

장대터널내 열차운행시 환기에 대한 비정상 수치해석

허 남 권*, 김 욱*, 김 사 량**, 차 철 현***

서강대학교 기계공학과, *서강대학교 대학원 기계공학과, **강릉대학교 정밀기계공학과, ***(주)대양공조

Unsteady Numerical Simulation on the Ventilation in a Long Rail Tunnel

Nahmkeon Hur*, Wook Kim*, Sa-Ryang Kim**, Chul-Hyun Cha***

Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

**Department of Precision Mechanical Engineering, Kangnung Nat'l. University, Kangnung 210-702, Korea

***Dae-Yang Air Conditioning Co. Ltd., Seoul 137-070, Korea

(Received September 14, 2000; revision received March 2, 2001)

ABSTRACT: In the present study, the transient axi-symmetric numerical simulation of traffic ventilation induced by a train running through a 15.6 km-long tunnel is performed by using over 100,000 computational cells. With train running, three cases of ventilation schemes are simulated, which are the case of ventilation fans turned on, the case of no fan but ventilation shafts open, and the case of no fan and no shaft. Results of the ventilation flow rate and pressure transients are compared for the cases considered.

Key words: Ventilation(환기), Long rail tunnel(장대터널), Numerical simulation(수치해석), Mechanical ventilation(기계환기), Traffic ventilation(교통환기)

1. 서 론

영동선 동백산-도계간 철도 이설구간의 장대터널은 현재 국내 최장의 철도 터널로 설계되고 있고 전동차량과 디젤차량 운행이 모두 계획되고 있다. 전동차량의 경우에도 여객열차의 냉난방 및 객실내 전원공급을 위한 발전차의 연결이 불가피하므로 터널내 매연에 대한 환기대책의 수립이 필요하다. 일반적으로, 장대터널의 중간 몇 곳에 환기갱(Ventilation shaft) 및 송풍기를 설치하여 기계환기를 실시하는 경우가 많다. 그러므로, 다양한 경우의 환기방식과 교통환기력의 조합에 대한 환기를 검토할 필요가 있다. 열차터널의 경

우는 큰 규모로 인하여 설계단계에서는 실험을 하기가 힘들다. 따라서, 설계안을 검증하기 위하여 수치계산을 많이 하게 된다. 외국에서는 오래 전부터 터널내의 유동을 1차원으로 가정하고 터널내의 환기 시스템을 모델링하여 해석을 수행하였으며,⁽¹⁾ 많은 설계회사들이 이러한 프로그램을 설계에 이용하고 있다.⁽²⁾ 또한, 고속전철의 개발과 관련하여 3차원 해석도 많이 사용되고 있다.⁽³⁻⁷⁾ 국내에서도 고속전철이 천안역사,⁽⁸⁻⁹⁾ 남서울역사⁽¹⁰⁾ 및 대전통합역사⁽¹¹⁾를 통과하는 경우에 승객의 안전과 쾌적성을 위한 역사 내부의 풍환경과 태풍이 부는 경우 역사 건축물에 작용되는 풍압에 대한 수치 및 모형실험 연구가 진행되어 안전한 역사의 설계자료로 활용되어 왔다. 또한, 연구의 결과가 국내외에 소개되어 좋은 평가를 받아 왔다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 또한, 이러한 수치적 연구는 지하철⁽¹⁶⁾ 또는 도로터널⁽¹⁷⁾에 대하여도 적용되고 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-712-0799

E-mail address: nhur@ccs.sogang.ac.kr

***현재, (주)대상설비기술

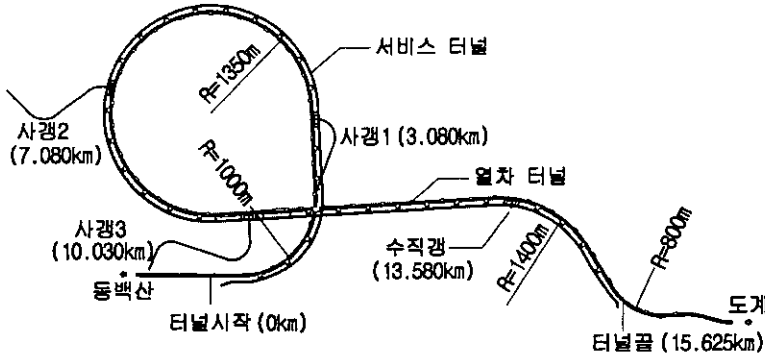


Fig. 1 Map of tunnel.

