신공법 소개

철도터널 미기압파 저감대책의 기술개발 동향

김 동 현* 신 민 호*

1. 서 론

철도가 대도시간 수송수단으로서 타 교통수단과 경쟁을 할 수 있는 조건 중의 하나가 고속성이다. 세계의 철도 고속화는 일본의 신간선과 특히 유럽에서 괄목할만하며 프랑스, 독일, 이태리 등이 초고속열차 개발에 적극적으로 참여하고 있다. 국내에서도 현재 경부고속철도 선실과 더불어 차세대 한국형 고속전철개발에 매진하고 있다.

열차속도가 고속화되면서 공기역학적 현상이 두드러지게 나타나고 있다. 한국이나 일본과 같이 터널이 많은 나라에서는 특히 "열차·터널 시스템의 공기역학적 문제"가 중요시된다. 터널과 같은 좁은 공간에서 고속주행은 개활지 구간의 주행에 비해서 한층 심한 공력학적 문제가 발생한다. 열차·터널 시스템의 공기역학적 문제의 연구개발은 이론해석, 수치 시뮬레이션, 모형실험, 혹은 실차시험 등에 의해서 행해지고 있으며, 철도 고속화에 따른 제반 문제는 다음과 같다.

- 터널 미기압파 현상 및 저감대책
- 터널 주행시 터널내의 풍압변화와 객실내 승객의 이명현상
- 터널 주행시 열차의 공기저항: 압력경감 덕트에 의한 완화
- 복선터널에서의 열차교행: 궤도중심 간격 설계
- 터널 주행시 풍압변동에 따른 차체 및 터널내벽 피로강도 설계기술

본 글에서는 터널 출입구 미기압파(micro pressure wave) 현상 및 완화대책을 중심으로 살펴보기로 한다.

2. 고속철도 터널의 미기압파 방사현상

열차가 고속으로 터널에 진입하면, 차체가 공기를 밀고 나가 압축함으로써 압축파가 형성된다. 이 압축파는 터널 내·외 환경에 영향을 미치는데, 터널 내부에서는 공기압의 변동이 나타난다. 이 공기압 변동은 열차 내부 기압에 영향을 미쳐 승객들이 귀울림(이명, 耳鳴) 현상 등을 느끼는 등 불쾌감을 일으킨다. 또한 압축파는 터널의 출구에서 충격성 소음으로 '뎅~'하는 소리와 함께 터져 나가는데, 이를 미기압파라고 한다. 충격성 환경소음인

* 한국철도기술연구원

미기압파는 대기압의 1/1000 정도 크기라서 "micro pressure wave"라 명명되었다. 이 미기압파는 폭발음 뿐 아니라 주변 환경에 진동현상까지 일으킨다. 특히 미기압파의 경우 저주파로 방음벽 등에 의한 차단이 불가능하며, 영향을 미치는 범위가 터널출구에서부터 최고 반경 100미터 이상에 이르는 것으로 알려졌다. 이에 대한 대책으로 경부고속철의 경우, ▶터널 단면적을 기존의 100㎡에서 107㎡으로 확대하는 방안 ▶터널 진입시 열차속도 저감책 등을 마련 적용하고 있다. 이에 대한 효과적인 저감대책은 터널 단면적을 크게 하는 것보다는 터널입구 후드(hood)의 적용이다.

미기압파의 현상은 다음과 같이 3단계로 발생된다(그림 1 참조).

(1) 열차의 터널 진입에 의한 압력파의 형성
(2) 압력파의 터널내부에 선파와 함께 압력파형의 변형
(3) 터널 출구로부터의 미기압파의 방사

고속열차를 270 km/h급 이상으로 운행하는 일본 신간선과 독일 ICE, 프랑스의 TGV의 터널통과 운행형태를 살펴보면, 프랑스의 경우 운행노선이 대부분 평지이고 도심지 근처의 터널(감속구간, 그림 2 참조)에서 약 220km/h로 운행속도를 낮추어 터널주행을 하고 있다. 독일의 ICE는 일본 터널 단면적 63.4㎡보다 비교적 큰 82㎡에서 270km/h로 운행하고 있는데 터널 미기압파의 심각성이 보고된 바 없다. ICE 노선 터널은 본 한국철도기술연구원에서 심도 깊게 연구한 경사갱구(일종의 미기압파 저감용 후드 역할)를 터널 입출구에 적용하고 있어 미기압파의 저감효과를 거두고 있다. 그림 3의 독일 ICE 노선과 경부고속철도의 경사갱구 터널갱문은 본래 취지가 사면안정과 주변경관을 목적으로 적용되었는데, 이와 더불어 미기압파를 줄이는데 크게 공헌하고 있다.

