학술논문

한국터널공학회논문집 2009년 12월
제11권 제4호, pp. 411-417

터널에서 차량의 운행에 의해 생성되는 비정상 유동에 대한 실험적 연구

김정엽[1]*, 신현준[2]

Experimental study on vehicle-induced unsteady flow in tunnel

Jung-Yup Kim, Hyun-Joon Shin

Abstract The thermo-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, piston effect is one of primary causes for formation of air flow in road tunnel and has an effect on initial direction of smoke flow in tunnel fire. In this study to analyze the unsteady flow in the tunnel caused by the run of vehicle, the experimental study of vehicle-induced unsteady flow on a reduced-scale model tunnel is presented. While the three types of vehicle shape such as basic type of rectangular shape, diamond-head type and stair-tail type are changed, the pressure and air velocity variations with time are measured. The rising ratio of pressure and velocity are in order of "basic type of rectangular shape > stair-tail type > diamond-head type". The experimental results would be good data for development of a numerical method on the vehicle-induced unsteady tunnel flow.

Keywords: Road tunnel, piston effect, tunnel flow, vehicle shape, model experiment

요 지 도로터널내 열유동장의 형성은 여러 가지 요인의 영향을 받는다. 즉 차량의 이동에 의한 피스톤 효과, 환기설비의 환기력, 자연풍 영향, 화재시 부력 등에 따라 도로터널내 기류가 형성된다. 차량의 이동에 의한 피스톤 효과는 도로터널내 기류생성의 일차적인 요인이며, 화재시 연기의 초기 거동에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 도로터널내 차량의 이동에 의해 생성되는 비정상 기류를 분석하기 위해서 단순한 형태의 터널과 차량에 대한 축소모형실험장치를 제작하고 실험을 수행하였다. 기본형, 전두부 사변형, 후두부 계단형의 3가지 형태로 차량의 형상을 변화시켜가며 차량운행에 따라 형성되는 터널내 압력과 기류속도를 측정하였다. 실험결과 터널내 생성되는 압력과 속도의 크기는 "기본형>후두부 계단형>전두부 사변형"의 순서로 증가하였다. 실험결과는 향후 3차원 수치해석 결과와의 비교, 검토를 통해서 수치해석 기술의 보완 및 신뢰성 확보를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주요어: 도로터널, 피스톤 효과, 터널유동, 차량형상, 축소모형실험

1. 서 론

산업발전에 따라 급격히 증가하는 교통량을 처리하고 사회간접자본의 확충을 위하여 도로의 신규건설과 기존 도로의 개선공사가 활발하게 진행되면서, 도로선형의 직선화를 통한 교통효율향상의 필요성과 터널굴착기술의 발전등으로 그림 1과 같이 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 편의 도모에 취약한 시설로 평가되고 있어서 도로터널의 환경개선을 위한 기술개발이 요청되고 있다.

국내에서는 90년대부터 도로터널의 환기 및 화재안전에 대한 연구가 진행되었으며(유지오 외, 1999, 우경범 외, 2002, 김효규 외, 2005, 김명배 외, 2004, 유홍선 외, 2005), 이러한 연구결과와 관련 전문가 그룹의 노력으로 국내 도로터널에 대한 환기 및 제연시스템의 설계기술이 확립되어 활용되고 있다. 그러나 국내에서 적용되는 설계기술 중 상당부분이 선진외국에서 도입되었고,

[1]정회원, 한국건설기술연구원 건설품질정책본부 선임연구원
[2]정회원, 한국건설기술연구원 건설품질정책본부 책임연구원
*교신저자: 김정엽 (E-mail: jykim1@kict.re.kr)

