

**한국형 고속전철 디자인**  
**-공기역학적 최적형상 디자인개발을 중심으로-**  
Korean High Speed Train Design  
- focused on aerodynamic optimal form design development -

주저자 : 이병종(byeong-jong lee)  
연세대학교 문리대학 디자인학부 산업디자인학과

본 디자인은 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 지원으로 수행된 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 한국생산기술연구원이 주관한 차량시스템 엔지니어링 기술개발사업의 위탁과제로 진행된 것이다.

## 1. 서론

## 2. 한국형 고속전철 시스템 디자인 방법론

- 2-1 한국의 철도 시스템 환경
- 2-2 한국형 고속전철 시스템 경제조건
- 2-3 한국형 고속전철 요구조건과 제한조건
- 2-4 한국형 고속전철 디자인 과정

## 3. 한국형 고속전철 저저항 디자인 연구

- 3-1 수치해법
- 3-2 최적 디자인 기법
- 3-3 저저항 디자인 결과

## 4. 한국형 고속전철 디자인

- 4-1 시제차량 HSR 350X 외형 형상 디자인
- 4-2 상용차량을 위한 HSR 350X의 공기역학적 수정정보 개념디자인
- 4-3 차세대 고속전철 공기역학적 외형 형상 디자인

## 5. 결론

## 참고문헌

## (要約)

이 논문은 한국의 환경에 맞는 한국형 고속전철 디자인 방법과 그 디자인 과정을 한국의 환경에 맞추어 연구하고, 그로부터 이루어진 결과를 바탕으로 공기역학적 최적화에 초점을 둔 시제차량(prototype test train, HSR 350X)의 외형형상 디자인 개발의 형태로 밝힌다. 이는 고속전철 기술개발 사업의 일환으로 1996년부터 2002년까지 6년간 진행되었다. 그 사업의 최종 결과로 제작된 시제차량은 두개의 동력차와 두개의 동력대차 그리고 세 개의 객차로 구성되어 있으며, 2003년에 경부고속전철 선로에서 최고 380km/h까지 성공적으로 시험을 마쳤다. 그러나 시제차량의 디자인 개발과 제작에서는 턱없이 부족한 진행일정과 경제적 제한으로 많은 것들이 유보되었다. 따라서 시제차량에서는 구현되지 못하였으나 향후 미래에 필요성을 염두에 두어, 시제차량과 병행하여 상용차량과 차세대차량을 위한 보다 개선된 개념 디자인 연구가 진행되었다.

## (Abstract)

This paper shows a study on the "Korean High Speed Train Design" method, its design process and the result in the form of aerodynamic optimal exterior design development of a prototype test train(HSR 350X). It was developed from 1996 until 2002, six years long in R&D project titled "Development of High Speed Railway Technology". The end result of the project is a prototype test train, which has two power cars, two motorized trailers and three trailers, had been tested successfully in the year 2003 to the highest speed limit 380km/h on high speed line. The improved conceptual design work of a new commercial train and next generation's train is also performed for future needs.

## (Keyword)

Korean Railway System Environment, Design determining Factors, Micro-pressure wave, System requirement and boundary condition, Least Square Method, D-optimal Method, Constrained and Weighted design

## 1. 서론

고속전철은 차량시스템, 전기 및 신호시스템, 선로구축물 및 운영시스템 등을 포함한 전문화된 복합 대형 시스템으로 이루어진 철도교통수단의 하나이다. 그러나 기존의 철도교통수단과는 달리 고속으로(보통 200km/h 이상) 주행하여 수송거리 500km 내외에서는 항공기보다 훨씬 경쟁력이 있는 승객수송 시스템으로 인정되고 있고 환경친화적인 장점이 있다.

철도교통수단은 산업사회의 필요에 의해 도입되고 서로 연계되어 망 구조를 갖는 철도시스템을 이룬다. 철도시스템의 이러한 연결 망 구조는 철도교통수단에 요구되는 고유한 기능작용을 결정짓는다. 즉, 철도교통수단은 철도시스템 내의 기능에 따라 순서가 정해지고 상호 연계된 수많은 요소들로 구성되는 특성을 갖는 구체적이고 동적인 기술시스템이라 할 수 있다. 따라서 철도교통수단의 디자인 개발에 있어 시스템적 접근법은 필수적이라 하겠다.

고속전철은 철도시스템 안의 교통수단, 제어장치 및 설비, 철도시설물 등 주변 환경과의 연결고리를 가로지르는 경계를 갖고, 철도시스템은 사회의 자연적, 문화적, 기술적, 경제적 조건 내에 형성된 환경들과 경계를 이룬다. 여기에서 우리는 한국사회에 적합한 철도시스템 경계 내에 존재하는 고속전철을 생각해 볼 수 있는데, 이것을 바로 한국형 고속전철이라고 정의한다. 따라서 한국형 고속전철 디자인은 한국의 사회적 시스템과 그 경계 내에 존재하는 철도 시스템에 최적화시키는 과정이라 할 수 있다.

한국형 고속전철 디자인의 시스템적 접근은 한국의 철도 시스템 환경과 그 안에 놓이는 고속전철 시스템의 경계를 규명하는 것에서 시작된다. 그리고 규명된 경제조건에 따라 한국형 고속전철이 갖추어야 할 요구사항을 정립하는 것이 필요하다. 이로부터 한국형 고속전철의 개념화를 어떻게 이루고, 그 구체적 디자인은 어떤 방식으로 전개되어 디자인을 실현시켜나가는 것이 가장 합리적인 방법인가를 논하고자 한다.

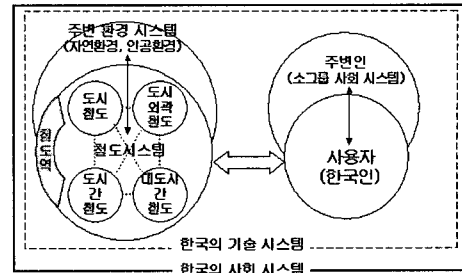
한국형 고속전철은 정상 주행속도가 350km/h이며 최대속도는 380km/h로, 이는 음속의 약 30%에 달한다. 이와 같이 고속으로 달릴 경우 기계적 마찰저항 등을 포함한 총 주행저항의 80% 이상이 공기저항임은 잘 알려진 사실이다. 특히, 터널주행의 경우 공기저항은 전체 에너지 소비의 90%를 차지할 정도로 커진다. 경부고속전철 노선의 50%가 터널로 이루어진 환경에서 무엇보다 터널주행을 고려한 저저항 디자인 방법에 관한 연구가 선행되었고, 이로부터 디자인 개발이 진행되었다. 그러나 시제차량의 개발과 제작 일정 및 개발비 등의 제약 그리고 엔지니어링 개발팀 간의 이해와 의사소통 부족으로 인하여 많은 문제들이 해결되지 못하였고, 미해결 문제들은 상용차와 차세대를 위한 개념 디자인으로 제안되었다.

