

## 제트팬에 의해 형성되는 터널내 유동의 실험 및 수치적 해석

김정엽\*†, 양상호\*\*

### Numerical and Experimental Analysis of Tunnel Flow Induced by Jet Fan

Jung Yup Kim\*†, Sang Ho Yang\*\*

Key Words : Tunnel flow(터널유동), Jet fan(제트팬), Ventilation(환기), Numerical analysis(수치해석), Real-scale experiment(실규모 실험)

#### ABSTRACT

To analyze the three-dimensional flow in tunnel caused by operation of jet fan, both experimental and computational studies have been conducted. The experimental analysis of tunnel flow induced by jet fan is conducted on a real-scale apparatus with jet fan and tunnel, and air velocity at the monitoring points is measured for variation of fan's RPM. The three-dimensional numerical analysis including tunnel and jet fan is carried out for the same geometric configuration as the experimental analysis. The experimental and computational results are compared to examine the applicability of the numerical method.

#### 1. 서 론

산업발전에 따라 급격히 증가하는 교통량의 처리와 사회간접자본의 확충을 위하여 도로의 신규건설과 기존도로의 개선공사가 활발하게 진행되고, 도로선형 직선화를 통한 교통효율향상의 필요성과 터널굴착기술의 발전 등으로 도로터널이 지속적으로 증가하고 있다. 그 결과 2007년 12월 현재 총 터널수가 1,064 개소, 연장이 754 km로 조사되어 1997년 대비 터널수 880 개소, 연장 604 km가 증가하였고 연평균 터널수는 47.8 %, 연장은 40.3 %의 증가세를 보이고 있다. 이와 같은 국내 도로터널의 양적인 증가와 함께 터널의 안전성 확보와 쾌적한 이용환경에 대한 요구가 점차 증가되고 있다. 그러나 터널은 반밀폐적 공간으로 화재발생시 안전확보에 취약하고 환기가 용이하지 않기 때문에 이용객의 안전과 편의의 도모에 취약한 시설로 평가되고 있어서 도로터널의 환경개선을 위한 기술개발이 요청되고 있다.

국내에서는 90년대부터 도로터널의 환기 및 화재안전에 대한 연구가 진행되었으며<sup>(1)~(3)</sup> 이러한 연구결과와 관련 전문가 그룹의 노력으로 국내 도로터널에 대한 환기 및 제연시스템의 설계기술이 확립되어 활용되고 있다. 그러나 국내에서 적용되는 설계기술 중 상당부분이 선진외국에서 도입되

었고, 관련된 주요 변수값들에 대한 기초연구가 미약한 상태로 현장에서 이용되고 있기 때문에 국내의 독자적인 기술발전에 걸림돌로 작용하고 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

도로터널의 환기 및 제연시스템은 터널내 기류를 효과적으로 제어하는데 그 목적이 있다. 따라서 터널 환기 및 제연시스템이 소기의 성능을 발휘하기 위해서는 도로터널내 열유동현상에 대한 해석과 대처가 잘 이루어져야 한다. 도로터널내 열유동장의 형성은 여러 가지 요인에 영향을 받는다. 즉 차량의 이동에 의한 피스톤 효과, 환기설비의 환기력, 자연풍 영향, 화재시 부력 등에 따라 도로터널내 기류가 형성된다.

본 논문에서는 상기의 요소중에서 터널내 제트팬의 가동에 의해 생성되는 유동장에 대한 실험 및 수치적 연구방법과 해석결과를 제시하고자 한다. 고속국도에서와 같이 차량의 피스톤 효과가 크고 일방향 구조의 터널에서는 종류식 터널 환기시스템<sup>(4)</sup>이 주로 사용되며, 이러한 종류식 환기시스템에서는 터널내 압력손실을 보충하여 환기량을 확보하는 수단으로 제트팬을 일반적으로 사용된다. 제트팬에 의한 환기류는 도로터널내 기류생성의 주요인자이며, 화재시 연기의 거동에 직접적인 영향을 준다. 따라서 터널과 차량의 특성, 환기량 및 제연풍속 등의 설계사항에 따라 제트팬의 용량과 설치방안 등을 타당하게 제시하는 것이 필요하다.

