

# 교행하는 고속전철의 비정상 공기력에 대한 수치적 연구

황재호\* · 이동호\*\*

## Computational Study on Unsteady Aerodynamic Loads on Crossing Train

Jaeho Hwang\*, Dong-Ho Lee\*\*

Key Words: Crossing Trains, Moving Grid Technique, Unsteady Aerodynamic Loads, Domain Decomposition Technique, Compression Wave, Unsteady Interaction

### Abstract

In order to study unsteady aerodynamic loads on high speed trains passing by each other at the speed of 350km/h, three-dimensional flow fields around trains during the crossing event are numerically simulated using the three-dimensional Euler equations. The Roe's FDS with MUSCL interpolation is employed to simulate wave phenomena properly. An efficient moving grid system based on domain decomposition techniques is developed to analyze the unsteady flow field induced by the restricted motion of a train on a rail. The numerical simulations of the trains passing by on the double-track are carried out to study the effect of the train nose-shape, the train length and the existence of tunnel when the crossing event occur. Unsteady aerodynamic loads side force and drag force - acting on the train during the crossing are numerically predicted and analyzed. It is found that the strength of the side force mainly depends on the nose-shape, and that of drag force on tunnel existence. And it is observed that the push-pull like impulsive force successively acts on each car and acts in different directions between the neighborhood cars. The maximum change of the impulsive force reaches about 3 tons. These aerodynamic force data are absolutely necessary for the evaluation of the stability of the high speed multi-car train. The results also indicate the effectiveness of the present numerical method for the simulation of unsteady flow field induced by the

bodies in the relative motion.  
정상적 작동을보장하기 위한 공기역학적 해석등 고속철도 차량의 주요부분의 설계에 공기역학적인 문제는 밀접하게 연관되어 있다. 이러한 열차의 고속화에 따른 공기역학적인 제반문제들중 열차의 교행에 따른 급격한 압력변동 및 공기력변동은 안락성과 안정성을 담보하기 위해서는 심도 있게 연구되어야 하는 부분이다.

### 1. 서 론

고속전철(High Speed Train)은 기존의 철도 차량과는 달리 주행속도가 시속 250 - 400 km로서 이와 같은 고속에서는 차량에 작용하는 총 주행 저항의 약 80%정도를 공기압력 및 공기와의 마찰로 인한 공력저항이 차지하게 되어 차량의 외형설계에서 공기역학적인 고려가 필수적으로 요구된다. 또한 고속주행중의 터널통과는 공기 압력파(pressure wave)로 인한 승객불쾌감, 선로 주변의 소음공해문제, 고속 주행시 판토틀라프의

본연구에서는 시속 350km로 복선궤도에서 교행하는 열차에 대해, 차량의 전두부 형상(긴전두부-짧은 전두부)과 교행장소(터널내 교행-개활지 교행), 열차의 총길이(2량 열차-3량 열차)등 3가지를 기본적인 인자로 택해 교행해석을 수행하였으며, 물리적인 관점에서 논의하였다.(<그림. 1> 참조)

\* 정희원, 서울대학교 항공우주공학과 박사과정  
\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 교수

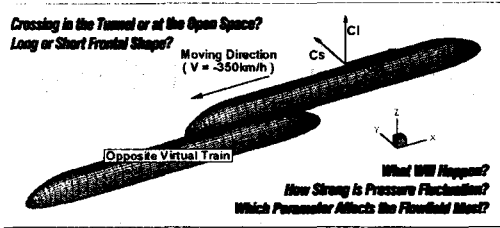


그림 1 교행해석문제의 정의

고속전철의 비정상 해석은, 열차와 터널, 열차와 열차와의 상대적 운동(Relative Motion), 방대한 계산영역 및 시간의 소요, 복잡한 열차 주변의 격자 형성등에 있어 수치적으로 어려운 요소가 있다. 열차/터널, 열차/열차의 상대적인 운동을 모사하기 위하여, Ogawa와 Fujii[1][2]는 겹침 격자 기법의 일종인 FSA(Fortified Solution Algorithm)[3]을 이용하였으며, 홍순찬등은 STAR-CD의 슬라이딩격자를, 혹은 Meastreu[4] 등은 비구조화 격자 기법등을 사용하였으나, 열차의 운동경로가 직선으로 구속되어 있기 때문에 상대적으로 효율적인 격자기법의 적용이 가능하다. ([5][6])

본 연구에서는 문제에 적합한 격자기법을 개발하여, 보다 실제적인 형상의 열차에 대한 교행해석을 수행하였다.