현재, 건설중인 경부고속철도에서 터널 미기압파에 의한 터널출구 폭발음은 생성되지 않으나, 미기압파에 의한 주변민가의 창문틀과 문의 흔들림은 예상될 수 있으므로 이에 대한 가장 효과적인 대비책은 터널입구 후드(hood)의 개발이다. 기존터

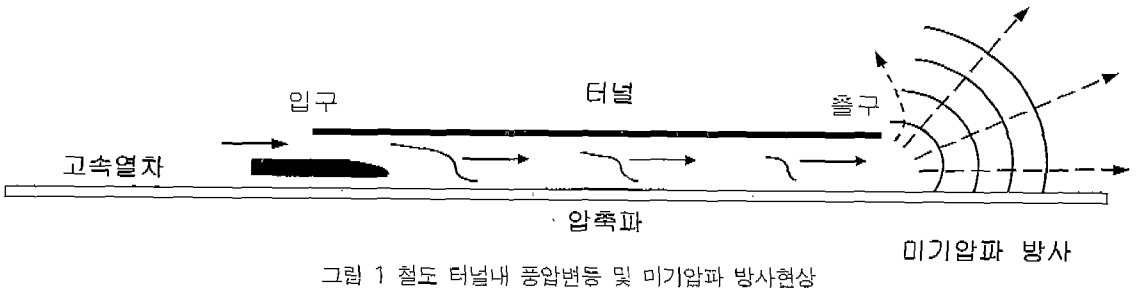


그림 1 철도 터널내 풍압변동 및 미기압파 방사현상

그림 2 프랑스 TGV 노선 터널 갱문

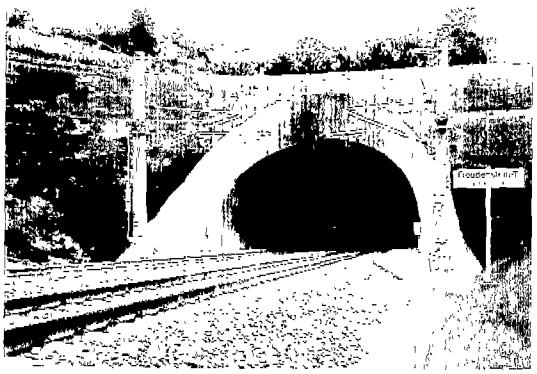


그림 3 독일 ICE 노선 터널 갱문

(사진제공 : 한국고속철도건설공단)

널 단면적은 유지되고 열차는 점점 속도향상을 추구하고 있다. 유럽보다 고속철도 터널·열차 인터페이스 기술의 선진국인 일본에서는 터널 단면적이 작은 상황에서 저비용의 터널입구 후드 등을 적용하고 있다.

3. 일본 신간선의 터널 미기압파 문제

일본 신간선의 경우에 1975년 3월 岡山-博多 노선 개통과 함께 비교적 긴 터널의 출구에서 충격성 굉음이 발생하고, 갱구 부근의 가옥의 창과 문이 갑자기 움직이면서 소음을 발생시키는 새로운 환경문제가 발생하였다. 이것은 열차의 터널진입시 발생하는 압력파가 터널내부를 진파하여 터널출구에 도달할 때 압력파의 몇 %가 갱구로부터 외부에 필스형태의 압력파(터널 미기압파)가 방사되기 때문에 발생한다. 미기압파의 파형은 근사적으로 터널출구에 도달한 압력파 파형의 시간미분으로 표시되어진다. 山陽 신간선의 비교적 긴 터널에서 이 문제가 발생한 것은 슬라브 궤도 적용에 따른 터널벽면 주위 전체가 매끄럽게 되어 압력파의 전면이 수직으로 되는 "파의 비선형 효과"가 나타났기 때문이다. 즉, 압력파의 전면이 터널내부를 진파하는 동안에 미기압파가 커졌다.

