

## 여객/화물 복합열차 HSB의 터널 공력특성에 대한 시뮬레이션 연구

노주현<sup>\*†</sup>

### A Numerical Study on Aerodynamic Characteristics in Tunnel for High Speed Combi Train-HSB

Joo-Hyun Rho<sup>\*†</sup>

*Key Words* : High speed combi train(여객복합열차), Aerodynamics(공기역학), Pressure wave(압력파), Tunnel micro pressure wave(터널미기압파), CFD simulation(전산유체해석)

#### ABSTRACT

The new high speed combi train prototype project was developed which named HSB. It runs over the speed of 330km/h. As the speed of the train exceeds over 300km/h, due to pressure change in tunnel, aerodynamic problems such as sudden drag increase, severe acoustic noise, passenger discomfort and tunnel pressure sonic boom were occurred. This aerodynamic characteristics in tunnel should be reviewed in early design state to enhance the performance and driving quality of new high speed train. In this paper, the aerodynamic characteristics in tunnel for HSB such as pressure waves in tunnel, a rate of pressure change in cabin and micro pressure wave that cause sonic boom outside tunnel are analyzed by 2D axisymmetric CFD simulations. The results are also compared with the value for ordinary high speed train like the KTX-Sancheon. It is helpful how to design the configuration of HSB train. Finally it shows that the HSB train was well designed in tunnel condition because all values fulfill the criterions on UIC code and Korean national regulations.

#### 1. 서론

한국 고속철도차량 역사에 있어 2004년 프랑스 알스톰사의 TGV레조(KTX-1) 모델을 최초 도입 개통한 이후, G7 고속차량(HSR-350x), 틸팅차량(TTX), 차세대 고속차량(HEMU-430x) 등 최고속도 향상 및 주행성능을 향상하는 연구가 꾸준히 추진되어 왔다. 또한 이를 바탕으로 양산 운용 차량인 KTX-산천, KTX-호남, 250km 분산형 차량 설계 제작 서비스 등과 같은 실용화 부분에서도 큰 성과를 이루었다. 나아가 현재 Fig. 1과 같은 300 km/h 급 여객/화물 복합열차(HSB), 2층 고속열차(KTX-DD) 및 고속화물열차(CTX) 등 다양한 형태의 고속차량이 연구 개발되고 있다.

고속열차 개발의 경우 빠른 주행속도에 의한 급격한 공력 저항 및 공력소음의 증가, 불안정성 등과 같은 문제점이 공기역학적 관점에서 연구되어 왔으며 유럽 선진국에서 통용되는 EN 규정에서도 철도차량의 공기역학 특성이 자세히 정

의되어 있으며 국제적으로도 차량 판매 및 개발시 기본사양으로 제시되는 추세이다.<sup>[1,2]</sup>

철도차량 공기역학은 크게 개활지 주행, 터널 주행, 측풍 상태의 주행, 교행 등으로 크게 구분되어 검토되고 있으며, 공기역학적 특성은 차량 형상 및 시스템에 따라 Fig. 2와 같이 주행저항, 차량 동력학, 주행 소음, 터널 압력파, 열차풍, 자갈비산 같은 현상과 밀접한 연관이 있다. 이는 승객의 승차감 향상, 친환경성, 안전도 향상, 에너지 효율화 및 사고예방을 위하여 지속적으로 연구되고 있다.<sup>[3]</sup>

특히 철도차량이 터널을 진출입하거나 터널 내부를 고속으로 주행할 경우 공기의 압축성 효과로 인하여 터널 내에서 서로 중첩과 상쇄를 반복하는 압력파가 형성되고 이로 인해 터널 외부로도 터널 미기압파가 방출됨으로써 주위 환경에 영향을 미치게 된다.<sup>[4-7]</sup> 따라서 터널과 교량이 많은 지역을 고속으로 운행하는 철도차량 개발에 있어서는 개념 설계 단계부터 열차의 터널 내 공력 특성은 면밀히 검토 되어야 한다.