## 2. 한국형 고속전철 시스템 디자인 방법론

### 2-1. 한국의 철도 시스템 환경

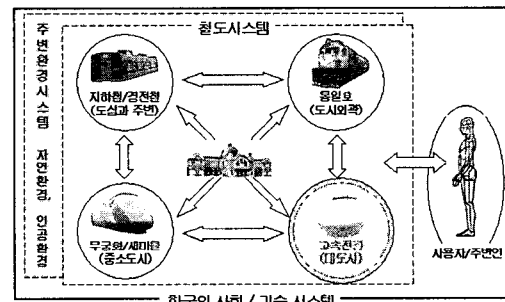
철도시스템은 우리의 현대 산업사회가 이룩한 기술시스템 내에서 형성되고 주변의 자연환경 및 인공 환경과의 긴밀한 상호작용관계를 갖으며 사회적 맥락에 따라 사용되어진다. 이때 사용자는 사용자의 주변을 이루는 사람들의 소그룹 사회와

긴밀한 연결 관계를 갖게 된다. 이러한 철도시스템의 일반적 사용과정은 주로 철도교통수단과 그 수단의 사용을 매개하는 철도역에 집중되어 있다.<sup>1)</sup>



[그림 2-1] 한국의 철도 시스템 환경 개념도

따라서 우리의 기존 철도시스템은 교통수단에 따라 크게 3가지 시스템으로 나누어 볼 수 있다: 도시 교통수단으로서 지하철과 경전철 차량(최고운행속도 약 60km/h), 도시와 주변 지역간의 교통수단으로서 통일호 급 철도차량(최고운행속도 약 90km/h), 도시와 도시 간 교통수단으로서 무궁화호 및 새마을호 급 철도차량(최고운행속도 약 120km/h). 여기에 대도시와 대도시 간 교통수단으로서 최고운행속도 300km/h의 경부고속전철 시스템이 도입되어 4가지 교통수단 시스템을 축으로 하는 철도시스템을 갖추게 되었다.<sup>2)</sup>



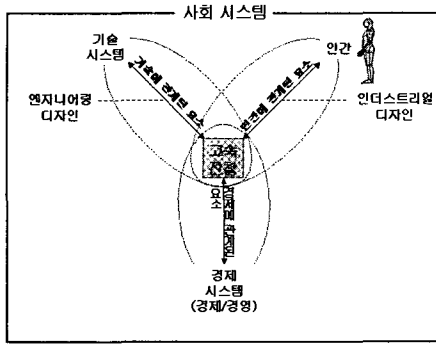
[그림 2-2] 한국의 철도차량 시스템 환경 개념도

### 2-2. 한국 고유형 고속전철 시스템 경계조건

고속전철 시스템은 단독으로 독립된 기능 작용을 하는 것이 아니라, 주변 철도차량 시스템과 입출력 관계를 갖는 철도 시스템의 일부분으로 존재한다. 그러한 고속전철 시스템이 전체기능을 발휘하기 위해서는 그 경계를 가로지르는 주변 환경 시스템과의 연결고리 및 입출력효과에 영향을 미치는 사용자와 그 주변인과의 상호작용을 갖는다. 따라서 한국형 고속전철 시스템을 결정짓는 경계조건은 한국 사회의 기술시스템 틀 내에 형성된 주변 철도차량 시스템, 주변 환경 시스템, 철도여행자와 그 주변인으로 정의된다. 이 경계조건은 바로 한국형 고속전철의 개발을 결정짓는 것으로, 아놀트 슈러 (Arnold Schuerer)의 “제품결정요소(Productbestimmende Faktoren)” 이론에 따르면 기술에 관계된 요소, 경제에 관계된 요소, 인간에 관계된 요소, 3가지의 추상적 요소로 분류할 수 있다. 고속전철의 기술에 관계된 요소란 기술 시스템 내에서 철도와 철도차량 기술시스템에 의한 경계조건으로 결정되는 기술적

1) 이병중, “한국 고유형 고속전철 디자인 개발연구, 연구보고서”, 한국과학기술원, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002  
2) 이병중, 위의 보고서

측면의 요소이다. 경제에 관계된 요소는 기술 시스템 내에서 철도 및 철도차량 시스템과 경계를 이루는 고속전철 생산의 경제성과 운행 및 유지·관리의 경제성에 관련된 요소이다. 그리고 인간에 관계된 요소는 기술 시스템 내에서 철도 및 철도차량 시스템의 사용과 경계를 이루는 고속전철 승객의 사용에 관련된 요소이다. 따라서 시스템의 전체 기능을 최적으로 충족시키는 고속전철을 개발하기 위해서는 각각의 요소를 담당하는 엔지니어링 디자인, 인터스트리얼 디자인, 경제/경영, 3분야 전문가들의 긴밀한 협동작업이 필수적이다.<sup>3)</sup>



[그림 2-3] 고속전철 디자인 결정요소와 전문분야

여기에서 인터스트리얼 디자인은 고속전철을 사용하기 위한 인간과 고속전철 간의 인터페이스 개발에 주력하는 전문기술이다. 인터스트리얼 디자인의 대상인 인간-고속전철 인터페이스는 실제적, 미적, 상징적 기능의 작용을 갖는다. 실제적 기능은 인간이 고속전철을 사용함에 있어 나타나는 물리적, 생리적 작용으로, 이는 물리적 형태에 의해 매개된다. 물리적 형태가 인간의 감각기관을 통해 인식되면 미적 기능 작용을 일으키고, 이는 다시 사회적 조건에 따라 해석되어져 상징적 기능 작용을 낳는다. 그러므로 인터스트리얼 디자인의 중심 대상은 고속전철의 물리적 형태이다. 그러나 이 물리적 형태는 엔지니어링 디자인의 결과로 형성되며, 요구되는 기술적 시스템의 기능을 수행하는 틀이기도 하다. 따라서 형태는 인터스트리얼 디자인과 엔지니어링 디자인의 접점이고, 개발과제의 성공적인 해결을 위해서는 어느 한쪽에 편중되지 않은 조율이 필수적이다.

### 2-3. 한국형 고속전철 요구조건과 제한조건

한국형 고속전철 개발을 시작하기 위해서는 개발과제를 상세히 규명하여 실현시켜야 할 요구조건과 현존하는 제한조건 등을 밝혀야 하는데, 이는 한국의 철도시스템 개념 틀을 토대로 수행되어야 한다. 고속전철 개발을 위한 요구조건은 무엇보다 한국사회의 기술시스템 내에서 규명된 고속전철 사용자를 기준으로 한다. 따라서 고속전철 사용자는 누구이고 몇 명으로 예상되며, 다른 철도차량 사용자와 차이는 무엇이고 사용목적과 기대하는 바는 무엇인가 등을 해명하는 것이 가장 우선된다. 고속전철 사용자가 특정 노선에서 일정 유형의 그룹으로 명확히 규명되고 사용자의 수가 항상 일정하다면 고속전철의 객실 수준과 승차감 및 시설, 승객 수용능력, 운

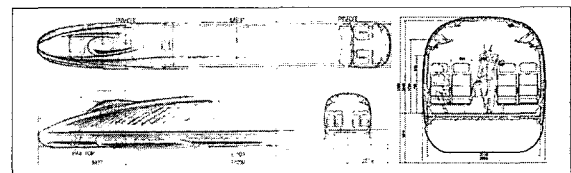
행속도, 운행방식 등을 단일 차량편성으로 설정할 수 있다. 반면에 여러 노선에 투입이 예상되거나 사용자 층과 사용자 수 및 사용 목적 등이 매우 유동적일 경우에는, 예상되는 각각의 경우에 유연하게 대처할 수 있는 모듈 식 차량편성이 유리하다. 이와 같은 사용에 관련된 요구조건이 확정되면, 이를 실현시키기 위해 알려진 기술적 조건들을 밝혀야 한다.

