

고속철도차량의 유리창 압력에 관한 연구

A Study on the Window Glass Pressure for High-speed Train

권혁빈¹ · 장대성[†]

Hyeok-bin Kwon · Dae-Sung Chang

Abstract In order to decide the strength requirement of the window glass for the high-speed train, the pressure change during the passage of the EMU type high-speed train has been numerically simulated. Based on the calculation results, the pressure difference between the inner and outer pressure of the cabin has been calculated to yield the amount of load acting on the window glass of the cabin. To simulate the pressure field generated by the high-speed train passing through the tunnel, computational fluid dynamics based on the axi-symmetric Navier-Stokes equation has been employed. The pressure change inside a train has been calculated using first order difference approximation based on a linear equation between the pressure change ratio inside a train and the pressure difference of inside and outside of the train.

Keywords : Glass Strength, Pressure Transient, Tunnel, Computational Fluid Dynamics, High-speed Train

초 록 분산형 고속철도차량의 유리창 강도조건을 설정하기 위하여 열차가 터널을 통과하는 동안의 압력변동이 수치적으로 모사되었다. 계산결과를 토대로 객실 내외의 압력차이가 계산되었고, 객실 유리창에 작용하는 하중의 크기가 도출되었다. 열차가 터널을 통과하는 동안의 압력장을 모사하기 위하여 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 기반한 전산유체역학이 이용되었다. 차량 내부의 압력변동은 차내 압력변화율과 차 내외부 압력변동의 선형 관계식에 근거한 1차 차분식을 이용하여 계산되었다.

주요어 : 유리창 강도, 압력 변동, 터널, 전산유체역학, 공기역학, 고속열차

1. 서 론

고속철도차량이 터널에 진입하게 되면 터널 내의 공기를 압축하여 터널 내에 압축파가 생성되며, 생성된 압축파는 음속으로 터널 내를 진행하다가 끝단에서 반복적으로 반사되면서 열차 주위의 압력을 급격히 변동시키게 된다. 열차 주위의 압력이 변동하는 반면, 객실 내의 압력은 상대적으로 기압 변화가 작기 때문에 객실 유리창은 내외부의 압력 차이를 갖게 된다. 전산유체역학의 발달로 열차와 터널 주위의 상대적인 운동을 고려한 유동장 해석이 가능해짐에 따라 수치적인 방법으로 터널 내의 압력변동을 평가하는 방법이 개발되었다. 권혁빈[1,2]은 Navier-Stokes 방정식을 이용한 축대칭 수치해석 프로그램을 개발하여 열차의 전두부 형상을 고려한 터널 통과 시의 터널 내부 및 입출구 유동장을 해석하였으며, 또한, 미기압파를 최소화시키는 최적의 전두부 면적분포에 대하여 연구하였다[3]. 또한, 고속철도차량의 객실 내 압력변동을 평가하여 국내 기준치에 해당하는 철도차량 안전기준에 관한 지침의 대한 부합 여부를 평가하였다[4]. 본 연구에서는 고속열차 객차의 유리창 강도조건을 설정하기 위하여 고속열차의 터널 통과 시 발생하는 터널 내 압

력변동을 수치적으로 모사하고, 이를 토대로 차체의 기밀도를 고려한 실내외 압력 차이를 계산하여 객차 유리창에 가해지는 하중의 크기를 도출하였다. 터널을 통과하는 열차 외부의 압력 변화를 모사하기 위하여 축대칭 Navier-Stokes 방정식에 기반한 전산유체역학을 이용하였으며, 차량 내부의 압력변동의 계산에는 차내 압력변화율과 차 내외부 압력변동의 선형 관계식에 근거한 1차 차분식을 이용하였다. 다양한 조건에서의 유리창 강도조건을 도출하기 위하여 열차의 속도를 변화시켜가면서 유리창에 가해지는 압력을 평가하였다.

2. 수치해법

2.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구에서는 식 (1)에 나타난 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. Q 는 보존량 벡터, E , F 는 플럭스 벡터, H 는 소스항을 의미하며, F_v , E_v 는 점성 플럭스 벡터, H_v 는 점성 소스항을 나타낸다. 공간 변수들은 터널 직경으로 무차원화 하였으며, 나머지 변수들은 자유류 값들로 무차원화 하였다. 대류항의 플럭스는 Roe의 FDS를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였고 시간적분법은 AF-ADI를 사용하였다.