\* 현대로템 기술연구소 고속차량개발팀(Hyundai Rotem Company, R&D Center, High Speed Train Development Team)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : jrho@hyundai-rotem.co.kr



Fig. 1 High Speed Combi Train - HSB

현재 국토교통과학기술진흥원 철도기술개발과제로 진행 중인 여객/화물 복합열차(HSB)차량은 다변화 되고 있는 고객의 요구에 즉각적으로 대응하고 고급 여객 운송 및 고속 택배 서비스 등을 동시에 제공하기 위하여 다양하고 창의적인 형태로 제안되었다. 화물공간과 승객공간의 배치에 있어서는 Fig. 3의 (a)에서와 보이는 바와 같이 Boeing-747 Combi 항공기와 유사한 수평배치 형식과 Fig. 3의 (b)와 같은 TGV-duplex 또는 신간선 E4 Max와 유사한 2층 형태, 즉 수직배치 형식이 검토 되었다. 본 연구에서는 현재 영업 운행 중인 KTX-산천 차량과 유사한 단층 형식 HSB 차량에 대한 터널 주행시의 공력 특성을 전산유체역학 시뮬레이션을 통하여 분석하였으며 KTX-산천 고속차량의 특성과 비교하여 신규차량 설계시 활용할 수 있도록 하였다.

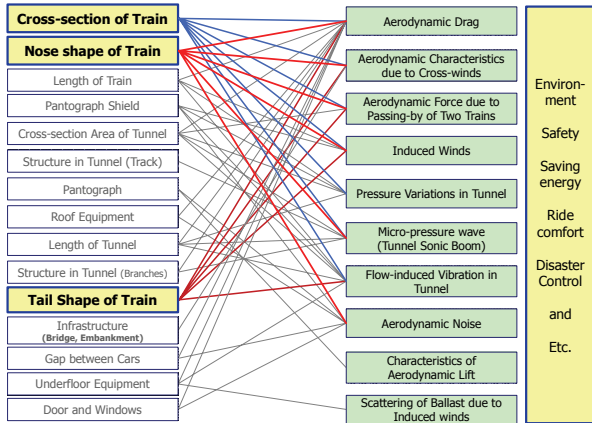


Fig. 2 Aerodynamics phenomena on high speed train

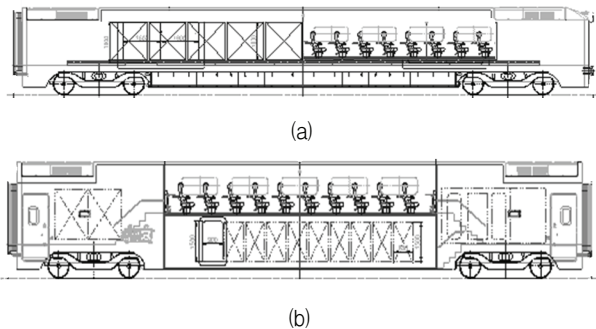


Fig. 3 (a) Single deck type HSB, (b) Double deck type HSB

## 2. 본 론

### 2.1. 전산유체 해석 기법 및 해석 모델

해석 대상인 HSB 차량은 동력 집중형 차량으로 KTX-산천과 동일한 동력차 및 차체 프로파일을 활용하고, 최대 축중 17톤의 독립대차를 적용하여 총길이 약 201 m의 8량 1편성 기준으로, 호남고속선로 및 수서 등 신규 고속선로를 설계최고속도 330 km/h로 운행하도록 설계되었다.

터널 공력특성의 경우 많은 연구 결과를 통하여 3차원 해석이 아닌 2차원 해석을 통해서도 충분히 현상을 예측 분석할 수 있음이 연구되었으며 다양한 모사실험으로 증명되었다.<sup>[6-10]</sup> 따라서 본 연구에서는 HSB 차량의 터널 진·출입, 주행시 공력성능을 평가하기 위하여 2차원 축대칭 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 식 (1)과 같이 유한체적법을 이용하여 지배방정식을 정의하고 전산유체해석 FLUENT<sup>[11]</sup> 프로그램의 동적격자기법(Dynamic mesh)을 사용하여 터널 내 압력변동과 이에 따른 터널 미기압파 방출을 예측하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + H = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v \quad (1)$$

