

# 시스템 엔지니어링 관점에서의 차세대 고속열차 성능 예측 및 검증

이 글에서는 국내에서 최초로 시도되는 분산형 고속열차의 차량시스템 성능 만족을 위한 시스템 엔지니어링 접근 방법을 소개한다. 차세대 분산형 고속열차는 간단히 HEMU-400X(Highspeed Electrical Multiple Unit-400km/h eXpress)라 불린다.

김상수 한국철도기술연구원, 선임연구원  
박춘수 한국철도기술연구원, 책임연구원

e-mail : sskim@krri.re.kr  
e-mail : cspark@krri.re.kr

## 시스템 엔지니어링 기술 적용의 필요성

시스템 엔지니어링은 여러 시스템이 복합적으로 연계된 경우에 각 시스템의 요구와 기술적 인터페이스를 종합적으로 분석하여 최적의 해를 찾아가는 과정에 대한 일련의 절차라고 말할 수 있다. 개발시스템의 요구로부터 시작하여 요구사항 분석, 요구조건 타당성 분석, 요구조건의 할당, 설계, 검증으로 이어지는 과정에 요구조건이 적절하게 반영되어 최적의 해를 찾도록 하는 것이 시스템 엔지니어링의 목적이다.

고속철도도 시스템 엔지니어링이 적용될 수 있는 복잡한 시스템으로서 차량시스템을 개발하기 위하여 시스템 요구사항을 만들고, 시스템 설계 및 검증에 필요한 각종 관리계획서를 만들어서 구성품 및 부품 개발기관에서 계획에 따른 절차를 준수하여 고속철도 차량을 개발할 수 있는 체계를 제공한다. 시스템 개발에서 이러한 체계의 확립은 전체 프로젝트 개발과정의 오류를 줄이고 관련 기관들간의 역할 정리를 통하여 개발 목표가 정확하게 연구에 반영되어 추진되도록 하는 것이다. 여기서 다루는 차량성능의 예측 및 검증은 위 생애주기에서의 정의부터 검증영역에 해당한다. 이러한 시스템 엔지니어링 프로세스를 적용하면서 최고시속 400km, 영업속도 350km/h의 분산형 고속열차에 대한 운영 요구

조건과 시스템 요구사항을 개발하여 차량시스템을 포함한 하위시스템의 기술 성능을 관리할 수 있다.

국가연구개발사업으로 추진하고 있는 차세대고속철도기술개발사업은 분산형 고속차량을 중심으로 개발되는 프로젝트로서, 차량시스템 및 부품들의 개발과 개발차량의 운영을 고려한 인터페이스 등을 종합적으로 고려하여야 하며, 여러 연구과제와 기관이 참여하는 사업의 특성상 프로젝트의 기술적 위함관리와 시스템 엔지니어링의 추진이 프로젝트의 성공에 지대한 영향을 줄 것이다. 고속철도는 차량과 시설물(선로시스템, 전력공급시스템, 신호시스템 등), 그리고 운영 등이 복합적으로 어우러지고 각 시스템의 요구와 인터페이스

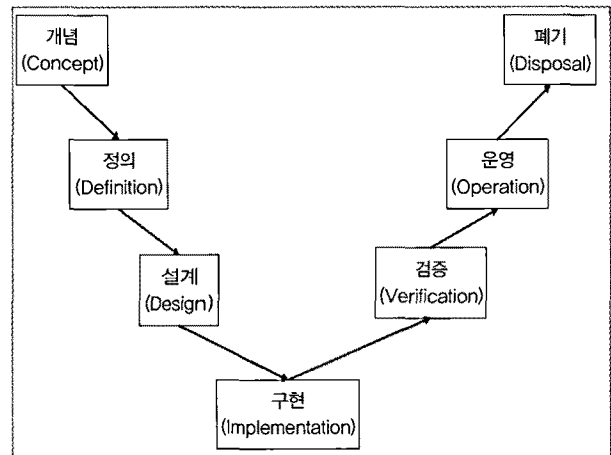


그림 1 시스템 생애주기

가 원활하여야 목적하는 차량시스템의 성능을 확보할 수 있다. 이 글에서는 목표된 차량시스템 성능이 발휘될 수 있도록 주요 성능에 대한 예비해석과 실제 완성된 구성품 및 차량의 성능검증 방법을 설명하도록 한다.

