

고속철도에서 슬릿커버 완충공의 터널 미기압파 저감성능

김 동 현* · 민 동 호**

(2000년 1월 27일 접수, 2001년 3월 16일 심사완료)

Experimental Study on the Slit Cover Hood for Reducing the Micro Pressure Waves in High-Speed Train-Tunnel Interfaces

Dong-Hyeon KIM and Dong-Ho MIN

Key Words: Micro Pressure Wave(미기압파), Tunnel Hood(터널 완충공), Seoul-Pusan High-Speed Railway(경부고속철도), Slanted Portal(경사 갱구), Slit Cover Hood(슬릿 커버 완충공)

Abstract

Purpose of the present is to investigate the hood configuration at a tunnel entrance for reducing the micro pressure wave that is generated according to train speed. Two configurations were examined for tunnel of 0.5 km length. The experimental results show that a slit cover hood installed at the entrance of the tunnel reduces the maximum micro pressure wave by 41.2%, and a configuration with a slit cover hood installed at the entrance and a 45° slanted portal at the exit of the tunnel suppresses it by 47.7 %.

기호설명

- P_{max} : 미기압파의 최대값 [Pa]
- p : 터널내 공기압 [Pa]
- Γ : 미기압파 저감계수
- U : 열차의 터널진입속도 [km/h]

1. 서 론

고속으로 열차가 터널 진입시에 압축파는 터널 출구 방향으로 생성되며 이 압축파가 터널출구 끝단에서 다시 반사하여 열차쪽으로 팽창파로 돌아온다. 터널내부는 이러한 압축파와 팽창파의 지속적인 교란으로 심한 압력변동을 겪게 된다. 또한 열차의 터널 진입시 생성된 압축파는 대부

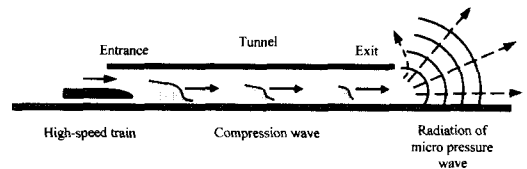


Fig. 1 The generation process of micro pressure wave at tunnel

분은 팽창파로 터널 입구 쪽으로 되돌아가지만 일부는 터널 출구 바깥의 대기중으로 미기압파(micro pressure wave)로 방출하여 환경소음(sonic boom)과 저주파 진동을 야기한다(Fig.1 참조). 터널내부 공기압 변동의 진폭은 진입하는 열차속도의 제곱에 비례하기 때문에, 터널에서 300 km/h 급의 초고속 운행에는 많은 제약이 따른다.⁽¹⁾

터널 출구에서 발생하는 충격성 소음을 미기압파(micro pressure wave)라고 하는데 터널 출구부근의 환경문제와 관련되며 열차 단면적, 열차 전두부의 형상, 터널의 단면적, 터널의 길이, 터널내 슬라브/발라스트 계도의 종류 및 터널 출구로부터 거리등에 복합적으로 의존하게된다.

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원 시설연구본부

E-mail: dhkim@krii.re.kr

TEL: (031)461-8531 ex) 234, FAX: (031)461-8374

**회원, 한국철도기술연구원 차량연구본부

Table 1 Parameters for optimizing a size of the slit cover hood(full scale for dimension)

The slit cover hood model	The length of slit hood (m)	The height of a slit (m)	The size of a slit cover (m)	A note
A1	12.8	1.1	1.2	the slit cover hood at the entrance
A2	12.8	1.1	1.2	15° slanted channel and the slit cover hood at the entrance
A3	12.8	0.54	1.2	the slit cover hood at the entrance
A4	12.8	1.1	1.2	the slit cover hoods at the entrance and exit
A5	12.8	1.1	1.2	the slit cover hood at the entrance and 45° slanted portal at the exit
A6	6.1	1.1	1.2	the slit cover hood at the entrance
A7	18.9	1.1	1.2	the slit cover hood at the entrance

위에 대하여 수행하였다. 터널길이 8.34 m(실척 0.5 km)와 열차길이 0.605 m로 일정한 상태에서 터널입구 슬릿커버 완충공을 변화시키면서 터널 내의 압력변동과 터널 출구에서 방사되는 미기압파의 크기를 측정하였다.