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

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

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

$$H = 1/y [\rho v, \rho uv, \rho v^2, (\rho E + p)v]^T$$

$$E_v = [0, \tau_{xxp}, \tau_{xy}, u\tau_{xxp} + v\tau_{xy} - q_x]^T$$

$$F_v = [0, \tau_{xy}, \tau_{yyp}, u\tau_{xy} + v\tau_{yyp} - q_y]^T$$

$H_v =$

$$\left[ 0, \tau_{xy} - \frac{2}{3} \frac{y}{Re} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{v}{y} \right), \tau_{yyp} - \tau_{\theta\theta} - \frac{2}{3} \frac{\mu}{Re} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v}{y} \right) - \frac{2}{3} \frac{y}{Re} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{v}{y} \right), u\tau_{xy} + v\tau_{yyp} - q_y - \frac{2}{3} \frac{\mu}{Re} \frac{v^2}{y} - \frac{2}{3} \frac{y}{Re} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{v^2}{y} \right) - \frac{2}{3} \frac{y}{Re} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{uv}{y} \right) \right]^T$$

$Q$ 는 보존량 벡터,  $E$ 와  $F$ 는 플럭스 벡터,  $H$ 는 소스항을 의미하여,  $E_v$ 와  $F_v$ 는 점성플럭스 벡터,  $H_v$ 는 점성 소스항을 나타낸다. 위 방정식의 해를 구하기 위한 수치해석 기법으로는 공간 차분법에 대하여 Roe의 플럭스 차이 분할법을 이용하였으며, 고차의 공간 정확도를 위하여 2차 정확도의 풍상차분법(upwind method)을 사용하였다. 또한 시간 적분항에 대해서는 Euler 후방 차분의 내재적 방법을 사용하였다. 그리고 수치해석 시스템의 광역오차(global error)를 효과적으로 감소시키고 수렴성을 향상시킬 수 있도록 다중격자(multigrid) 기법을 적용하였다. 수치해석에 사용된 공기의 밀도는 이상기체방정식(ideal gas law)을 이용하여 계산하였으며, 점도(viscosity) 계산은 Sutherland 법칙을 사용하여 온도의 변화를 고려하여 계산하였다.

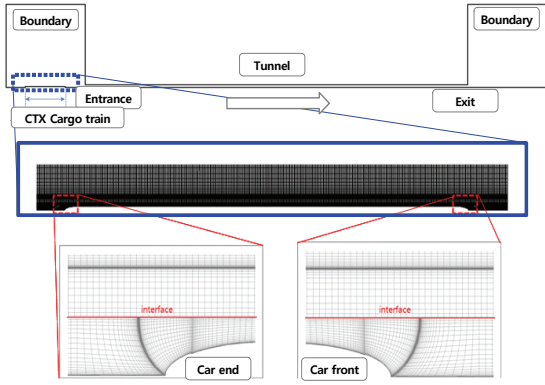


Fig. 4 CFD grid system for HSB

Fig. 4은 터널 압력과 유동해석 영역을 표현한다. 원방 경계조건은 자유흐름 조건과 유동의 방향에 따라 리만(Riemann) 불변량의 외삽을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고, 무반사 조건을 부여하였다. 그리고 차량과 터널구간의 벽면에 해당하는 부분은 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다. 전두부와 후미부 주위에는 격자의 밀집도를 높여서 정체영역에서의 유동장을 정확히 해석하고자 하였다. 그리고 전체 해석영역을 정렬격자계로 구성하여 격자로 인한 수치점성을 최소화하였으며, 또한 해의 정확도를 높이면서 격자수를 최소화하도록 하였다. 터널 압력과 해석에 사용된 전체 격자수는 950m길이의 궁현터널인 경우에 25만9천개이며, 1,930m의 봉명터널과 7,240m의 계룡터널인 경우는 각각 41만8천개와 115만1천개의 격자를 사용하였다.

