



## 제트팬 운전에 의해 형성되는 터널내 유동에 대한 수치적 해석

김 정 엽<sup>1</sup>

## NUMERICAL ANALYSIS OF TUNNEL FLOW INDUCED BY JET FAN

J.Y. Kim

*The flow field in road tunnel is influenced by some facts such as piston effect of vehicle's move, operation of ventilation facilities, natural wind and buoyancy effect of fire plume. Among those, jet fan is one of main ventilation facilities especially in longitudinal ventilation system of tunnel. In this study to analyze tunnel flow induced by operation of jet fan, numerical simulation has been carried out. The velocity distributions and streamlines in tunnel are examined to consider the three-dimensional characteristics of tunnel flow caused by jet fan.*

**Key Words :** 도로터널(Road Tunnel), 제트팬(Jet Fan), 환기(Ventilation), 수치해석(Numerical Analysis)

## 1. 서 론

도로터널은 반밀폐적 공간으로 화재발생시 안전확보에 취약하고 환기가 용이하지 않기 때문에 이용자의 안전과 편의 도모에 취약한 시설로 평가되고 있어서 도로터널의 환경개선을 위한 기술개발이 요청되고 있다. 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 상당 부분이 선진외국에서 도입되었고, 관련된 주요 변수값들에 대한 기초연구가 미약한 상태로 현장에서 이용되고 있기 때문에 국내의 독자적인 기술발전에 걸림돌로 작용하고 있어 이에 대한 개선이 필요하다.

고속국도에서와 같이 차량의 피스톤 효과가 크고 일방향 구조의 터널에서는 종류식 터널 환기시스템[4]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. 국내의 설계기법에서는 제트팬에 의한 승압력을 산정하기 위해서 제트팬의 토출속도를 주요인자로 사용하는 1차원 운동량방정식이 주로 적용되고 있으며, 터널풍속과 제트팬의 이격거리 등의 영향을 반영하기 위하여 실험계수를 사용하고 있다.

현재의 1차원적인 접근방법은 터널내 생성기류에 의한 전체 마찰손실과 이를 극복하기 위한 제트팬의 승압력 및 댄수를 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 승압계수나 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

