

# 연속터널에서 터널출구 미기압파를 저감 할 수 있는 스노우 셸터 개발에 대한 연구

김 동 현\*, 강 부 병\*\*

## The study about the development of snow shelter connecting serial tunnel for reducing the micro-pressure wave

Dong-Hyeon Kim, Bu-Byoung Kang

**Key Words:** Serial Tunnel(연속터널), Snow Shelter(스노우 셸터), Micro-Pressure Wave(미기압파), Slit Cover Shelter(슬릿 커버 셸터), Moving Model Rig(주행 모형 시험기)

### Abstract

There are many tunnels located apart short distance from each other in mountainous country like Korea. Serial tunnels are connected by snow shelter in many cases. This study presents some countermeasures against micro-pressure wave at the tunnel exit using snow shelter. Through 1/60 scale model laboratory test, we find that snow shelter with 3.6m slit and slit cover show the effect of reducing the micro pressure wave to about 50.6%.

### 1. 서 론

철도 차량·터널 인터페이스에서 나타나는 여러 가지 공기역학 문제에서 터널 미기압파 현상은 고속철도에서 발생하는 독특한 물리현상이다. 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 의해 터널 출구에서 미기압파(micro pressure wave)가 방사되는 것은 많이 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 미기압파는 열차 단면적, 전두부의 형상, 터널 단면적, 터널의 길이, 터널내 슬라브/발라스트 궤도의 종류, 터널 출구로부터의 거리등에 의존한다.<sup>(2,3)</sup> 터널 출구에서 방사된 미기압파는 터널 출구 주변의 민가에 환경소음과 저주파 진동을 일으킨다. 이러한 미기압파는 저주파수 특성을 가지므로 방음벽과 같은 방법으로는 저감하기 매우 어렵다. 또한 터널 내 풍압변동(pressure fluctuations) 대책뿐 아니라 미기압파에 대한 저감 대책도 터널 단면적을 증가시킬 수 있으므로 이 현상에 대한 낮

은 비용의 저감대책이 세워지지 않으면 철도 건설비가 기하급수적으로 증가된다.<sup>(4)</sup>

한국, 일본과 같이 산악이 많은 나라의 고속철도의 경우 터널과 터널 사이의 거리가 짧은 연속터널(serial tunnel)이 존재하게 되며 스노우 셸터(snow shelter)로 연결하게 된다. 본 연구에서는 고속열차가 연속터널내로 진입할 경우에 셸터가 터널내 풍압변동과 미기압파에 미치는 영향을 조사하기 위해서 특별히 개발된 시험장치<sup>(4~6)</sup>를 활용하여 축소모형시험을 수행하였다. 스노우 셸터를 활용하여 터널 미기압파를 저감 할 수 있는 대책을 개발하였는데 경부고속철도 화신 1, 2 터널을 대상으로 터널사이에 스노우 셸터를 설치하고 셸터의 양쪽 측벽에 높이 60 mm(실척 3.6 m)의 슬릿(slit) 및 슬릿커버(slit cover)를 설치하여 터널 진입속도 260 km/h ~ 320 km/h 영역에서 화신 2 터널 출구 미기압파를 최대 50.6 % 줄일 수 있다는 결과를 얻었다.

### 2. 연속터널 제원 및 실험방법

본 연구에서는 고속전철이 연속터널을 통과시 발생하는 미기압파의 저감을 위해 Fig. 1(a)과 같은 슬릿 커버 셸터를 이용하였다. 연속터널 모델

\* 회원, 한국철도기술연구원 시설연구본부

E-mail : dhkim@krii.re.kr

TEL : 031-461-8531 FAX : 031-461-8374

\*\* 회원, 한국철도기술연구원 차량연구본부

로는 경부고속철도 구간에 존재하는 화신 1, 화신 2 연속터널(내공 단면적 107 m<sup>2</sup>)을 1/60로 축척하여 Fig. 1(b)와 같은 아치형으로 실제형상에 근접시켜 사용하였으며, 터널에 대한 길이제원은 Table 1에 나타내었다.

