

고속철도차량의 기술 동향

백광선*, 온정근, 이강원
한국철도기술연구원

The technical trend of high speed train

Baik kwangsun*, Ohn Jungghun, Lee Kangwon
KRRRI

Abstract - 현재 각 국에서 운영중이거나 개발중인 고속철도차량의 주요 장치의 적용 현황을 정리하고 보다 안정적이고 좋은 승차감을 유지하기 노력과 각각의 장점이 결합되어 진행되는 개발사태에 대하여 알아본다.

1. 서 론

신간선의 개발시 초기에는 300km/h가 차량한계로 생각되었으나 TGV 및 ICE의 시험결과 그 한계는 더 멀리 있다고 판명되었고, 최근에는 약480km/h 정도가 차량한계로 생각되고 있다. 이와 같은 차량의 고속화에 있어 일본과 유럽은 사용되는 조건 등이 다르고 환경에 맞게 별도로 기술개발을 추진해온 관계로 철도차량이 구성이 특징을 갖고 개발되어 왔다. 이와 같은 기술동향은 과거에는 차량을 고속화하기 위한 연구가 주류를 이루었으나 1990년대를 정점으로 궤도 및 터널 등과 조화를 이루어 속도향상이 가능하게 하기 위하여 차량의 경량화 연구, 공력해석을 통한 차량형상의 최적화 및 탈딩대차의 개발 등이 주류를 이루고 있다. 또한 승객의 안락성과 편의성에 대한 요구가 증가함에 따라 차량의 성능뿐만 아니라 인간공학적인 측면과 환경 친화적인 측면의 연구개발이 이루어지고 있다.

2. 본 론

2.1 차량의 구성

고속열차의 편성은 동력분산식과 동력집중식이 있다. 동력분산식은 점착성능이 높아 가속성과 제동성능이 좋아지며, 축중이 가벼워지며, 한 개의 차량이 고장나더라도 그 영향이 전체적으로 적지만 주행저항 및 에너지 소모가 크고, 총 중량 및 제작비가 증가하며 유지보수의 면에서 불리하고 소음원이 광범위하게 확산되는 단점이 있다. 또한 열차길이가당 좌석수를 증가하고 많은 전동기를 제동시에도 사용할 수가 있어 기계제동에 의한 소모를 감소시킬 수 있으므로 일본에서 모든 신간선에 적용하고 있다. 이에 반해 추진부분이 집중된 동력집중식은 분산식에 비하여 가속도를 크게 얻을 수는 없고 역이 많은 곳에서 기계제동의 마모가 크지만 동력기기의 집중으로 보수작업과 여객차 내의 쾌적성이 유리하여 유럽에서 TGV-PSE, TGV-A, ICE 등에서 채용되고 있다. 그러나 차량의 고속화가 레일에 미치는 영향 등에 따라 유럽에서도 ICE-T(1998년), ICE3(2000년)와 AGV(프랑스) 등과 같이 동력분산식을 개발, 사용하고 있다.

2.2. 차량 메카니즘

2.2.1 전동기 및 제어장치

고속전철용 구동용전동기는 처음에는 직류전동기가 사용되었다. 일본은 0~200계, 400계, 프랑스의 TGV-PSE, 이탈리아의 ETR450이 직류전동기 구동이다. 이 전동기를 제어하기 위해서 전류회로(轉流回路)가 설치되어야 하며, 정류의 문제점, 전동기의 크기, 특히 전기자의 직경에 대한 고티출력의 정류가 어려우며 정류자와 브러시의 빈번한 유지보수, 출력 강화도 곤란 등의

단점을 가지고 있어 무정류자 전동기에 대한 개발이 진행되었는데, 독일에서는 유도전동기 구동시스템의 개발을 먼저 시작했고 프랑스는 동기전동기를 개발하였다. 이에 따라 유도전동기를 사용하는 시스템을 적용하는 시제차가 유럽에서는 1971년에 등장하였고 일본에서는 1982년에 등장한 이래 ICE와 이탈리아의 ETR500 그리고 300계 이후 신간선에서는 유도전동기 구동기술을 사용하여 1990년대에는 광범위하게 사용되고 있고 프랑스는 동기전동기 구동기술을 사용하여 전류형 인버터와 결합하여 TGV-A, TGV-R, AVE 에 적용하고 있다. 소음, 진동 등의 환경 대책과 고속에서의 안정된 성능 그리고 소형화와 경량화 그리고 시스템의 대용량화를 위해서는 유도전동기 구동방식이 유리하고 차량의 경량화로 인해 더 작은 크기로 고티출력을 낼 수 있는 제품이 계속 연구되고 있으므로 동기전동기를 사용하는 나라에서도 유도전동기를 사용하는 인버터제어가 주류를 이루게 될 것이고 소형 대출력 견인전동기의 개발을 위한 노력이 계속될 것이다.

