시하였다. T. Saika et al.⁽⁸⁾은 실제 산간의 도로터널에서 제트팬의 승압력을 측정하고 승압력의 산출식을 검토한 연구를 수행하였다. 일본에 위치한 연장 1,960 m의 Akarusan Tunnel에서 터널내 풍속을 변경시켜 가면서 4가지 모델의 제트팬을 가동하고 이 때 형성되는 터널내 압력을 측정하였다. 논문에서는 제트팬의 출구속도에 근거한 승압력 산출식보다는 추력(Thrust)을 이용하는 산출식이 실험결과에 근접하다는 결론을 제시하였다.

한편 전산유체역학의 해석기술이 발전함에 따라 터널구조, 차량속도, 제트팬 설치조건 등의 여러 가지 변수가 포함되는 도로터널에 대하여 제트팬에 의한 분출기류와 터널 환기특성의 통합적 검토가 전산유체역학 해석기술에 의해 효율적으로 수행될 수 있다. 특히 제트팬 등의 송풍설비에 의해 생성되는 유동장을 실제 현상과 매우 흡사하게 해석할 수 있는 전산유체역학 해석기법들이 개발되어 사용되고 있다.^{(9)~(10)}

이러한 해석기술이 도로터널내 환기유동에 적용되었을 경우의 정확성에 대한 평가도 수행되고 있다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용하여 터널내에 설치된 제트팬의 가동에 의해 생성되는 유동장을 해석하였다. 종류식 터널 환기시스템의 설계에 필요한 제트팬의 승압력과 관련된 자료를 도출하기 위하여 병렬로 설치된 제트팬의 이격거리에 따른 환기특성을 분석하였다.

2. 연구방법

국내의 도로터널에서는 터널연장과 제트팬의 설치대수를 고려하여서 Fig. 2와 같이 일반적으로 제트팬을 한 단면에 병렬로 2대씩 설치하고 있다. 이 경우 2대의 제트팬에서 분출되는 제트류간의 간섭에 의해서 승압효과가 영향을 받게 된다. 이러한 영향은 Fig. 3에서와 같은 제트팬간 이격거리(L)에 따라 달라지게되므로 이에 대한 설계자료가 요구되며, 본 연구에서는 이러한 이격거리에 따른 터널내 유동특성을 검토하였다.

한국건설기술연구원 화성분원에는 Fig. 4와 같은 실험용 도로터널이 설치되어 있다. 실험용 터널은 2차선 도로터널의 실규모 단면을 가지며 터널길이 40 m, 터널높이 8.92 m 및 터널폭 10.6 m의 제원을 가진다. Fig. 5는 실험용 터널안에 구비된 제트팬의 모습을 보여주고 있다. 실험용 제트팬의 내경(D)은 1,250 mm이고 토출풍속 30 m/s로서 전형적인 도로터널용 제트팬이다. 제트팬의 블레이드 개수는 6개이며, 허브지름은 425 mm이다. 제트팬의 모터는 전원 3상 380 V, 동력 37 kW 및 절연등급 H종의 사양을 가진다. 또한 인버터



Fig. 2 Jet fans in parallel installed in road tunnel

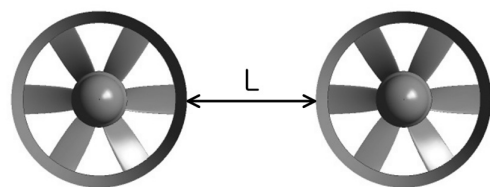


Fig. 3 Distance between jet fans in parallel

를 구비하여 임펠러의 회전수가 가변될 수 있다. 그림에서와 같이 제트팬은 구조물 위에 장착되어서 실험조건에 따른 이동이 용이하도록 하였다.

본 연구에서는 앞에서 제시한 실험용 터널과 제트팬을 모델로 하여 도로터널에서의 제트팬 설치조건에 따른 터널 유동장의 수치해석을 수행하였다. 향후 수치해석적 고찰을 바탕으로 실규모의 실험이 수행될 수 있을 것이다.