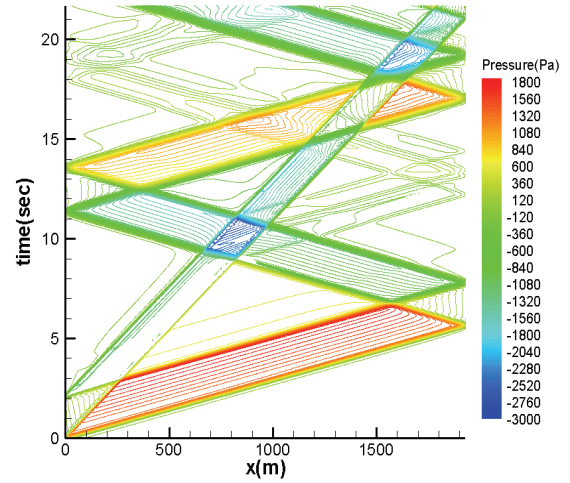
## 2.2. 터널 압력파

대표적인 호남고속선의 터널인 봉명터널(1,930 m)과 계룡터널(7,240 m) 내에서 HSB 차량이 330 km/h로 주행하는 경우, 차량이 터널을 진입할 때 나타나는 압축파와 출구에서 반사되어 나타나는 팽창파의 상쇄와 중첩 등의 상호작용으로 터널 내부 압력과 해석 결과는 Fig. 5, 6과 같이 터널 내 시간과 위치에 따라 급격한 압력변화가 발생한다.

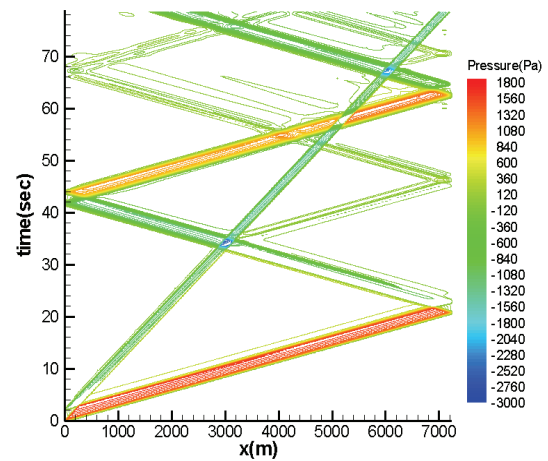
Table 1 Pressure change in tunnel

Train	Tunnel length[m]/area[m <sup>2</sup> ]	Tunnel pressure [Pa]		Amplitude
		min.	max.	
KTX-Sancheon (Kyungbu-line)	Kunghyun 950/107.2	-2,390.9	1,536.9	3,927.8
	Wonju 4,020/107.2	-2,300.95	1,541.15	
HSB (Honam & new-line)	Bongmyung 1,930/96.7	-2,836.1	1,747.5	4,583.6
	Kyeryong 7,240/96.7	-2,606.8	1,652.4	

\* Equivalent Radius [m] :  
Kyungbu line tunnel 5.84/ Honam line tunnel 5.55



(a) Bongmyung tunnel



(b) Kyeryong tunnel

Fig. 5 Pressure wave in tunnel (x-t diagram)

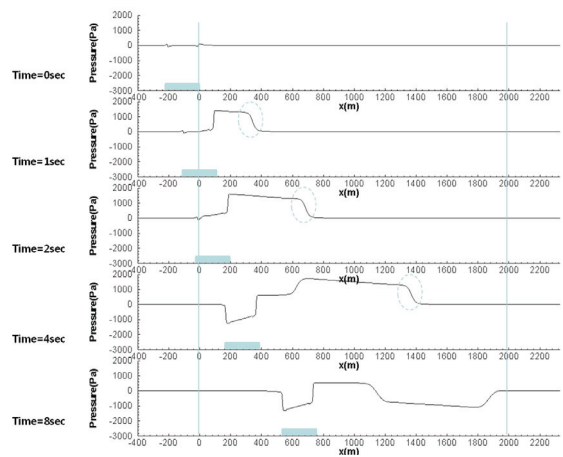


Fig. 6 Pressure propagation in tunnel

HSB의 호남고속선 터널 주행 시 터널 내부의 최대 최소 압력변동 값은 Table 1에서 정리된 바와 같으며 이 값은 기존 경부고속선로에서 서비스 중인 KTX-산천 고속차량과

비교하여 약 17% 증가하였다. 이는 차량의 표준 단면적 9.335 m<sup>2</sup>은 동일하더라도 터널의 단면적이 107.2 m<sup>2</sup>에서 96.7m<sup>2</sup>로 축소됨에 따라 터널대비 차량 단면적비가 약 0.087에서 0.097 증가한 것이 원인이다. 하지만 모든 조건에서의 압력 결과치는 UIC 779-11<sup>[12]</sup>에서 규정하는 제한요구조건 10 kpa 이하이며 터널 인프라스트럭처와 인터페이스상에도 문제가 없음을 예상할 수 있다.