## 2. 해석기법

### 2.1 수치해법개요

본 해석에 사용된 지배방정식은 비정상 압축성 Euler 방정식이며, 수치기법으로는 플럭스 항 계산에는 Roe의 FDS 기법을 사용하였으며, 해의 수렴성에만 영향을 주는 좌변 행렬 항은 수렴 속도를 높이기 위하여 Van Leer의 FVS 기법을 이용한 엄밀 선형화 행렬(exact flux Jacobian)을 사용하였다. 시간적분법으로는 LU-SGS기법(Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel Scheme)을 사용하였다. 보다 자세한 내용은 참고 문헌[5][6]을 참고하기 바란다.

### 2.2 이동격자기법

전산유체역학이 직면하는 여러 문제들 중의 하나는 상대적 운동이 있는 복잡한 2차원/3차원 물체

주위의 물리영역을 하나의 블록으로 이산화하기가 어렵다는 것이다. 그리고, 이에 대한 대안으로 영역분할 기법, 비구조화 격자계, Dragon 격자계 등의 방법들이 제시되었다. 영역분할 기법(DDT; Domain Decomposition Technique)은 복잡한 물리영역을 보다 다루기 쉬운 여러 개의 영역으로 분할하여 구조화된 격자를 이용한 격자형성을 쉽게 하는 방법이다.

널리 이용되는 영역분할기법에는 부영역 사이의 겹침과 격자선 연결 형태에 따라 다중 블록 격자(Multi-block Grid System), Patched 격자, Overlapping 격자의 세 가지 방법이 있다. 다중 블록의 경우 부영역 사이 공통경계면에 수직한 격자선이 경계를 가로질러 연속적으로 이어지는 반면 Patched 격자의 경우 공통경계를 가로지르는 격자선이 연속일 필요가 없다. Overlapping 격자의 경우 둘 이상의 격자를 독립적으로 형성한 후 공통경계면 없이 충분한 겹침영역을 갖도록 오버랩 시키는 것이다. 다중 블록 격자계의 경우 상대적 운동이 존재할 경우 매 시간 단계마다 움직이는 격자들을 재형성해야 하는데, 이 때문에 격자가 쉽게 연장되고, 꼬이게 되어 계산결과와 수렴해의 질을 보장할 수 없는 단점이 있으나 유동변수의 보존이 격자 경계에서 보장되는 장점이 있다. Patched 격자의 경우 물체의 제한적인 운동을 모사하기 위하여, 이동경계(sliding boundary)가 이용될 수 있는데, patch 경계(patch boundary)는 시간정확도와 보존처리가 쉽게 조절될 수 있기 때문에 겹침 경계와 비교하여 효과적인 방법이 된다.

후자로 갈수록 격자 형성이 쉬워지는 반면 격자경계간 유동정보교환을 위한 과정이 복잡해지게 된다. 다중 블록 기법에서는, 격자점들이 경계에서 연속적으로 분포되므로, 특별한 interpolation 과정이 필요없고 인접한 격자의 해를 경계조건으로 외삽하는 것으로 충분하다. Patched 격자의 경우 유동정보의 보존적인 내삽이 가능하다고 알려져 있으나, 일반적인 3차원 곡면에 대해서는 격자간 틈이 존재하는등, 코드에 구체화시키는 작업은 다중 블록의 경우에서와 같이 단순하지는 않다.

고속전철의 터널 진·출입 및 교행 등의 3차원 비정상 계산을 수행하기 위하여 설정한 계산영역은 플랩의 진동이나, 외부부착물의 분리와 같이 비교적 단순한 영역으로 설정될수 없으며, 보다 세심한 배려가 요구된다. 계산영역의 세심한 선택에 있어서는, 수치기법의 효율성, 해석기법의 확장성 등을 고려하여야 한다.