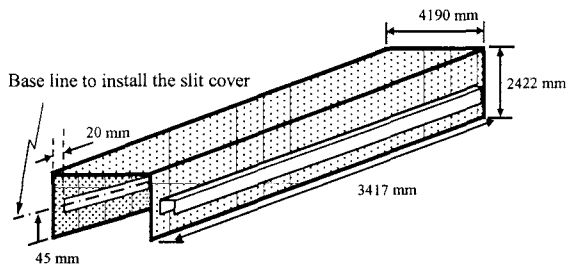
본 연구는 한국철도기술연구원의 터널주행 열차모형 시험기를 이용하여 수행하였으며, 열차모

형을 실제속도로 터널에 주행시켜 각종 공력현상을 분석할 수 있는 실험장치로 참고문헌에 소개되어 있다.<sup>(5)</sup> 연속터널의 미기압파와 터널내 압력 변동 측정위치는 Fig. 2에 나타내었다. 화신 2 터널 출구 뒤에 음압계(Rion, NA-18)를 터널 중심에서 333.33 mm(실척 20 m)거리와 45° 각도에 위치시켜 터널 출구에서 방출되는 미기압파를 측정하였다. 이 위치는 복선터널에서 열차진행선로 건너편이다.

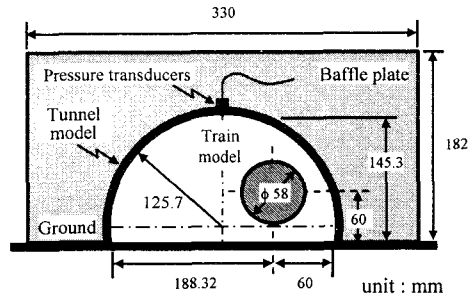
본 연구의 실험은 3가지 방법으로 진행되었다. 먼저 화신 1, 2 터널 각각의 양 끝에 미기압파 대책을 설치하지 않은 경우와 45° 경사갯구만을 설치한 경우에 대하여 미기압파를 측정하였다. 시험결과분석에서는 미기압파 대책을 적용하지 않은 경우를 기준시험으로 보고 결과를 비교하였다. 둘째로 연속터널 사이에 슬릿 커버 쉘터를 설치하고 슬릿 높이를 20 mm(실척 1.2 m), 40

**Table 1** Dimensions of the tunnel and the shelter

Tunnel (Double track)	Lengths		Test Model
	Full scale	1/60 scale	
Whashin 1	260 m	4.333 m	Tunnel 1
Distance between tunnels	205 m	3.417 m	Shelter
Whashin 2	245 m	4.083 m	Tunnel 2



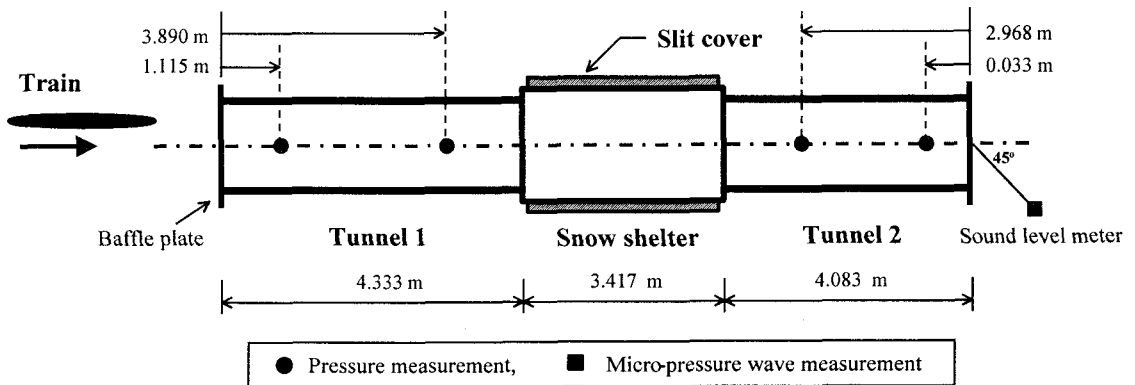
\* Slit cover size : 20 mm x (20, 40, 60) mm x 3377 mm



(a) Snow shelter (slit cover shelter)

(b) Double track tunnel

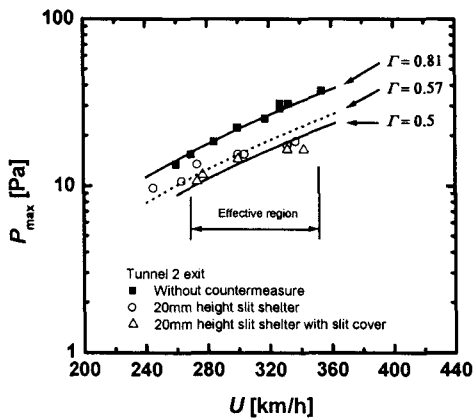
**Fig. 1** 1/60 scale dimensions of the slit cover shelter and the double track tunnel