[†]교신저자 : 우송대학교 철도차량시스템학과
E-mail : dsjang62@wsu.ac.kr

¹한국철도기술연구원 초고속열차연구실

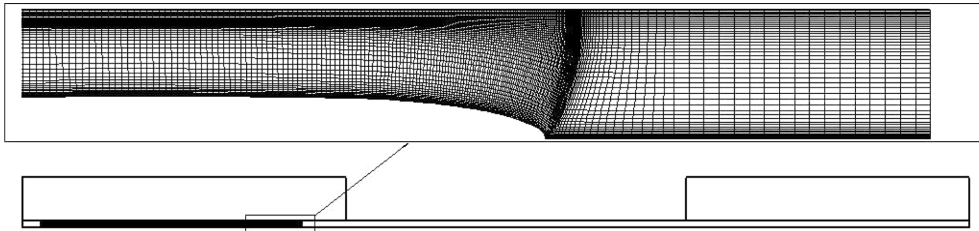


Fig. 1 Computational domain and mesh

$$\partial_t Q + \partial_x E + \partial_y F + H = \frac{1}{Re_c} (\partial_x E_v + \partial_y F_v + H_v) \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T$$

$$E = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (\rho e + p)v]^T$$

$$F = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (\rho e + p)v]^T$$

$$H = \frac{1}{y} [\rho v, \rho uv, \rho v^2, (\rho e + p)v]^T$$

열차의 초기 조건은 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수도 있는 수치적인 압축파를 피하기 위해서 완만한 출발 (Smooth start) 기법[1]을 사용하였다. 이 방법은 열차를 정지 상태에서 서서히 주행속도까지 가속시키는 것으로서 수치적 파동을 완전히 제거할 수 있을 뿐 아니라 속도 변화가 완만하고, 짧은 거리에서도 출발이 가능하므로 계산 시간을 크게 감소시킬 수 있다. 수치 해석의 경계 조건으로서 터널 벽면에서의 유동 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직한 운동량 방정식을 통하여 구할 수 있다. 또한 원방 경계조건은 자유 흐름 조건과 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량의 외삽을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고, 무반사 조건을 부여하였다.

2.2 계산 조건

수치해석을 위하여 대상 시스템을 선정하고 공력모델을 구축하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 객실 내 압력변동 평가의 대상 열차는 현재 개발 중인 최고속도 400km/h의 HEMU 열차이다.

터널의 경우에는 호남고속선에 위치한 노티터널, 학천터널, 장재터널 및 계룡터널을 대상으로 선정하였으며, 각각 길이가 300m, 1140m, 3345m 및 7225m로서 터널 길이에 따른 압력변동 특성의 파악을 비교할 수 있도록 하였다.

3. 해석 결과

3.1 터널 내 압력 변동

열차의 터널 통과 시 발생하는 터널 내부의 압력변동은 본질적으로 열차의 진입 시 발생하는 압력파에 의해 지배되는 현상이며, 터널과 열차의 길이의 다양한 조합에 대하여 압력변동의 양상은 각각 다르게 나타난다. 하지만, 압력변동의 크기를 결정짓는 가장 주요한 인자는 열차의 전두부 진입 시

Table 1 Train model

train type	HEMU
총 편성 길이	197.6m
동력차 최대 단면적	10.268m ²
Nose slenderness(a/b)	13.67

Table 2 Tunnel model

Tunnel type	T4	T5	T6	T7
노선명	호남고속선	호남고속선	호남고속선	호남고속선
기준 단면적	96.7m ²	96.7m ²	96.7m ²	96.7m ²
터널명	노티터널	학천터널	장재터널	계룡터널
터널길이	300m	1140m	3345m	7225m

발생하는 진입 압축파(Entry Compression Wave)의 크기이며, 이는 열차 속도와 열차/터널 단면적비에 주로 의존하는 함수로 알려져 있다.