4. 터널입구 후드의 터널 미기압파 저감원리 및 설계기준

터널출구 미기압파를 저감시키기 위해서는 압축파의 시간에 대한 압력구배를 작게 하는 것이 기본원리이다. 그림 4의 (1)에서와 같이 후드를 적용하지 않으면 열차가 터널 진입시 첫 번째 압축파의 압력구배 자체가 상당히 가파르다. 즉 압력구배의 큰 값을 가지므로 미기압파의 강도 또한 크다. 그러나 터널 입구에 후드를 설치하면 그림 4의 (2)와 같이 압력구배의 변화를 가져 올 수 있으나, 시간에 대한 압력구배를 선형적으로 얻을 수 없다. 따라서 압력파 전면의 상세한 형상이 문제시된다. 따라서 후드의 양 측면에 그림 4의 (3)과 같은 공기역학적인 개구부나 다른 형상대책(슬릿 및 커버)을

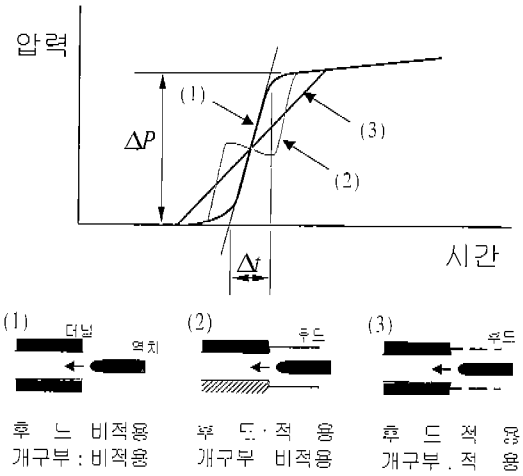


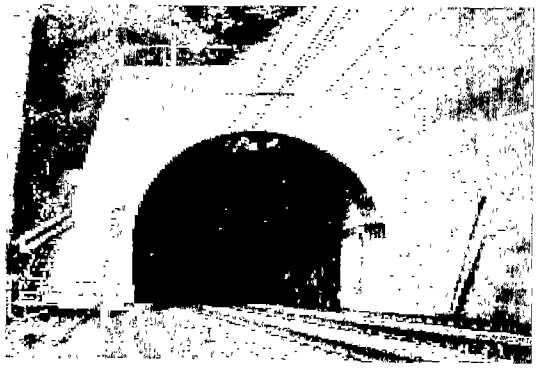
그림 4 터널미기압파 저감원리

마련하여 압력구배가 선형적으로 변화되도록 해야 한다. 이를 위해서는 모형실험을 통해 후드 측면의 개구부 크기 및 위치, 슬릿 커버의 형상 등을 최적화 시켜야 한다. 압력구배를 낮출 수 있는 가장 효과적인 대책이 현재로서는 터널입구 후드 대책이다. 일본의 경우에 터널입구 후드 시방설계 기준은 열차/터널 단면적비 R=0.216(신간선 열차와 터널 단면적)에서 후드를 설치하지 않은 발라스트 궤도 터널의 열차진입속도 V=160km/h일 때의 압력구배를 기준으로 각 노선에서의 후드를 실험으로 시방설계하고 있다. 터널 출구면 중심에서 45° 각도로 20m 거리에서 미기압파의 피크 값이 20Pa 이하가 되도록 하고 있다.

미기압파 저감대책의 원리는 터널출구에 도달한 압력파 전면의 구배를 완화하는 것이다. 이러한 방법은 여러 가지를 생각할 수 있다. 현재 일본의 山陽 및 東北 上越신간선에서는 터널입구에 길이 수십 미터의 후드를 설치하는 방법, 연속되는 터널을 연결하는 스노우 쉘터(snow shelter)의 측면의 개구부(slit)로부터 압력파를 없애는 방법이 적용되고 있다.

그림 5에 최근에 설치된 일본 신간선 터널입구 후드의 개관을 나타내었다. 그림 5(a)는 강재(steel) 구조로 설치된 후드이며, 그림 5(b)는 반대편 터널 갱문으로서 이 부근지역에 방사되는 미기압파를 줄이기 위한 것이다.

(a) 상재구조 터널입구 후드



(b) 반대편 터널출구(미기압파 발생지역)

그림 5 일본 신간선 터널입구 후드 및 갱문

5. 터널 미기압파 저감대책

터널 미기압파는 터널출구에 도달한 압축파의 파면 압력구배에 기인 하기 때문에, 이 파면의 압력구배를 작게 하는 것이 저감 대책의 기본적인 사항이다.