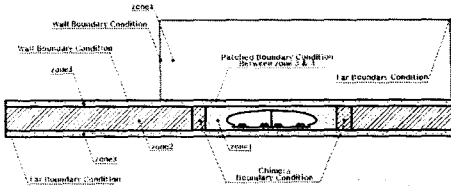


그림 2 영역분할 개략도

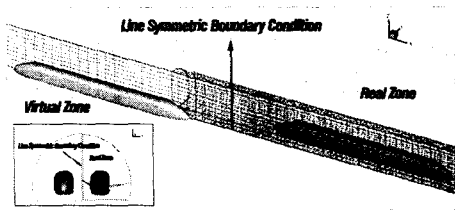


그림 3 교행해석을 위한 경계조건

본 연구에서는 열차의 교행해석을 위하여, 물리영역을 5개의 영역으로 분할하였다. <그림. 2>에 보이는 바와 같이 열차 주변의 계산영역(zone 1), 열차 주변의 영역과 겹치는 부분을 갖게 되는 계산영역(zone 2), zone 1, zone 2의 경계가 되는 중간영역(zone 3)과 외부 영역이 되는 계산영역(zone 4, 5)로 이루어져 있으며, 이는 수치해법과 각 계산영역간 경계조건의 간략화와 더불어, 계산 영역의 확장의 용이하게 할 수 있을 것이다. zone1 과 zone2 의 경계는 물체의 운동경로의 중첩 영역으로서 겹침격자기법을 이용하였으며, 유동정보의 전달방식은 1-D linear interpolation이다. 이로 인해 Chimera 전처리 시간의 단축은 물론 trilinear interpolation에 의한 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. zone1 과 zone2의 바깥 경계는 zone3와 경계면을 공유하게 되므로, 보존변수의 시간에 대한 보존을 고려한 patched 경계로써 처리되었으며, zone3 와 zone4의 경계면은

multiblock 경계나 patched 경계로써 처리되며, 이로 인해 zone4, 5의 계산격자수를 줄일수 있어 계산용량의 감소가 기대된다. 계산영역의 앞과 뒤, 그리고 윗면은 원방경계조건으로 처리된다. 교행해석시 한방향의 열차를 해석하기 위해서 <그림 3>에서 보이는 바와 같이 선대칭 조건을 이용하였으며, 따라서 대칭면을 중심으로 실제계산영역과 가상영역이 된다. zone 3는 그와 같은 경계조건을 부여하기 위한 중간영역이 된다. 보다 자세한 내용은 참고문헌[5]을 참고하기 바란다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 해석기법 검증

비정상 해석기법을 검증하기 위하여, NLR의 비정상 시험장치에서 수행된 터널 진입 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 압력은 터널 입구 4% 지점에서 측정되었으며, 열차의 속도는 350km/h, 열차와 터널 면적의 차폐율은 0.083 이다. ([7])

수치해석을 이용한 해석방법은 압력파의 최대기울기와 최대치등을 잘 예측하는 것으로 보인다.

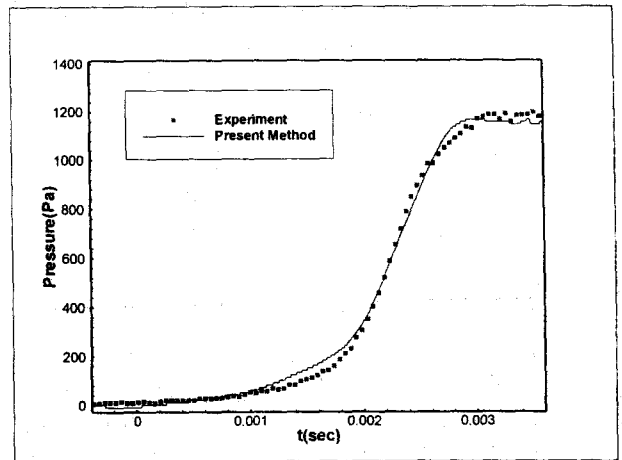


그림 4 해석기법 검증(V = 350km/h, Blockage Ratio = 0.083)

#### 3.2 해석모델 정의

열차의 교행문제에 대한 연구는 어려운점이 많아서 제한된 수치적, 실험적 연구만이 보고되고 있

다. Shimbo[8]의 실험은 교행중인 열차위의 제한된 점에서 압력을 측정하여 비대칭적인 압력분포를 보고하였으나, 수치적으로나 실험적으로나 교행문제에 대한 다양한 Parametric Study는 연구는 수행된 바 없다.

본 연구에서는 열차교행과 관련된 기본적인 비정상 공력특성을 파악하기 위하여, 전두부 형상 전두부 형상(긴전두부-짧은 전두부)과 교행장소(터널내 교행-개활지 교행), 열차의 총길이(2량 열차-3량 열차)등 3가지를 기본적인 인자로 택해 교행해석을 수행하였으며, 열차와 터널의 형상은 개발중인 한국형 고속전철의 것을 이용하였다. 본 연구에서는 열차하부의 복잡한 유동 패턴이나, 열차후미부의 박리영역등 보다는 적분특성인 공력에 초점을 맞추고, 있으므로, 열차의 형상은 평면도, 정면도, 측면도와 전두부를 따른 면적분포를 만족시키도록 단순화 하였다. 채택된 해석 모델은 다음과 같이 정리될 수 있다.