**Fig. 2** 1/60 scale test model dimensions and the measurement positions

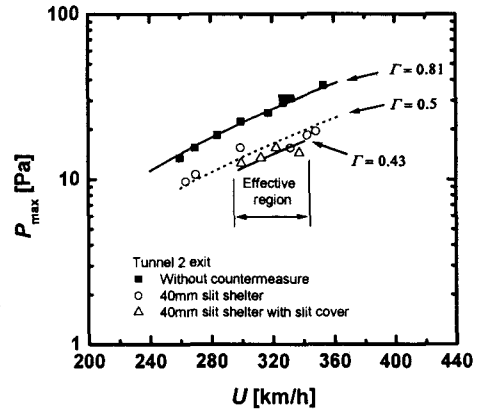
**Table 2** Performance of countermeasures against micro-pressure wave

Model	Type of countermeasure	Effective speed range (km/h)	Reduction factors ( $\Gamma$ )	Reduction effects (%)
A	- Without shelter - Without 45° slanted portal	240~360	0.81	reference
B	- Without shelter - 45° slanted portals at both ends of two tunnels	230~400	0.53	34.6
C	- Shelter without slit - 45° slanted portals at both ends	240~360	0.57	29.6
D	- Shelter with 20 mm height slit - 45° slanted portals at both ends	260~340	0.57	29.6
E	- 20 mm height slit cover shelter - 45° slanted portals at both ends	240~340	0.5	38.3
F	- Shelter with 40 mm height slit - 45° slanted portals at both ends	260~350	0.5	38.3
G	- 40 mm height slit cover shelter - 45° slanted portals at both ends	290~340	0.43	46.9
H	- Shelter with 60 mm height slit - 45° slanted portals at both ends	240~350	0.52	35.8
I	- 60 mm height slit cover shelter - 45° slanted portals at both ends	260~320	0.4	50.6

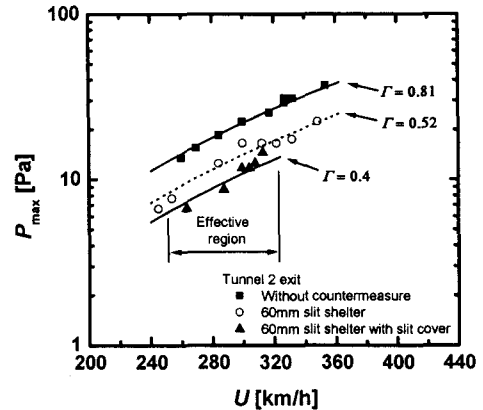


**Fig. 3** Maximum values of micro-pressure wave at tunnel 2 exit(20 mm height slit shelter and slit cover shelter)

mm(실척 2.4 m), 60 mm(실척 3.6 m)로 변화시키면서 열차 진입속도별 미기압과 강도를 측정하였다. 이때 쉘터의 단면적은 터널단면적의 1.23배를



**Fig. 4** Maximum values of micro-pressure wave at tunnel 2 exit(40 mm height slit shelter and slit cover shelter)



**Fig. 5** Maximum values of micro-pressure wave at tunnel 2 exit(60 mm height slit shelter and slit cover shelter)

적용하였다. 마지막으로 슬릿 쉘터 양 측벽의 슬릿에 슬릿커버를 부착하여 슬릿 및 슬릿커버 높이를 20 mm, 40 mm, 60 mm로 변화시키면서 열차 진입속도별 미기압과 저감을 측정하였다. “ㄱ”자 형상 커버의 돌출된 길이는 20 mm(실척 1.2m)로 일정하다. 또한 슬릿이 없는 쉘터의 경우도 시험하여 비교하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1. 미기압과 저감성능 실험결과

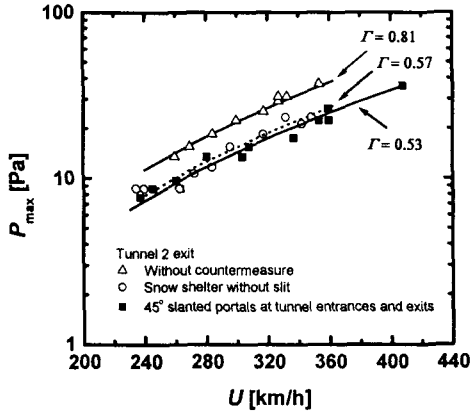


Fig. 6 Maximum values of micro-pressure wave at tunnel 2 exit (Shelter without slit and 45° slanted portals)