현재의 설계기법에서는 제트팬에 의한 승압력을 산정하기 위해서 제트팬의 토출속도를 주요인자로 사용하는 1차원 운동량방정식이 주로 적용되고 있으며, 터널풍속과 제트팬의

\* 한국건설기술연구원 화재안전연구소

\*\* (주)삼원이엔비 기술연구소

† 교신저자, E-mail : jykim1@kict.re.kr

이격거리 등의 영향을 반영하기 위하여 실험계수를 사용하고 있다.

현재의 1차원적인 접근방법은 터널내 생성기류에 의한 전체 마찰손실과 이를 극복하기 위한 제트팬의 송압력 및 댓수를 산정하는 방식으로서 단면에서의 평균풍속과 평균압력에 대한 해석결과만을 얻을 수 있어서 최적설계와 신제품개발의 과정에서 경우에 따라 요구되는 정밀하고 정확한 설계가 어렵고, 새로운 개념의 환기 및 제연시스템에 대한 독자적인 기술을 확보하는 데에는 충분한 데이터를 확보하기 곤란한 측면이 있다.

선진외국에서는 도로터널의 환기 및 제연시스템에 대한 설계시 주요 인자의 영향을 동시에 고려하고 있는 추세이다. 즉 제트팬의 송압계수나 설치간격 산정시 터널내 풍속을 변수로 설정하고 있으며, 제연시스템 가동시 초기풍속과 풍향을 반영하고 있다. 이와같은 설계를 위해서는 환기설비나 터널풍속 등에 대해서 각각의 영향을 고찰하는 것보다 통합적으로 접근할 수 있는 연구기법이 필요하다. 한편 3차원 유동 수치해석기법이 발전함에 따라 제트팬의 운영, 터널의 형상, 통과차량 조건 등의 다양한 해석조건이 존재하는 도로터널에서의 제트팬에 의한 유동 분석과 통합적 검토가 3차원 수치적 해석방법에 의해 효과적으로 수행될 수 있으며, 제트팬 등의 송풍기에 의해 생성되는 분류유동을 해석할 수 있는 전산유체기법들이 개발되어 활용되고 있다.<sup>(5)-(6)</sup> 이러한 3차원 수치해석기법을 도로터널내 기류분석에 활용하기 위해서는 수치해석의 정확성에 대한 평가가 우선 수행되어야 하며, 동일한 조건에 대한 실험과 수치해석 결과의 비교 및 검토과정이 평가방안으로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 터널내에 설치된 제트팬에 의해 생성되는 유동장을 분석하기 위하여 실규모 실험과 3차원 수치해석을 수행하였다. 실규모 단면의 실험용 터널에 설치된 제트팬의 가동으로 형성되는 기류속도를 측정하였으며 실험과 동일한 조건에 대하여 3차원 비압축성 수치해석을 수행하여 터널내 설치된 제트팬의 수치적 해석기법에 대한 적용성을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실규모 실험

Fig. 1은 실규모 단면의 실험용 터널에 설치된 제트팬과 기류측정 실험의 모습을 보여주고 있다. 실험에 사용된 제트팬은 내경 1,250 mm와 토출풍속 30 m/s의 규격을 가지는 전형적인 터널용 제트팬으로서 블레이드 개수는 6개이며, 허브지름은 425 mm이다. 또한 인버터를 구비하여 임펠러의 회전수가 가변될 수 있다. 그림에서와 같이 제트팬은 구조물 위에 장착되어서 이동이 용이하도록 하였으며, 기류측정용 센서를 지지대 상부에 설치하였다. 제트팬의 모터는 전원 3