제한조건은 고속전철 시스템 전체가 요구조건을 수행하기 위해 충족시켜야 하는 주변 자연환경과 인공 환경과의 시스템 입출력 관계로 이루어진다. 자연환경은 주로 지형조건과 기후조건을 이룬다. 이로부터 궤도, 구배, 터널 등 노선조건과 전천후 운영을 위한 기술조건 등이 발생한다. 역사와 승강장에 따라 차량 치수한계조건과 운행 및 승하차조건 등이 결정되고 철도시스템에 의해 전기, 제어, 신호, 통신 및 다양한 기술적 조건들이 주어진다. 또한 사용자의 행동방식과 문화유형에 의해 승강구와 실내에 대한 형태와 치수조건들이 나타난다. 이 모든 조건들은 한국의 사회 시스템이 갖는 경제성에 직접적인 영향을 받는다. 그러나 오늘날 그 무엇보다 간과되어서는 안 될 중요한 것은 소음과 진동을 비롯한 환경적 조건들로, 이는 모든 개념 디자인 결과의 평가기준이 되어야 하는 것이다.

### 2-4. 한국형 고속전철 디자인 과정

고속전철 개발을 위한 요구조건과 제한조건에 따라 개념 디자인에서 구체 디자인과 상세 디자인에 이르는 일련의 디자인 과정이 진행된다. 요구조건 설정이 고속전철 사용자의 규명에서부터 출발하였듯이, 개념디자인 또한 사용자에게 관한 사항에서 시작된다. 사용자를 기준으로 설정된 요구조건을 충족시키기에 가장 까다롭고 결정적인 일반 객실의 단면개념이 우선 개발되어야 한다. 여기에서는 사용자의 행동양식과 생활 문화에 대한 고려 하에 요구조건 문제를 해결할 수 있는 좌석과 통로 및 짐칸의 치수와 배열을 모색하고, 이를 기준으로 공기역학적으로 유리한 단면 외형 형상을 개발한다. 이 단면 형상을 운행조건에 맞게 공기역학적으로 최적의 단면변화를 갖도록 확장시켜나 가면 고속전철 전체 외형 형상 개념을 얻을 수 있다. 따라서 인터스트리얼 디자인과 공력설계의 협동작업이 이 과정의 중심축을 이룬다.

인터스트리얼 디자인과 공력설계 개념개발과 병행하여 엔지니어링 디자인은 제한된 조건 하에서 요구사항들의 기술적 해결방안들을 모색해나가는데, 이는 앞서 제시된 형상개념으로 수렴될 수 있도록 진행되어야 한다. 바로 이 과정에서 고속전철 차량시스템 편성방식과 구동방식, 대차의 유형과 방식, 시스템 제어와 신호처리 방식, 차량제작방식과 재료 등이 결정되는데, 이 또한 고속전철에 관련된 전체 시스템적 측면에서 이루어져야 한다.

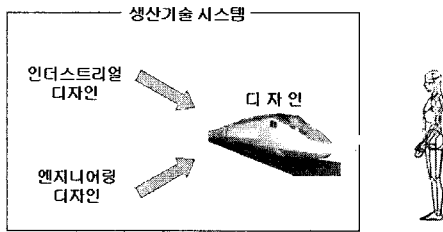


[그림 2-4] 고속전철 단면 형상 개념과 외형 형상 개념의 예

개념디자인의 결과로부터 고속전철 시스템의 구성 및 구조

3) Schuerer, Arnold, *Der Einfluss Produktbestimmender Faktoren auf die Gestaltung*, Selbstverlag, Hannover, 1968

를 사용적, 기술적, 경제적, 환경생태학적 기준을 고려하여 결정해나가는 구체디자인의 과정이 진행되는데, 이로부터 시스템의 배치의 명세가 이루어진다. 여러 가지의 척도에 맞는 배치방안들을 동시에 혹은 순차적으로 충분히 검토하고, 위의 기준에 따라 평가를 내리게 된다. 그리고 상세디자인 단계에서는 모든 시스템 구성품들의 배열, 형상, 치수 및 표면특성들이 확정되고 재료가 선정되며 생산을 위한 도면과 관련문서가 작성된다. 따라서 이 단계에서는 엔지니어링 디자인 활동을 중심으로 협동작업이 진행된다. 이 단계에서 인더스트리얼 디자인은 사용에 대한 개념 디자인을 구체적으로 실현화시키기 위해 엔지니어링 디자인과 밀접하게 연계된 협동작업을 통하여 인터페이스의 게슈탈트(Gestalt)를 확정한다.



[그림 2-5] 사용자가 고속전철과 접하는 경계, 즉 고속전철 인터페이스의 생산기술 시스템 환경

또한 이 단계에서는 사용적, 기술적, 경제적, 환경적 기준에 따라 고속전철 전체 시스템에 요구되는 사항들의 충족 정도를 시험장치와 모델시험을 통해 평가하게 되고, 그 결과에 따라 수정작업을 하거나 앞 단계로 되돌아가서 작업을 반복하는 경우가 흔히 발생하게 된다. 이러한 과정에서 엔지니어링 디자인과 인더스트리얼 디자인 사이의 긴밀한 협동작업이 효과적으로 수행되어야만 목적한 바의 개발이 달성될 수 있다. 그렇기 때문에 엔지니어링 기술 수준 뿐 아니라 인더스트리얼 디자인 기술과 두 전문분야간의 협동작업능력의 수준에 의해 고속전철 생산기술력이 결정되는 것이다.

### 3. 한국형 고속전철 저저항 디자인 연구

고속전철의 공기저항을 저감하기 위해서는 기본적으로 단면적과 길이를 최소화함으로써 표면의 마찰저항을 줄이는 일이 가장 중요하지만, 이는 수송능력과 관련이 되므로 단위승객에 대한 에너지소모율의 측면에서 본다면 큰 효과를 기대하기 힘들다. 고속전철의 하부형상을 매끄럽게 하거나 대차에 커버를 장착함으로써 하부저항을 저감시키는 노력은 매우 큰 효과를 얻을 수 있다. 그리고 고속전철의 전두부 형상을 전두부와 후미부에서 유동이 심한 박리가 발생하지 않도록 디자인함으로써 공기저항을 줄이는 방법은 매우 효율적인 성능의 향상을 가져올 수 있으므로 고속전철의 디자인에서 필수적으로 고려되어야 하는 사항이다.

고속화로 인한 중요한 공기역학적 문제로는 앞서 언급한 공기저항의 증가와 함께 미기압파의 발생을 들 수 있는데, 고속전철 노선의 50% 가량이 터널로 되어 있는 한국적 지형조건에서는 미기압파가 디자인에서 가장 중요한 문제 중 하나이다. 고속전철이 터널에 진입하면 공기의 압축성 효과로 인하여 압축파가 발생하고 터널 내부를 음속으로 진행하다가 터널 출구에서 일부는 팽창파로, 일부는 미기압파(Micro-pressure

wave)로 방사된다. 미기압파는 터널 출구 주변에서 심각한 환경소음문제를 야기하는 충격성 소음(Booming noise)의 원인이 된다.