터널출구에서 방사되는 미기압파는 열차가 터널에 진입시에 발생하는 압축파의 압력구배에 비례하여 증가한다는 것은 잘 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 또한 미기압파의 최대값은 열차속도의 3승과 비례한다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 차량대 터널의 단면비(blockage ratio)에 상관없이 적용할 수 있으며, 개발한 미기압파 저감대책의 성능을 비교할 수 있는 다음과 같은 경험식을 이용하여 비교하였다.<sup>(4)</sup>

$$P_{\max} = \Gamma \frac{U^3}{10^6} \quad (1)$$

여기서,  $P_{\max}$  는 미기압파의 최대 값[Pa]이고  $\Gamma$  는 미기압파 저감계수,  $U$ 는 열차의 터널진입시의 속도[km/h]이다. 스노우 션터 측벽에 다양한 형상 변화를 적용한 본 연구의 미기압파 저감대책 실험결과를 식 (1)을 이용하여 실험모델별로 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Fig. 3~Fig. 6은 열차 진입속도별 미기압파 저감계수를 나타내고 있다. Fig. 3~Fig. 5는 각각 20 mm, 40 mm, 60 mm 슬릿 션터와 슬릿 커버 션터 적용에 따른 미기압파 최대 피크 값(peak value)의 비교 결과를 나타내고 있다. 터널 2 출구에서 측정된 미기압파 저감계수는 기준 시험의 결과(Table 2의 모델 A)와 비교할 때 슬릿 높이가 증가할수록 효과적이었으며, 슬릿 커버가 없는 경우(모델 D, F, H)보다 있는 경우(모델 E, G,

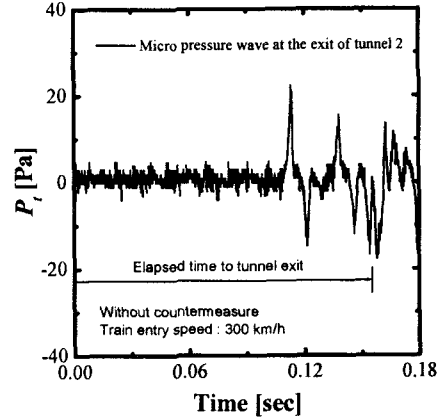


Fig. 7 Micro-pressure fluctuations in the case of no countermeasure against micro pressure wave(train entry speed : 300 km/h)

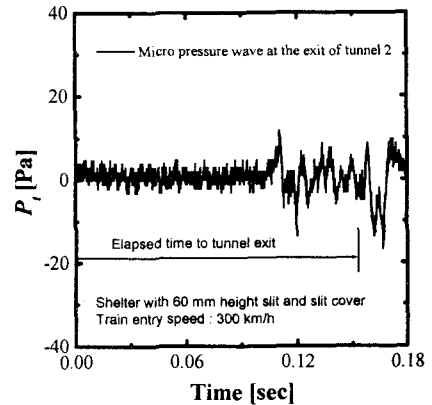


Fig. 8 Micro-pressure fluctuations in the case of 60 mm height slit cover shelter(train entry speed : 300 km/h)

I)가 미기압파 저감에 효과적인 것을 알 수 있었다. 즉, 션터 양 측벽에 슬릿만 있을 때에는 슬릿 높이의 증가에 따라 차이가 적었으나, 슬릿 위에 커버를 부착하면 슬릿 높이가 증가할수록 미기압파 저감율이 좋아지는 것을 알 수 있었다. 화신 1 터널의 입구에 45° 경사개구를 설치하고 화신 2 터널 출구에 45° 경사개구를 설치한 경우로서 슬릿 및 슬릿커버의 높이가 60 mm인 경우(모델 I)에 Fig. 5에서와 같이 미기압파 저감율 50.6 %의 결과를 얻었다.