본 연구에서는 열차가 영동선 동백산-도계간 철도 이설구간의 터널 설계안(Fig. 1)에 대하여 열차가 장대터널구간을 통과할 때 터널내 환기량을 검토하여 터널 환기방식 및 환기설비의 선정에 대한 자료를 제공하고자 한다.

2. 터널제원

Fig. 1에 나타낸 본 연구의 대상인 터널은 총 길이가 15.625 km인 복선터널이며, 본선터널 단면적이 70.82 m², 환기갱 및 급·배기구가 설치된 확폭구간(길이 약 100 m)의 단면적은 85.92 m²이다. 환기구의 단면적은 댐퍼개방시 18 m², 환기팬가동시 급기구와 배기구 각각 9 m²이다. 환기팬은 급기구와 배기구에 각각 1대씩 설치되어 있으며 유량은 80 cms(m³/s)이다. 급기구와 배기구에서의 유동의 방향은 열차의 진행방향과 15° 기울어지게 설계되었으며, 댐퍼를 통한 유동은 열차의 진행방향과 수직이다.

터널에는 동백산 쪽의 입구를 기점으로 3,080 m, 7,080 m, 10,030 m, 13,580 m 지점에 사갱1, 사갱2, 사갱3, 수직갱의 순서로 모두 4개의 환기갱이 설치되어 있다. 동백산 쪽의 고도는 도계 쪽보다 약 400 m 정도 높아서 터널의 경사를 줄이기 위해 크게 한 바퀴 회전하게 설계되었다. 터널 입구 사갱1 사이에 회전반경 1,000 m 구간이 있고, 사갱1에서 사갱3 사이는 회전반경 1,350 m 구간이 있으며, 수직갱 근처에서 회전반경 1,400 m, 터널 출구 부근에서 회전반경 800 m의 곡선 구간이 있다.

또한, 설계에는 서비스 터널도 계획되어 있으나, 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 수치해석

3.1 해석내용

본 연구에서는 장대터널의 터널 환기방식 및 환기설비 선정 등의 타당성 등을 검토하기 위하여 장대터널에 디젤 및 전기 열차가 운행할 때에 터널내의 환기량 및 터널 벽면 등에 미치는 압력, 열차가 운행하며 배출한 배기가스 등의 오염물질 및 배출된 열 등이 터널내에 축적되지 않고 잘 환기되어 사라지는지를 연구한다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 장대터널의 환기방법은 크게 세 가지로 분류되어질 수 있는데, ① 터널에 환기를 위한 어떤 시설도 설치되어 있지 않고 단지 열차의 운행에 따른 피스톤 효과에 의해 환기가 이루어

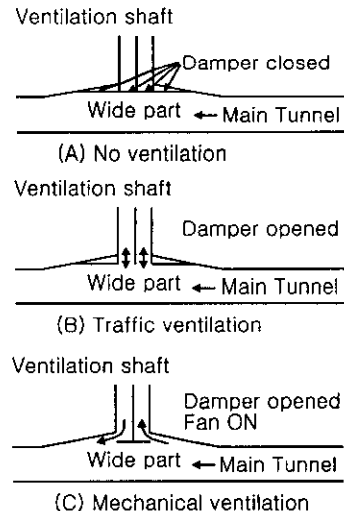


Fig. 2 Ventilation methods.

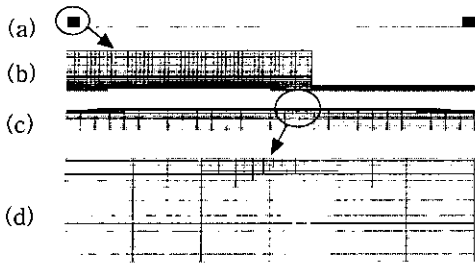


Fig. 3 Meshes for axi-symmetric analysis (a) All meshes (b) Entrance region and train (c) One of 4 wide parts for ventilation (d) Meshes around damper.

어지는 무환기 방식과, ② 환기갱이 설치되어 있어서 열차의 주행에 따라 환기가 되는 교통환기, 그리고 ③ 환기갱내에 송풍기가 설치되어 열차의 주행방향에 따라 동작하는 경우인 기계환기이다. 현재 설계된 터널의 경우에는 하행선(동백산→도계)은 교통환기를 적용하며, 상행선(도계→동백산)은 기계환기를 적용하여, 무환기의 경우와 비교 검토하도록 한다.

3.2 해석방법

본 연구에서는 STAR-CD® V3.05를 사용하여 계산을 수행하였다.