일반적으로 미기압파는 압축파의 파두구배, 즉 최대압력 변화율에 비례하는데, 이는 고속전철의 속도, 고속전철-터널 단면적비, 전두부의 세장비, 전두부의 단면적분포 등에 의해 결정된다. 즉, 고속전철의 속도가 낮을수록, 고속전철-터널 단면적비가 클수록, 그리고 전두부의 세장비가 클수록 미기압파는 크기가 작아진다. 그러나, 고속전철의 속도를 낮추면 운행 시간이 늘고, 고속전철-터널 단면적비의 감소를 위해 터널 단면적을 크게 하면 터널건설비용이 높아진다. 따라서 적절한 전두부 길이를 선택하여 단면적분포를 최적화시키는 것이 미기압파 저감 디자인에서 매우 효율적인 대안이 될 수 있다.

본 연구에서는 서울대학교 정밀기계설계연구소의 권혁빈과 함께 고속전철의 터널진입 및 주행의 조건에서 공기저항과 미기압파를 동시에 고려한 최적화 디자인을 수행하였다. 해석에 사용된 지배방정식은 비정상 축대칭 오일러(Euler) 방정식이며 비정상 유동장에 적합하도록 이동격자계를 도입하였고, 격자간의 유동정보교환을 위해서는 패치드 그리드(Patched grid) 기법이 적용되었다. 최적화 과정에서 디자인 점을 선택하고 목적함수와 경계조건을 수치적 모델을 구성하기 위해 반응면(Response Surface) 기법이 사용되었다.<sup>4)</sup>

#### 3-1. 수치해법

수치해석에 적용된 지배방정식은 아래에 나타난 일반화된 곡선 좌표계로 변환한 축대칭 비정상 압축성 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + H = \frac{1}{Re_c} \left[ \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v \right] \quad (1)$$

위의 방정식을 차분화하여 해를 구하는 과정에서는 풍상 차분법(upwind scheme)을 이용한 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하였으며, 수치해석기법으로는 Roe의 플럭스 차이 분할기법(FDS; Flux Difference Splitting)과 Van Leer의 플럭스벡터 분할기법(FVS; Flux Vector Splitting)을 이용하였다. 공간 정확도를 높이기 위해 물리 변수를 외삽하는 MUSCL 기법을, 난류 모델링으로 볼윈 노맥스(Boldwin-Lomax)를 사용했다. 시간 적분에는 오일러 후방 차분의 내재적 방법을 사용하였으며, 시간간격은 동일시간간격(constant time stepping)을 사용하였으며, 행렬 처리에는 AF-ADI 기법을 도입하였다. 그리고 권혁빈<sup>5)</sup>이 제안한 완만한 출발(Smooth start)조건을 사용하였다. 이 방법은 속도의 2차 미분치까지 연속하는 조건을 만족시키는 5차 다항방정식을 이용하여 열차를 정지상태에서 주행속도까지 가속시키는 방법으로 정상해를 구해 일정속도로 출발시키는 급작스런 출발(impulsive start)에 비해 수치적 파

4) Myers, R. H. and Montgomery, D. C., 1995, Response Surface Methodology, John Wiley & Sons, Inc.

5) 권혁빈, 이관중, 이동호, 2000, "미기압파 저감을 위한 고속전철 전두부 형상의 최적화설계" 2000년도 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp 506-513

동을 완전히 제거하면서 계산시간을 줄일 수 있다.

영역의 외부경계는 각각의 물리적 성질에 따라 벽면에 해당하는 터널 내부와 입/출구벽면 및 고속전철 표면은 미끄럼 경계조건을 주었고, 나머지 원방에 해당하는 경계는 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량에 근거한 특성형태의 경계조건을 부여하거나, 무반사조건을 사용하였다.

열차가 터널에 진출입하는 것과 같이 물체간의 상대적인 운동이 있는 경우 단일화된 격자의 형성이 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 정렬격자계를 이용한 영역 분할기법(zonal method)을 이용하였다. 그리고 영역 간의 유동정보의 교환을 위해서는 직선의 상대적 운동을 하는 물체에 대해서 겹쳐지는 블록들 간의 격자경계면에서 빠르고 정확하게 유동정보를 전달할 수 있는 가상경계면을 이용한 패치드(Patched) 격자기법을 이용하였다.

### 3-2. 최적 디자인 기법

반응면 기법은 실험을 통해 얻은 결과를 실험에 영향을 주는 독립변수들로 구성된 다항식으로 모델링하고 이를 분석하는 일련의 수리통계적 과정이다. 따라서 소수의 실험(물리적 혹은 수치적 실험)의 시행을 통해 전체 디자인 공간 내에서의 독립변수들의 변화가 주는 영향을 파악하기 위한 목적으로 사용되며, 이러한 특징은 실험의 시행에 많은 비용이 요구되는 경우 유용하게 활용될 수 있다.

반응(Response)이란 독립변수들의 변화에 의해 결정되는 실험결과를 의미하며 디자인 공간 내의 반응변화가 반응면을 형성하게 된다. 본 연구에서는 반응면을 식(2)의 2차 다항식으로 구성된 2차반응면 모델을 사용하였다.

$$y^{(p)} = C_0 + \sum_i C_i x_i^{(p)} + \sum_{1 \leq i < j \leq n_s} c_{ij} x_i^{(p)} x_j^{(p)} + \epsilon$$

$$p = 1, \dots, n_s \quad (2)$$

여기서  $y^{(p)}$ 는 반응,  $x_i^{(p)}$ ,  $y_i^{(p)}$ 는  $n_s$ 개의 설계변수,  $n_s$  ( $n_s \geq n_v$ )는 해석의 횟수이며,  $c_0$ ,  $c_i$ ,  $c_j$ 는 미결정 계수이다.

위 식은  $n_i = \frac{(n_v+1)(n_v+2)}{2}$  개의 계수를 갖게 되며 다음과 같은 행렬로 표현될 수 있다.

$$y^{(p)} = \bar{x}^{(p)} c, \quad c = [c_0, c_1, \dots, c_{n_i-1}] \quad (3)$$

위의 식 (3)은 다음과 같은 행렬식으로 나타난다.

$$\vec{y} \approx \vec{X} \vec{c}$$

$$\vec{y} = [y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n_s)}]^T \quad (4)$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^{(1)} & \dots & (x_{n_s}^{(1)})^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^{(n_s)} & \dots & (x_{n_s}^{(n_s)})^2 \end{bmatrix}$$

구성된 반응면을 완성하기 위해서는 다항식의 각 항에 존재하는 미결정 계수들을 합리적으로 결정하는 과정이 필요하다. 여기에서 미결정계수를 구하는 방법으로는 최소 제곱법(Least Square Method)이 사용되었다. 그리고 구성된 디자인 공간에 대해서 적절한 수치 실험점을 선택하여야 하는데, 수치 실험점의 적절한 선택은 반응면 모델의 정확도를 높인다. 따라서 D-최적법(optimal Method)을 이용하여 적은 점에서 높은 정확성을 갖도록 수치 실험점을 선택하였다.