Table 2와 Fig. 6을 보면 터널 출입구에 45° 경사개구만 설치한 경우(모델 B) 저감율이 34.6 %

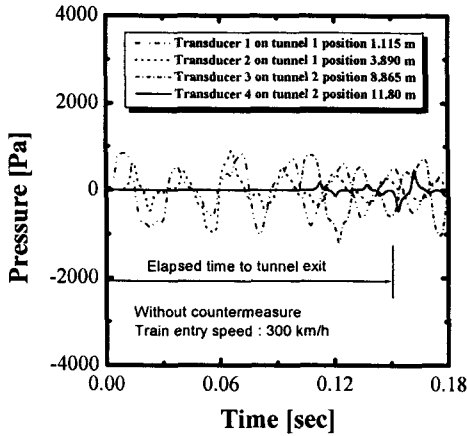


Fig. 9 Tunnel inside pressure fluctuations in the case of no countermeasure against micro-pressure wave(train entry speed : 300 km/h)

이다. Table 2를 보면 화신 1 터널 입구에 45° 경사갱구를 설치하고 화신 2 터널 출구에 45° 경사갱구를 설치하고 슬릿이 없는 션터를 설치한 경우(모델 C)와 20 mm 슬릿을 설치한 경우(모델 D)가 미기압과 저감율이 둘 다 29.6 %로 45° 경사갱구만 설치한 경우(모델 B)의 34.6 %보다 미기압과 저감능이 적은 것을 알 수 있다. 즉 션터 설치 및 션터에 슬릿을 뚫어준다고 해서 경사갱구를 적용한 것(모델 B)보다 미기압과 저감율이 반드시 커지진 않는다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 미기압과 대책을 적용하지 않은 경우(모델 A)와 60 mm 슬릿커버 션터를 적용한 경우(모델 I)에 터널 진입속도 300 km/h에서의 화신 2 터널 출구의 실시간 미기압과 변화량,  $P$ ,를 보여준다. 터널입구에서 터널출구까지의 터널통과 실시간에서의 미기압과 변화량이 분석에 유효한 값이고, 그 이후의 변동량은 열차모델이 음압계를 통과할 때의 열차풍에 의한 시그널이다. Fig. 7과 비교하여 Fig. 8의 그래프에서 알 수 있듯이 슬릿커버 션터를 적용하였을 때 미기압과 최대 피크 값이 많이 줄어든 것을 볼 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 연속터널인 화신터널에서 슬릿 커버 션터 유·무에 따른 터널진입속도 300 km/h에서의 터널내 풍압 변동량을 나타내고 있다. Fig. 2에서와 같이 압력센서 1과 압력센서

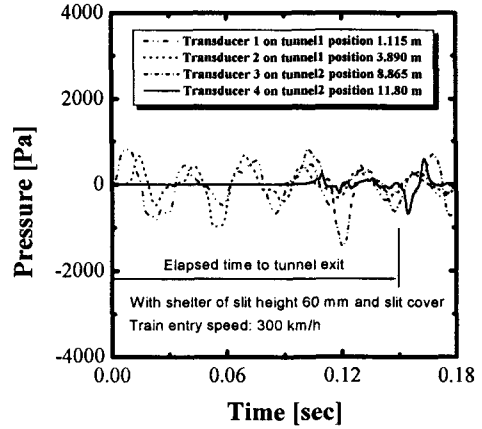


Fig. 10 Tunnel inside pressure fluctuations in the case of 60 mm height slit cover shelter(train entry speed : 300 km/h)

2는 터널 1(화신 1 터널)에 설치되어 있으며, 압력센서 3과 압력센서 4는 터널 2(화신 2 터널)에 설치되어 있다. 본 연구에서 적용한 Table 2의 9 가지 모델실험을 통하여 연속터널 중간에 스노우 션터를 설치하고 션터의 양 측벽에 슬릿 및 슬릿커버를 최적제원으로 설치할 경우에 터널 내를 음속으로 진행하는 첫 번째 압축파의 기울기를 낮추는 효과를 기대할 수 있었다. 즉, 터널 2 출구 미기압과의 피크 값을 낮추어 준다. 이전 연구에서 터널 입구의 슬릿 커버 완충공<sup>(8)</sup>이 열차가 터널 돌입시의 압력상승 시간을 지연시켜 터널 출구 미기압과를 낮추었다. 본 연구의 경우도 Fig. 9와 Fig. 10의 터널출구 가까이 있는 4번 압력센서의 압력변동 실선 그래프를 관찰해 보면, 첫 번째 압축파의 기울기가 60 mm 폭의 슬릿 및 커버를 적용한 션터(모델 I)인 Fig. 10의 경우에 아무런 대책을 적용하지 않은 Fig. 9(모델 A)와의 비교에서 압력 상승시간 지연이 명확하게 나타나고 있다. 그러나 터널 2의 입구 가까이 있는 3번 압력센서에서의 첫 번째 압축파의 기울기(일점 채선 그래프)는 Fig. 9와 Fig. 10의 비교에서 큰 차이를 보여주지 않는다. 즉, 본 연구에서 고려한 미기압과 저감대책은 압축파가 터널 2(화신 2 터널)내로 진전하면서 압축파의 기울기를 작게하는 효과로 추론된다.