열차가 터널을 통과하는 경우에 대하여 유동해석을 하기 위해서 열차와 열차에 접한 영역을 이동격자로 처리하여 계산하였다.

터널이 단면적에 비하여 길이가 매우 길고 곡률반경이 크기 때문에 열차가 지나는 터널은 직선으로 가정하였으며, 열차와 터널의 모양을 단면적이 같은 원형단면으로 가정하여 축대칭 해석을 하였다. 고도차에 의한 영향은 고려하지 않았으며 수평터널로 가정하였다. 격자생성시 환기갱의 길이는 무시하였으며, 열차터널의 벽면에 환기구(덤퍼 및 급·배기구)가 있는 것으로 가정하

여, 경계조건으로 처리하였다. 계산격자는 Fig. 3에 나타내었으며, 모두 100,598개로 구성되어 있다.

경계조건으로는 터널, 열차 표면 및 바닥에는 벽면조건을 사용하였고 터널 입구와 출구에서는 압력조건(대기압)을 사용하였으며, 기계환기의 경우에는 환기갱의 입구와 출구에 모두 입구조건을 주어 설계된 환기팬의 유량을 흡입 또는 배출하도록 하였다.

본 연구에서 열차의 속도는 시속 50 km로 마하수는 약 0.04이지만 터널 내부에서 pressure transient가 발생 가능하므로 비정상 압축성 유동해석을 하였으며, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 열차의 길이는, 열차의 길이가 짧을 때 열차의 운행에 의한 교통 환기량이 가장 작으므로 열차 편성표를 참고하여 열차의 길이가 가장 짧을 때인 160 m(8량 편성)로 설정하였다. 계산조건을 Table 1에 정리하였다.

4. 결과 및 검토

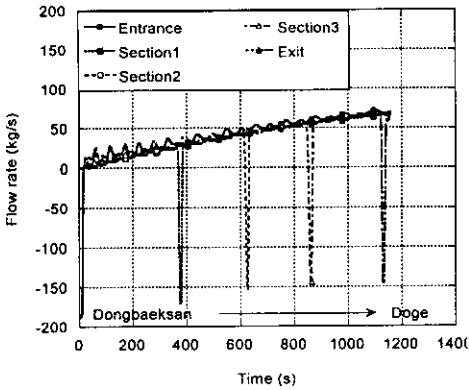
본 연구에서는 SGI Origin2000 Server(4개의 R1000 180MHz CPU, 2GB RAM, 54GB HDD)를 사용하여 계산을 수행하였으며, 1 CPU만을 이용하여 1 time step당 평균 1분 30초의 계산시간이 소요되었다. 본 연구에서 작성한 격자를 이용하여 계산을 수행하였을 때, 열차가 약 15.6 km의 터널을 통과하기 위해서는 터널 입·출구 부분과 열차 길이를 고려할 때, 총 4,036개의 time step이 필요하며, 총계산시간은 1가지 경우당 약 100 시간 정도 소요되었다.

4.1 환기량 비교

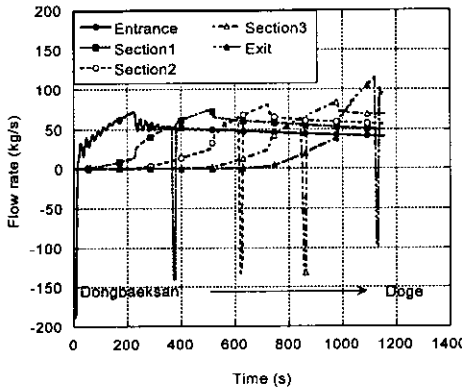
Fig. 4에 터널내의 5지점(입구(0 m, 동백산 쪽), 중간부1(5,080 m), 중간부2(8,555 m), 중간부3(11,805 m), 출구(15,626 m, 도계 쪽))에서의 시간에 대한 질량유량의 변화를 나타내었다.

Table 1 Cases for ventilation simulation

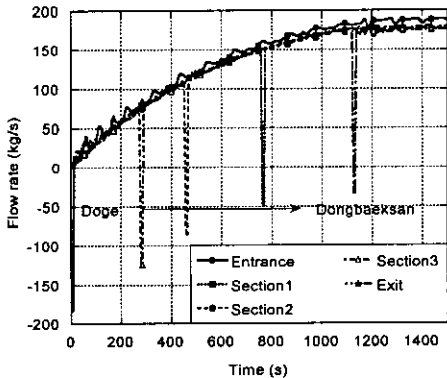
Case	Damper	Fan	Moving direction	Scalar transport equation solved	
				Concentration	Heat transfer
No ventilation	Closed	OFF	Down	○	×
Traffic ventilation	Open	OFF	Down	○	○
Mechanical ventilation	Open	ON	Up	○	×



(a) No ventilation



(b) Traffic ventilation



(c) Mechanical ventilation

Fig. 4 Flowrate through each section of the 3 cases.