HEMU 열차가 400km/h의 속도로 터널을 통과하는 경우의 터널 내 압력변동을 터널길이와 시간에 대한 contour로 Fig. 2에서 Fig. 5에 나타내었다. 터널의 길이가 짧은 경우에는 압력파의 반사가 상대적으로 자주 일어나기 때문에 열차 주위 압력변동이 심하게 일어나게 된다. Fig. 2에서 터널 길이가 300m일 경우에는 열차 후미부가 터널에 진입한 직후에 진입 압축파가 반사된 팽창파가 입구에 도달하여 압축파로 다시 반사되면서 열차 후미부 진입에 의한 팽창파와 상

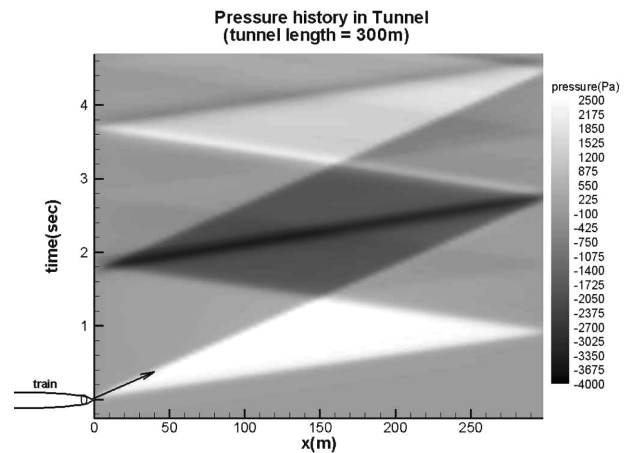


Fig. 2 Pressure field in tunnel(tunnel length=300m)

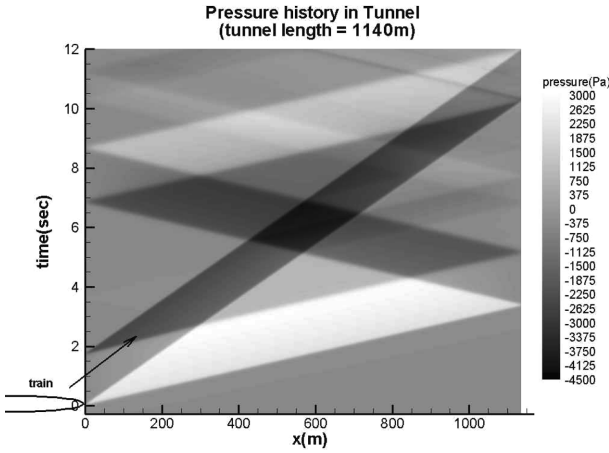


Fig. 3 Pressure field in tunnel(tunnel length=1140m)

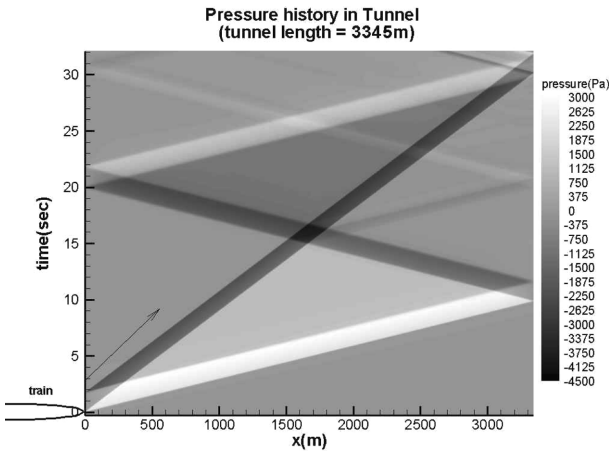


Fig. 4 Pressure field in tunnel(tunnel length=3345m)

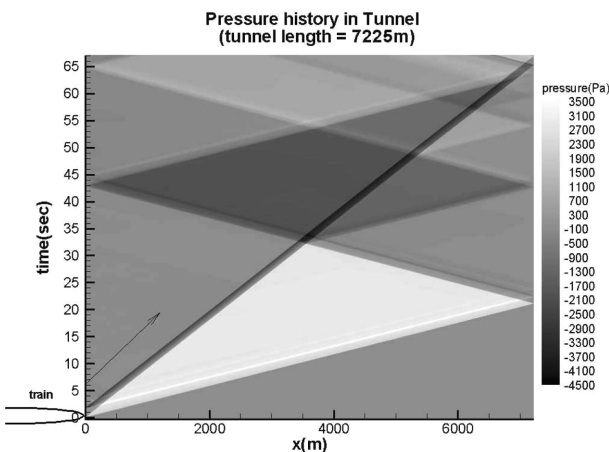


Fig. 5 Pressure field in tunnel(tunnel length=7225m)

당부분 겹쳐지는 것을 알 수 있다. 반면, 터널 길이가 길어질수록 압력파가 반사되기까지의 시간 간격은 점점 더 길어지게 되며, 가장 긴 터널(7225m)의 경우에는 열차가 터널에 진입한 이후 터널을 통과하는 동안 크게 두 번의 압력변동 밖에 겪지 않음을 알 수 있다.