### 차량시스템 성능 예측 및 예비해석

시제편성의 개발과정은 차량시스템 기술요구서 및 기술요구서를 만족하는 구성품 설명서의 작성, 제작된 구성품의 개발시험, 조립 완성된 차량의 본선시운전 시험 등의 순서로 진행된다. 차량시스템 기술요구서는 그림 2와 같이 일반사항, 운영, 차량, 시제편성, 시험평가의 부분에 걸쳐 총 239개 항목에 대한 시스템 요구사항을 만족할 수 있도록, 관련 기관들과 수 차례의 협의를 통하여 확정되었다. 결정된 요구사항에 따라 각 구

성품의 설계, 제작, 시험 등이 진행되고 있고, 열차 성능에 중요한 영향을 미치는 주요 기능 즉 제동성능, 주행성능, 동적성능에 관하여는 각 구성품이 제작 전에 미리 성능을 예측하여 요구하는 기능과 성능을 만족하도록 관리하고 있다. 구성품 설명서가 작성되는 시기에 1차 해석을 실시하고, 해당 구성품의 제작이 이루어져서 개발시험이 실시되는 시기에 2차 해석을 실시한다. 각 예비해석단계의 결과가 시스템 요구사항에서 제시하는 성능을 만족하지 못할 시에는 설계에 반영하여 개선할 예정이다. 여기서는 1차 해석 결과를 기술한다.

#### 제동성능

제동성능의 예비해석은 300km/h에서의 비상회생제동과 순수공기제동 사용에 대한 제동거리를 확인하였다. 차량시스템 기술요구서에서 제시한 제동성능을 만족하는 시스템 구축을 위하여 수 차례의 통합제품개발팀 회의를 거쳐 검토된 기술적 사항을 바탕으로 제동시스템의 기본 사양이 결정되었다.

제동성능해석을 위한 프로그램은 LabVIEW를 이용하여 작성되었으며, 전기제동, 기계제동 등의 수량 및 상태 등의 입력이 가능하며, 전기제동 조건(회생, 저항)의 구별 입력 및 고속선 선로 구배의 적용이 가능하도록 구성하였다. 300km/h에서의 비상회생제동 및 순수공기제동에 대한 제동성능을 해석하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 예비해석의 결과는 제동시스템 개발 연구기관에서 차량시스템 요구조건을 만족할 수 있도록 제동력 프로파일, 제동력 분배 재검토 등 개선 방안을 도출하는 데 활용된다.