제어기술이 발달해도 인버터를 구성하는데 있어서도 사용되는 반도체 소자가 많지않으면 어느 정도 한계에 도달하게 된다. 초기에는 반도체 소자로 싸이리스터가 사용되었으나 집진적으로 스위칭 속도가 빠른 소자가 개발되어 사용되고 있다. 독일과 스위스에서는 무정류자 전동기의 개발에 정진하여 1970년대에는 GTO 등 전력용 반도체소자를 개발하여 1980년대에는 대용량 인버터 기관차를 실용화하여 ICE에 GTO가 사용되었고, 최근에는 스위칭 속도가 빨라 소음, 점착력 개선 제어, 고조파 발생량 등에서 유리한 IGBT가 대용량으로 개발되어 동력분산식(E4계-일본, ICE3-독일)에서는 사용되고 있으며 동력집중식에도 적용이 가능한 대용량 소자도 시험 중에 있다. 국내에서 개발중인 G7 고속전철에서는 동력집중식인 관계로 GTO보다 효율이 좋고 고속스위칭이 가능한 IGBT가 사용되어 개발되고 있다.

2.2.2 집진장치

차량 고속주행중의 차량진동, 트롤리선의 고저차와 진동을 흡수하여 전차선에 안정적인 집진을 이행하므로 차량을 고속화하는데 있어서 집진성능이 큰 비중을 차지한다. 따라서 공기와의 마찰로 인한 소음을 저감하기 위하여 개발이 수행되고 있다. 이를 위하여 다양한 집진장치가 개발되어 왔다. 판도그라프에는 능형(菱形)(ETR450, 460)과 다이아몬드형(능형의 변형으로 0계 사용)이 처음에는 사용되어 고속으로 주행하면서 양력에 의한 압상력의 변화를 보전하여 일정 압상력을 유지하며 안정된 집진을 하기 위하여 집진주와 위쪽 프레임사이에 스프링을 삽입하거나 판도헤드의 형상을 고안하는 일이 진행되기도 했으며, 다이아몬드형의 경우 소음특성이 좋지 않은 것으로 판명되었다. 가선 높이의 변화와 고속주행시에도 가선에 제빠르게 추종하기 위하여 등가질량을 작게 한 싱글암형이 프랑스에서 개발되어 ICE, ETR500, X2000에서 채용되고 있다. 또한 추종성을 좋게하기 위하여 스프링 상 등가질량을 작게한 2단식 싱글암형이 개발되어 TGV-PSE(1981년)에 사용

되고 있다. 이 외에도 E3계는 저소음형의 싱글암 판토그래프가 채용되고 있으며, TGV-A는 안정판에 해당하는 기구를 소형화하여 경량화를 이룬 제품을 사용하고 있다. 또한 일본에서는 공기실린더의 내압을 제어하여 압상력을 일정하게 유지하는 T4형 판토그래프를 개발했는데, 이 장치는 복잡하지만 공력특성이 개선되고 소음이 작아지는 특징을 갖고 있으나 고속에서의 특성이 만족스럽지 않아 500계에서만 채용되고 있으며, 고속에서도 안정적인 집전이 이루어지도록 하는 연구가 진행되고 있다. 판토그래프는 최근까지 수동형 제어방식으로 사용하였으나, 가선계의 제한, 고속으로 주행시 전차선의 파상마모, 집전판의 마모 등이 있을 수 있어 총순기비용이 클 수 있다. 이를 위해 능동형 제어장치의 판토그래프가 필요하다. 이 판토그래프는 열차주행중에 판토그래프와 전차선 사이의 접촉력을 거의 일정하게 유지시켜줌으로 마모 발생량이 줄어들고 다양한 가선계에서도 고속주행시 양호한 집전성을 얻을 수 있다. 외국에서는 이미 90년대에 연구를 시작했고 프랑스는 CX를 개발하여 2층 열차인 PBKA에 활용하고 있으며, 이태리는 개발을 했고, 독일은 250km/h 이상의 고속용 판토그래프를 적극 개발 추진중이다. 판토그래프의 수량도 고속주행에 중요하다. 신간선 0계에서는 2량당 1개의 집전장치를 사용했으나 고속주행시 후방 판토그래프에 아크가 지속적으로 나타나고, 트롤리선과 집전주의 스파크마모, 소음 증가가 발생하였다. 1편성에 2대의 집전장치를 50m이상 떨어져서 설치하는 것이 소음저감과 집전성확보에 가장 효과적이라는 결과에 따라 TGV는 뒤쪽의 1개만 사용하고 있으며 ICE는 각 기관차가 집전장치를 사용하도록 하고 있다. 일본에서는 판토그래프의 수를 점진적으로 줄였으며, 현재 신간선은 편성에 관계없이 2개 또는 1개를 사용하고 있다. 프랑스에서는 대 전류로 인한 가선의 단선에 대한 우려로 2대를 사용하나 고속에서는 1대만 사용한다.