무환기(a)의 경우는, 열차가 지나가면 대략 50~70 kg/s의 교통환기량이 생기며 열차가 환기량 측정지점을 통과하는 시간에는 약 200 kg/s의 교통환기량이 반대 방향으로 열차가 통과하는 시간

동안 생기는 것을 알 수 있다. 또한, 환기량 곡선으로부터 터널 각 지점에서의 질량유량은 진동하며 증가하지만 시간이 지날수록 그 진폭은 줄어드는 경향성을 보여주고 있다.

교통환기(b)의 경우는 무환기의 경우와 같이 열차가 지나가면 대략 50~70 kg/s의 교통환기량이 발생하며 터널에 열차가 진입하면서 발생한 압축파는 터널내의 공기를 압축하여 밀어내게 되므로 입구 근처의 유량은 증가하게 되지만 유동이 열려 있는 사갱을 만나서 유동의 일부가 사갱으로 빠져나가게 되면서 입구부분의 유동은 정상상태에 이르게 된다. 중간부1의 경우는 열차가 사갱1의 위치를 지나면 열차에 의해 유도된 열차풍이 사갱1로 빠져나가지 못하고 중간부2의 위치를 지나게 되므로 질량유량이 증가하다가 유동이 사갱2를 통하여 일부가 빠져나가면 정상상태에 이르며 이러한 현상은 중간부2, 중간부3 및 출구에서도 적용되어 질량 유량이 증가하고 정상상태에 이르게 된다. 각 환기구에서의 환기량은 열차가 지나가기 전에는 열차 선두부의 높은 압력으로 인하여 약 50 kg/s 유출이 발생하며, 열차가 지나가고 나면 열차 후미의 부압으로 인하여 점점 줄어서 약 20 kg/s의 유입이 발생한다. 교통환기시의 환기경의 경우 열차가 다가올 때는 배기구의 역할을 하며 열차가 지나간 후에는 급기구의 역할을 하는 것으로 나타났다.

기계환기(c)의 경우는, 열차가 지나가면서 환기팬이 가동되면 최고 170 kg/s 정도의 환기량이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 환기량의 증가형상은 무환기의 경우와 비슷한 경향성을 나타내었다. 질량유량은 열차에 의해 유도된 환기량과 환기 시스템 가동에 의한 환기량의 합 이상으로 나타나 3가지 환기방법 중에서 가장 많은 환기량이 나타났다.

무환기와 기계환기의 경우는 터널에 열차가 진입하면서부터 환기량이 계속 증가하는 경향을 보이는 반면에 교통환기는 가장 빠른 속도로 환기량이 증가하여 일정수준에 도달하면 그 값을 계속 유지하는 경향을 보였다. 교통환기가 기계환기보다 초반에 더 빠른 질량 유량의 증가를 보이는 것은 교통환기의 경우가 더 유동저항이 적기 때문으로 판단된다. 최대 환기량의 경우, 기계환기는 약 180 kg/s, 교통환기는 약 70 kg/s, 무환기는 약 70 kg/s 정도의 값을 보여준다.