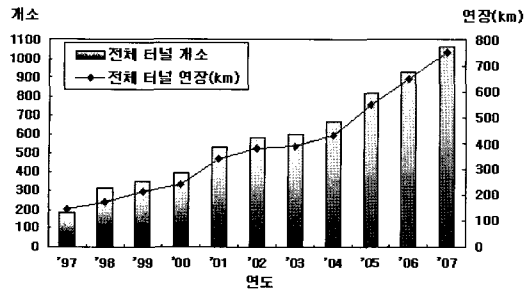

그림 1. 국내 도로터널 건설 현황

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 열유동 현상에 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 도로터널내 차량의 이동에 의해 생성되는 비정상 기류의 해석에 대하여 연구결과를 제시하고자 한다. 차량의 이동에 의한 피스톤 효과는 도로터널내 기류생성의 일차적인 요인이며, 화재시 연기의 초기 거동에 영향을 줄 수 있다. 따라서 차량의 제원, 속도, 차폐율, 교통량 등에 따른 터널내 기류 발생 및 환기설비와의 상호작용에 대한 설계자료가 도출되어야 한다. 현재의 설계기법에서는 터널내에서 이동하는 물체에 의해 발생하는 유동의 해석을 위해서 1차원 항력방정식과 공기역학적 마찰계수가 주로 적용되고 있으며, 3차원적 특성이 강한 마찰계수와 환기구 주위 유동현상을 반영하기 위해 실험계수를 사용하고 있다 (B. Dayman, 1970, S. W. Gouse Jr. 외, 1969, B. Fago 외, 1991). 또한 축소모형실험을 수행하여 이동하는 차량의 조건에 따른 터널내 기류발생 특성을 고찰하였다 (T. Y. Chen 외, 1998, B. Dayman, 1982).

현재의 1차원적인 접근방법은 단면에서의 평균풍속과 평균압력에 대한 해석결과만을 얻을 수 있으므로 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 터널의 형상, 통과차량 조건 , 환기설비 운영 등의 다양한 해석조건이 존재하는 도로터널에서의 이동차량에 의한 유동 분석과 통합적 검토가 3차원 수치적 해석방법에 의해 효과적으로 수행될 수 있으며, 차량의 이동효과를 반영할 수 있는 기법들이 개발되어 활용되고 있다(D. M. Anderson 외, 1998, T. Ye 외, 1999, H. S. Udaykumar 외, 2001). 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 단순한 형태의 터널과 차량에 대한 축소모형실험장치를 제작하여 차량의 이동에 따라 터널내에 생성되는 비정상 기류유동을 분석하였다. 차량의 형상을 변화시켜가며 차량운행에 따라 형성되는 터널내 압력과 기류속도를 측정하였으며, 실험결과를 분석하였다. 실험결과는 향후 3차원 수치해석결과와의 비교/검토를 통해서 수치해석기술의 보완 및 신뢰성 확보를 위한 기초자료로서 활용될 것이다.

2. 연구방법

그림 2는 축소모형실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 터널과 차량의 형상은 수치해석결과와의 비교를 고려하여 최대한 단순하게 제작하였으며, 차량은 그림 3와 같이 기본형, 전두부 사변형, 후두부 계단형의 3가지 형태를 적용하였다. 아크릴로 제작한 터널의 총길이는 39 m이고 직사각형 단면의 단순한 형태로 제작되었다. 2대의 차량을 동시에 이동시켜서 차량의