수치실험의 결과를 바탕으로 미계수들의 값을 결정하고

각 항의 타당성을 검증하는 과정이 ANOVA(Analysis of Variance)와 회귀분석(Regression Analysis)이다. 결정된 계수로 구성되는 특정 항들이 반응함수에서 제외됨으로써 반응모델의 성능이 향상될 수도 있으며 각 항들의 포함여부를 결정하기 위한 지수로서 t-static 이 사용되었다.

$$t = \frac{C_{j-1}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 (X^T X)^{-1}_{jj}}} \quad (5)$$

구성된 모델의 신뢰도를 평가하는 방법으로  $R_{adj}^2$  가 사용되었다.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE/DOF_{SSE}}{SYY/DOF_{SYY}} \quad (6)$$

여기서 SSE는 오차제곱의 합이며 SYY는 반응함수 제곱값의 합이다. 전체 반응모델의 신뢰도를 감소시키는 항을 제거할 경우  $R_{adj}^2$ 이 증가하는 경향을 보이며, 반응 모델의 신뢰도를 향상시키는 값을 제거할 경우에는  $R_{adj}^2$ 이 감소한다. 따라서  $R_{adj}^2$ 의 값이 클수록 정확한 반응 모델이 구성되었음을 알 수 있으며, 0.9~1.0 사이의 값을 가질 경우 타당한 반응 모델이라고 할 수 있다.

보다 일반적인 설계공간을 얻기 위해 항공기 익형 디자인에서 널리 쓰이는 히스 헨(Hicks-Henne) 형상함수(shape function)를 도입하였다. 히스 헨 형상함수는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$Y = Y_{base} + \sum_{i=1}^n W_i F_i \quad (7)$$

여기서  $Y_{base}$ 는 기본형상(Baseline)을 의미하며  $F_i$ ,  $W_i$ 는 각각 형상함수와 이에 대한 가중치를 의미한다. 본 연구에서는 sine 함수를 이용하여 6개의 형상함수를 정의하였으며 디자인에 사용된 형상함수들 및 가중치의 범위는 식 (8)과 같이 나타나 있다.

$$F_1 = \sin(\pi x^{0.356})^3 \quad ; -0.03 < W_1 < 0.12$$

$$F_2 = \sin(\pi x^{0.553})^3 \quad ; -0.03 < W_2 < 0.12$$

$$F_3 = \sin(\pi x^{0.818})^3 \quad ; -0.03 < W_3 < 0.12$$

$$F_4 = \sin(\pi x^{1.239})^3 \quad ; -0.06 < W_4 < 0.06$$

$$F_5 = \sin(\pi x^{2.060})^3 \quad ; -0.09 < W_5 < 0.03$$

$$F_6 = \sin(\pi x^{4.497})^3 \quad ; -0.07 < W_6 < 0.03$$

$$(8)$$

반응면기법의 적용에 있어서 형상함수와 가중치의 범위의 조절을 통한 디자인 공간의 적절한 선정은 매우 중요하다. 식 (8)에서 정의한 디자인 공간의 타당성을 조사하기 위하여 그림 3-1에 디자인 공간을 전두부의 단면적분포로 나타내었다. 기본형상인 포물형 전두부가 디자인 공간 내에 완전히 들어가지 있으며, 전두부의 앞, 뒤 부분에서 충분한 디자인 공간을 가지고 있음을 알 수 있다.

### 3-3. 저저항 디자인 결과

이상과 같은 수치해석 최적 디자인 기법에 근거하여 고속전철 전두부 외형 형상개념을 정립하고, 이로부터 시제차량 외형 형상을 구체화 하였다. 그리고 표 3-1과 같은 시제차량과 터널의 체원 및 주행조건을 바탕으로 시제차량의 공기저항을 줄이기 위한 수치 해석적 최적 외형 형상 디자인을 수행하

였다.

[표 3-1] 시제차량과 터널의 시험 조건

속도(km/h)	350
차량-터널 단면적비, R	0.083
전두부 세장비, a/b	3.82
차량 길이(m)	40
터널 길이(m)	140

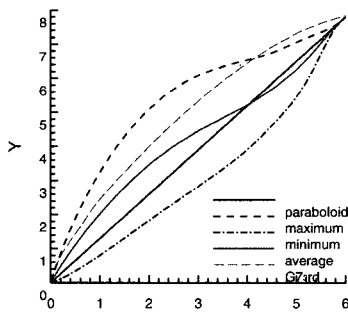
차량의 속도는 개발목표인 350 km/h 이고, 차량-터널 단면적비(R)는 0.083이다. 전두부 세장비(a/b)는 전두부의 형상 변화가 이루어지는 길이(a)와 원으로 가정한 차량 단면적의 반지름(b)과의 비로 정의되는데, 시제차량의 경우, 이 값은 10.36이다. 그러나 현실적으로 전두부의 형상은 동력차 내부공간과 운전석 시야의 확보 등의 이유로 동력차의 형상변화는 제한받기 때문에 전두부로부터 6m까지의 길이만을 저저항 디자인의 대상으로 삼았으며, 이 경우 디자인에 고려된 전두부의 세장비는 3.92가 된다. 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위해 차량 길이와 터널길이는 각각 40m와 140m로 정하였다. 차량의 공기저항은 차량이 터널을 통과하는 동안 시간에 대해 적분한 값을 사용하였고, 미기압파는 터널 출구로부터 50m 떨어진 지점에서 측정하였다.

공기저항을 제약조건으로 주고 미기압파를 최적화시키는 방법으로 최적 디자인을 수행하였다. 사용된 목적함수 및 제약조건은 다음과 같다.

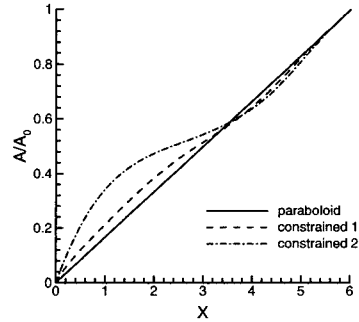
$$F_1 = \min(\text{Micro-pressure wave})^* \quad (9)$$

$$G = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (\text{Drag}) dt}{\int_{t_1}^{t_2} (\text{Drag of baseline}) dt} < 1 \quad (10)$$

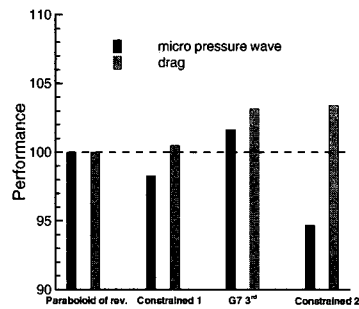
식 (9)와 (10)에서 위첨자 \*는 기준선(baseline)의 값으로 나누었다는 의미이며, t1과 t2 는 각각 열차가 터널에 진입하기 시작한 시점과 터널로부터 진출을 끝낸 시점을 의미한다. 목적함수 F1 은 미기압파의 크기이며, 제약조건 G는 시간에 대해 평균한 항력의 값이 기준선의 항력의 값보다 작도록 설정되었다. 제약조건에서 항력의 기준이 되는 기준선은 포물형과 시제차량 형상 두 가지를 사용하여 디자인 하였다.