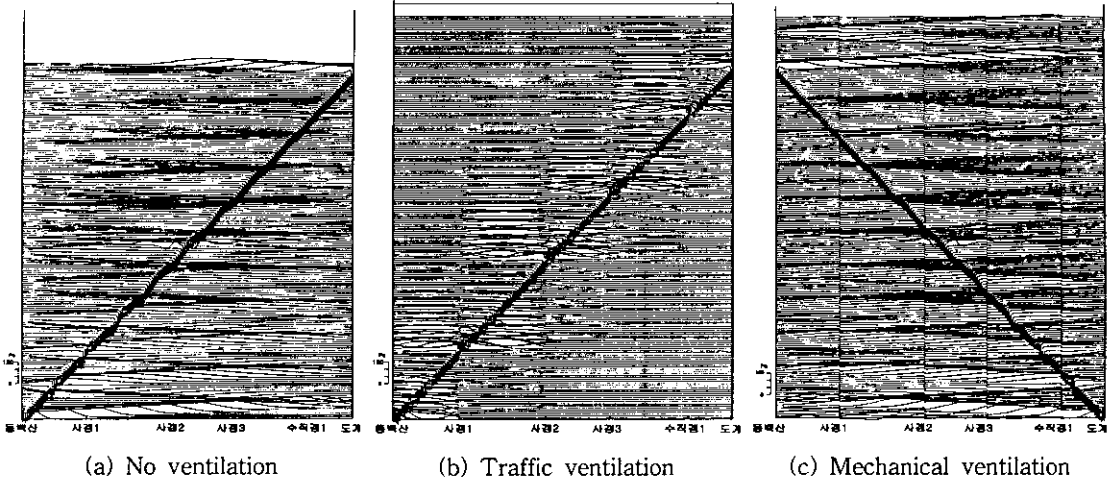


Fig. 5 Pressure variation along the tunnel at every 20 time step.

무환기와 교통환기의 경우 최대 환기량은 같지만 교통환기의 경우가 좀더 고른 분포를 보여주었으며 기계환기의 경우는 무환기나 교통환기와 비교하여 2배 이상의 환기량이 나타났다.

4.2 압력변동 비교

Fig. 5에 시간에 따른 압력변동을 나타내었다. 열차가 출발해서부터 5.76초(20 time step)의 간격으로 아래서 위로 열차가 진행함에 따라 터널 내부의 압력을 그린 것이다.

무환기(a)의 경우는 열차가 터널에 진입하면 압축파가 형성되며, 이 압축파가 출구에서 팽창파로 반사되어 나오는 것과, 압축파와 팽창파가 터널내에서 음속으로 반복적으로 전파되고 있는 것과, 열차가 터널을 빠져나가면서 팽창파가 형성되며 열차가 터널을 나간 후에도 팽창파가 전파되고 있는 것을 확인할 수 있다. 낮은 마하수임에도 불구하고 압축파와 팽창파가 발생하여 피스톤 효과가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 교통환기(b)의 경우는, 열차의 이동에 의하여 발생된 압축파가 환기경을 지나서 전파되지 못하고 들 또는 세 개의 환기경 사이에서만 왕복하는 것을 보여주고 있으며, 열차가 터널을 통과한 후에 압축파와 팽창파는 빠른 속도로 소실되는 것으로 나타났다. 따라서, 열차가 있는 구간에서만 압력변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 기계환기(c)에 대하여는, 터널에 열차가 진입하면서 발생된 압축파가 음속으로 전파되며 압축파는 출구

에서 반사되어 팽창파로 열차 진행 방향의 반대 방향으로 전파되며 이런 현상이 반복되는 것을 보여주며, 열차가 터널을 통과한 후에도 압축파와 팽창파는 계속 전파되고 있다.

압력변동량은 무환기와 기계환기의 경우는 약 150 Pa 정도이고, 교통환기의 경우는 그보다 조금 작은 130 Pa로서 벽면에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예측되며, 현재 선택된 팬의 경우는 성능곡선으로부터 약 3~8m³/s 정도의 유량 변화가 생길 수 있다.

Fig. 6은 터널내 임의의 지점에서의 시간당 압력변동률($\Delta P/\Delta t$)을 나타낸 것으로 그 값의 범위는 7~15 Pa/s 이내로 나타났다. Bechtel 보고서⁽¹⁸⁾에 의하면 정거장에서의 최대 기류속도는

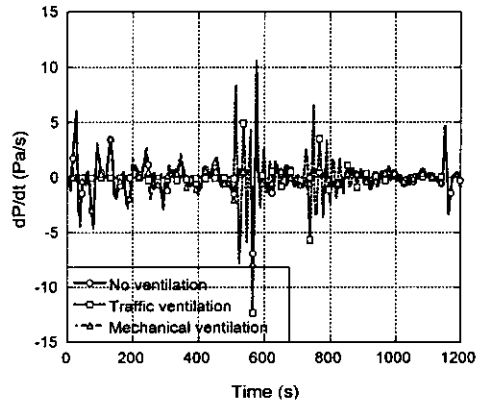


Fig. 6 Pressure gradient of each ventilation method at a position in the tunnel.