Fig. 6에 해석 모델로 사용된 실험용 터널과 제트팬의 단



Fig. 4 Photograph of experimental tunnel



Fig. 5 Photograph of jet fan

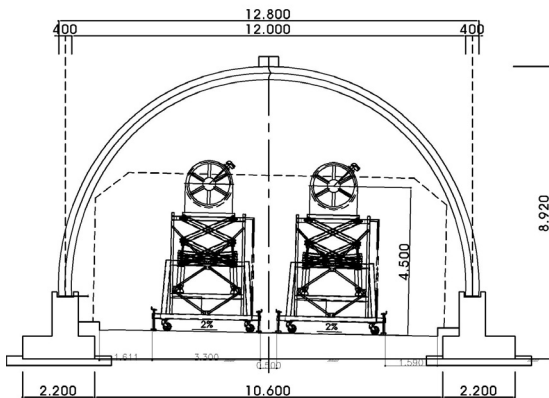


Fig. 6 Sectional view for installation of jet fan

면도를 도시하였으며 그림에서와 같이 제트팬 중심이 지면에서 4.5 m 위치에 있도록 구조물의 높이를 조정하였다.

수치해석에서는 Table 1과 같이 병렬로 설치된 제트팬사이의 이격거리를 변화시켜가며 터널내 유동장 특성을 검토하였다. 이 때 검토조건인 이격거리는 제트팬의 내경(D)으로 무차원화 하였으며, 제트팬의 운전조건은 60 Hz시 1,780 RPM으로 동일하게 설정하였다.

수치해석은 ANSYS CFX 11.0⁽¹²⁾을 사용하였다. ANSYS CFX 11.0은 유동지배방정식을 유한체적법으로 이산화하며, TurboMachinery의 해석을 위해 전처리, solver 및 후처리에서 전용의 모듈을 제공하고 있다. 본 연구의 대상 유동장은 3차원 비압축성 정상유동으로 가정하였으며, 지배방정식으로 연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 설정하였다. 대류항과 확산항은 각각 수정된 상류차분법과 중심차분법을 적용하였으며, 난류모델로는 SST(Shear Stress Transportation)을 사용하였다. 제트팬의 임펠러 주위 유동장에는 회전 좌표계를 적용하였으며, 회전좌표계 적용 영역과 고정좌표계 적용 영역간의 접합면에는 인터페이스를 설정하여 유동정보가 교환되도록 하였다. 터널 영역과 제트팬 영역의 격자계를 따로 작성한 후 결합하는 방식으로 전체 유동장의 격자계를 구성하였다. 격자계는 육면체 형태의 격자로서 제트팬 영역에는 478,816개, 터널 영역에는 863,478개의 격자가 사용되었다. 터널의 입구와 출구에 대한 경계조건은 구배가 영인 Opening 조건이 적용되었다.

Fig. 7은 병렬로 설치된 2대의 제트팬을 포함하는 실험용 터널의 수치해석 모델을 보여주고 있고, Fig. 8은 케이싱을

Table 1 Test condition of the distance

CASE	Distance between jet fans (Dimensionless, L/D)
CASE1	0.5
CASE2	1.0
CASE3	1.5
CASE4	2.0
CASE5	2.5
CASE6	3.0