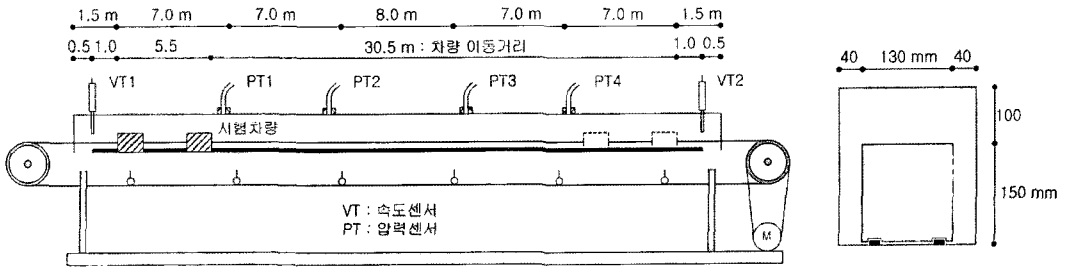

그림 2. 축소모형실험장치 개략도

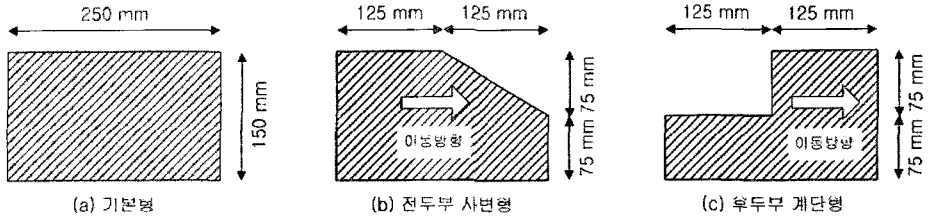

그림 3. 차량형상 개요도

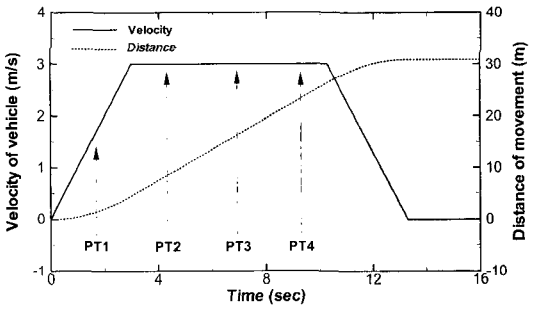

그림 4. 차량운행조건

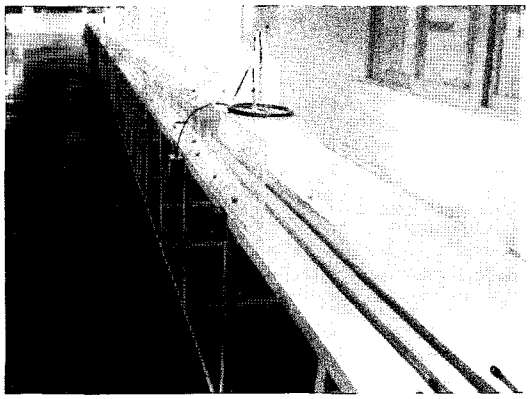

그림 5. 축소모형실험장치 전경

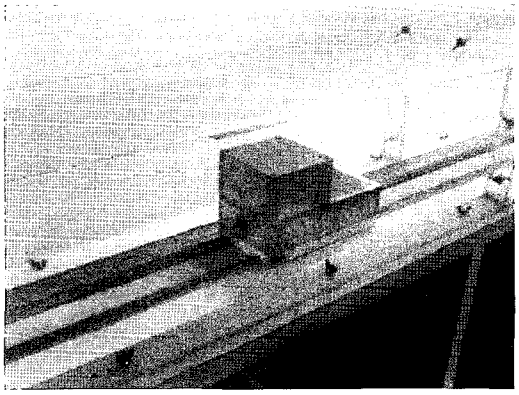

그림 6. 실험차량 전경

연속운행에 따른 영향을 고찰하도록 하였으며 차량사이 간격은 5 m로 하였다. 차량은 전단과 후단에 강선으로 연결되어서 가이드레일을 따라 전후로 이동하게 되며, 모터의 회전수를 제어하여 차량의 운행속도를 변경한다. 차량의 운행거리는 30.5 m이다. 터널 입출구에 속도센서를 설치하였고 터널 중간부에 차량의 운행시 시간에 따른 압력변화를 측정하고자 총 4개의 압력센서를 설치하였다. 속도와 압력 모두 0.1초 간격으로 변화량을 측정하였다. 그림 4는 실험을 수행한 차량운행조건을 도시하고 있다. 그림에서 실선은 시간에 따른 차량속도를 나

타내며 점선은 차량의 운행거리를 나타내고 있다. 또한 차량의 운행에 따라 통과하는 압력센서의 위치를 시간과 차량운행조건 및 차량의 운행거리에 따라 알 수 있도록 하였다. 그림에서와 같이 터널내 유동이 난류적 특성을 지니도록 하면서 동시에 등속운전구간을 최대한 확보하기 위하여 차량의 최고속도를 3 m/s로 설정하였다. 그림 5는 축소모형실험장치의 실제모습을 보여주고 있으며, 그림 6은 후두부 계단형 실험차량의 전경이다. 모형터널의 수력직경과 차량운행의 최고속도에 기초한 터널유동의 레이놀즈수는 4.9×10^4이다.