[그림 3-1] 전두부 최적화를 위한 디자인 공간



[그림 3-2] 최적화된 전두부 형상 (Constrained design)



[그림 3-3] 최적화된 전두부 형상의 성능 (Constrained design)

그림 3-2와 3-3은 각각 최적화된 전두부 형상과 그것들의 성능을 나타낸다. 기본형상을 포물형 전두부로 하였을 때 (constrained 1), 미기압파는 약 2%정도 감소하였고 공기저항은 약간 증가함을 볼 수 있다. 이와 같이 포물형 전두부는 공기저항이 작고 미기압파의 발생이 적은 특성을 갖기 때문에 이를 디자인의 제약조건으로 하여 설계할 때 형상의 변화 및 성능의 개선이 그리 크지 않음을 알 수 있다. 제약조건을 좀 더 완화시키기 위해 기본형상을 시제차량으로 하였을 때 (constrained 2)에는 주어진 항력의 제약조건을 잘 만족시키면서 미기압파 감소율이 6%로 나타났다. 이를 통해 좀 더 완화된 제약조건에 의해 최적화된 형상변화 및 성능의 개선이 더 커짐을 알 수가 있다.

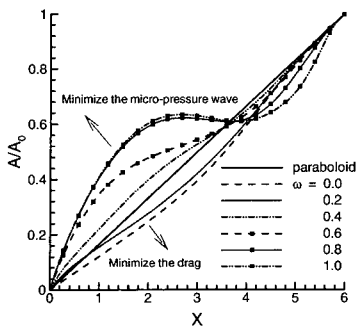
이상의 결과를 바탕으로 공기저항과 미기압파에 각각 가중치를 부여하고 그 비율을 달리하여 최적 디자인을 수행하였다. 사용된 목적함수는 다음과 같다.

$$F_2 = \omega \cdot F_1 + (1 - \omega) G \quad (11)$$

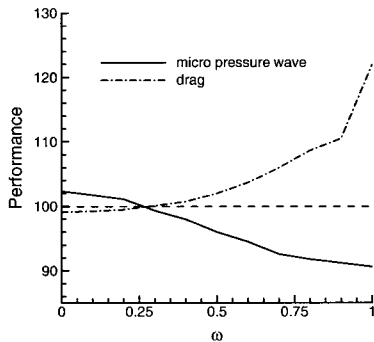
위의 식 (11)에서 F1과 G는 각각 식 (9)와 식 (10)에 정의된 제약조건 디자인에서의 목적함수와 동일하며 기본형상으로는 포물형 전두부를 사용하였다. 가중치  $\omega$ 를 0에서 0.2씩 증가시키며 총 6번의 디자인을 수행하였다.

그림 3-4에는 가중치에 따른 최적화된 전두부 형상이 나타나 있다. 공기저항만을 고려하였을 경우 ( $\omega=0.0$ )에 전두부의 형상은 포물형에 비해 약간 낮은 곡선을 그리고 있으며 그 변화가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 반대로, 미기압파만을 고려하였을 경우 ( $\omega=1.0$ )에는 전두부의 형상이 크게 변화하였는데, 포물형에 비해 전두부의 앞부분에서는 단면적이 더 크며,

후미부에서는 더 작은 결과를 나타내었다.



[그림 3-4] 최적화된 전두부 형상 (Weighted design)



[그림 3-5] 최적화된 전두부 형상의 성능 (Weighted design)

그림 3-5에는 최적화로 인한 성능을 가중치의 함수로 나타내었다. 공기저항만을 고려하였을 경우 ( $\omega=0.0$ )에 최적 디자인으로 인해 나타난 공기저항의 감소는 1%미만으로 나타났으며, 미기압파는 2%이상 증가하였다. 반대로, 미기압파만을 고려하였을 경우 ( $\omega=1.0$ )에는 미기압파가 약 10%까지 줄어드는 반면 공기저항은 20%이상 증가함을 알 수 있다. 가중치 ( $\omega$ )가 0에서 1로 증가함에 따라 공기저항은 서서히 증가하다가  $\omega=1$ 에서 급격히 증가하였으며, 미기압파는 서서히 감소하다가  $\omega=0.6$ 이후로는 감소율이 작아짐을 알 수 있다. 공기저항과 미기압파가 동시에 기본형상과 같아지는 점은  $\omega=0.3$ 인데, 여기서부터  $\omega=0.7$ 정도까지는 미기압파의 감소율이 크고 공기저항의 증가율이 작으므로 이 영역에서 효율적인 디자인이 가능할 것으로 예상된다.

한국형 고속전철의 터널 진입 시 공기저항과 미기압파를 최적화시키기 위해 제약조건을 주거나 가중치를 변화시키는 방법으로 전두부 형상의 최적 디자인을 수행하였으며, 그로부터 다음의 결과를 얻었다: 1. 미기압파에 최적화된 전두부 형상은 앞부분이 뾰족하고 뒷부분이 가늘며, 공기저항을 최소화시키는 전두부 형상은 가늘고 긴 형상이다, 2. 공기저항과 미기압파의 저감을 동시에 만족시키는 디자인 결과는 - 한 쪽의 감소는 다른 한쪽의 증가를 유발시키기 때문에 - 얻을 수 없다, 3. 포물형 전두부는 미기압파와 공기저항의 측면에서 매우 우수한 형상이나, 공기저항의 측면에서는 최적화의 효과가 거의 나타나지 않는다, 4. 한국형 고속전철을 공기저항의 제약조건으로 하여 최적 디자인을 수행할 경우, 공기저항의 변화 없

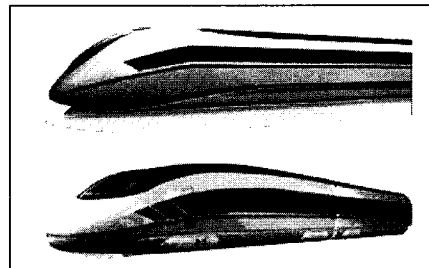
이 미기압파를 약 6% 감소시키는 디자인 결과를 얻을 수 있다.

그러나 이상과 같은 연구결과는 앞서 언급한 바와 같은 한계로 인하여 시제차량 외형 형상 개발에 심분 적용될 수 없었기에, 차세대를 위한 개념 디자인이 제안되었다.

## 4. 한국형 고속전철 공기역학적 최적 디자인 결과

### 4-1. 시제차량 HSR 350X 외형 형상 디자인

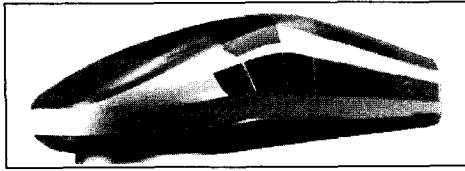
국내에서 철도차량 개발로는 최초로 진행된 고속전철 기술개발 사업은 초기 2년간 개발의 방향과 계획이 고속주행기술 탐색에 집중되었을 뿐, 승객을 비롯하여 한국의 자연적, 사회적인 환경에 대한 고려는 전무하였다. 이러한 상황에서 한국형 고속전철 디자인을 수행하기 위해 우선적으로 앞서 밝힌 바와 같은 디자인 방법과 공기역학적 저저항 디자인의 기초연구가 수행되었다. 이와 병행하여 주로 개발팀에서 논의되는 기술적 측면에서의 동력차 전두부 형상 개념개발에 집중되었다. 제 1단계 1차년도에는 고속전철 전 구간의 30%가 터널로 계획된 시기였기에 개활지 주행을 초점이 맞추어졌다. 그러나 2차년도에는 터널이 50%로 수정됨으로써 터널 주행에서의 미기압파 감소에 역점을 두었다. 또한 한국적 상황에 최적화될 수 있는 동력집중식 관절형 개념을 적용한 디자인 연구가 진행되었다.