2.2.3 대차

2.2.3.1 틸팅

차량이 고속으로 곡선을 주행할 때 차에 탑승하고 있는 승객은 원심력으로 불쾌감을 느끼게 된다. 이를 극복하기 위한 방안으로 고속운전 전용열차를 건설하거나 곡선반경을 크게 되도록 선형화하는 데는 막대한 비용이 소요되고 모든 열차에 적용되는 궤도를 만드는 것도 불가능하므로 상당한 수송수요가 예상되지 않는 선구에서 틸팅 기술이 적용되고 있다. 프랑스의 경우, 초기에는 강제도 틸팅을 하는데 있어서 적절한 방법을 찾는데 어려움이 있어, 1956년에 강제틸팅방식의 대차 시험을 성공적으로 하여 1970년 차량에 적용하여 시험을 했으나 차량구조가 복잡해지고 보수가 빈번해지는 관계로 개발을 보류했고, 최근에 TGV 틸팅차의 개발을 시작하기로 결정하여 진행중인 프랑스의 제외하고, 스페인, 스웨덴, 일본 등에서는 자연 틸팅을 시도하였다. 그러나 일본은 자연진자의 속도가 느려 승차감이 문제가 발생하여 유럽에서 1988년 이탈리아의 펜들리노가 나올 때까지 적용하지 않았고, 스페인은 자연틸팅을 개발하여 사용중에 있으며, 스웨덴은 1981년에는 자연틸팅이 가능한 TALGO Pendulum을 영업운전했으나 X2000에서는 진동가속도 센서 사용하고 유압실린더로 경사 조정하는 방식을 사용하고 있으며 대부분의 틸팅시스템은 강제틸팅방식을 사용하고 있다. 또한 초기에는 동력차에도 이 시스템을 적용하고자 하여 이탈리아의 펜들리노와 ETR450에서는 동력차에 있는 집전장치가 틸팅에 의하여 영향을 받으므로 판토그래프의 위치를 보정하도록 하는 방식을 취하기도 했으나 현재 스페인의 탈고나 스웨덴의 X2000은 객차만 틸팅시스템을 도입하고 있다. 독일(ICT:전철구간, ICT-VT:디젤동력차), 이탈리아(ETR450) 및 미국 등에서도 이 기술이 개발, 연구되고 있다. 또한 유럽에서는 자이로스토프(이탈리아에서 병용)나 가속도센서를 설치하여 가속도의 변화에 따라 곡선진입을 감지하여 유압실린더 등으로 차체를 기울이는 강제진자

방식이 주류를 이루고 있으며 차체의 진동을 혼돈할 수 있으므로 필터를 설치하여 감도조정이 필요한 방법을 적용하고 있다.