3. 결과 및 검토

그림 7과 그림 8은 기본형의 차량모델에 대한 축소모형실험의 결과를 보여주고 있다. 그림 7은 시간에 따른 터널에서의 압력변화를 나타내고 있는데, 각 압력센서에 의해 측정된 결과는 차량이 출발하여 가속되면서 터널내부의 압력이 상승하며, 선두부 차량이 각 압력센서 설치지점을 통과하면 해당위치의 터널압력이 급격히 하강한다. 선두부 차량이 통과한 후 두 번째 차량이 압력센서 설치지점에 접근하면서 하강했던 압력이 다시 상승하다가 두 번째 차량이 통과하면서 급격한 압력하강이 반복된다. PT2와 PT3에서와 같이 등속운전구간에서 차량이 통과할 때 하강하는 압력폭과 차량 통과 후 회복되는 압력폭을 정량적으로 분석해보면 차량 통과 후 회복되는 압력폭은 하강하는 압력폭에 비해 45.1%~47.6%의 범위에 있다. 한편 PT3와 PT4 위치에서의 압력변화를 보았을 때, 터널 후반부에서는 차량이 가속에서 등속으로 변화하는 시각에 최고압력이 발생됨을 알 수 있다. 차량이 등속운전을 하면서 압력이 서서히 감소하고, PT3와 PT4 위치를 통과하면서 해당 위치의 터널압력이 급격히 하강한다. 그리고 차량이 감속구간에 들어서면서 터널내 압력이 서서히 증가하는 현상을 보이고 있는데, 이는 운행속도가 점차 줄어드는 차량이 터널내 기류의 흐름에 저항으로 작용하면서 차량 후단의 터널내 압력이 올라가는 것으로 해석될 수 있다.