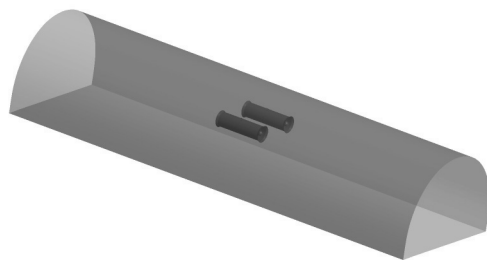


Fig. 7 Numerical model of tunnel and jet fan

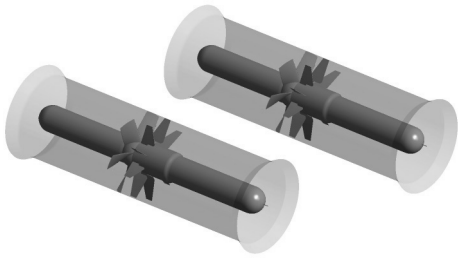


Fig. 8 3D-diagrammatic representation of jet fan with casing

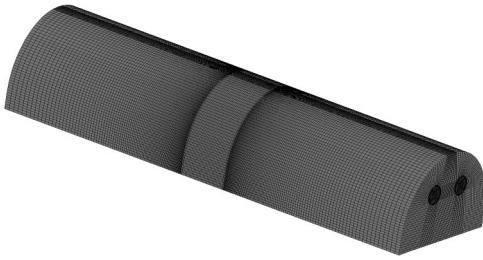


Fig. 9 Grid system for numerical analysis

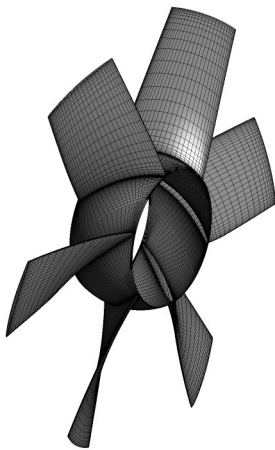


Fig. 10 3D-diagrammatic representation and grid system of rotor

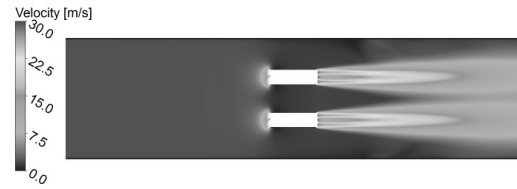
포함하는 병렬로 설치된 제트팬의 개요도를 보여주고 있다. Fig. 9은 대상 터널에 대하여 격자계를 생성한 결과를 도시하였으며, Fig. 10은 rotor의 형상과 주위 격자계를 도시하고 있다.

3. 결과 및 검토

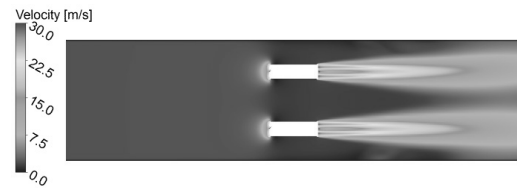
Fig. 11은 제트팬의 중심축을 포함하는 터널내 단면에서의 속도분포를 보여주고 있다. 그림에서 속도분포가 표시되지 않은 영역은 제트팬을 의미한다. Fig 11의 (a)에서 (c)는 각각 제트팬 이격거리가 1.0 L/D, 2.0 L/D, 3.0 L/D에 대한 수치해석 결과이다. 그림에서와 같이 제트팬의 운전으로 인하여 터널입구에서 제트팬으로 유사한 속도의 기류가 형성



(a) For case of 1.0 L/D

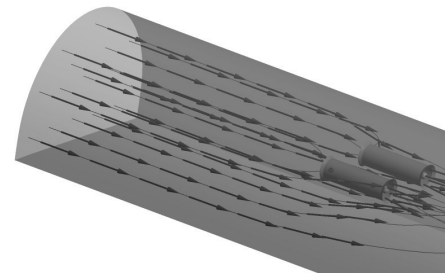


(b) For case of 2.0 L/D

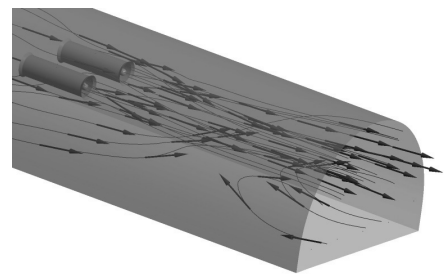


(c) For case of 3.0 L/D

Fig. 11 Velocity contours on the plan of tunnel



(a) Region before jet fan



(b) Region after jet fan

Fig. 12 Streamlines in tunnel

되다가 제트팬 입구에서 빠른 속도로 제트팬으로 유입되는 유동이 형성된다. 제트팬에서 가속된 기류는 제트팬 출구에서 30 m/s에 달하는 속도로 분출되고 이어서 확산되면서 터널 후단부를 통과한다. 제트팬에서 분출되는 기류는 케이싱 부근에서 최고속도가 형성되는 반면 허브가 있는 중심부에서는 상대적으로 낮은 속도가 형성된다. 또한 병렬로 설치된