2.2.3.2 일반대차 및 관절대차

일반대차는 차체와의 결합이 간단하고 하중의 불균형을 제어하기가 용이하고 차량 연결기가 전후의 충동을 흡수하므로 큰 충격을 가할 때 대책을 얻기 쉽고 편성량 수의 증감은 용이하다는 장점으로 사용되고 있지만, 전체 중량 저감에는 불리하고 객실이 대차위에 있는 관계로 차내 소음면에서는 바닥 차음구조로 해야하는 단점이 있다. 고속용 차량에는 일반대차(독일, 일본 등)와 관절대차(프랑스)가 많이 사용되고 있다. 일본에서 STAR 21에서 관절대차와 일반대차를 시험했으나 주행성능과 승차감에서 현저한 차이는 없었다고 한다. 일본에서는 1950년대 300계에서 우수한 승차감은 물론 가능한 한 고속주행을 목표로 경량화, 저중심화를 주안점으로 설계, 일본 최초로 관절대차를 적용하기도 했으나 최근의 신간선에는 일반대차를 주로 적용하고 있다.

2.2.3.3 볼스타 및 볼스타레스대차

볼스타가 좌우 움직임과 상하 움직임을 흡수하도록 한 스윙행거식이 독일에서 200km/h로 주행하는 객차에 활용되었고, 볼스타와 볼스타스프링의 위치를 변화시키고 볼스타 위에 볼스타스프링을 배치하여 차체를 직접 지지한 직접 마운트식이 일본의 0계, 100계, 200계 신간선에서 사용되고 있다. 그러나 최근에는 차량의 경량화의 일환으로 진행되고 있는 대차의 경량화로 인하여 좌우 사이드 빔을 연결하는 볼스타를 없애고 대차 프레임위에 볼스타스프링을 설치하여 대차의 회전방향 변위도 흡수하는 볼스타레스방식이 적용되는 경향이다. 유럽의 경우, 이탈리아에서는 처음부터, 프랑스에서는 1972년 코일 스프링식 볼스타를 개발하여 TGV-A 이후로는 전부 공기스프링방식을 사용하고 있다. 일본은 최고속도 300km/h 정도를 목표로 하기 위하여 고속주행안정성, 곡선주행성능, 승차감, 진동을 동시에 개선하고 경량화한 대차를 개발하기 위하여 1980년경부터 신간선전차용으로 연구개발 시작하여 1988년 공기스프링식을 개발하여, 300계 이후로 전부 볼스타레스 대차를 적용하고 있다.

2.2.4 제동

제동관의 압력을 감소시켜 보조공기탱크의 공기가 제동실린더로 보내져 제동력을 발휘하는 자동공기제동방식이 사용되었으나 제동시령의 전달속도가 공기의 압력전파속도에 의존하여 편성이 길어지면 제동효과가 개시되기까지 시간이 길어지는 단점때문에 전기지령으로 전자밸브를 작동하여 제동관의 급배기를 이행하는 전자자동공기제동이 개발되어 TGV와 ICE에 사용되고 있다. 초기에는 아나로그 전압을 사용했으나 제동력을 단계적으로 조정하는 것이 가능한 디지털식이 개발되어 일본의 200계 및 100계 이후의 신간선은 모두 전기지령식을 사용하고 있다. 기계제동의 기초적인 제동으로 담면제동(TGV 동력차)이 있는데 1950년대부터 4대대에 제동실린더를 설치하여 이용해 왔으며, 제동수를 차량 담면에 붙여 제동을 하는 방법으로, 큰 제동력이 필요한 경우에는 슈의 온도가 상승하고 담면의 마모도 증가하여 유지보수 측면에서 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 차륜과는 별도로 디스크를 설치하여 제동실린더와 레버로 제동라이닝을 눌러 붙여 제동력을 얻는 디스크제동이 개발되어 신간선 0계에서 사용되고 있다. TGV-A 등에서는 담면제동과 병용하고 있으며, TGV-Duplex에서는 부수대차 뿐만 아니라 동력대차도 포함하여 전부 디스크 제동을 사용한다. 현재는 고열을 견딜 수 있는 재료가 개발중에 있다. 안정적 제동력을 얻기 위하여 제동에너지를 저항기에서 열로 방산하는 발전제동이 사용되어 신간선 0계, 100계, 200계, 400계와 TGV-PSE, ETR450, 유로스타에서 사용되었으나 최근에는 잔류에너지를 전원측으로 돌려주는 회생제동이 개발되어 신간선의 E1계 이후와 독일의 ICE 그리고 한국의 KTX