그림 8은 시간에 따른 터널 입구와 출구에서의 종방향 기류속도변화를 도시한 것으로서, 차량이 출발하면서

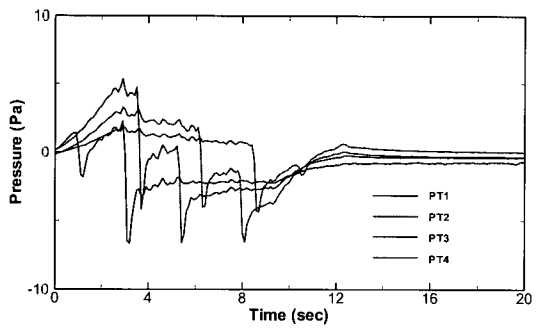

그림 7. 시간에 따른 터널에서의 압력 변화

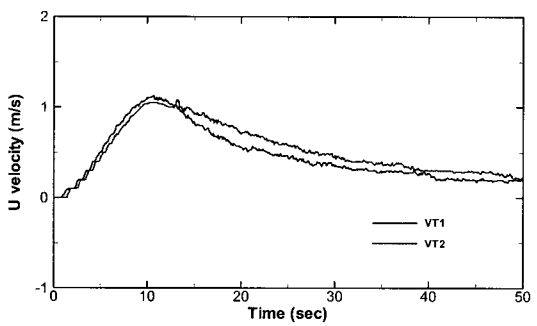

그림 8. 시간에 따른 터널에서의 종방향 기류속도 변화

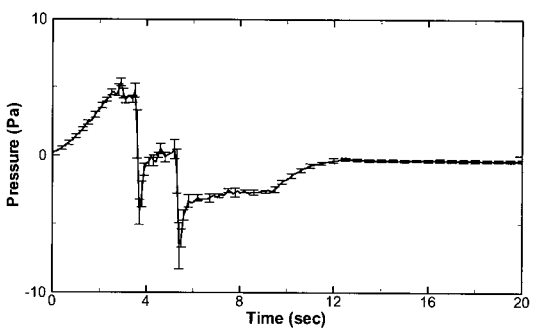

그림 9. PT2지점에서의 압력측정값에 대한 표준편차

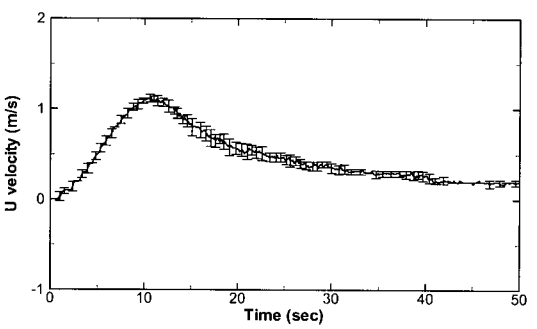

그림 10. VT1지점에서의 속도측정값에 대한 표준편차

정지해 있던 공기가 서서히 움직이기 시작하여 약 1.1 m/s의 최고풍속을 형성한 후 서서히 감소함을 알 수 있다. 차량의 이동에 의해 생성되는 기류는 차량의 운행 후반시각에 최고속도가 되고 차량이 정지한 후에도 한동안 터널내 흐르고 있다.

축소모형실험은 10회를 수행하였고, 실험오차를 분석하기 위하여 표준편차(Standard Deviation)를 산출하였으며, PT2위치에서의 압력측정값과 VT1위치에서의 속도측정값에 대한 표준편차를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 실험평균값에 의해 표준편차의 크기를 나타내는 변동계수(Coefficient of Variation)는 주요지점에서 10% 미만의 값을 보이고 있다.

그림 11에서 그림 16은 차량의 형상을 그림 3과 같이 기본형, 전두부 사변형 및 후두부 계단형의 3가지 형태로 변화시켜가며 실험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 차량의 이동에 의해 터널내 생성되는