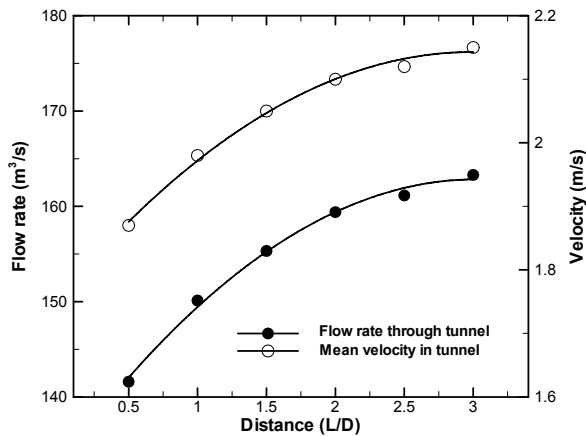


Fig. 13 Variations of flowrate and mean velocity with the distance between jet fans

2대의 제트팬에서 분출된 각각의 제트류는 확산되면서 서로 간섭을 주는 것을 확인할 수 있으며, 제트팬간 이격거리가 클수록 영향이 적어진다.

Fig. 12는 터널내 기류의 유선분포를 보여주고 있다. Fig. 12의 (a)는 터널입구에서 2개의 제트팬 입구 부근에 걸친 지역에서의 유선을 보여주고 있는데, 그림에서와 같이 터널입구에서 유입되는 공기 중 상당수가 제트팬으로 흡입되고 있으며 일부는 터널 측면이나 하부를 통해 제트팬 주위를 지나 터널 출구쪽으로 흐르고 있다. Fig. 12의 (b)는 제트팬 출구 부근에서 터널 출구까지의 지역에서의 유선분포를 도시하고 있다. 제트팬에서 분출된 제트류가 터널내에 형성되고 있으며, 터널 하부와 측면지역으로 제트팬 주위를 통과한 기류가 제트팬에서 분출된 제트류에 유인되는 것을 볼 수 있다. 한편 제트기류가 형성되는 터널 상부지역에 비해서 터널출구의 하단부에서는 외부의 공기가 터널로 유입되어 상부지역으로 회전한 후 제트류와 함께 터널을 빠져 나간다.

Fig. 13은 제트팬의 이격거리에 따라서 터널내 형성되는 기류의 환기풍량과 평균속도를 보여주고 있다. 제트팬의 이격거리가 넓어질수록 터널내 형성되는 환기풍량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 제트팬의 이격거리가 좁을수록 2대의 제트팬에서 분출되는 제트류 사이의 간섭에 의한 마찰손실이 커지기 때문이다. 즉, 제트류의 마찰손실로 인해 제트팬의 운전으로 발생하는 추력이 감소하는 것이며 이는 터널내 환기풍량의 감소로 이어진다. 한편 환기풍량의 증가추이는 이격거리에 대해 점근적인 특성을 가진다. 즉 이격거리가 증가할수록 이격거리 증가에 따른 풍량의 증가폭이 점차 감소한다.

Fig. 14는 제트팬에 의해 발생하는 추력을 정량적으로 도출하기 위하여 터널 종방향으로 제트팬 후단부의 한 단면(A plane)에서 산출한 종방향 속도의 운동량에 대한 적분값(M)을 보여주고 있다. 종방향 속도의 운동량 적분값은 다음과

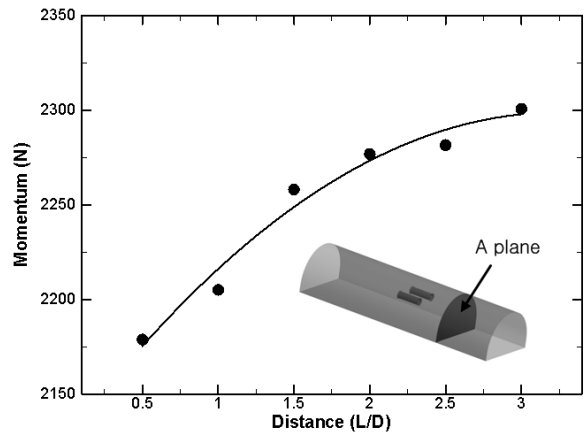


Fig. 14 Variations of momentum with the distance between jet fans

같이 구할 수 있다.

$$M = \int_{A_{plane}} \rho U^2 dA \quad (2)$$

여기서 U는 터널의 종방향 속도를 나타낸다.