### 2.3. 차량 내부 압력변동

고속차량이 터널 내부를 주행하는 경우 Fig. 7의 시뮬레이션 결과와 같이 터널 내부 및 차량 외부에서는 급격한 압력변동이 발생한다. 이로 인하여 기밀이 유지 되지 않는 경우는 차량외부의 압력변화가 직접적으로 승객 및 운전자에게 전달되며 이는 승객에게 이명감 및 피로감을 유발하게 된다. 따라서 터널에서 압력변동이 승객이 머무르는 공간인 cabin에 영향을 없도록 하기 위해서는 기밀성능을 우수하게 하여야 한다. 이를 위하여 차량 설계시 외부와 통하는 면적을 최대한으로 작게 하며 추가적으로 플러그 형식의 기밀도어 및 기밀 케이블 브라켓, 플랩이 장착된 공기조화장치 등이 사용된다.

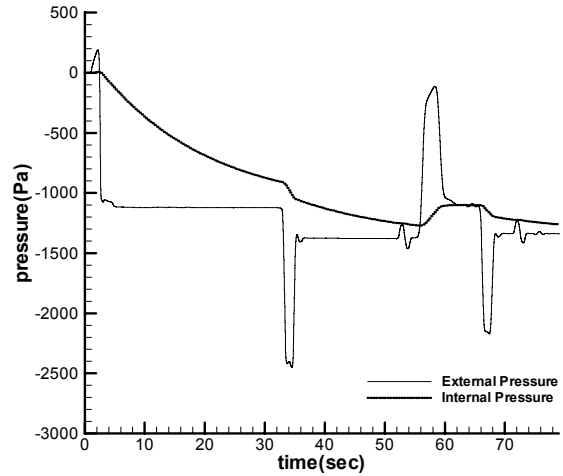
차량외부의 압력변동이 차량 내부에 영향을 미치는 정도를 나타내는 차량 내부 압력변화율은 식(2)과 같이 그 순간의 차량 내·외부 압력차에 비례하는 것으로 가정할 수 있으며 이때의  $\tau$ 를 기밀계수(pressure sealing coefficient)라고 정의하고 식(2)에의해 객실의 내부 압력변동은 지수함수를 따르게 되며 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dP_{in}}{dt} = \frac{1}{\tau}(P_{out} - P_{in}) \quad (2)$$

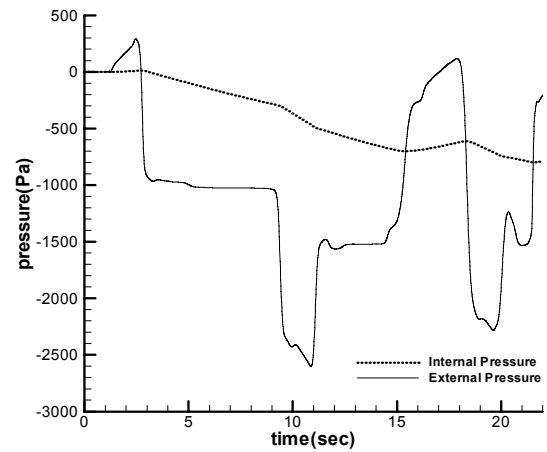
$$P_{in} = (P_{out}^0 - P_{in}^0)e^{-t/\tau} + P_{out} \quad (3)$$

$\tau$ 는 초기 압력차를 1로 하였을 때 내부압력 변화가 36.8%가 되는 노미널 시간으로 표시한다. 철도차량 안전기준의 기압변화 세부 기준<sup>[13,14]</sup>에 따르면, 고속철도차량의 경우에는 열차의 객실 내 기압이 3,000 Pa에서 1,100 Pa(3,000 Pa의 36.8%)로 하강하는데 18초 이상이 소요되어야 한다고 규정되어 있는데, 이는 기밀도  $\tau=18s$ 이라는 것을 의미한다. 즉,  $\tau$ 값이 클수록 객실의 기밀성능이 우수하다는 것을 나타낸다. Fig. 8는 차량의 기밀도를 보여 주며 이에 따른 압력강하의 추이를 나타내었는데, 기밀도가 높을수록 객실의 압력 변화가 크지 않는 것을 알 수 있다. Table 2는 열차 종류에 따른 대략적인 기밀특성을 보여주며 차량 등급에 따라 기밀계수를 시험 등을 통해 성능을 증명한다.<sup>[15]</sup>