본 연구에서는 미기압파의 저감율을 비교하기 위하여 차량과 터널의 유효차단비에 상관없이 적용할 수 있는 다음과 같은 경험식을 만들었다.⁽⁸⁾

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

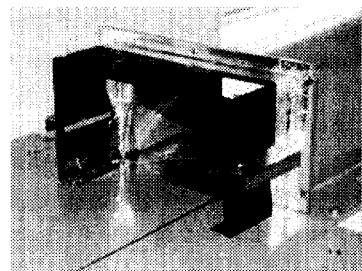
식 (1)을 적용하여 본 연구에서 수행한 여러 가지 슬릿커버 완충공의 미기압파 저감성능을 비교하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 적용한 대표적인 슬릿커버 완충공의 형상을 보여준다. 완충공의 내공단면적은 터널단면적의 1.3배를 적용하여 0.0387 m²(실척 139 m²)에 해당되며 가로 253 mm, 세로 153 mm이다.

다양한 완충공 형상변경 실험을 거친 후, Table 1에 슬릿커버 완충공의 공기역학적인 최적설계를 위해 적용한 대표적인 형상에 대한 슬릿커버 완충공의 시험모델을 나타내었다. 완충공 모델 A1은 고려된 완충공 중에서 가장 성능이 우수한 슬릿커버 완충공 형상이며 A2는 15° 경사수로(slanted channel)가 입구 완충공에 미치는 영향을 비교하기 위한 모델이다. 또한 A3모델은 슬릿의 높이가 미기압파 저감성에 미치는 영향을 비교하



(a) Slit hood, A1



(b) Slit hood, A6

Fig. 3 Appearances of the slit cover hood for reducing the micro pressure waves(1/60 scale)

기 위한 형상이다. A4모델과 A5모델은 각각 터널 출구부에 설치된 슬릿커버 완충공과 45° 경사개구(slanted portal)가 미기압파 저감에 미치는 영향을 분석하기 위한 시험이며, A6모델은 슬릿

Table 2 Performance of slit cover hood for reducing the micro-pressure waves

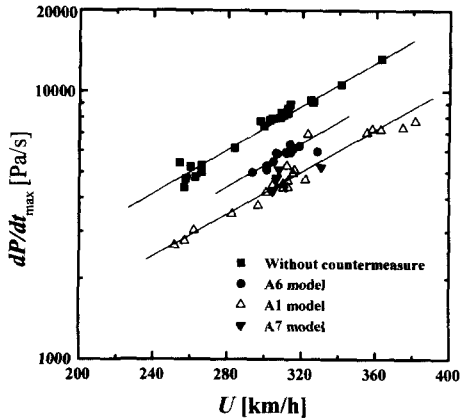
The slit cover hood model	The effective speed ranges (km/h)	Reduction factors (Γ)	Reduction effects (%)
Without countermeasures	250 ~ 360	1.300	Criterion
A1	240 ~ 380	0.765	41.2
A2	300 ~ 380	0.700	46.2
A3	240 ~ 360	0.820	36.9
A4	240 ~ 360	0.750	42.3
A5	240 ~ 380	0.680	47.7
A6	280 ~ 340	0.900	30.8

커버 완충공의 길이 영향을 비교하기 위한 시험 모델이다.