<sup>1</sup> 한국건설기술연구원 건설품질정책본부

\* TEL : 031) 369-0506

\* Corresponding author, E-mail: jykim1@kict.re.kr

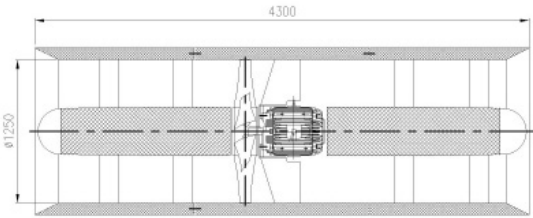


Fig. 1 Sectional view of jet fan

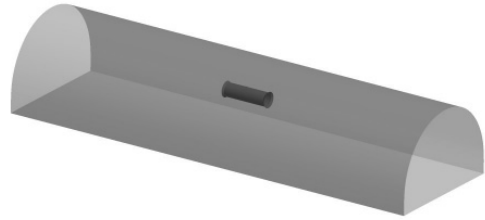


Fig. 4 Numerical model of tunnel and jet fan



Fig. 2 Photograph of jet fan

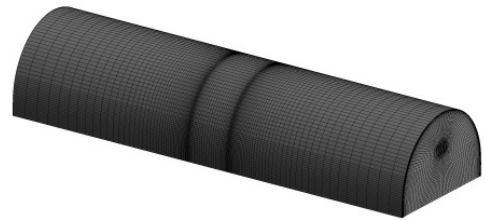


Fig. 5 Grid system for numerical analysis

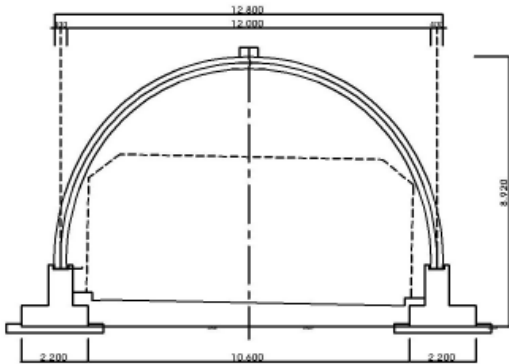


Fig. 3 Front view of road tunnel

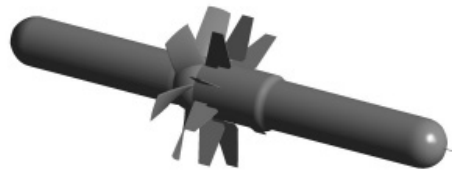


Fig. 6 3D-Diagrammatic representation of jet fan without casing

## 2. 수치해석 방법

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.

본 연구에서는 터널내에 설치된 제트팬에 의해 생성되는 유동장을 분석하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 실험터널에 설치된 제트팬과 동일한 조건에 대하여 제트팬과 터널내 유동을 동시에 해석하는 방법으로 수치해석을 수행하였으며, 해석결과로서 터널내 속도분포와 유선을 분석하였다.

수치해석의 대상이 되는 제트팬은 내경 1,250 mm와 토출 풍속 30 m/s의 규격을 가지는 전형적인 터널용 제트팬으로서 Fig. 1에 대상 제트팬의 단면도가 제시되고 있다. Fig. 2는 실험터널에 설치된 대상 제트팬의 실제 모습을 도시한 것으로서 인버터를 구비하여 임펠러의 회전수가 가변될 수 있다. Fig. 3에 본 연구에서 적용한 2차선 도로터널의 정면도를 나타내었다.

터널에 설치된 제트팬에 의해 생성되는 분류유동을 수치적으로 해석하기 위하여 범용 수치해석 프로그램인 ANSYS CFX 11.0[5]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

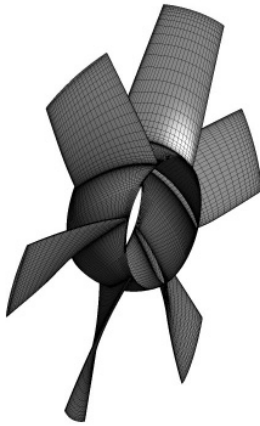
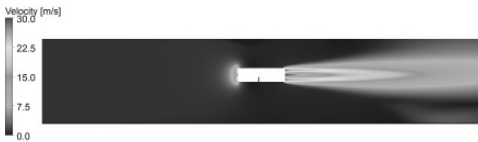
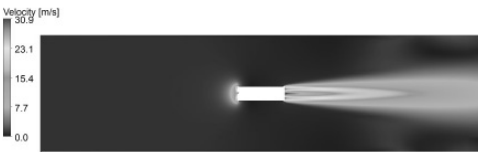


Fig. 7 3D-Diagrammatic representation and grid system of rotor



(a) Sectional plan including the central axis of jet fan



(b) Plane plan including the central axis of jet fan

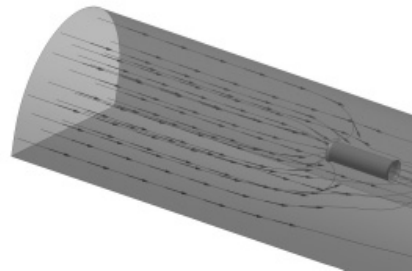
Fig. 8 Velocity distributions on the plan of tunnel

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.

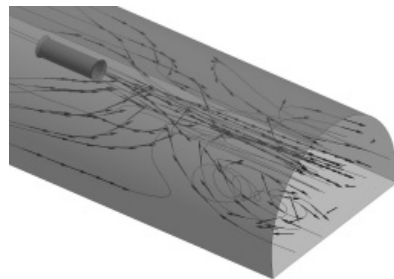
Fig. 4는 제트팬을 포함하는 대상터널의 수치해석 모델을 보여주고 있고, Fig. 5은 대상모델에 대하여 격자계를 생성한 결과를 도시하였다. Fig. 6은 케이싱을 제외한 제트팬의 개요도를 보여주고 있으며 Fig. 7은 rotor의 형상과 주위 격자계를 도시하고 있다.