Case	전두부 형상	교행장소	열차길이
LFCT	Long(15m)	Tunnel	40m(2 Car)
SFCT	Short(6.64m)	Tunnel	40m(2 Car)
LFCO	Long(15m)	Open Space	40m(2 Car)
SFCO	Short(6.64m)	Open Space	40m(2 Car)
SFCO3	Short(6.64m)	Open Space	60m(3 Car)

표 1 해석모델 정의

열차의 폭, 높이와 단면적은 각각 2.80m, 3.50m와 9.00m<sup>2</sup>이며, 터널의 단면적은 108m<sup>2</sup>이다. <표. 2>에는 계산에 사용된 격자수와 순간출발조건을 고려한 초기위치를 보이고 있다.

Case	격자수	초기위치
LFCT	341,941	48.60D(about 457m)
SFCT	488,061	66.25D(about 623m)
LFCO	235,471	21.14D(about 199m)
SFCO	302,051	21.14D(about 199m)
SFCO3	316,111	21.14D(about 199m)

표 2 해석모델 정의

### 3.3 해석결과

본 수치해석에서는 전역시간전진법을 이용하였으며, 이때 시간간격은 0.01이며, 계산시간은

450Mhz Digital Alpha CPU에서 단위격자당 1회 반복계산시 3.8×10<sup>5</sup>초가 소요되었다. 이때의 각 분할영역간의 유동변수 보간을 위한 시간은 총계산시간의 1%미만으로 효율적인 격자제임을 확인할 수 있다.

<그림. 5>와 <그림. 6>은 각각 LFCT경우와 SFCO경우의 3가지 공력변화를 보이고 있다. 교행을 시작할 때를 0초로 설정하였으며, 따라서 15.32초일 때 교행을 종료하며, 7.66초일 때 두 열차는 완전히 겹치는 위치에 서게 된다.

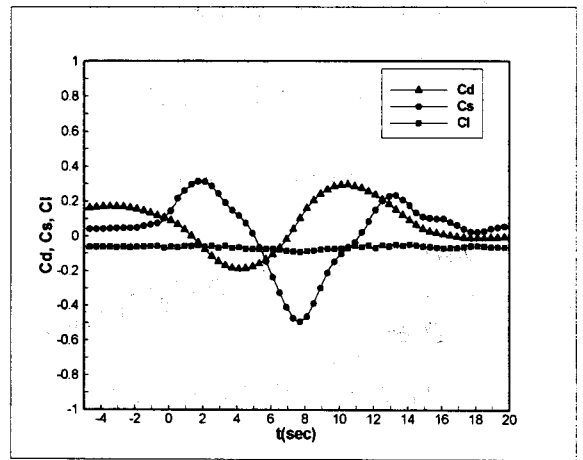


그림 5 공력계수변화(LFCT)

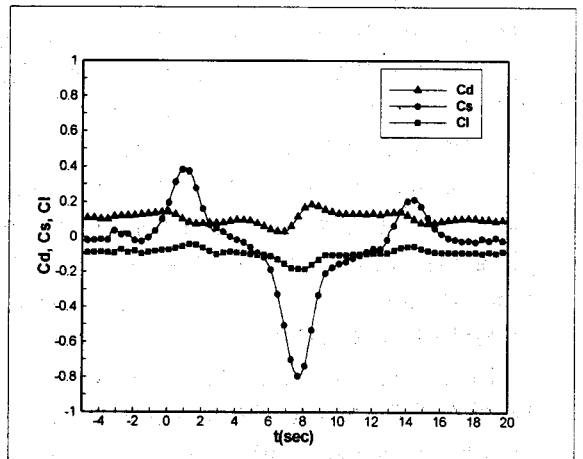


그림 6 공력계수변화(SFCO)

<그림. 5>와 <그림. 6>을 참조하여, 공력계수들 중에서 열차의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 측력성분(Cs)을 먼저 보면, 열차들이 근접함에

따라 열차 측면에 미치는 전두부 부근의 정체압력의 영향으로 척력을 작용하며, 교행시작후 1-2초후 최대척력값을 가지게 되며, 열차가 완전히 일치하는 7.66초 근방에서는 열차전두부 어깨부분의 음압장이 서로 겹치게 되어 인력이 작용하며, 따라서 최소 척력을 보이게 된다. 다시 서로 교행을 끝내는 15.32초 근방에서는 후미부 부근의 정체압력의 영향으로 강한 척력을 보이게 된다.