[그림 4-1] 제 1단계 1차년도(상), 개활지 주행을 위한 공력최적화 형상개념, 2차년도(하) 터널주행을 위하여 15m에서 최고점에 이르는 공력최적화 형상개념

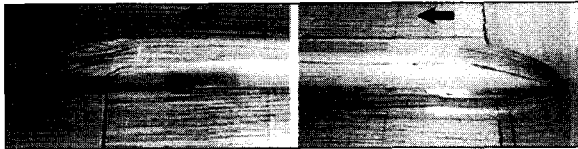
시제차량 제작을 위한 기본설계를 완성해야 하는 제 1단계 3차년도에 이르러서야 고속전철 KTX의 시스템을 기본으로 하는 구체적인 개발 방향과 기본준선(Guide Line) 결정의 합의가 이루어졌다. 그러나 그 합의의 초점은 한국의 사회 시스템 내에 존재하는 철도 시스템의 사용적 조건들은 배제한 채, KTX의 기술적 조건들만을 우선으로 하여 고속주행의 목표를 달성할 수 있는 시제차량 개발을 완성하는데 있었다. 결국 한국의 사회적기술적 시스템과 그 안에 놓이는 철도 시스템으로부터 고립된, KTX의 프랑스식 기술 시스템이 모든 개발의 기준이 되었다. 따라서 한국형 고속전철 디자인의 개발하기 위해 개발팀의 엔지니어들에게 2장에서 밝힌 바와 같은 조건들을 이해시키고 그에 따른 개발방향을 설득시켜나가는 것이 우선되었다. 그리고 차량 기본설계안을 토대로 3장에서 설명한 저저항 최적 디자인 기법을 적용하여 기본설계안의 수정방안을 제안하였고, 이를 다시 개발팀 내에서 구조와 설비 배치방안 등, 상충되는 분야에 대해 집중적으로 검토·조정하여 디자인을 구체화시켜나갔다.



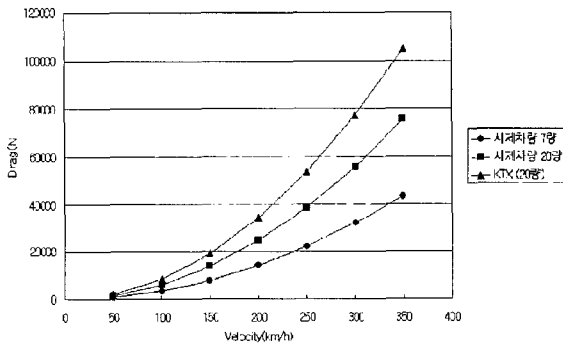


[그림 4-2] 제 1단계 3차년도 한국형 고속전철 개념 디자인, KTX를 기반으로 한 공기역학적 최적 외형 형상개념

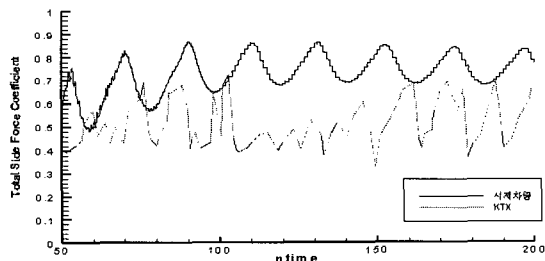
그림 4-2와 같은 저저항 개념 디자인의 7량 편성 1/25 축소 모델을 제작하였다. 이동지면장치를 구현한 풍동에서 그림 4-3의 예와 같은 시험을 수행하여 주행저항을 측정하였다. 기본적으로 많은 부분 KTX 시스템 조건에 한정되었음에도 불구하고, 공기역학적 문제가 많은 KTX의 형상에서 탈피하여 새로이 제시된 최적 형상개념은 KTX에 비해 공력 주행저항과 미기압과 모두에서 30% 가량 감소한 저저항의 특성을 보이고, 3건의 특허로 출원될 만큼 괄목할 만한 성과를 이루었다.



[그림 4-3] 제 1단계 3차년도 한국 고유형 고속전철 개념 디자인 1/25 축소모델의 유동가시화 풍동시험: 전두부(우), 후미부(좌)



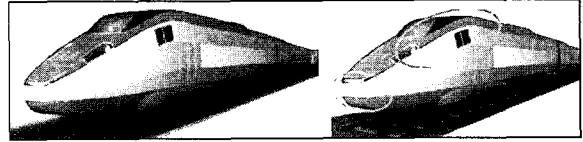
[그림 4-4] 시제차량과 KTX의 공력 주행저항 시험 비교 결과



[그림 4-5] 시제차량과 KTX의 측풍안정성 시험 비교결과, 평균측력계수가 KTX에 비해 50% 감소

2단계 1차년도부터 3년간 1단계에서 이루어진 기본골격을 유지하면서 시제차량 제작을 위하여 지속적으로 수정되는 구조와 내장설비 배치 설계에 맞추어 디자인을 수정·보완하고 전체 차량의 형상통합 과정이 진행되었다. 우선 1단계 디자인 결과의 풍동시험에서 나타난 전두부 상단 측면에서의 박리현상 문제(그림 4-6)를 해결하는 개선방향이 연구되었으나, 촉박한 제작일정으로 실현되지 못하였다. 그리고 제작설계과정에서 운전실 공간과 시야 확보를 이루지 못하여, 전두부의 기

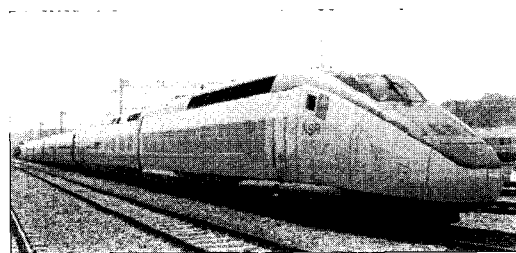
본골격을 유지하면서 운전실 공간과 시야 확보하는 수정 디자인이 이루어졌다. 이 과정에서 운전실 상단 측면에서의 박리현상이 예상되었으나 제작기한과 제작비 문제로 수정되지 못하였다. 그럼에도 불구하고 그림 4-4와 4-5와 같이 시제차량은 KTX에 비해 공기역학적 해석 및 풍동시험 결과 공력 주행저항과 미기압과 모두 우수한 특성을 보였다.