#### 주행성능

주행성능 예비해석의 목적은 차세대고속열차 시제편성의 주행성능 최고 시험속도인 400km/h를 만족할 수 있는지 사전에 성능을 예측하는 것

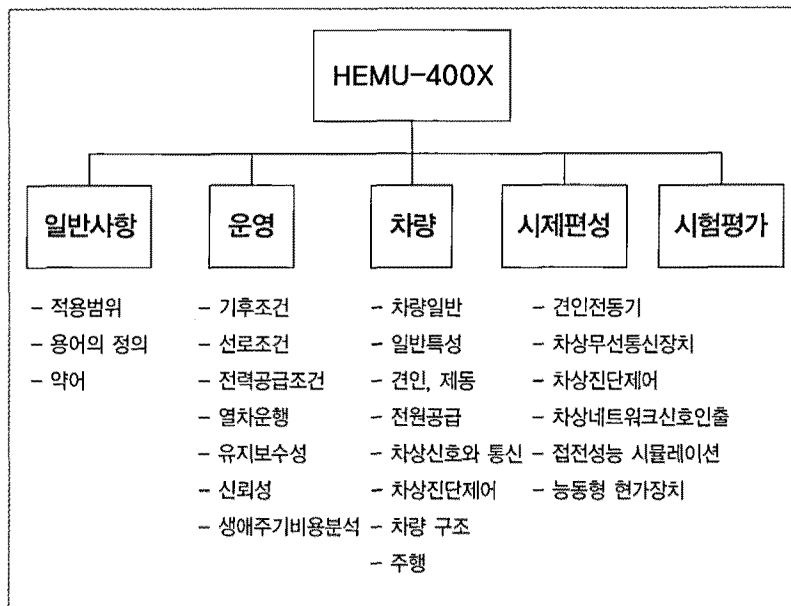


그림 2 시스템 요구사항 구조

표 1 제동성능 해석 결과

구분	비상회생제동	순수공기제동
제동초속도 (km/h)	300	300
제동시간 (sec)	76.2	120.0
제동거리 (m)	3,642.0	5,845.0
총에너지 (MJ)	1,258.4	1,258.4
전기에너지 (MJ)	472.8	-
기계에너지 (MJ)	699.3	1,122.2
주행저항 (MJ)	86.3	136.2

이다. 이를 위하여 설계 단계에서 시스템 요구사항의 성능목표를 달성할 수 있는지 여부를 검토하는 것이다. 아울러 시험평가단계에서 수행하는 본선에서의 시운전시험을 위한 시험선로의 길이 산출을 위한 것이다. 이를 위해 주행성능 분석을 위한 요소와 변수를 도출하고 시운전 선로의 입력조건을 도출하였다. 또한 주행성능의 특성을 도출하고 최종적으로 주행성능 예비해석을 실시하였다.

평탄선로에서 시제편성의 예비해석을 수행한 결과는 그림 3과 같다.

시제편성에 대해 주행성능 예비해석을 수행한 결과 평탄선로에서의 균형속도가 400km/h를 상회하여 설계목표를 만족하였으며, 향후 세부적인 상세 차량 변수가 도출됨에 따라 해석이 추가될 수 있다.

**동적 특성**

차세대고속철도 기술개발사업에서 개발되는 시제차량은 동력집중식인 KTX나 한국형고속열차와는 달리 분산형 동력시스템으로 구성되며, 객차대차 역시 일반형의 동력장치가 있는 대차와 동력장치가 없는 일반대차로 구성되는 등 이전의 고속열차와는 다른 형식으로 개발되고 있다. 이렇게 다른 형식의 대차와 속도향상의 가능성을 위해서는 초기 차량의 설계단계에서부터 예비해석을 통하여 동적거동의 안전성을 확보해 나아가야 한다. 분산형 고속열차에서 중요 시되는 요소를 기본으로 대차를 구성하여, 그림과 같이 차량을 모델링하였다. 1차 현가장치는 차축액셀박스 중심에서 대차와 6자유도 Bush 모델로 구성하였으며, 2차 현가장치 또한 대차와 차체를 2지점에서 6자유도 Bush 모델로 구성하였다. 이 모델에