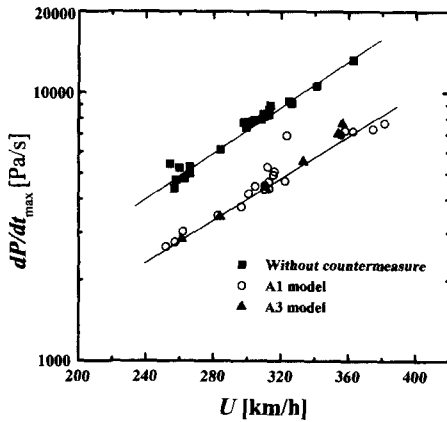
Table 2는 식 (1)을 이용하여 Table 1에서 주어진 대표적인 슬릿커버 완충공에 대하여 최대 미기압과 저감효과를 나타내었다. 여기서 완충공이나 경사갱구를 터널 입출구에 적용하지 않은 경우를 저감효과 상대비교의 기준으로 하였다(Fig. 5 참조). A3모델과 A6모델은 성능이 우수한 슬릿커버 완충공 A1모델에서 슬릿의 높이를 약 1/2로 줄인 것과 슬릿커버완충공의 길이를 약 1/2로 줄인 것인데 A1보다 미기압과 저감성능이 각각 약 5 %와 10 %정도 낮음을 알 수 있다. 슬릿 커버를 적용한 동일조건에서 A3모델은 완충공 측면 슬릿의 면적이 A1모델보다 1/2 줄어든 경우인데 열차진입 시에 첫 번째 압축과 형성의 압력상승 시간이 슬릿면적의 상대적 작음으로 인하여 A1모델의 경우보다 짧게 된다. 즉 슬라브케도 터널 모델의 동일조건에서 완충공 적용의 성능비교를 수행할 때, 완충공 A3모델이 A1모델보다 터널 입구부에서 첫 번째 압축과 형성의 시간에 대한 압력구배를 크게하기 때문에 출구에서의 미기압과도 커지게 된다. A1모델과 A4모델을 비교해 볼 때 A1모델은 입구에만 슬릿커버 완충공을 설치했을 경우인데 출구 쪽에도 완충공을 설치한다 해도(A4 모델) 저감율은 1.1 %만이 향상될 뿐이다. 즉 경사갱구의 2배 효과⁽²⁾와 달리 터널 출구에 설치된 슬릿커버 완충공 자체는 출구에서 미

기압과 저감에 기여하지 못함을 보여주고 있다. 그러나 입구쪽 슬릿커버 완충공 단독으로 41.2 %나 저감시킨다는 것만으로도 큰 저감효과임은 분명하다. 슬릿커버 완충공의 앞부분에 15° 경사수로 설치하였을 때(A2 모델) 미기압과 저감율이 46.2 %로 측정되었다. 슬릿커버 완충공을 터널입구에 설치하고 45° 경사갱구를 터널출구에 설치하였을 경우(A5 모델)에 미기압과 저감율이 약 47.7 %임을 얻었다. 다른 모델과 비교해 볼 때 이 경우 미기압과 저감성능이 가장 좋게 나타났 다.

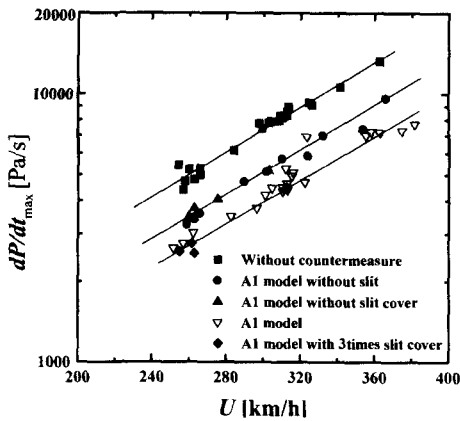
슬릿커버 완충공의 길이변화에 따른 일련의 실험에서 가장 효과적인 실험 결과는 8.34 m(실척 0.5 km) 슬라브케도 터널에서 슬릿커버 완충공의 길이는 213 mm(실척 12.8 m, 편의상 이하에서 완충공 제원을 실척으로 표기함)이었다. 슬릿커버 완충공의 측면부에서 슬릿(개구부)의 높이와 슬릿커버(개구부를 'ㄱ'로 막는 덮개)의 크기에 따라서도 미기압과 저감효과는 달리 나왔다. 본 연구에서 시험한 결과는 슬릿커버 완충공의 길이와 슬릿의 길이가 거의 같을 경우에 슬릿커버가 있을 경우의 미기압과 저감율이 슬릿커버가 없을 경우보다 성능이 더 우수하였다. 시험한 슬릿커버 완충공 중에서 효과적인 길이는 12.8 m(실척)이고 슬릿의 길이가 10.4 m(실척) 일 때 슬릿의 높이는 1.1 m(실척)으로 얻어졌다. 또한 슬릿커버는 슬릿을 완전히 가릴 수 있는 크기면 충분하였다.