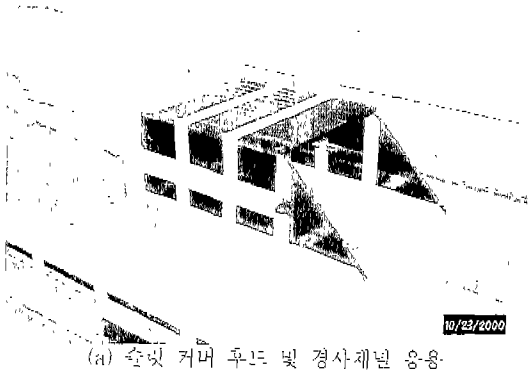
구체적으로 다음과 같은 방법을 생각할 수가 있다.

- 슬릿 커버 후드(또는 경사 갱구)에 의한 대책
- 연속한 터널을 슬릿 및 슬릿 커버가 부착된 챔버로 연결하는 방법
- 통풍공 터널에 의한 대책
- 차량에 의한 대책
- 터널 벽면에 의한 대책
- 능동제어 대책

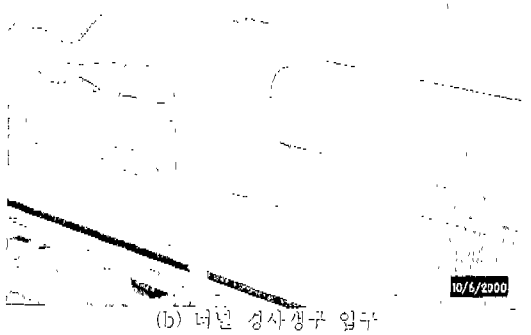
5.1 입구후드에 의한 대책과 터널 갱문 부근의 지형효과

입구 후드는 열차 진입에 의해서 발생하는 압축파 전면의 압력구배를 처음부터 완화하는 대책법이다. 현재, 길이 12~22m의 후드가 일본 山陽 신간선 24 갱구, 東北 신간선 30 갱구에 설치되어 있다 (그림 5 참조). 일본의 경우는 터널주행 열차모형 시험기를 이용하여 후드를 적절한 위치에 적절한 크기의 개구부를 각각의 길이에 대한 최적의 개구부(openings)를 얻었다. 또한 터널 갱문 주변의 지형이나 시설물이 터널 입구후드의 역할을 수행할 수 있다는 것이 밝혀졌다.

최근에 본 한국철도기술연구원에서 개발된 슬릿 및 슬릿커버 후드는 일본의 개구부 형태 후드보다 한층 미기압파 저감효과가 크다. 현재 경부고속철도에



(a) 슬릿 커버 후드 및 경사제널 응용



(b) 터널 경사갱구 입구

그림 6 경부고속철도 터널 미기압파 저감대책 개발(한국철도기술연구원)

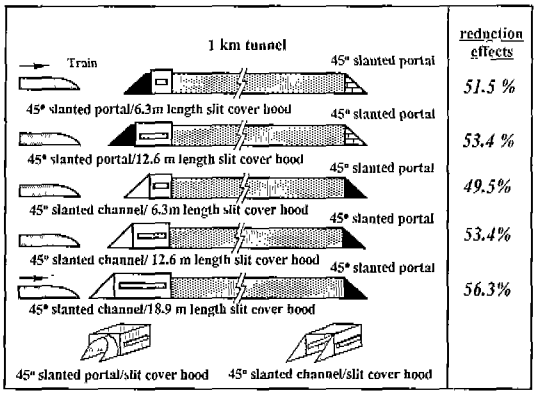


그림 7 경부고속철도 1km급 이상 미기압파 저감대책 개발(한국철도기술연구원)

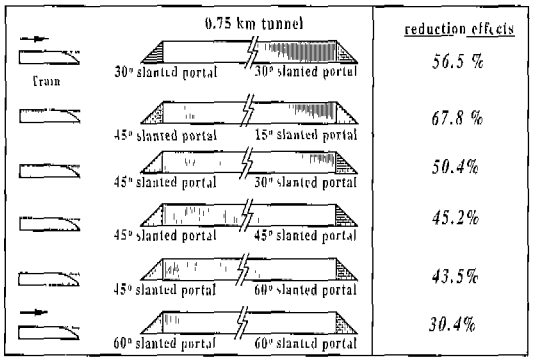


그림 8 경부고속철도 0.75km급 경사갱구 대책개발(한국철도기술연구원)

대해 터널연장 0.25km급, 0.5km급, 0.75km급, 1km급 이상까지 적용할 수 있는 슬릿 키버 후드 및 경사갱구를 개발완료 하였다(그림 6 참조). 그림 7과 그림 8은 개발결과 중 일부로서 후드형과 경사갱구형 경부고속철도 미기압파 저감대책으로 터널 출입구 지형 상황이나 시공성, 민가분포 상황 등에 맞추어 선택 적용이 가능하다.