3.2 객실 내외 압력 변동

터널 통과 시 차량 외부에서는 압력이 심하게 변화하며, 이에 따라 차량 내부에서도 압력변동이 발생하게 된다. 이때 차량 내부 압력변화는 아래 식(2)와 같이 차량 내외부 압력차에 비례하는 것으로 가정할 수 있다[4].

$$\frac{dP_{internal}}{dt} = \alpha(P_{external} - P_{internal}) \quad (2)$$

위의 식(2)를 시간에 대해 차분화시켜 나타내면 아래 식(3)과 같다.

$$P_{internal}^{n+1} = P_{internal}^n + \alpha(P_{external}^n - P_{internal}^n)(t^{n+1} - t^n) \quad (3)$$

한편 열차의 기밀도는 3000Pa에서 1100Pa까지의 압력강 시간으로 정의한다[5]. 고속철도차량의 경우는 압력강 시간은 18sec 이상으로 규정되어 있는데, 이에 해당하는 식(2)의 계수 α 는 0.05573이다. Fig. 6에는 이때의 열차내부 압력 변화를 나타내고 있다.

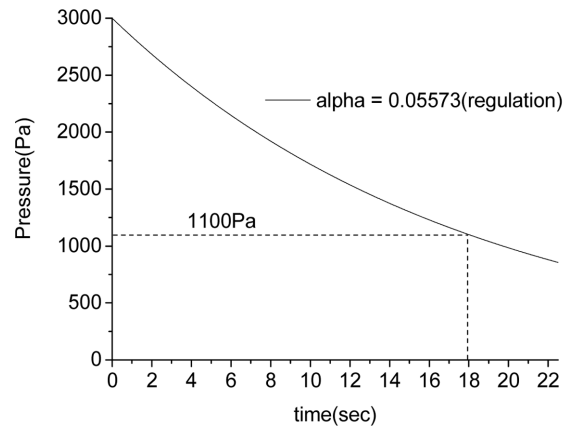


Fig. 6 Pressure change in the train passenger cabin

Fig. 7에서 Fig. 10에는 각각의 터널 길이에 대하여 계산된 실내의 압력차를 나타내고 있다. 수치해석을 통해 열차 표면의 압력을 계산한 후 실내 압력을 두 가지 시나리오로 가정하여 실내외 압력차를 계산하였다. 먼저, 열차의 기밀도가 Fig. 6에 나타난 국내 고속열차 기준[5]을 준수하는 것으로 가정하게 되면, 실내 기압은 실외 기압과 실내 기압의 차이에 비례하여 변동하게 되는데, 이를 최소기밀 시로 정의하여 해석하였다. 또한, 열차가 완전한 기밀 상태라고 가정할 경우 실내 압력은 실외 압력과 상관없이 일정한 값을 유지하게 되는데, 이를 완전기밀 시로 정의하였으며, 이 경우에는 실외 기압이 곧 실내외 압력차이가 된다.

그림에서 터널 길이가 길어질수록 열차 주위의 압력은 좀 더 오랜 시간 동안 저압 상태를 유지하게 되며, 완전기밀의 경우에는 이러한 실외의 저압 환경에 의해 음의 압력차(유리창 내측에서 외측으로 압력 작용)를 나타내게 된다. 그러나, 최소기밀 조건에서는 외부의 저압 환경에 대해 실내의 압력이 점차 낮아지기 때문에 실내외 압력차가 시간에 따라 완

Table 3 Pressure difference on glass during tunnel passage

차량 기밀조건	300m		1140m		3345m		7225m	
	최소	최대	최소	최대	최소	최대	최소	최대
완전기밀 시	-3544.6	385.8	-4155.4	329.9	-4054.7	328.3	-4238.2	319.3
최소기밀 시	-3465.8	539.9	-3791.0	856.3	-3077.9	1775.3	-3432.0	617.1