[그림 4-6] 제 2단계 1차년도에 제시된 시제차량 1/20 축소모델(좌)과 그 디자인의 공기역학적 취약부(우)



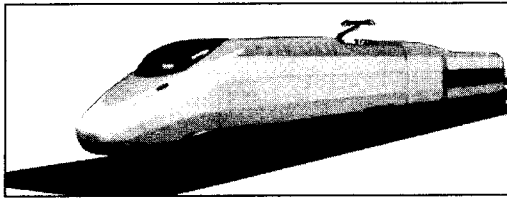
[그림 4-7] 제작 완성된 시제차량의 발표 시승식(2002.6.25)



[그림 4-8] 시제차량의 HSR350X의 주행시험, 1993년

## 4-2. 상용차량을 위한 HSR 350X의 공기역학적 수 정보안 개념디자인

시제차량 HSR350X는 공력해석 결과 제기된 측면 유선의 박리현상에 따른 저항력의 증가 문제, 운전실 실내공간 확보와 운전자 시야 최적화 문제, 차량 외형 형상의 부조화 문제 등을 갖고 있었으나, 이 모든 문제들은 제작과정에서 제작 기한과 개발비 문제로 유보되었다. 시제차량의 시험을 마친 후에 진행될 상용차량의 양산 디자인을 위한 후속 조치로서, 디자인 수정보안 연구가 진행되었다. 양산을 위한 수정보안은 시제차량 HSR350X의 기본설계를 유지하면서 문제들을 최적으로 해결하는 방향으로 설정되었다. 전두부 상단 측면에서의 박리현상과 운전실 공간과 운전자 시야의 최적화 문제 등은 차량 노즈(nose)에서부터 5.2m에 이르는 복합소재로 만든 전두부의 최소한의 수정으로 해결대안이 제시되었다. 그리고 통풍 그릴과 출입문 및 유리창 등 최소한의 수정으로 차량 전체의 통합 형상을 이룰 수 있는 개념을 개발하였다.



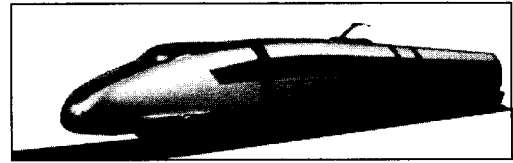
[그림 4-9] 상용차량을 위한 수정 개념디자인, 1/20 축소모델

### 4.3. 차세대 고속전철 공기역학적 외형 형상 디자인

유럽 고속전철을 대표하는 프랑스, 독일, 이탈리아는 차세대 고속전철 개발 컨소시엄을 구성하고 2010년부터 500km/h 급 고속전철을 투입하기 위한 개발에 박차를 가하고 있다. 그러나 현재 운영을 시작한 경부고속전철은 1970년대에 개발된 TGV 초기 모델 TGV-PSE로서, 프랑스에서는 이미 폐기가 시작된 모델이다. 이번에 개발된 한국형 고속전철 또한 TGV-PSE 기술에 기반하여 개발된 것이다. 우리는 비록 이제야 고속전철 개발을 시작하고 있지만, 선진국과 어깨를 나란히 하기 위해서는 우리 고유의 차세대 한국형 고속전철 개발에 박차를 가해야만 하는 실정이다. 따라서 한국의 환경에 지형에 맞는 500km/h 급 고속전철의 외형 형상 개발을 추진하였다.

궁극적으로 국토의 70%가 산악지형이고 교통망이 서울을 중심으로 방사형을 이루는 한국형 고속전철이란 고정편성차량이 아니라, 편성의 다양한 유연성을 극대화시킬 수 있는 모듈 시스템이어야 한다. 이에 따라서 구동시스템은 분산식이어야 한다. 또한 기존의 철도노선을 십분 활용하고 산악지형에서의 고속주행을 위해 관절식 틸팅 구동시스템이 필수적이다. 한국형 고속전철에서 터널주행이란 피할 수 없는 것이기에, 터널주행 최적화를 위한 공기역학적 형상의 개발이 가장 핵심 관건이다. 따라서 터널이 없는 평지에서의 주행에 최적화된 프랑스의 TGV의 기본형상과는 전적으로 다를 수밖에 없다. 기존 TGV의 기본골격을 유지하면서 터널주행을 위해 개발된 TGV-EuroStar의 경우에서도 평지에서는 350km/h로 운행하지만 Euro Tunnel에서 만큼은 안전상의 문제로 운행속도를 140km/h로 낮추어 운행하고 있는 것이 이러한 사실을 뒷받침해주는 것이다.

차세대 고속전철 외형 형상 개념은 저저항 형상디자인 연구결과를 바탕으로 노즈가 대형 고속선박의 하부 노즈와 같이 둥글고, 낮은 세장비를 이루며 15m 이후에 차량 최고점에 달하는 것에 중점을 두었다. 또한 차량 표면적을 최소화 하여 표면에서 발생하는 공기저항을 줄이고 고속주행에서의 측풍 안정성을 높이기 위하여 차량 단면형상을 최대한 원형에 근접하도록 하였다. 여기서 단면적 증가곡선이 S형 커브를 이루도록 함으로써 미기압과 발생을 최소화 할 수 있는 외형 형상개념을 개발하였다.



[그림 4-10] 저저항 디자인 기법에 따른 차세대 한국형 고속전철 개념 디자인, 1/20 축소모델

## 5. 결론

시제차량 HSR 350X의 개발과 제작에서 한국형 고속전철 시스템 디자인의 결과는 성공적으로 반영되지는 못하였다. 그러나 이 과정에서 가장 큰 성과는 무엇보다 한국형 고속전철 시스템 디자인 방법의 과학성과 합리성이 실천적으로 검증되었다는 사실이다. 그리고 이 디자인 방법을 차량개발 초기부터 적극적으로 도입하여야 차량시스템을 전체적으로 조망하면서 차량의 개발과 제작을 성공적으로 이끌 수 있다는 인식이 차량 시스템 엔지니어링 개발팀에 확산되었다는 것이다.

향후 제작 기한으로 인하여 디자인 최적화를 위한 수정보완이 유보되었던 사항들과 시제차량 제작에서 제작공정 관리 문제로 실현되지 못하고 있는 사항들을 상용차량 제작 시 효과적으로 개선해 나가기 위해 상용차량을 위한 보다 심도 있는 연구가 이루어져야 할 것이며, 무엇보다 우리 고유의 차세대 한국형 고속전철 개발에 박차를 가해야 할 것이다. 여기에서 그간의 개발과정에서 고속전철 개발팀 내에서 성장한 인식과 시스템 디자인 방법론을 바탕으로 한국 고유의 통합적 시스템을 이루는 고속전철 개발이 원활히 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- 이동호 외(1998), "공력설계, 해석기술 및 전두부 개발, 연구보고서", 서울대학교 정밀기계설계공동연구소.
- 한동철 외 역(1998), "공학설계론", 동명사.
- 정경렬 외, "차량시스템 엔지니어링 기술개발, 연구보고서", 한국생산기술연구원, 1999-2002
- 정경렬(2000), "21세기의 고속전철", 생산기술지, pp.4~16.
- 이병중, "한국고유형 고속전철 디자인 개발연구, 연구보고서", 한국과학기술원, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002
- 이병중 외(2002), "한국 고유형 고속전철 디자인 방법론", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.344~350.
- Auer, Ernst Josef(ed.), "Design InterCityExperimental MagLev Transrapid", Design Center Stuttgart, Stuttgart, 1986.
- Villa, Mario, "Treni", domusdossier, Nr.4 1996.
- Messerschmidt, Wolfgang, "Schnelle Stars der Schiene", transpress-verlag, Stuttgart, 1997.
- Rahn, Theo(ed.), "ICE-Zug der Zukunft", Hestra-Verlag, Darmstadt, 1997.
- Schuerer, Arnold, "Der Einfluss Produktbestimmender Faktoren auf die Gestaltung", Selbstverlag, Hannover, 1968.