본 해석에서는 KTX-산천 차량과 동일하게 비교할 수 있도록 HSB 열차가 철도차량 안전기준의 기압변화 세부기준을 만족한다는 가정으로, 기밀도  $\tau=18s$ 을 적용하여 분석한 결과



(a) Bongmyung tunnel



(b) Kyeryong tunnel

Fig. 7 Internal and external pressure on HSB cabin

이며 Table 3은 차량 내외부의 최대 압력변화 폭과 압력 변화율을 나타내며, Table 4는 규정된 일정 시간동안 안에 변화하는 최대 압력차를 나타내었다. 시뮬레이션 결과 UIC 779-11<sup>[12]</sup> 철도차량 안전기준 및 UIC-660<sup>[16]</sup>인 단위 시간당 압력변화  $\Delta P/\Delta t \leq 500 \text{ Pa/s}$ , 3초간 최대 압력 변화  $\Delta P \leq 800 \text{ Pa}$ , 10초간 최대 압력 변화  $\Delta P \leq 1000 \text{ Pa}$ , 60초 이상에서의 최대 압력 변화  $\Delta P \leq 2000 \text{ Pa}$ 를 모두 만족할 수 있음을 알 수 있으며 이는 HSB 차량의 경우 다양한 터널 길이의 터널을 고속 주행할 경우 내부의 승객이 느끼는 이명감은 현재 운용중인 일반 고속차량과 유사할 것으로 예측할 수 있다.

Table 2 Sealing coefficient

Train	$\tau$
unsealed train	$\tau < 0.5s$
poorly sealed train	$0.5s < \tau < 6s$
well sealed train	$6s < \tau < 15s$
excellently sealed train (KTX, ICE, AGV etc.)	$\tau > 15s$



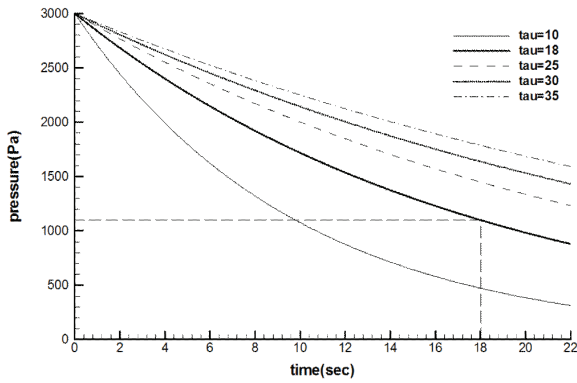


Fig. 8 Pressure tightness

Table 3 Internal and external pressure change on cabin

Train	Tunnel		External		Internal	
			pressure [Pa]	gradient [Pa/s]	pressure [Pa]	gradient [Pa/s]
KTX (Kyungbu-line)	Kunghyun	min.	-2,212.5	-21,476.8	-360.2	-110.4
		max.	261.8	22,588.2	11.0	19.6
	Wonju	min.	-2,117.1	-5,734.6	-930.4	-86.0
		max.	259.8	9,620.3	11.0	49.2
HSB (Honam-line)	Bongmyung	min.	-2,602.7	-6,759.5	-799.3	-118.6
		max.	291.2	11,295.9	12.6	41.3
	Kyeryong	min.	-2,451.3	-11,985.9	-1,271.7	-81.6
		max.	190.6	12,353.7	9.0	58.3

Table 4 Pressure change for the duration time

Train	Tunnel	Max pressure change (Pa)			
		1sec	3sec	10sec	60sec
HSB	Bongmyung	115.17	265.43	601.59	-
	Kyeryong	73.87	166.69	475.69	1,271.72
	Specification	≤500	≤800	≤1,000	≤2,000