Fig. 1 Photograph of jet fan and velocity measuring apparatus



Fig. 2 Photograph of experimental tunnel

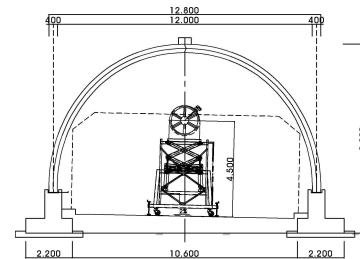


Fig. 3 Sectional view for installation of jet fan

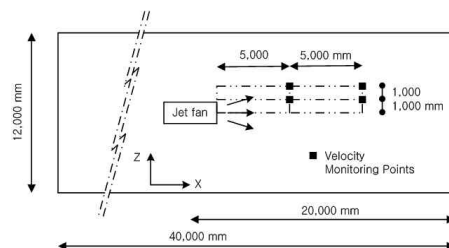


Fig. 4 Schematic diagram for position of velocity monitoring points

상 380 V, 동력 37 kW 및 절연등급 H종의 사양을 가진다. 제트팬이 설치되는 실험용 터널은 Fig. 2와 같이 2차선 도로터널의 실규모 단면을 가지는 터널로서 터널길이 40 m, 터널높이 8.92 m 및 터널폭 10.6 m의 체원을 가진다. Fig. 3에 본 실험에서 사용된 실험용 터널과 제트팬의 단면도를 도시하였으며 그림에서와 같이 제트팬 중심이 지면에서 4.5 m 위치에 있도록 구조물의 높이를 조정하였다. Fig. 4는 풍속

Table 1 Test condition of fan's RPM

CASE	Hz	RPM
CASE1	30	897
CASE2	40	1194
CASE3	50	1491
CASE4	60	1780

을 측정할 지점의 나타내고 있다. 그림에서와 같이 터널의 중앙에 제트팬을 위치시키고 제트팬의 앞단에서 각각 5 m(x=5m)와 10 m(x=10m)만큼 떨어진 위치로부터 좌측으로 각각 1 m(z=1m), 2 m(z=2m) 편향된 지점에서 형성되는 풍속을 측정하였다. 이 때 풍속측정 센서의 센싱부를 지면에서 4.5 m 높이에 위치하도록 하여 제트팬 중심부와 같은 높이가 되도록 하였다. 실험에서는 Table 1과 같이 인버터를 조정하여 임펠러의 회전수를 변화시켜가며 풍속을 측정하였다.

2.2 수치해석

수치해석은 실규모 실험과 동일한 조건을 대상으로 수행하여 각각의 결과를 비교·검토할 수 있도록 하였다. 실험용 터널에 설치된 제트팬에 의해 생성되는 분류유동을 수치적으로 해석하기 위하여 범용 수치해석 프로그램인 ANSYS CFX 11.0<sup>(7)</sup>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.

Fig. 5는 제트팬을 포함하는 실험용 터널의 수치해석 모델을 보여주고 있고, Fig. 6은 대상모델에 대하여 격자계를 생성한 결과를 도시하였다. Fig. 7은 케이싱을 제외한 제트팬의 개요도를 보여주고 있으며 Fig. 8은 rotor의 형상과 주위 격자계를 도시하고 있다.

3. 결과 및 검토

Fig. 9에서 Fig. 11은 Table 1의 CASE 4(RPM=1780)에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 9는 터널내 단면