(a) The length of slit cover hood



(b) The height of a slit

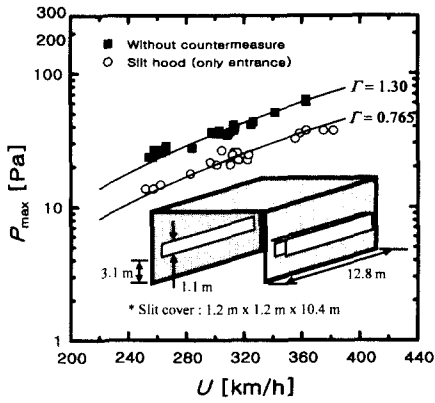


(c) The size of a slit cover

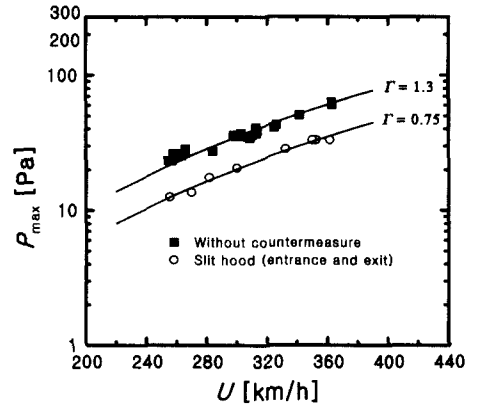
Fig. 4 Maximum values of pressure gradient measured at 1.115m from tunnel entrance(semi-log scale)

이와 같은 시험결과는 다음과 같은 그래프로부터 분석되었다. Fig. 4(a)는 미기압파의 저감에 효과적인 슬릿커버 완충공의 길이를 찾기 위해서 3가지의 완충공 길이에 관하여 시험을 수행한 것으로 각각의 완충공 길이는 실척으로 6.1 m, 12.8 m 및 18.9 m에 해당되며 열차의 터널 진입속도가 240 km/h ~ 400 km/h일 때 최대 압력 구배만을 속도에 관하여 나타내었다. 3가지 경우의 시험결과에 따르면 A1모델과 A7모델인 경우에 최대 압력구배가 비슷하게 낮게 나오는 것을 알 수 있으며 A1모델이 건설비용 차원에서 더 효과적임을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 대표적인 슬릿의 높이 변화에 따른 최대 압력구배의 저감 효과를 나타내고 있다. Fig. 4(c)는 슬릿의 개구부를 막는 'Γ' 자형의 슬릿커버의 효과 및 길이 결정에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 여기서 중요한 점은 슬릿(개구부)이 없는 막힌 완충공(A1 model without slit)과 슬릿은 있지만 슬릿커버가 없는 완충공(A1 model without slit cover)에 대한 실험 결과인데, 이때 나타나는 최대 압력구배가 비슷한 크기를 갖는 점이다. 반면에 슬릿에 커버를 설치한 완충공(A1 model, 슬릿커버 완충공)의 최대 압력구배를 살펴보면 단지 슬릿 완충공에 커버를 설치함으로써 압력구배를 효과적으로 낮출 수 있다는 점이다. 즉, 열차 진입 시에 완충공과 터널 부에서 상승하는 공기압력을 적당한 면적과 길이의 슬릿의 개구부를 거쳐 커버에서 유출되는 공기량을 순간적으로 제어하여 터널 입구부 공기압력의 상승시간을 지연시켜주는 역할을 하는 것으로 기대된다. 이러한 최대 압력구배의 저감성능은 미기압파 저감성능과 밀접한 관계를 갖으며 Fig. 5에서 보다 분명하게 알 수 있다.

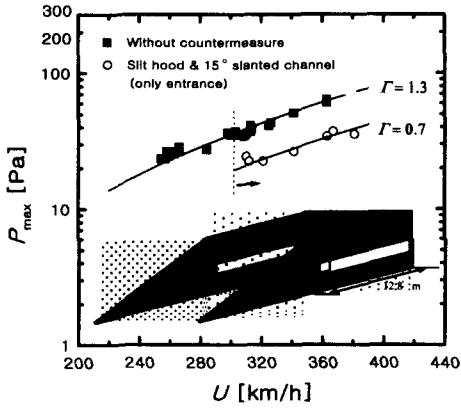
Fig. 5(a)는 본 연구에서 개발된 슬릿커버 완충공(A1모델)을 입구에만 설치하였을 경우와 대책이 없는 경우에 관하여 비교한 도식으로 미기압파의 저감율이 41.2 %로 상당히 우수한 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 A2모델을 입구에 설치하였을 경우에 나타나는 미기압파의 저감율로서 열차의 터널 진입 입구속도가 300 km/h 이상인 경우에 식 (1)에서 보여준 경험식에 잘 맞는 경향을 보여주고 있으며 슬릿커버 완충공만 설치한 경우(A1모델)보다 약 5 % 향상된 성능을 보여준다. Fig. 5(c)는 슬릿커버 완충공의 슬릿(개구부) 영향을 보기 위한 경우들 중의 하나