## 2.4. 터널 미기압파

미기압파는 Fig. 9와 같은 과정으로 발생하며 터널 내부의 압력파의 압축으로 인하여 터널 출구에 생기는 Sonic boom의 일종이다. 이는 터널 및 주변 환경에 영향을 미치며 특히 저주파 압력파로 회절을 통해 먼 거리까지 영향을 끼친다. 일본<sup>[17]</sup> 등에서는 산악터널 설계시공 표준, 철도건설 운수시설 정비지원기구(2008년)같은 기준을 통해 터널 갱구 중심으로 부터 20 m 지점에서 50 Pa 이내, 민가 근방에서 최대값 20 Pa 이하로 규제하고 있다. 기존 연구결과에 따르면<sup>[10,18,19]</sup> KTX-산천의 경우에는 Table 5와 같이 미기압파의 크기가 약 40 Pa 수준인 것으로 나타났으며, HSB의 경우는 호남고속선의 기준 터널면적의 감소로 인하여 시뮬레이션 결과 Fig. 10와 Table 5와 같이 KTX-산천보다 미소하게 큰 값을 보이지만 경사갱구 적용 등으로 인해 실제 측정값은 차이가 없을 것으로 예측되며 모든 HSB 열차의 시뮬레이션 결과는 일본 참고 규정치인 50 Pa 이하<sup>[17]</sup>를 만족함을 알 수 있다.

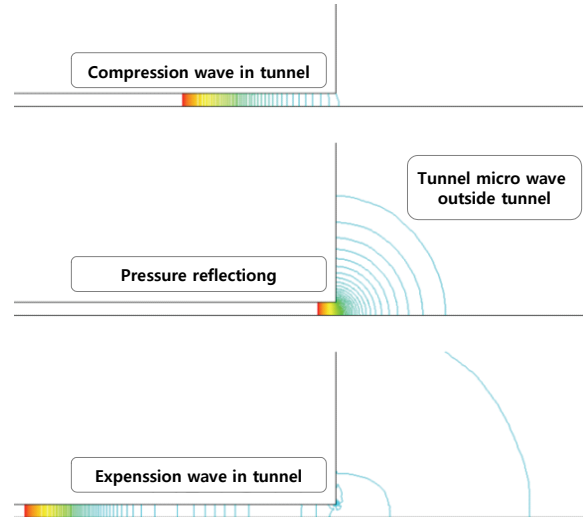
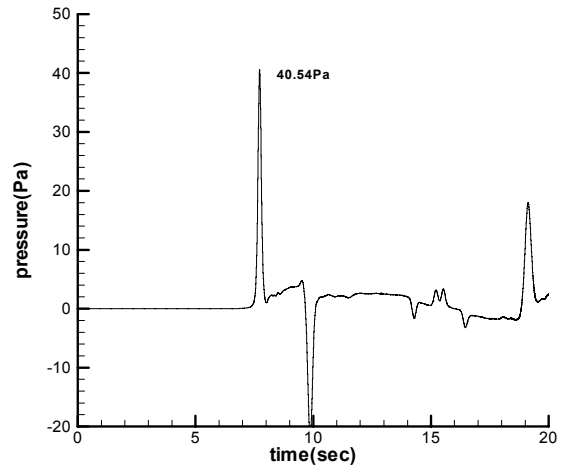
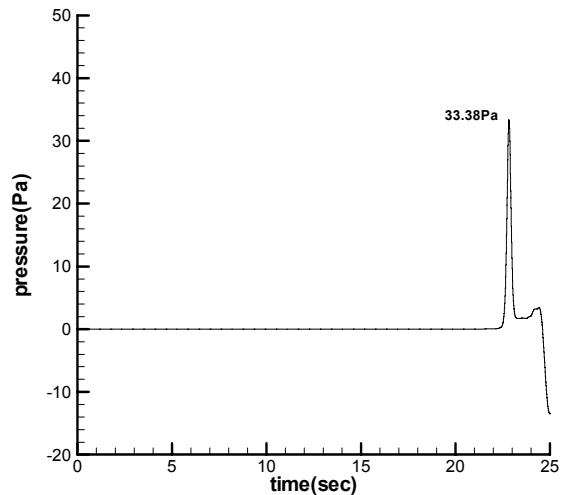


Fig. 9 Micro pressure wave phenomena



(a) Bong-myung tunnel (1,930 m)



(b) Kye-ryong tunnel (7,240 m)

Fig. 10 Micro pressure wave on tunnel exit

Table 5 Sonic boom outside tunnel

	Kunghyun	Bongmyung	Wonju	Kyeryong
KTX-Sancheon (Kyungbu-line)	39.7 Pa	-	31.9 Pa	-
HSB (Honam-line)	-	40.5 Pa	-	33.4 Pa

\* 20 m, 45 deg. position from tunnel exit

### 3. 결 론

본 연구를 통하여 HSB가 터널을 고속주행 할 때의 공력 특성을 검토하였으며 각 결과 항목을 현재 서비스 중인 KTX-산천 결과 및 국제 기준과 비교 평가하였다.