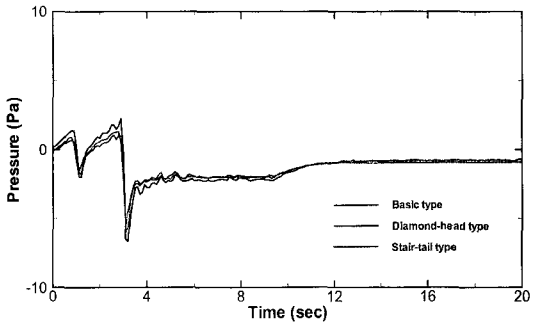

그림 11. 차량형상에 따른 PT1지점에서의 압력 변화

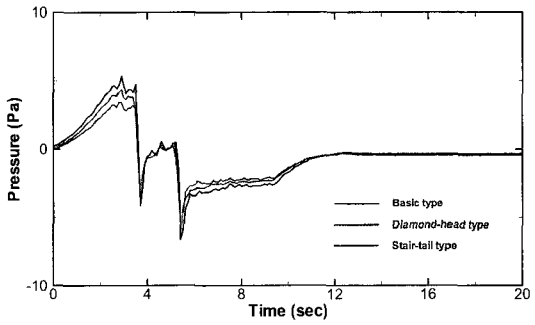

그림 12. 차량형상에 따른 PT2지점에서의 압력 변화

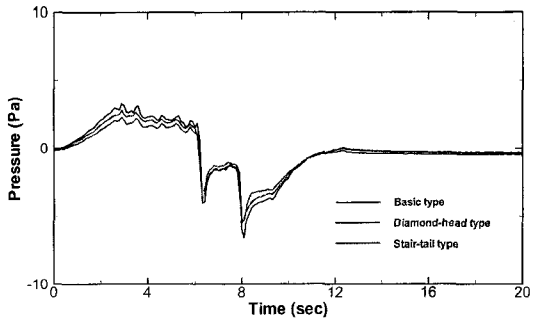

그림 13. 차량형상에 따른 PT3지점에서의 압력 변화

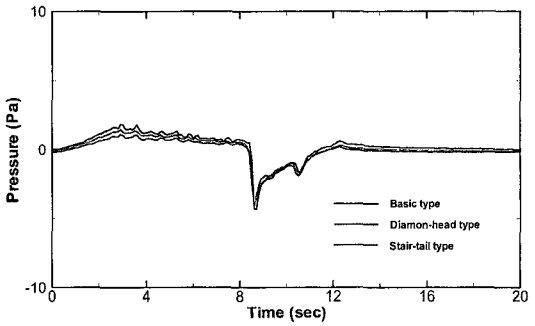

그림 14. 차량형상에 따른 PT4지점에서의 압력 변화

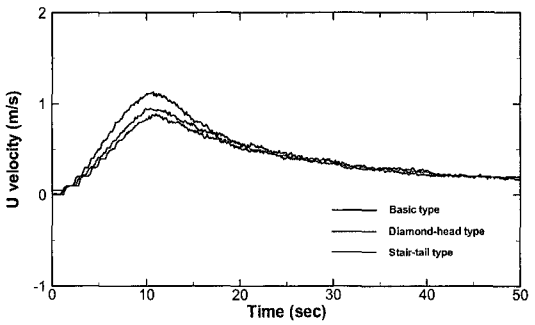

그림 15. 차량형상에 따른 VT1지점에서의 속도 변화

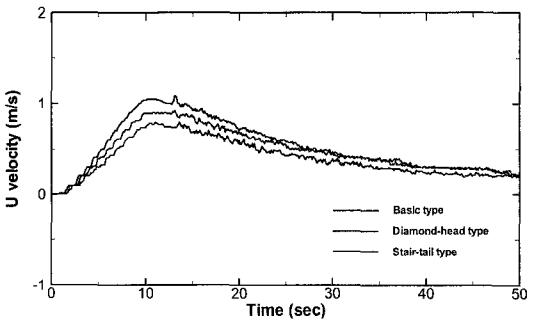

그림 16. 차량형상에 따른 VT2지점에서의 속도 변화

압력과 기류속도의 크기는 각 차량형상에 따라 차이를 보이고 있다. 즉, 직육면체 형상의 기본형의 경우에 터널내 압력과 속도가 가장 높게 형성되며, 차량 앞부분이 사변형으로 처리된 전두부 사변형의 차량이 운행될 때 터널내 압력과 기류속도가 가장 낮게 형성된다. 기본형의 차량이 이동할 때 피스톤 효과가 가장 크게 발생하고 전두부 사변형의 경우가 피스톤 효과가 가장 낮아지는 것으로 말할 수 있다. 이를 정량적으로 설명하면 다음과 같다. 즉 그림 12와 같이 PT2 압력센서 위치에서 각 차량형상에 따라 터널내 생성되는 압력장을 검토하였을 때, 압력 상승기의 대표시점으로 압력 상승기의 평균적인 결과를 보여주고 있는 t=2 s에서 전두부 사변형의 경우에 비해 후두부 계단형은 압력이 26.9% 더 상승하고, 기본형은 47.2% 더 올라간다. 한편 PT2 위치에서 압력이 최고로 올라가는 t=2.9 s에서는 전두부 사변형에 비해 후두부 계단형은 25.4%, 기본형은 55.4% 정도 압력이 더 상승하며, 부압시기의 대표시점인 t=8.5 s에서는 전두부 사변형에 비해 후두부 계단형은 10.1%, 기본형은 23.6% 더 부압이 낮게 형성된다.