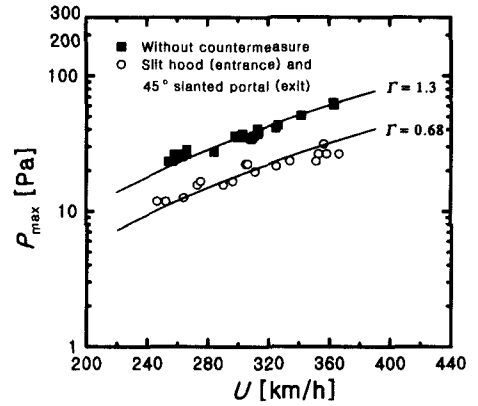
(a) Slit cover hood model, A1



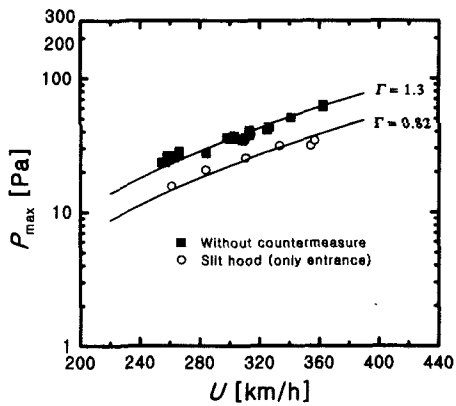
(d) Slit cover hood model, A4



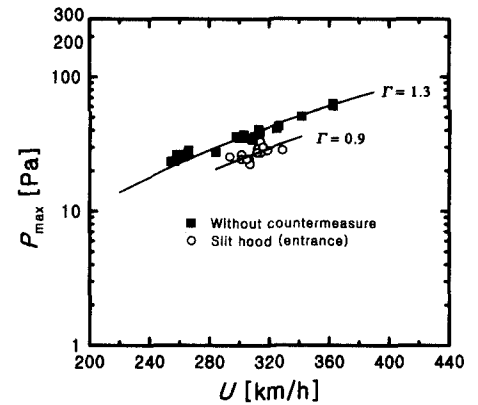
(b) Slit cover hood model, A2



(e) Slit cover hood model, A5



(c) Slit cover hood model, A3



(f) Slit cover hood model, A6

Fig. 5 Maximum values of micro pressure wave for the case of slit cover hood measured at 0.333 m from tunnel exit

로 슬릿의 높이를 A1모델에서 사용된 크기의 1/2인 절반으로 줄였을 경우에 A3모델에서 나타나는 미기압파의 저감성능이 약 5% 정도로 상대적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 실험결과 슬릿의 최적높이는 1.1 m(실척)임을 알 수 있었다. Fig. 5(e)은 슬릿커버 완충공을 입구에 설치하고 45° 경사 갱구는 출구에 설치하였을 경우에 나타나는 저감성능은 약 47.7%로 미기압과 저감율이 가장 좋은 것으로 나타났다. Fig. 5(f)는 슬릿커버 완충공의 길이변화에 대한 영향을 실험한 경우로서 A6모델의 결과는 30.8%의 미기압과 저감율이 나타났으며 A1모델에 비하여 약 10%정도 상대적 성능이 열악하다는 것을 알 수 있었다. 실험 수행한 슬릿커버 완충공 길이 중에서 미기압과 저감에 가장 효과적인 길이는 12.8 m(실척)임을 알 수 있었다. 특히, 입구 슬릿커버 완충공의 역할이 미기압과 저감(터널내 전파하는 압력구배 저감)에 기여하는 반면에 터널출구에 설치된 슬릿커버 완충공은 방사되는 미기압파의 주 전파경로에 기여하는 영향이 적음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 완충공을 터널 앞, 뒤로 각각 달았을 때(A4 모델)의 미기압과 저감율이 터널 입구에만 후드를 달았을 때(A1 모델)와 별반 차이가 없는 것과 터널입구에 슬릿커버 완충공을 달고 출구에는 45° 경사갱구를 달았을 때(A5 모델)의 미기압과 저감효과가 약 47.7%로 되는 것으로도 설명된다. 그러나 터널출구 갱구의 경사각도에 따른 명확한 역할 및 영향은 심도 깊게 추후 연구되어야 할 것이다(현재까지 터널출구에서 미기압파 방사는 무지향성으로 구형으로 방사된다고 보고되어 있다).