5.2 연속한 터널에 개구부를 적용하여 스노우 쉘터로 연결하는 방법

일본 上越 신간선에 시공한 방법은 스노우 쉘터(snow shelter)에 적절한 개구부를 설치하여 미기압파에 대한 대책을 하였다. 다시 말해서, 터널 앞쪽에서 발생한 압력파를 연속터널 중간에 위치한 스노우 쉘터의 개구부에서 처리하는 방법이다. 본

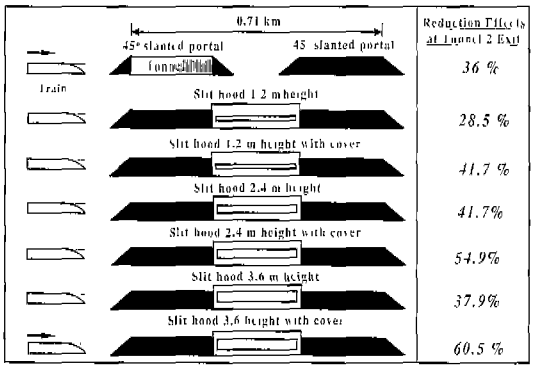


그림 9 경부고속철도 화신터널용 스노우 쉘터 대책개발(한국철도기술연구원)

연구원에서도 최근에 한층 저감효과가 뛰어난 개량형인 슬릿 및 슬릿 커버를 적용한 스노우 쉘터를 개발하였다(그림 9 참조).

5.3 통풍공 터널에 의한 대책

기계화 굴착에 의한 소단면 수직 통풍공(air shaft)을 철도터널에 일정 간격으로 적용하면 터널내의 풍압변동량을 저감시켜 승객 이명감을 줄여주고, 돌풍식 환기에 의한 환기효과뿐만 아니라 터널 미기압파 저감에도 크게 기여한다(그림 10 참조). 통풍공 터널의 수 목적은 터널 단면적 저감설계를 위한 내공단면을 줄이는데 있다.

5.4 열차 전두부 형상의 최적화

열차 진두부의 길이와 미기압파 저감효과의 관계에 있어서 전두부는 기본적으로 긴 쪽이 미기압파의 저감 효과가 크다. 미기압파 저감을 위해서는 압축파의 형성에 관여하는 열차 선두부의 단면적 변화를 완만하게 설계해야 할 필요가 있다. 즉, 터널 진입시 터널내 공기 압축시간 지연효과를 갖는다. 대표적인 적용사례는 일본 신간선 500계 차량이다.

5.5 차량 단면적에 의한 미기압파 저감 대책

차량측의 미기압파 저감 대책으로서 터널진입시 압력파의 형성에 영향을 주는 열차 진두부 형상

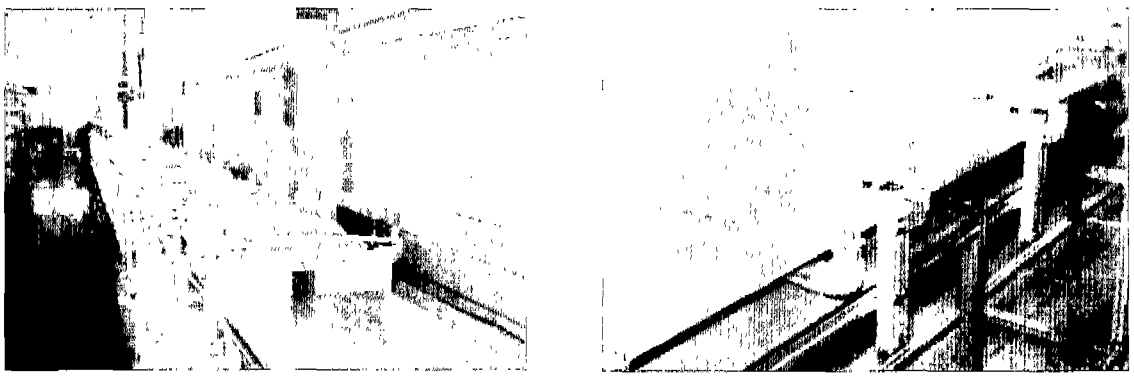


그림 10 재래철도용 소단면 통풍공(air-shaft)터널 개발(한국철도기술연구원)