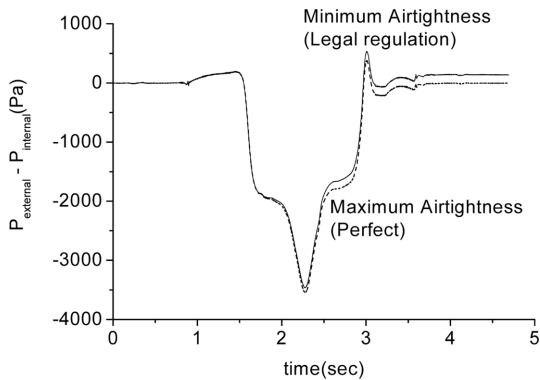


Fig. 7 Pressure difference on glass(tunnel length=300m)

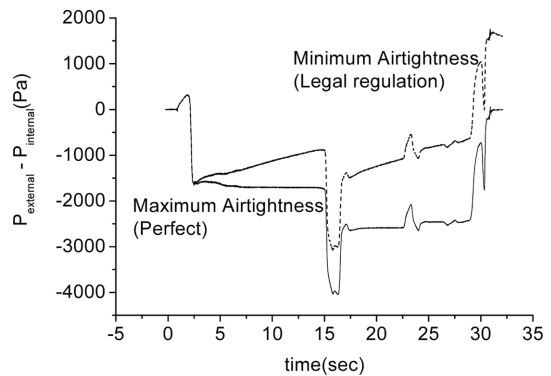


Fig. 9 Pressure difference on glass(tunnel length=3345m)

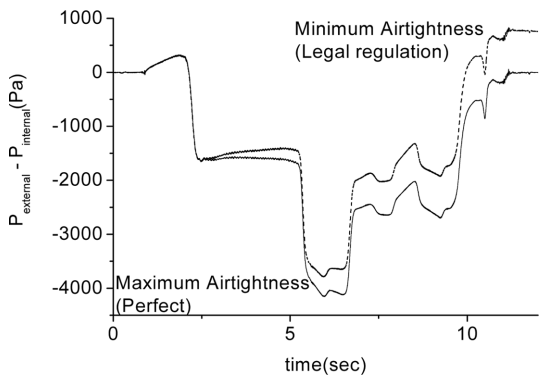


Fig. 8 Pressure difference on glass(tunnel length=1140m)

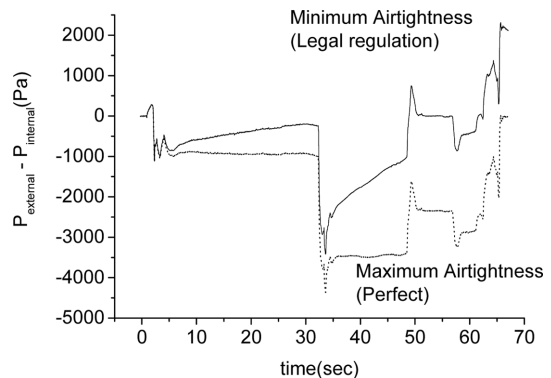


Fig. 10 Pressure difference on glass(tunnel length=7225m)

화되는 것을 알 수 있다. 열차가 터널에서 나오는 순간 완전기밀의 경우에는 곧바로 압력차가 0으로 돌아오지만, 최소기밀의 경우에는 열차의 터널 통과 중에 실내의 압력이 낮아졌기 때문에 일시적으로 실내 압력이 실외보다 더 낮아져서 양의 압력차(유리창 외측에서 내측으로 압력 작용)를 나타내게 되며, 이는 시간이 지남에 따라 점차 감소하게 된다.

Table 3에는 Fig. 7-Fig. 10에 나타난 터널 길이 별 실내의 압력차의 최대값 및 최소값을 정리하여 나타내었다. 완전 기밀 시 차내 방향으로서는 터널 길이 1140m에서의 329.9 Pa이 최대로 나타났고, 차외 방향으로서는 터널 길이 7225m에서의 4238.2Pa의 최대값을 나타내었다. 유리에 가해지는 공기압의 영향이 방향에 무관하고 가정할 경우, 완전 기밀 조건에서 기대되는 실내의 압력차의 최대값은 4238.2Pa로 생각할 수 있다. 이와 같은 방식으로 최소기밀 조건에는 터널 길이 1140m에서의 3791.0Pa이 실내의 압력차의 최대값으로 생각할 수 있다.