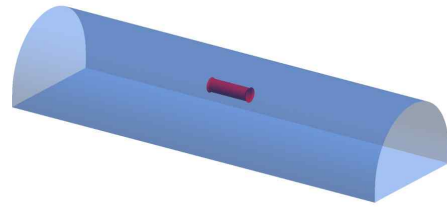


Fig. 5 Numerical model of tunnel and jet fan

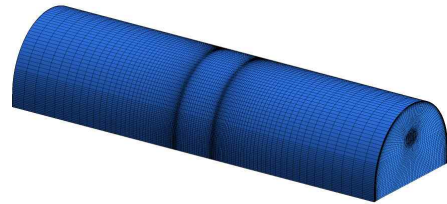


Fig. 6 Grid system for numerical analysis

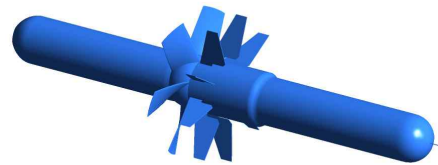


Fig. 7 3D-diagrammatic representation of jet fan without casing

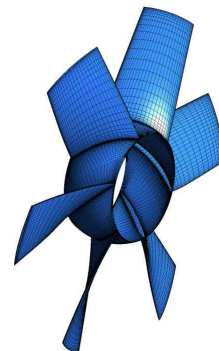


Fig. 8 3D-diagrammatic representation and grid system of rotor

에서의 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 9의 (a)는 제트팬 중심축을 포함하는 터널 중심단면에서의 속도분포를 보여주고 있다. 그림에서 속도분포가 표시되지 않은 영역이 제트팬을 의미하는데 Fig. 3와 같이 제트팬이 구조물 위에 장착되어 있는 상황으로 실제 터널현장에서의 제트팬 설치위치보다는 아래쪽에 위치한다. 그림에서 알 수 있듯이 제트팬 입구에서 제트팬으로 기류가 빠른 속도로 유입되고 제트팬 출구에서 30m/s에 근접하는 속도로 기류가 분출되며 분출된 기류는 제트팬 후단에서 확산되면서 터널내 유동을 형성한다. 이 때

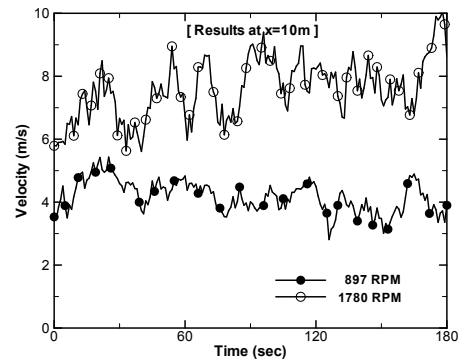
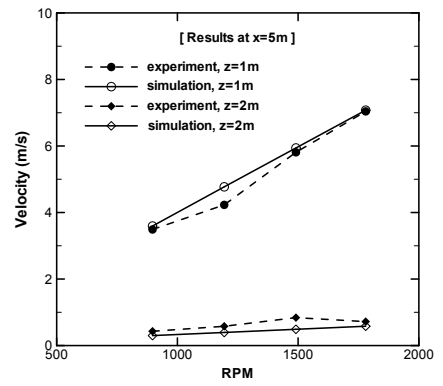
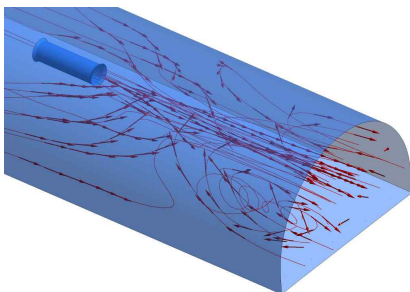
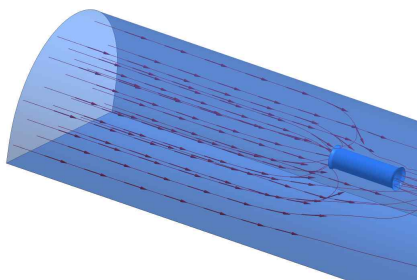
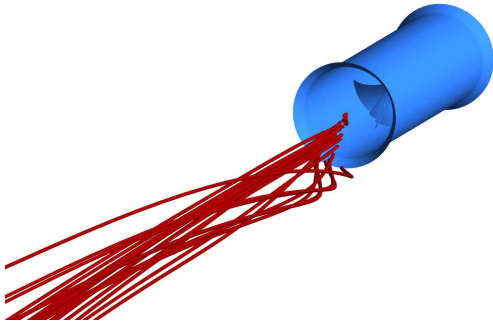
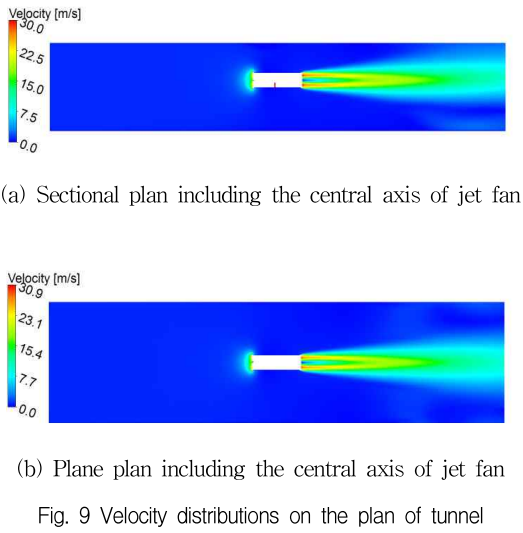