3.56 m/s 이내, 최대 압력변동은 700 Pa 이내이고 최대 압력변동률 423 Pa/s 이내이어야 정거장내의 시설 및 사람에 대하여 안전하다고 한다. 따라서, 혹시라도 터널내에 사람이 있는 경우에 열차가 지나간다고 가정하였을 때(선로보수원이 대기하는 경우 또는 사고로 인하여 열차의 승객이 대피하는 경우 등)에 대비하여 검토할 필요가 있다. 본 연구결과 압력변동률은 Bechtel 보고서의 기준에 비하여 훨씬 작은 값을 보이고 있으므로 안전하다고 할 수 있겠다. 그러나 이 수치는 열차의 속도에 따라서 변하기 때문에 현재 고려한 속도보다 더 빨리 열차를 운행하는 경우에는 다시 검토할 필요가 있을 것이다.

5. 결 론

(1) 무환기와 교통환기의 경우는 열차에 의해 유도되는 환기량인 70 kg/s이 발생하였으며, 기계환기의 경우는 환기팬 용량과 열차에 의해 유도된 환기량의 합보다 더 많은 180 kg/s의 환기량이 발생하였다.

(2) 압력변동은 세 가지 경우가 거의 비슷하며, 시간에 대한 압력변화율은 무환기의 경우가 교통환기와 기계환기보다 2배 정도 크다. 따라서 환기구를 열어 놓는 것이 압력변화율을 줄이는 데 도움이 된다.

(3) 본 연구대상 터널의 경우에 상행선의 경우는 기계환기를, 하행선의 경우는 교통환기를 적용하면 적절하다고 하겠다.

참고문헌

1. Casale, E., Charvier, J. M. and Lemaire, G., 1994, Tunnel ventilation system modelling, 8th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Liverpool, UK.
2. Subway Environmental Design Handbook, Volume II, U.S. Department of Transportation, Dec. 1997.
3. Aita, S., Tabbal, A., Mestreau, E., Montmayeur, N., Masvernati, F., Wolfhugel, Y. F. and Dumas, J. C., 1992, CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train, SAE Technical Paper, 920343.
4. Mestreau, E., Lohner, R. and Aita, S., 1993, TGV Tunnel Entry Simulations Using A Finite Element Code With Automatic Remeshing, AIAA Conference, Reno.
5. Ogawa, T. and Fujii, K., 1994, Numerical Simulation of Compressible flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 63-82.
6. Ogawa, T. and Fujii, K., 1997, Numerical Investigation of Three Dimensional Compressible Flows Induced By a Train Moving into a Tunnel, Int. Journal of Computers & Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 565-585.
7. Yang, X., Okajima, A., Kiwata, T. and Ohtuyama, S., 1999, Numerical Analysis of Unsteady Compressible Turbulent flows about a Train Passing through a Tunnel, Vehicle Aerodynamics and Wind Noise, SAE SP-1441, March, pp. 121-132.
8. Hur, N., 1995, A report on wind pressure distribution caused by a train in Chonan station, Report of KIST, KHSRCA.
9. Kim, S.-R., Lee, K. H., Ahn, I. K. and Hur, N., 1995, A study on the wind pressure distribution during high speed train passes through Chonan station, Proceeding (II) of KSME '95 Autumn Conference, KSME, pp. 115-119.
10. Hur, N., 1997, A study on the wind pressure distribution during high speed train passes through Nam-Seoul station, Report of ITRC, Sogang Univ.
11. Hur, N., 1997, A study on the wind pressure distribution during high speed train passes through Taejon station, Report of ITRC, Sogang Univ.
12. Hur, N., Kim, W. and Lee, S., 1997, Study on wind pressures in a high speed train Nam-Seoul station, Proceeding of '97 STAR-CD Users' Conference.
13. Hur, N. and Kim, H.-D., 1998, Flow analysis on the field of high speed train re-

- search, Proceeding of '98 KSME Fluid Engineering Division Conference, Seoul, pp. 121-132.
14. Hur, N., Kim, S.-R., Kim, W. and Lee, S., 1998, Wind Pressure Transients inside a Station Caused by a Passing High Speed Train, Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., Pusan, Korea, Oct., pp. 173-176.
15. Jan. 1999, CFD in the station, Passenger Terminal World, p. 11.
16. Lee, C. S., 1996, Report of KIST, BSII677-5765-2.
17. Yang, P.-S., Cho, Y.-J. and Lee, J.-H., 1998, A study on the ventilation in a long road tunnel, KSME J.(B), Vol. 22, No. 8, pp. 1091-1100.
18. Bechtel International, Inc. and ICF Kaiser Engineering, Inc., Korea High Speed Rail Project Aerodynamic Study Final Report, May, 1996.