와 G7사업으로 개발된 한국형 고속전철에 채용되고 있다. 또한 속도가 증가함에 따라 350km/h 이상에서는 기존의 제동만으로는 제동력 확보에 어려움이 발생하므로 대차프레임에 설치된 전자석과 디스크 또는 레일의 전자유도에 의하여 제동력이 발생하는 비접촉방식의 와전류제동이 개발되어 신간선의 100계, 300계, 500계 부수차에 사용되고 있으며, ICE1,2와 일본의 8000계 및 한국형 고속전철에 부착되어 있으며, 전자석의 흡착력을 이용하여 대차에 부착된 슈를 레일에 밀어붙이는 전자흡착식 레일제동을 비상제동시에 사용하는 방식도 개발되어 사용되고 있다. 이외에도 와전류방식의 레일제동을 ICE3에서 사용하며, 전기제동과 기계제동의 브렌딩(blending)제어를 확대하여 고속영역에서는 전기제동을 full로 사용하고 저속영역에서 전기제동력이 부족할 때 부수차의 제동을 동작시키는 공기보충 제동제어가 ICE4와 신간선 200계에서 사용되고 있다.

2.2.5 차체경량화

초기에는 스틸차체가 신간선의 0계, 100계 그리고 TGV-A 등에서 사용되었으나 알루미늄이나 스테인레스를 사용한 차체가 개발되어 신간선에 있다. 스테인레스는 부식에 강해 판의 두께를 연강에 비해 얇게 하는 것이 가능하나 재료의 특성 때문에 연속용접이 아닌 스폿 용접을 하여 기밀구조가 어려워 1990년 영업운전이 시작된 2000의 경우 기밀구조를 채용하고 있지 못하고 있다. ICE, ETR 및 신간선 E2계 이후에는 가볍고 기밀구조가 가능한 알루미늄차체를 사용하고는 있으나 경량화에 유리하나 가격이 비싼 단점이 있다. 따라서 TGV-Duplex는 일체로 성형한 대형 알루미늄 압출형체를 사용하여 제작비를 내리고 있다. 일본에서는 보통강의 철구조이던 것이 1973년 제작된 381계 전차와 신간선 시험차에 채용되었고 1985년 10월 출현한 100계는 알루미늄차체로 제작되었다. 그리고 STAR21에는 항공기용 고장력 알루미늄합금계 리벳 결합구조를 사용하였다. 또한 차체의 프레임에는 내화성, 내부식성, 고강도, 저보수성의 스테인레스강을 사용하고 상부에는 경량성, 기밀성, 저보수성의 알루미늄 합금을 이용한 하이브리드형 차체가 개발되었으며, 비강도(比強度), 비강성(比剛性)이 우수한 탄소섬유강화소재가 시험 제작되었으나 너무 고가인 관계로 실용화는 되지 않고 이차량 재료의 차체용 소재로 기대되고 있다.

2.2.6 신호

200km/h 이상의 속도로 주행하는 열차의 승무원이 육안으로 확인하고 제동동작을 실행하는 것은 불가능하므로 차내 신호시스템 및 열차제어시스템이 활용되고 있다. 신간선이나 TGV430의 경우 신호에 따라 신호장치 또는 사람이 제동을 하는 방식을 사용하고 있다. ICE의 LZB의 경우에는 조금 더 복잡하게 지상컴퓨터에 열차의 위치정보가 송신되어 지상으로부터 열차에 전방열차의 위치, 선로구배 및 허용속도가 송신되고 차내에는 목표속도, 정지거리 및 허용속도가 표시되도록 하는 시스템을 사용하고 있다. 최근에는 일본의 경우 지진이 일어나는 빈도가 잦고 이로 인하여 레도에 이상을 주는 경우 고속으로 운행하는 열차는 탈선을 하여 큰 인명피해와 재산적인 피해를 보게되므로 UrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System)라는 시스템을 개발하여 초기의 미진을 감지하여 진원의 위치와 규모를 예측하고 주행중인 열차가 큰 지진이 도달하기 전에 정지하거나 저속운전을 하도록 하는 시스템이 개발되고 있으며, 무선기술과 컴퓨터기술을 구사하여 열차의 본체에 조립된 제어기능에 의하여 앞뒤 차량의 위치, 속도 등을 통신으로 전송받아 자신의 속도를 제어함으로 지상설비를 경감하는 CARAT(Computer And Radio Aided control system)이 개발되었다. 이 시스템은 이동블록(Moving Block)이 가능하고 열차의 운전간격을 단축시키는 장점이 있다. 1990년대 초반부터 개발된 이 신호체계는 3세대 신호체계라고 할 수 있으며 일부 국가에서는 도시철도에서 사용 중에 있다. 일본에서는 CARAT, 북미에서는 ATCS, 유럽에서는

ETCS(레벨 3)가 있다.