Fig. 12 Velocity variations with time at monitoring points of experiment

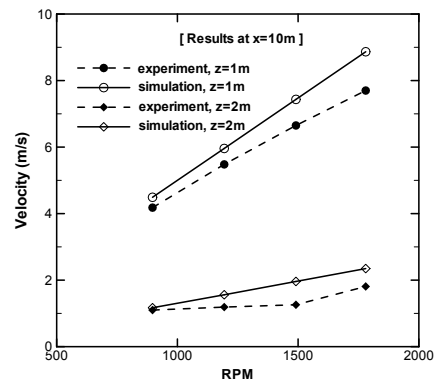
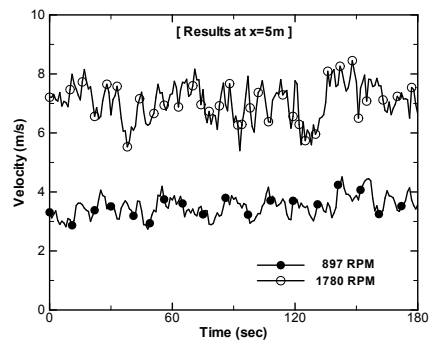


Fig. 13 Comparison of velocity at monitoring points between experimental and numerical results

제트팬에서 분출되는 기류의 형상을 자세히 살펴보면 제트팬의 케이싱 부근 안에서 최고속도의 기류가 분출되어 일정거리 후단에서 합류한 후 후류의 코어를 형성한다. 반면 제트팬의 허브가 위치하는 중심부에서는 상대적으로 낮은 분출 속도를 보이고 있다. Fig. 9의 (b)는 제트팬의 중심축을 포함하는 터널 평면에서의 속도분포를 보여주고 있다. 터널 중앙에 위치한 제트팬에서 분출되는 기류의 형상을 볼 수 있는데, 짧은 연장의 대상터널 조건을 감안할 때 분출된 기류가 터널 측면벽까지 확산되지 않은 상태에서 터널출구를 통과하고 있다.

Fig. 10은 제트팬을 통과한 후 출구에서 분출되는 기류의 유선분포를 보여주고 있다. 그림에서는 유선의 궤적을 명확히 보이게 하기 위해 제트팬의 rotor와 rotor 사이 하나의 유도에 대한 기류만을 대상으로 하였다. 그림에서와 같이 케이싱에 가까운 외각쪽으로 갈수록 분출되는 기류의 회전특성이 강해져서 기류가 회전하면서 앞으로 진행하는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 터널내 기류의 유선분포를 보여주고 있다. Fig. 11의 (a)는 터널입구에서 제트팬 입구 부분에 걸친 지역에서의 유선분포를 도시하고 있는데 그림에서와 같이 터널 입구에서 유입된 기류 중 대부분이 제트팬으로 유입되고 있으며 바닥이나 측벽부근의 기류는 제트팬 주위를 지나 터널 후단부로 흐르고 있다. Fig 11의 (b)는 제트팬 출구에서 터널 출구 부분에 걸친 지역에 대한 유선분포를 보여주고 있다. 제트팬 출구에서 분출되는 기류를 볼 수 있으며, 터널바닥과 측벽부근에서 흘러온 유동은 제트팬에서 분출되는 빠른 속도의 기류에 유인되어 터널 중심부를 거쳐 터널외부로 나간다. 한편 터널출구 부근에서는 빠른 유속이 형성되는 중심부 이외의 지역에서 터널 안쪽으로 외부의 기류가 유입된 후 회전류를 형성한다.