이상의 각 터널 길이에 따른 실내의 압력차의 분석결과를

바탕으로 각 차량 기밀도 조건과 열차 주행 조건에서의 최대 압력차를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 나타나는 바와 같이 단독 주행의 경우에는 완전기밀 시에 4238.2Pa이 최대 실내의 압력차로 나타났으며, 교행 시에는 이의 2배인 8476.4Pa로 나타났다. 최소기밀 시에는 단독 주행 시 3791.0Pa, 교행 시에는 7582.0Pa로 완전기밀 시에 비해 약간 작게 나타났다. 차량의 기밀도는 완전기밀과 최소기밀 사이의 상태에 있으므로 두 경우 중 가장 큰 경우인 8476.4Pa이 본 계산조건에서 유리창에 가해지는 가장 큰 압력이라고 볼 수 있다.

이상의 실내외 압력차의 분석은 차량이 단독으로 터널을 통과할 경우를 고려한 것이며, 두 대의 차량이 터널 양 끝단에서 각각 진입하여 교행할 경우에는 각각의 열차가 야기하는 압력변동의 중첩되어 나타난다고 볼 수 있는데, 두 열차의 진입하는 시간의 간격과 터널의 길이에 따라 매우 민감하게 변화하게 되며, 때로는 압력파가 서로 상쇄되어 압력변동이 없고 때로는 서로 중첩되어 큰 압력변동을 야기할

수도 있다. 그러나, 터널 길이와 진입 시격의 모든 조합에 대해서 계산을 수행하는 것은 매우 방대한 계산이 필요하므로 본 검토에서는 단독주행 시의 차내외 압력변동값에 대해 교행 시에는 그 2배를 넘지 않는다는 사실을 이용하여 간단하게 교행 시의 차내외 압력변동값을 도출하였다.

Table 4 Maximum Pressure difference on glass during tunnel passage

차량 기밀조건	교행 여부	
	단독	교행
완전기밀 시	4238.2	8476.4
최소기밀 시	3791.0	7582.0

4. 결 론

본 연구에서는 고속열차 객차의 유리창 강도조건을 설정하기 위하여 고속열차의 터널 통과 시 발생하는 터널 내 압력변동을 수치적으로 모사하고, 이를 토대로 차체의 기밀도를 고려한 실내외 압력 차이를 계산하여 객차 유리창에 가해지는 하중의 크기를 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실내외 압력차는 열차속도, 터널 단면적 뿐만 아니라 터널 길이에 대해서도 의존하므로 이를 고려하여 유리창 강도조건을 구해야 한다.

(2) 분산형 고속철도차량 모델이 400km/h 로 주행할 경우 단독 주행 시 내외부 최대 압력차는 4238Pa로 나타났으며, 교행을 고려할 경우 객실 유리창에 가해지는 최대압력은 8476.4 Pa을 초과하지 않을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 차세대고속철도기술개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H.B. Kwon (2001) A Study on the Unsteady Compressible Flow Field Induced by a High-speed Train Passing through a tunnel, *Seoul National University, a doctoral dissertation.*
- [2] H.B. Kwon, T.Y. Kim, D.H. Lee, M.S. Kim (2003) Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel, *Proceedings of the IMECH E Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 217, pp. 111-124.
- [3] H.B. Kwon, K.H. Jang, Y.S. Kim, K.J. Yee, D.H. Lee (2001) Nose Shape Optimization of High-speed Train for Minimization of Tunnel Sonic Boom, *JSME International Journal Series C*, 44(3), pp. 890-899.
- [4] H.B. Kwon, S.W. Nam, J.H. Kwak (2009) Assessment of the Pressure Transient Inside the passenger Cabin of High-speed Train Using Computational Fluid Dynamics, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(1) pp. 65-71.
- [5] Guidance on railway vehicle safety, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs No. 2006-247.
- [6] H.B. Kwon, T.Y. Kim, D.H. Lee, M.S. Kim (2002) Hybrid Dimensional Approach to the Unsteady Compressible Flow-field Analysis around a High-speed Train Passing through a Tunnel, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 30(6), pp. 78-83.
- [7] H.B. Kwon, S.W. Nam, C.H. Cha (2006) A Numerical Analysis on the Pressure Field Around KTX Train Using the Standard Framework of CFD Analysis for Railway System, *Journal of the Korean Society for Railway* 9(5) pp. 1-6.
- [8] T. Maeda, T. Matsumara, M. Iida, K. Nakatani, K. Uchida (1993) Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel, *Proc. International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles*, Yokohama, Japan, JSME, 2, pp. 315-319.
- [9] A.E. Vardy (1993) Measured pressures in a very high speed tunnel, *The International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles.*

접수일(2010년 2월 19일), 수정일(2010년 4월 26일),
게재확정일(2010년 7월 4일)