Fig. 14에서와 같이 제트팬의 이격거리가 넓어짐에 따라 터널내 유동의 운동량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 연구결과는 터널 환기시스템의 설계과정에서 터널유동에 가해지는 제트팬의 추력에 대한 자료로 사용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용하여 터널내에 설치된 제트팬의 가동에 의해 생성되는 유동장을 해석하였다. 병렬로 2대가 설치되는 제트팬의 이격거리에 따른 터널의 환기특성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 병렬로 설치된 2대의 제트팬에서 분출된 각각의 제트류는 확산되면서 서로 간섭을 주는 것을 확인할 수 있으며, 제트팬간 이격거리가 클수록 영향이 적어진다.
- 2) 제트팬 출구이후의 터널 후단부에서는 제트팬에서 분출된 제트류가 터널내에 형성되며, 제트팬 주위를 터널 하부와 측면지역으로 통과한 기류 중 일부가 제트팬에서 분출된 제트류에 유인되어 터널 중심부로 흐른다.
- 3) 제트팬의 이격거리가 넓어질수록 터널내 형성되는 환기풍량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 제트팬의 이격거리가 좁을수록 2대의 제트팬에서 분출되는 제트류 사이의 간섭에 의한 마찰손실이 커지기 때문이다.
- 4) 환기풍량의 증가추이는 이격거리에 대해 점근적인 특성을 가진다. 즉 이격거리가 증가할수록 이격거리 증가에 따른 풍량의 증가폭이 점차 감소한다.

5) 터널유동에 가해지는 제트팬의 추력을 정량적으로 검토하기 위해서 종방향 속도의 운동량을 산출하였으며, 제트팬의 이격거리가 넓어짐에 따라 터널내 유동의 운동량이 증가하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “(11주요) 성능기반 화재안전 선진화 연구” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 유지오, 이동호, 신현준, 1999, “도로터널 환기시스템 설계 프로그램 개발,” 한국산업안전학회지, 제14권, 제4호, pp. 60~70.
- (2) 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, 2004, “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구,” 터널기술, 제6권, 제2호, pp. 129~139.
- (3) 우경범, 김원갑, 한화택, 2002, “화재시 터널내 열유동 시뮬레이션 모델 연구,” 설비공학논문집, 제14권, 제7호, pp. 584~591.
- (4) 한국도로공사, 2002, 고속도로터널 환기시설 설계기준.
- (5) N. Costeris, 1991, “Impulse Fans,” 7th International

- Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Brighton, UK, pp. 827~846.
- (6) F. Wang, M. Wang, S. He, J. Zhang, Y. Deng, 2010, “Computational study of effects of jet fans on the ventilation of a highway curved tunnel,” Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.25, pp.382~390.
- (7) A. D. Martegani, G. Pavesi, C. Barbetta, 1994, “An Experimental study on the longitudinal ventilation system,” 8th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool, UK, pp. 3~15.
- (8) T. Saika, K. Nakajima, S. Setoyama, S. Haraguchi, M. Miyake, T. Kanoh, 2000, “Jet fan thrust performance evaluation installed in road tunnels,” 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, USA, pp. 1079~1088.
- (9) 이기상, 김광용, 최재호, 2008, “익형의 형상최적화를 통한 고효율 축류송풍기 설계,” 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 46~54.
- (10) 장춘만, 최승만, 김광용, 2006, “허브 캡 형상에 따른 축류 송풍기 성능특성,” 유체기계저널, 제9권, 제6호, pp. 9~16.
- (11) 김정엽, 양상호, 2010, “제트팬에 의해 형성되는 터널내 유동의 실험 및 수치적 해석,” 유체기계저널, 제13권, 제3호, pp. 59~64.
- (12) ANSYS, Inc., 2006, ANSYS CFX Introduction.