최적화와 더불어 열차 단면적을 축소하는 것을 생각할 수 있다. 동력차와 객차 단면적이 작아지면 터널 단면적이 커진 효과와 같다. 고속용 신차량 제작시에 이와 같은 미기압파 대책을 고려한 설계가 요구되어진다.

5.6 터널 벽면에 의한 대책

발라스트(ballast) 궤도에서 터널이 긴 경우, 압축파가 터널내를 진파하면서 파면의 압력구배가 감소하여 미기압파도 작아진다. 따라서 발라스트와 같은 완충재를 터널의 전체 길이에 걸쳐서 설치하는 저감대책을 생각할 수 있다. 파면 압력구배의 감소는 발라스트의 표면거칠기와 자갈 적층에 의한 작은 다공 효과로 볼 수 있다. 이 방법은 설치 구간이 짧으면 효과가 없는 것으로 알려져 있다.

5.7 능동제어 방법

지금까지 제시한 방법은 수동제어 방법이고 능동제어 방법으로는 다음과 같은 방법들이 일본철도종합기술연구소를 중심으로 검토되고 있으나 실용화까지는 기술개발이 더 필요하다.

- 터널내에 워터 커텐(water curtain)을 설치하는 방법
- 터널내에 물방울을 분사하는 방법
- 터널 입구에 송풍기를 설치하는 방법
- 터널 출구에 능동소음제어 우퍼 스피커 설치방법

이러한 방법은 시공성, 경제성, 안전성 등의 문제점이 발생하지 않도록 충분한 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Dong Hyeon Kim, Dong-Ho Min and Il Geun Oh, "Experimental study of the aerodynamic countermeasures for reducing the mico pressure waves and pressure fluctuations in high-speed train-tunnel interfaces." WCRR, 1999, 10. 18~23
2. Maeda T., Matsumura, T. and etc, "Counter-measures against Micro-pressure Waves Radiated from Tunnel Exit under Speed-up of Shinkansen," RTRI REPORT, Vol. 4, No. 1, 1990. 1.(in Japanese)
3. Maeda, T. and etc, "The Final Report of Micro-Pressure Wave Study for The Seoul-Pusan High-speed Railroad Project," Japan Railway Technical Services, 1994
4. Matsuo, K.; Aoki, T.; Mashimo, S.; Nakatsu, E; Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel. 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp. 925-934, Aosta Valley, Italy: 6-8 October 1997
5. Ozawa, S., "Numerical Simulation of Aerodynamic Problems in Tunnel-Train Systems," RTRI REPORT, Vol. 4, No. 8, 1990. 8.(in Japanese)
6. Ozawa, S. and Maeda, T., "Model Experiment

on Reduction of Micro Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit," JSME, International Symposium on Scale Modeling, Tokyo, July 18-22, 1988

7. Pope, C. W.; The Simulations of Flows in Railway Tunnels Using a 1/25th scale moving facility, Proceedings of the 7th International Symposium on Acrodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Elsevier, pp.709~737, Brighton 1991
8. 김동현 등, "고속철도 터널의 공력학적 설계기술개발(터널 미기압파 저감대책)," G7 위탁과제 보고서, 1998. 10
9. 김동현 등, "고속전철 비정상시험장치 1차개발 및 기본모델 공력시험," G7 위탁과제 보고서, 1998. 10
10. 김동현 등, "터널 미기압파 저감을 위한 강제후드(steel hood) 개발," RIST 수탁과제보고서, 1999. 7
11. 김동현, 오일근 등, "고속철도 터널 공력설계 및 터널 후드 개발," G7 하위단위과제 보고서, 1999. 10, 2000. 10
12. 김동현, 강부병, 신민호 등, "철도터널 내공단면 직 저감을 위한 통풍공의 공기역학 설계기술 및 수직갱 굴착장비 개발," '99 산학연 공동기술개발사업, 2000. 11