2.2.7 차량 형상

고속화를 위해서는 차량 전두부 형상이 중요하다. 전두부 형상은 주행중의 공기저항감소와 터널 통과시의 미기압파를 줄이기 위하여 유선형을 많이 사용해왔으며, 형상을 더 날렵하게 하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이 형태로는 개선의 여지가 적고 차량의 모양을 돌고래형, 카스프형(오리주둥이), 썬기형 등으로하는 연구가 진행되어 왔고 후자가 효과가 더 있어 최근 차량은 이를 근거로 설계를 하고 있다. 또한 차량 측면의 돌출부를 없애고 차체 단면적을 줄이는 등의 개선 노력이 계속되고 있다. 독일이 가장 앞선 것으로 판단되고 있다.

2.3. 최근 개발사례

2.3.1 AGV

Alstom사와 SNCF가 공동으로 개발하는 열차로써 동력분산형시스템과 IGBT 사용 VVVF 인버터의 사용으로 경량화가 되어 축중 17ton을 유지하고 있으면서도 안전성과 승차감이 우수한 관철대차를 채용하고, 평균속도 350km/h를 목표로 운전할 계획이다. 차량의 종류는 크게 운전실을 가지고 있는 차량과 중간차량으로 구분되고 자체 냉각장치(팬)가 전동기에 직접 부착되고, 진동이 차체에 직접 전달되지 못하도록 방진 블록 등이 설치되어 차체에 직접 설치된 전동기가 있는 2대의 동력대차와 1대의 부수대차를 가지는 차량 3량을 기본편성으로 한다. 또한 제동성능은 350km/h의 고속영역에서의 효과적인 제동을 위하여 개발되었던 와전류제동장치를 선두와 후부에 위치하는 2대의 동력대차에 장착한다. 승객의 승차감 향상을 목적으로 전기적으로 작동되는 현가장치를 장착하여 기존의 TGV가 300km/h로 주행시와 동일한 승차감을 유지할 수 있도록 승차감 향상을 도모하였다. 차량의 경량화를 위하여 TGV Duplex에 사용되었던 알루미늄 차체구조가 적용되었다.

2.3.2 HSE(High Speed Train Europe)

현재 대외적으로 공포된 자료는 아니나 독일 DB와 프랑스의 SNCF가 주축이 되어 관철형 대차, 2층대차 등 현재 고속화를 위하여 개발된 많은 기술들을 전반적으로 검토하여 이를 실용화하는 열차의 개발과 관련된 검토가 이루어지고 있다고 한다.

3. 결 론

일본과 프랑스는 서로 다른 철도를 건설해왔다. 서로 다른 특징을 갖고 있으며 어느 부면에서는 서로 뒤지지 않는 기술을 갖고 있다. 그러나 최근에는 승객의 안전과 편의성을 증대하는 가운데 많은 인원을 운송할 수 있도록 하기 위하여 특정한 기술에 집착하여 계속 발전시키려는 것보다는 다른 시스템일지라도 검토하고 적용하려는 형태를 보이고 있다. 따라서 이런 추세는 고속철도를 개발하고 있는 국내 실정에 있어서 기술개발을 위한 방향 설정에 좋은 지침이 될 것으로 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 세계의 고속철도 장경수, 백남욱, 김기환 共譯 골든벨
- [2] 한국철도기술정보지 2001년 1·2월호 기존선고속화와 신호체계
- [3] G7 고속전철기술개발사업 2단계 1차년도 연차보고서 주 전력변환장치 개발
- [4] G7 고속전철기술개발사업 2단계 1차년도 연차보고서 차량시스템 엔지니어링 기술개발 IRJ(International Railway Journal) EDITORIAL - May 2000
- [5] 선도기술개발사업-고속전철기술개발 1996 한국고속철도건설공단
- [6] 세계의 고속철도와 속도향상 & 자기부상식 철도기술 住田俊介 著 골든벨철도경