항력의 경우에는 점대칭의 분포를 보이고 있는데, 열차의 전두부가 대향열차의 측면에 위치하고 있을때는 전두부 정체압력의 감소로 저항성분이 감소하게 되며, 다시 후미부가 대향열차의 측면에 위치하게 될 때는 후미부 정체압력의 감소로 저항성분이 증가하게 된다.

무거운 지상운송체에 적용되는 양력의 경우에는 그 변화량이 무시할만 하므로 이후 척력과 항력에 대하여만 논의하겠다.

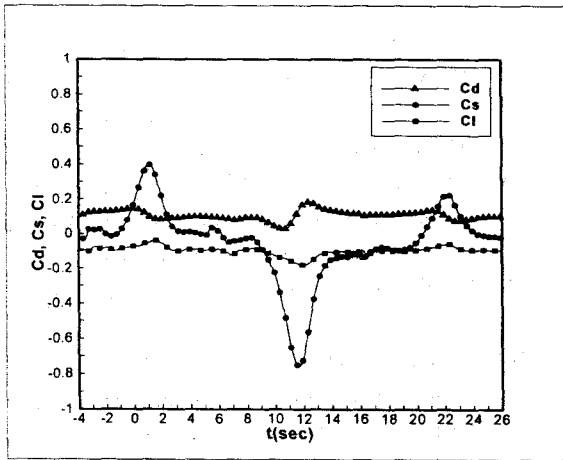


그림 7 공력변화(SFCO3)

<그림. 6>과 <그림. 7>에 보이는 2량의 열차(SFCO)와 3량의 열차(SFCO3)의 교행시 공력계수 분포를 비교하여 보면, 열차의 총길이(량수)는 최대, 최소치와 전반적인 분포에는 영향을 미치지 않으며, 공력 시간만이 열차의 길이 증가에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다.

척력과 항력의 경우를 4가지 2차량 Case(LFCO, LFCT, SFCO, SFCT)에 대하여 비교하여 보면, <그림. 8>과 <그림. 9>와 같다.

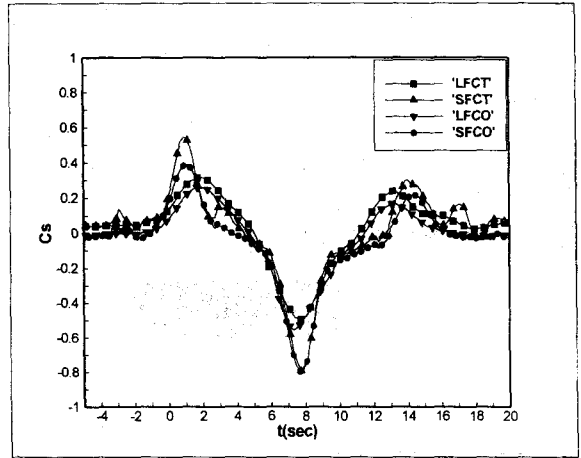


그림 8 척력비교(2차량의 경우)

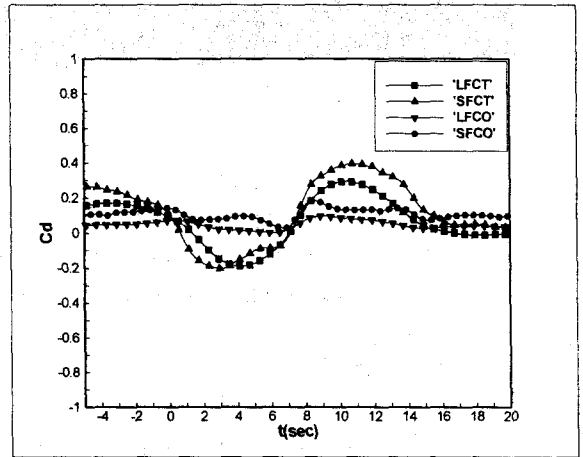


그림 9 항력비교(2차량의 경우)

<그림. 8>과 <그림. 9>의 척력과 항력비교를 보면, 열차의 형상과 교행장소에 따른 공력변화의 특성을 확인할 수 있다. 척력의 경우 교행장소의 영향보다는 열차형상의 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있으며, 이는 척력의 변화가 대향열차의 정체압력영역과 전두부 어깨부분의 음압영역에 의해 결정되기 때문이며, 이에 의한 열차의 대향면과 바깥면의 압력차이에 의해 크기가 결정되기 때문이다. 항력의 경우에는 터널 내부에서의 압력장이 1차원적으로 형성되는 특성 때문에 터널내부에서 교행시 변동폭이 훨씬 크게 된다. 터널내부교행시의 유동의 1차원성은 교행시 압력