- 1) 전산해석 시뮬레이션을 통하여 분석된 최고속도 330 km/h 주행 조건에서의 터널내부 압력과, 규정된 기밀도 기준에서의 차량 내부 압력변동 및 터널 외부로 방출되는 미기압과 해석 결과는 각종 선진 해외 기술 기준 및 제작사양서 요구를 만족하였다.
- 2) KTX-산천과 비교한 HSB 고속차량의 터널 주행 공력 특성 결과 경부고속선보다 작은 면적의 호남고속선의 터널을 운행하여도 이명감 및 터널 압력과, 미기압과 특성은 서로 유사할 것으로 예상된다.
- 3) 향후 차고가 높아지고 단면적이 증가하는 2층 형식의 HSB 차량도 시뮬레이션 하여 본 연구의 결과치와 비교하여 설계 지표로 이용할 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “고속화물열차 및 여객/화물 복합열차 기술 개발(No.13RTRP-B067952)” 과제로부터 지원 받았으며 이에 감사드립니다.

### References

- (1) Chris Baker, 2010, “The flow around high speed trains,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics, Vol. 98, pp. 277~298.
- (2) British Standard Institution, 2010, European standard EN 14067-1~7.
- (3) J.L. Peters, 1982, “Optimising Aerodynamics to Raise IC

Performance,” Railway Gazette International, pp. 817~819.

- (4) Takanobu Ogawa, 2007, “Numerical Investigation of Three Dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel,” Computers & Fluids, Vol. 26, pp. 565~585.
- (5) YC Ku et al., 2010, “Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave,” Struct Multidisc Optim, Vol. 42, pp. 965~976.
- (6) 김희동 외 1인, 1994, “고속철도 터널에서 발생하는 파동현상에 관한 충격파관의 연구(1)-압축파의 특성에 대하여,” 대한 기계학회 논문집, 제18권 10호, pp. 2686~2697.
- (7) 권혁민 외 4인, 2002, “G7 시제 차량의 터널 내부 압력파에 대한 수치 해석,” 한국철도학회지, 제5권 제4호, pp. 260~266.
- (8) 남성원, 2004, “KTX 차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구,” 한국철도학회논문집, 제7권 제1호, pp. 26~31.
- (9) Roger Gawthorpe, 2000, “Pressure effect in railway tunnels,” Rail international, Schienen de welt, pp. 10~17.
- (10) H.B. Kwon, 2007, “The Review of Aerodynamic Characteristics for KTX-Sanchon,” KRRI report.
- (11) FLUENT User’s Guide, 2010
- (12) UIC 779-11, 2005, “Determination of Railway Tunnel Cross-sectional Areas on the Basis of Aerodynamic Considerations”.
- (13) 철도차량 안전기준에 관한 지침, 건설교통부고시 제2010-637호
- (14) 철도차량 안전기준에 관한 규칙, 국토해양부령 제280호
- (15) R. Bopp, 2009, “Aerodynamics, Ventilation and Tunnel Safety for High Speed Rail Tunnels,” Workshop Tunnels Technical Article.
- (16) UIC 660, 2002, “Measures to Ensure the Technical Compatibility of High-speed Trains”.
- (17) 산악 터널 설계 시공 표준·동해선 철도건설·운수시설 정비지원기구, 2008, “터널갱구 완충공 설치기준(안)”.
- (18) Maeda T. et al., 2000, “A Micro-pressure Waves Radiating from a Tunnel Portal and Their Mitigation,” Internose 2000. Proceedings of the 29th International Congress on Noise Control Engineering, 27-31 AUGUST 2000, NICE, FRANCE., Volume 4, pp. 2461~2.
- (19) Maeda, 2004, “A Micro-pressure Wave Radiating from a Tunnel Portal,” RTRI report.