그림 13과 같이 PT3의 위치에서 각 차량형상에 따라 터널내 생성되는 압력장을 보면, 압력 상승기인 t=2 s에서 전두부 사변형의 경우에 비해 후두부 계단형은 압력이 23.9% 더 상승하고, 기본형은 48.5% 더 상승한다. PT3 위치에서 최고압력이 형성되는 t=2.9 s에서도 전두부 사변형에 비해 후두부 계단형은 23.1%, 기본형은 44.4% 정도 압력이 높아지며 부압이 형성되는 t=8.8 s에서는 11.9%, 22.9% 각각 압력이 적게 형성된다.

한편 그림 11과 그림 14는 차량이 출발한 지 얼마되지 않아 차량의 속도가 낮은 상태로 압력센서를 통과하는 경우(PT1 압력센서 위치)와 차량이 등속구간의 후반부에서 압력센서를 통과하는 경우(PT4 압력센서 위치)의 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 터널내 두 센서의 설치위치에서는 차량의 이동에 의해 형성되는 압력의 절대값이 적으며 따라서 차량의 형상에 따른 압력의 차이도 그래프의 표시단위에서는 분간하기 힘들 정도로 미미하게 나타나고 있다.

그림 15는 VT1 위치에서 각 차량형상에 따라 터널내 형성되는 종방향 기류속도의 변화의 보여주고 있다. 그림에서와 같이 속도가 상승하는 t=7 s에서 전두부 사변형의 경우에 비해 후두부 계단형은 속도가 8.5% 더 빠르게 형성되고, 기본형은 37.3% 더 높아지다. 한편 VT1 위치에서 기류속도가 최고로 올라가는 t=10.5 s에서는 전두부 사변형에 비해 후두부 계단형은 11.8%, 기본형은 31.8% 정도 속도가 더 상승한다.

그림 16은 VT2 위치에서 각 차량형상에 따라 터널내에 형성되는 종방향 기류속도의 변화를 보여주고 있다. 실험결과는 VT1 위치에서의 측정결과와 유사한 형태를 보여주고 있으며 이는 터널내 유동이 비압축성의 특성을 지니고 있기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 도로터널내 차량의 운행에 의해 생성되는 비정상 기류에 대한 분석을 위해서 단순한 형태의 터널과 차량에 대한 축소모형실험장치를 제작하고 차량의 이동에 따라 터널내 형성되는 압력과 기류속도를 측정하였다. 또한 기본형, 전두부 사변형 및 후두부 계단형의 차량형상이 피스톤 효과에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 축소모형실험은 10회를 수행하였으며, 실험평균값에 의해 표준편차의 크기를 나타내는 변동계수는 주요 지점에서 10% 미만의 값을 보이고 있다.
2. 차량이 출발하여 가속되면서 터널내부의 압력이 상승하며, 선두부 차량이 각 압력센서 설치지점을 통과하면 해당위치의 터널압력이 급격히 하강한다. 선두부 차량이 통과한 후 두 번째 차량이 압력센서 설치지점에 접근하면서 하강했던 압력이 다시 상승하다가 두 번째 차량이 통과하면서 급격한 압력하강이 반복된다.
3. 기본형 차량모델에 대하여 PT2와 PT3에서와 같이 등속운전구간에서 차량이 통과할 때 하강하는 압력폭과 차량 통과 후 회복되는 압력폭을 정량적으로 분석해보면 차량 통과 후 회복되는 압력폭은 하강하는 압력폭에 비해 45.1%~47.6%의 범위에 있다.
4. 터널 후반부에서는 차량이 가속에서 등속으로 변화하는 시각에 최고압력이 발생되며, 그 후의 등속운전구간에서는 압력이 서서히 감소한다. 한편 차량이 감속구간에 들어서면서부터 차량이 정차할 때까지 터널내 압력이 서서히 증가하는 현상을 보이고 있는데 이는 운행속도가 점차 줄어드는 차량이 터널내 기류

의 흐름에 저항으로 작용하면서 차량 후단의 터널내 압력이 올라가는 것으로 해석될 수 있다.