4. 결 론

열차가 고속으로 터널에 진입할 때 압축파가 열차 앞에 생성되고 터널을 통하여 전파된다. 터널 출구에서 압축파는 팽창파로서 터널 입구 쪽으로 반사된다. 이 압축파와 팽창파의 상호작용은 열차 안에 있는 승객에게 이명(耳鳴)현상을 야기한다. 한편 첫 번째 압축파가 터널 출구에 도달했을 때 일부분이 미기압파라고 불리는 충격성파(impulsive wave)로 터널출구 바깥 주변으로 방사되는데 이것은 환경 소음 및 진동문제를 야기한다. 이 현상은 터널내공 단면적이 작은 경우

폭발음을 일으키기도 하며 터널출구 주변민가의 문과 창문틀을 흔들어 놓는다. 본 연구에서는 중형(1/60축척) 터널주행 열차모형 시험장치로 고속철도 터널 미기압과 저감대책인 “ㄱ”형상 커버를 적용한 슬릿커버 완충공을 개발하였다. 0.5 km의 비교적 짧은 터널의 경우에 미기압파는 열차의 속도가 증가할수록 커지며 이와 같은 경향은 입구 완충공의 종류에 관계없이 거의 일관된 양상을 보이며, 미기압의 최대 값은 열차입구속도의 3승에 비례함이 본 실험결과와 잘 일치하였다. 그리고 이상의 실험결과들로부터 터널입구에 완충공을 설치하면 열차의 터널 돌입속도를 줄이는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 미기압과 저감 대책으로 완충공 길이, 측면 슬릿 개구면적, 슬릿 덮개의 크기 등을 변화시켜 슬릿커버 완충공을 개발하였고, 또한 완충공과 경사 갱구와의 혼합사용을 통한 일련의 실험을 통하여 열차진입속도 240 km/h ~ 380 km/h 영역에서 터널출구 미기압파를 최대 47.7% 줄일 수 있는 대책을 개발하였다. 주요 결과로는 개발된 슬릿커버 완충공을 터널 입구부에만 설치하였을 경우에는 미기압파를 41.2% 저감할 수 있으며 개발된 슬릿커버 완충공을 터널 입구부에 설치하고 45° 경사갱구를 터널 출구부에 설치할 경우에는 미기압파를 47.7% 저감할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 완충공은 터널 길이에 따라 완충공 길이만 적합화시켜 사용할 수 있다.

본 연구는 추후 호남고속철도, 신의주고속철도 등의 터널 단면적 최적화를 시행하면 반드시 필요한 기술이다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발의 3차년도 개발결과 중 일부이며 (주) 대본 엔지니어링, (주) 삼보기술단의 지원에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Maeda, T., 1994, "The Final Report of Micro Pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project," Japan Railway

Technical Services.

- (2) 김동현, 민동호, 오일근, 1999, "350km/h급 터널 미기압파 저감대책 개발," 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집, pp. 101~107.
- (3) 김희동 등, 1999, "입구후드가 고속철도 터널 입구의 압축파에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제1호, pp. 58~68.
- (4) 김희동 등, 1999, "고속철도 터널입구에서 형성되는 압축파의 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제2호, pp. 234~242.
- (5) Dayman, B. and Vardy, A. E., 1979, "Alleviation of tunnel Entry pressure transients: I. experimental program," *Proceedings of 3rd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, March, Sheffield University, England, pp.343~362.
- (6) 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.
- (7) 김동현, 1999, "터널 미기압파 저감을 위한 강재후드 개발 연구," 한국철도기술연구원 연구보고서, BK5388.
- (8) Kim, D. H., Min, D. H. and Oh, I. G., 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.
- (9) 김동현, 양신추, 오일근, 1999, "한국형 터널 미기압파 저감 시험기 개발," 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 146~154.