### 3.2 연속터널내 풍압변동 결과토의

Table 2의 모델 I의 형상으로 셸터를 설치한 경우는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 각 지점의 최대 풍압 피크 값은 미기압과 대책이 없는 경우(모델 A)인 Fig. 9와 비교하여 정압에는 큰 차이가 없으나 부압에서 20.8 %정도 더 크게 나타난다. 즉, 풍압 피크 값이 셸터를 장착하면 약간 크게 나타난다. 풍압 피크 값이 부압에서 20.8 %정도 크게 나타나지만 터널내 풍압변동량의 허용범위이내라면 승객 이명감(ear-discomfort)에 영향이 없을 것이다. 실제로 차량단면적대 터널 내공 단면적비가 1:8인 터널을 280 km/h로 운행하는 독일 ICE 열차의 차체 기밀설계시 차체외부 최대압력조건은 정압 3900 Pa, 부압 -5500 Pa로 되어 있는데<sup>9)</sup> 본 실험의 경우 부압이 -1500 Pa 정도로 이 조건을 충분히 만족하고 있다. 본 실험에 사용된 차량대 터널 단면적 비는 1:11.3로 경부고속철도에 해당된다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 연속터널을 연결해주는 스노우 셸터를 활용하여 터널 미기압과를 저감할 수 있는 대책을 개발하였다. 경부고속철도 화신 1, 2 터널을 대상으로 셸터의 양쪽 측벽에 높이 60 mm의 슬릿 및 슬릿 커버를 갖는 셸터를 장착하여 터널 진입속도 260 km/h ~ 320 km/h 영역에서 미기압과를 최대 50.6 % 줄일 수 있는 셸터 대책을 개발하였다.

본 기술은 향후 호남고속철도, 신의주고속철도 건설시 예상되는 연속터널에 본 연구의 미기압과 저감대책 기술은 유용하게 사용 될 것으로 생각된다.

#### 후기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일부분이며 (주) 삼보기술단, (주) 대본엔지니어링의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Ozawa, S. and Maeda, T., 1988, "Model Experiment on Reduction of Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit," JSME, *International Symposium on Scale Modeling*, Tokyo, July 18-22.
- (2) Maeda, T., Matsumura, T., Tanemoto, K., Kajiyama, H., and Iida M., 1990, "Countermeasures against Micro-pressure Waves Radiated from Tunnel Exit under Speed-up of Shinkansen," *RTRI report*, Vol. 4, No. 1, pp. 44~51(In Japanese).
- (3) Matsuo, K., Aoki, T., Mashimo, S., and Nakatsu, E., 1997, "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel," *9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Aosta Valley, Italy, pp. 925~934.
- (4) Kim, Dong-Hyeon, Min, Dong Ho, and Oh, Il-Geun, 1999, "Experimental study of the aerodynamic countermeasures for reducing the micro-pressure waves and pressure fluctuations in high-speed train-tunnel interfaces," *World Congress on Railway Research*, Tokyo, Japan, October 19-23.
- (5) 김동현, 오일근, 2001, "압축공기 발사기에 단선 와이어 유도방식을 적용한 1/60축척 터널주행 열차모형 시험기 개발에 대한 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제 25권, 제5호, pp. 634~644.
- (6) 김동현, 민동호, 오일근, 1999, "350km/h급 고속철도 터널 미기압과 저감대책 개발," 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집, pp. 101~107.
- (7) Maeda, T., 1994, "The Final Report of Micro-Pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project", Japan Railway Technical Services Report.
- (8) 김동현, 민동호, 2001, "고속철도에서 슬릿커버 완충공의 터널 미기압과 저감성능," 대한기계학회 논문집 B권, 제 25권 제6호, 게재예정.
- (9) Martinsen, W. O. and Rahn, T., 1991, *ICE High-tech on Rails*, Hestra-Verlag, pp. 77 ~ 78.