5. 차량이 출발하면서 정지해 있던 공기가 터널 종방향으로 서서히 움직이기 시작하여 가속된 후 최고풍속을 형성한 다음 서서히 감소한다. 기본형 차량의 경우 1.1 m/s의 최고풍속이 형성된다. 차량의 이동에 의해 생성되는 기류는 차량의 운행 후반시각에 최고속도가 되고 차량이 정지한 후에도 한동안 터널내 흐른다.
6. 기본형, 전두부 사변형, 후두부 계단형의 3가지 차량형태에 따른 피스톤 효과를 살펴보았을 때, 차량의 운행에 의해 터널내 형성되는 압력과 속도의 크기는 "기본형>후두부 계단형>전두부 사변형"의 순서로 높아진다.
7. PT2 압력센서 위치에서 각 차량형상에 따라 터널내 생성되는 최고압력을 비교하였을 때, 전두부 사변형에 비해 후두부 계단형은 25.4%, 기본형은 55. 4% 정도 압력이 더 상승한다. 한편 VT1 위치에서 각 차량형상에 따라 터널내 형성되는 종방향 기류속도의 최고상승값을 비교하면 전두부 사변형에 비해 후두부 계단형은 11.8%, 기본형은 31.8% 정도 속도가 더 상승한다.

향후연구계획

연속적으로 운행하는 차량에 의해 형성되는 도로터널 유동의 3차원 수치해석은 유동장에서 이동하는 고체경계(Moving boundary of immersed solid)의 해석방안 개발이 핵심사항으로서, 향후 본 논문의 실험결과를 이용하여 경제성과 정확성면에서 해석대상인 도로터널의 환경에 효과적으로 적용될 수 있는 3차원 수치해석기법의 개발을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. 김명배, 최병일, 최준석, 한용식 (2004), "도로터널에서의 화재환기 설계에 관한 연구", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제2호, pp. 129-139.
2. 김효규, 송석헌, 이창우 (2005), "대면통행 터널의 환기특성 연구", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 13-25.
3. 우경범, 김원갑, 한화택 (2002), "화재시 터널내 열유동 시뮬레이션 모델 연구", 설비공학논문집, 제14권, 제7호, pp. 584-591.
4. 유지오, 이동호, 신현준 (1999), "도로터널 환기시스템 설계 프로그램 개발", 한국산업안전학회지, 제14권, 제4호, pp. 60-70.
5. 유홍선, 양승신 (2005), "터널 화재시 배연속도가 연소율 변화에 미치는 실험적 연구 - Heptane 풀화재 경우", 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 109-117.
6. Dayman, B. (1970), "Considerations for Design and Operation of Facilities to Study the Aerodynamics of Vehicles Travelling in Tubes", AIAA Paper, 70-225.
7. S. W. Gouse Jr., B. S. Noyes, J. K. Nwude and M. C. Swarden (1969), "Aerodynamic Drag on Vehicles in Tunnels", Journal of Basic Engineering, Vol. 91, pp. 694-706.
8. Fago, B., Lindner, H. and Mahrenholtz, O. (1991), "The effect of ground simulation on the flow around vehicles in wind tunnel testing", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 38, pp. 47-57.
9. Chen, T. Y., Lee, Y. T. and Hsu, C. C. (1998), "Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 73, pp. 99-110.
10. Dayman, B. (1982), "Small-scale aerodynamic testing for highway tunnels", 4th International Symposium on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Heslington, U.K., pp. 483-504.
11. Anderson, D. M., McFadden, G. B. and Wheeler, A. A. (1998), "Diffuse interface methods in fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., 30, 139.
12. Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H. S. and Shyy, W. (1999), "An Accurate Cartesian Grid Method for Viscous Incompressible Flows with Complex Immersed Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol. 156, pp. 209-240.
13. Udaykumar, H. S., Mittal, R., Rampunggoon, P. and Khanna, A. (2001), "A Sharp Interface Cartesian Grid Method for Simulating Flows with Complex Moving Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol. 174, pp. 345-380.

접수일(2009.8.25), 수정일(1차 수정: 2009.10.6, 2차 수정: 2009.10.13), 게재확정일(2009.10.15)