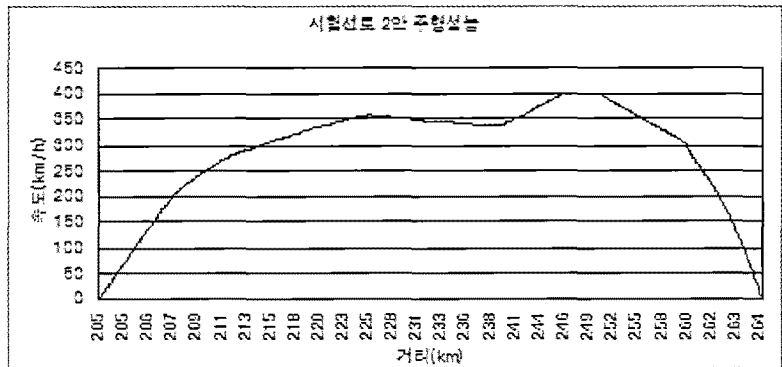


그림 3 시험선로 주행성능 예비해석 결과

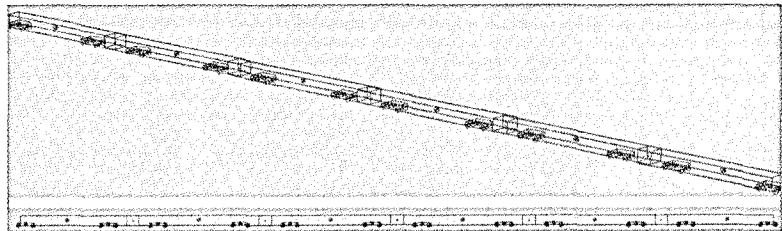


그림 4 시제편성 모델링

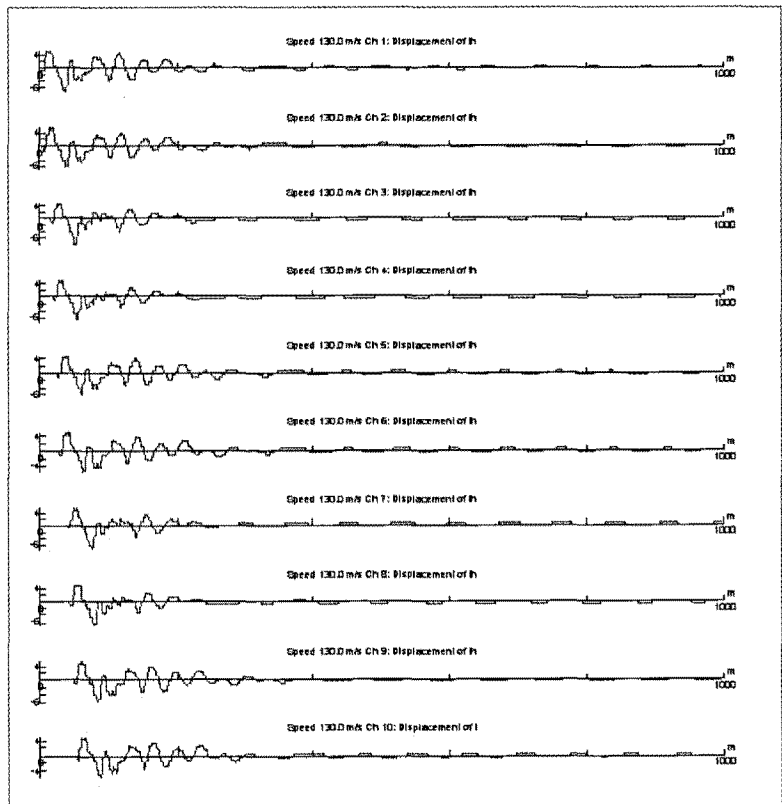


그림 5 고속에서의 주행 안정성 해석 결과

는 현가장치의 구성품은 장착치수를 입력하지 않고, 장착지점의 한 점에서 힘이 작동되도록 하였으므로, 상세 설계에 발생할 수 있는 불확실성을 최소화 하였다. 또

는 현가장치의 구성품은 장착치수를 입력하지 않고, 장착지점의 한 점에서 힘이 작동되도록 하였으므로, 상세 설계에 발생할 수 있는 불확실성을 최소화 하였다. 또