Fig. 12는 실험과 수치해석의 결과로서 풍속측정 지점 중 일부에서의 시간에 따른 풍속측정 결과를 도시하고 있다. Fig. 12의 (a)는  $x=5\text{ m}$ ,  $z=1\text{ m}$ 의 지점에서 제트팬의 RPM이 각각 897과 1780으로 운전될 때 180초간의 풍속측정 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 시간에 따라 1~2 m/s 정도의 변동폭을 가지며 풍속이 측정되고 있음을 알 수 있다. Fig. 12의 (b)는  $x=10\text{ m}$ ,  $z=1\text{ m}$ 의 지점에서의 풍속측정 결과를 보여주고 있다. 이 지점에서는  $x=5\text{ m}$ 에서의 결과보다 1 m 정도 풍속의 변동폭이 크게 형성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 13는 실험과 수치해석의 결과를 비교하여 도시한 내용이다. Fig. 4와 같은 각각의 풍속측정 지점에서 Table 1과 같이 제트팬의 회전수를 달리해 가며 실험과 수치해석을 통해 얻은 풍속을 비교하였다. 이때 실험값은 180초 동안의 측정값에 대한 평균값을 사용하였다. Fig. 13의 (a)는  $x=5\text{ m}$ 와  $z=1\text{ m}$ ,  $z=2\text{ m}$  지점에서 얻은 풍속을 도시한 것으로서 실험과 수치해석의 결과가 약 2~11 %의 차이를 보이고 있다. 그림에서와 같이 터널내 풍속은 제트팬의 회전수에

따라 선형적으로 증가하는 것으로 판단된다. 한편  $x=5\text{ m}$ 로 제트팬에 근접한 지역에서는 제트팬의 분출기류가 아직까지 측면으로 넓게 확산되지 않았기 때문에  $z=2\text{ m}$  지점에서의 풍속이 적게 측정된다. Fig. 12의 (b)는  $x=10\text{ m}$ 와  $z=1\text{ m}$ ,  $z=2\text{ m}$  지점에서의 결과를 보여주고 있다.  $z=10\text{ m}$ 의 데이터에 대해서 실험과 수치해석 결과간에 약 7~13 %의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터널내 설치된 제트팬에 의해 형성되는 터널내부의 유동장을 분석하기 위해서 터널과 제트팬을 이용한 실험과 동일한 조건에서의 3차원 수치해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 제트팬이 정격모드(60Hz, 1,780RPM)로 운전하면 제트팬 출구에서 30 m/s에 근접하는 속도로 기류가 분출되며 분출된 기류는 확산되면서 터널내 유동을 형성한다.
- 2) 제트팬의 케이싱에 가까운 외각쪽으로 갈수록 분출속도가 높아지고 기류의 회전특성도 강해진다.
- 3) 터널입구에서 유입된 기류 중 대부분은 제트팬으로 유입되며, 터널바닥이나 측벽부근의 일부 기류가 제트팬 주위를 지나 터널 후단부로 흐른다. 이렇게 제트팬을 지나친 기류는 제트팬 출구에서 분출되는 빠른 속도의 기류에 유인되어 터널 중심부를 거쳐 터널외부로 나간다.
- 4) 실험에 의한 풍속측정 결과를 보면  $x=5\text{ m}$ 의 지점에서는 시간에 따라 1~2 m/s 정도의 변동폭을 가지며 풍속이 변화하고 있으며,  $x=10\text{ m}$  지점에서는 이보다 1 m 정도 풍속의 변동폭이 크게 형성된다.
- 5) 터널내 기류속도의 측정결과를 살펴보면  $x=5\text{ m}$  지점에서는 실험과 수치해석의 결과가 약 2~11 %의 차이를 보이고 있으며,  $x=10\text{ m}$  지점에서는 약 7~13 %의 차이를 보이고 있다.

#### 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) 이기상, 김광용, 최재호, 2008, “익형의 형상최적화를 통한  
고효율 축류송풍기 설계,” 유체기계저널, 제11권, 제2호,  
pp. 46~54.
- (6) 장춘만, 최승만, 김광용, 2006, “허브 캡 형상에 따른 축류  
송풍기 성능특성,” 유체기계저널, 제9권, 제6호, pp. 9~16.
- (7) ANSYS, Inc., 2006, ANSYS CFX Introduction.