Fig. 9 Streamlines near the outlet of jet fan



(a) Region before the jet fan



(b) Region after the jet fan

Fig. 10 Streamlines in tunnel

### 3. 결과 및 검토

Fig. 8 에서 Fig. 10은 제트팬이 정격모드로 운전하는 조건에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 8는 터널내 단면에서의 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 8의 (a)는 제트팬 중심축을 포함하는 터널 중심단면에서의 속도분포를 보여주고 있다. 그림에서 속도분포가 표시되지 않은 영역이 제트팬을 의미하는데 Fig. 2와 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



30 m/s에 근접하는 속도로 기류가 분출되며 분출된 기류는 제트팬 후단에서 확산되면서 터널내 유동을 형성한다. 이 때 제트팬에서 분출되는 기류의 형상을 자세히 살펴보면 제트팬의 케이싱 부근 안쪽에서 최고속도의 기류가 분출되어 일정 거리 후단에서 합류한 후 후류의 코어를 형성한다. 반면 제트팬의 허브가 위치하는 중심부에서는 상대적으로 낮은 분출 속도를 보이고 있다. Fig. 8의 (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. 9는 제트팬을 통과한 후 출구에서 분출되는 기류의 유선분포를 보여주고 있다. 그림에서는 유선의 궤적을 명확히 보이기 위해 제트팬의 rotor와 rotor 사이 하나의 유로에 대한 기류만을 대상으로 하였다. 그림에서와 같이 케이싱에 가까운 외각쪽으로 갈수록 분출되는 기류의 회전특성이 강해져서 기류가 회전하면서 앞으로 진행하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 터널내 기류의 유선분포를 보여주고 있다. Fig. 10의 (a)는 터널입구에서 제트팬 입구 부분에 걸친 지역에서의 유선분포를 도시하고 있는데 그림에서와 같이 터널입구에서 유입된 기류 중 대부분이 제트팬으로 유입되고 있으며 바닥이나 측벽부근의 기류는 제트팬 주위를 지나 터널 후단부로 흐르고 있다. Fig 10의 (b)는 제트팬 출구에서 터널출구 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 터널 출구 부근에서는 빠른 유속이 형성되는 중심부 이외의 지역에서 터널 안쪽으로 외부의 기류가 유입된 후 회전류를 형성한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터널내에 설치된 제트팬에 의해 생성되는

유동장을 분석하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 실험터널에 설치된 제트팬과 동일한 조건에 대하여 제트팬과 터널내 유동을 동시에 해석하는 방법으로 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 제트팬이 정격모드로 운전하면 제트팬 출구에서 30 m/s에 근접하는 속도로 기류가 분출되며 분출된 기류는 확산되면서 터널내 유동을 형성한다.

(2) 제트팬의 케이싱 부근 안쪽에서 최고속도의 기류가 분출되어 일정거리 후단에서 합류한 후 후류의 코어를 형성한다. 또한 제트팬의 케이싱에 가까운 외각쪽으로 갈수록 분출되는 기류의 회전특성이 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.

#### 참고문헌

- [1] 1999, 유지오, 이동호, 신현준, “도로터널 환기시스템 설계 프로그램 개발,” 한국산업안전학회지, 제14권, 제4호, pp.60-70.
- [2] 2004, 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, “도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구,” 터널기술, 제6권, 제2호, pp. 129-139.
- [3] 2002, 우경범, 김원갑, 한화택, “화재시 터널내 열유동 시뮬레이션 모델 연구,” 설비공학논문집, 제14권, 제7호, pp. 584-591.
- [4] 2002, 한국도로공사, “고속도로터널 환기시설 설계기준”.
- [5] 2006, ANSYS, Inc., "ANSYS CFX Introduction".