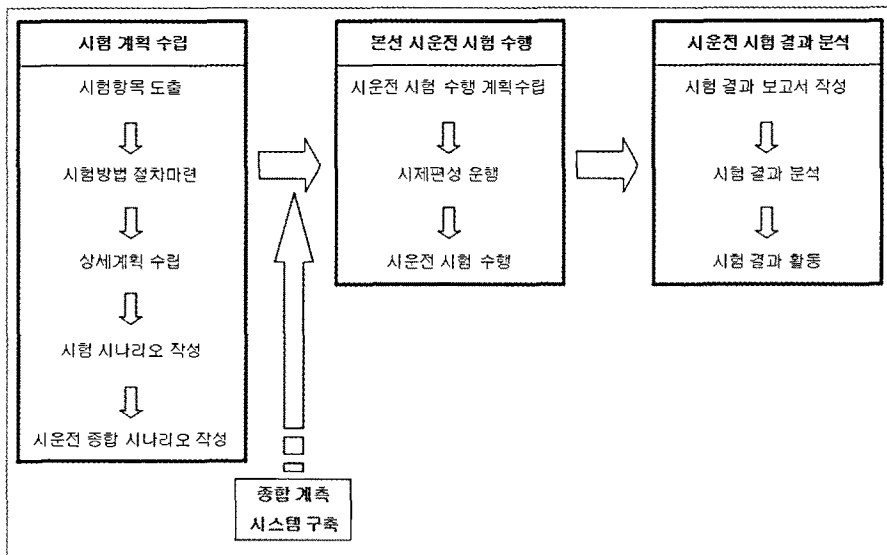


그림 6 본선시운전 시험 구성도

고속철도 시스템에서 요구되는 성능을 갖는 시제차량을 완성하기 위한 차량시스템 기술요구서 및 각종 설명서, 설계도면, 시험 절차서 등에 대한 검토와 관련한 각 기관의 업무 체계를 구축하는 것이다. 둘째는 차량의 각종 부품 및 시스템이 제작 및 시험, 본선 시운전 시험 과정에서 예측된 성능을 발휘하는지를 확인하기 위한 성능검증체계 구축이다.

한 대차와 차체의 Pivot을 단순하게 대차 중심에서 전후, 좌우의 높은 탄성계수만을 적용하여 견인력이 전달할 수 있도록 하였다.

위에서 완성한 모델을 철도차량 전문 해석 프로그램인 Vampire를 이용하여 고속주행 시 10개 차륜의 좌우방향 변위를 구하였다. 주행속도 468km/h에서의 해석결과가 그림 4와 같다. 초기 가진에 대해 모두 차륜의 변위가 수렴하는 것을 알 수 있다. 400km/h의 시험 속도를 확보하기 위해서는 최소 10% 이상의 속도범위인 440km/h에서 안정성을 확보해야 하는 것을 감안하면, 고속주행시험은 가능함을 알 수 있다.

이후 설계의 구체화에 따라 모델링도 개정될 수 있으며, 시제편성이 주행하게 될 시운전 노선을 포함한 모델 개발 및 해석을 실시할 계획이다.

### 차량시스템 성능 검증

분산형 고속철도 시스템이 목표된 성능을 발휘할 수 있도록, 설계 단계에서부터 요구사항에 대한 반영 여부를 추정, 검증할 수 있도록 체계를 마련하였다. 이는 크게 두 가지로 나누어 진행되었다. 첫째는 분산형

계인 시제차량의 본선 시운전 시험에 관련된 여러 기관들의 역할 분담 및 시험 절차를 마련하여 성능평가 종합계획을 수립하여 본선시운전시험에서 수행하여야 하는 시험의 종류를 구분하여 명시하였고, 각 시험별로 계획수립절차 및 담당업무에 대하여 정리하였다. 또한, 시운전시험을 위한 계측시스템 구축 및 시험결과처리까지 본선시운전시험 전체 업무 수행에 대한 체계를 수립하여 예측된 성능의 발휘를 검증하게 된다.

### 향후 계획

현재 차세대고속철도기술개발사업은 2단계 1차 연도 연구 일정으로 진행되고 있다. 2단계에는 시제편성의 설계 및 구성품/부품의 제작, 시험이 이루어진다. 시스템엔지니어링 관점에서 접근하여 목표로 하는 성능을 갖는 열차를 개발하기 위하여, 위에서 언급한 주요 성능에 대한 예측 및 검증 연구는 지속될 예정이다. 또한, 각 구성품이 조립되어 완성된 열차가 본선에서 주행하면서 열차의 성능을 검증하기 위한 계획 및 작업도 수반되고 있다.