장의 평면도에서 확인할수 있다. 터널내 교행시 압력의 변동크기가 상대적으로 큼에도 불구하고 터널내 유동장은 3차원적인 특성에 의해 터널의 길이 방향으로 1차원성을 유지하게 되며, 이로부터 교행시 축력변화가 터널유무에 크게 의존하지 않음을 설명할수 있다. (<그림. 10>,<그림.11> 참조)

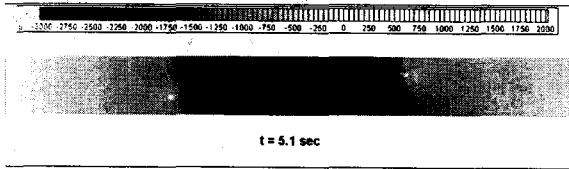


그림 10 터널내 교행시 압력장

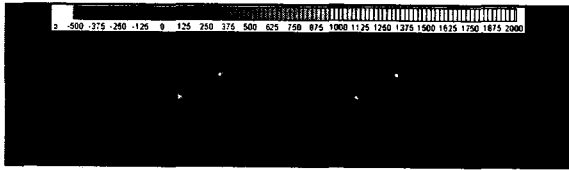


그림 11 개활지 교행시 압력장

#### 4. 결론

열차의 교행시 공력변화를 해석하기 위하여, 3차원 비점성,비정상 해석기법을 개발하고, 비정상 해석을 3개의 Parameter를 이용한 5개의 모델에 대하여 수행하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 도출할수 있었다.

1. 교행시에도 터널내부유동의 1차원성이 유지됨을 확인하였다.
2. 열차의 교행에 따른 전반적인 공력변화는 열차의 상대적 위치에 의존함을 확인할수 있었다. 교행시 열차는 '척력-인력-척력' 형태의 축력을 경험하게 되며, '감소-증가' 형태의 항력을 경험하게 된다.
3. 교행시 축력의 변화특성은 교행장소보다는 열차전두부의 형상에 보다 의존적임을 확인하였다.
4. 교행시 항력의 변화특성은 열차전두부 형상보다는 교행장소에 보다 의존적임을 할수 있었으며, 이는 터널내부 유동의 1차원성에 기인한 것이다.
5. 본 연구결과는 2량과 3량 열차에 적용됨으로써, 보다 실제적인 편성에 쉽게 적용될수 있다.

#### 후기

본 연구결과는 G7 고속전철기술개발사업 중 "I-1-2 고속전철설계기반기술개발" 과제의 위탁 과제 "고속전철 공력설계 및 해석기술 개발"의 연구결과 중 일부임을 밝히는 바입니다.

#### 참고문헌

- [1] Fujii, K. and T. Ogawa, 1995, "Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each Other" Computers & Fluids, Vol. 24, No. 8, pp 897-908.
- [2] T. Ogawa and K. Fujii, 1994, "Numerical Simulation of Compressible Flows induced by a Train Moving into a Tunnel," Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 3, No. 1.
- [3] Fujii, K., 1992, "Unified Zonal Method Based on the Fortified Solution Algorithm," ISAS Report No. 648.
- [4] Mestreau, E., Lohner, R. and Aita, S., 1993, "TGV Tunnel Entry Simulations Using a Finite Element Code with Automatic Remeshing", AIAA 93-0890
- [5] Hwang, J. and Lee, D, 1998, "Development of Moving Grid Technique for Unsteady Analysis of High Speed Train", Proceedings of the KSME 1998 Spring Annual Meeting B, pp. 607-610.
- [6] Hwang, J. and Lee, D, 1999, "Numerical Simulation of Flow field around High Speed Trains Passing by Each Other", AIAA Paper 99-3156.
- [7] Kwon, H., Lee, D., Lee, S., Kim, D. and Kang, S., 1998, "An Experimental Study on Propagation of Pressure Waves inside the Tunnel and Booming Noise by a High-Speed Train", Proceedings of the KSME 1998 Fall Annual Meeting B, pp. 735-740.
- [8] Shimbo, Y., Hosaka, S., 1993, Steady and Unsteady Pressure Measurement on High Speed Train, Proceedings of the International Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, PS3-14, pp341-346.