

세계의 고속전철 기술동향

김용주*, 김종수**, 류홍제**, 조창혁*, 이주훈**, 박도영**
 (*한국전기연구소 산업전기연구단장, **한국전기연구소 전기물리 연구그룹,
 *한국전기연구소 제어자동화 연구그룹, **한국전기연구소 Mechatronics 연구그룹)

1. 서론

1996년 12월에 선도기술개발사업(G-7 사업)으로 건설교통부가 주관하고 산업자원부와 과학기술부가 협조 부처로서 시작된 “고속전철 기술개발” 사업은 개발 기간이 1996년부터 2002년까지 6년 간의 사업기간에 총 2,874억의 예산이 소요되는 대형 연구사업이다. 최종 목표는 현재 불란서로부터 도입되는 TGV-Korea의 운행 속도인 300 km/h보다 16.6% 향상된 350 km/h로 운행가능한 초고속전철의 시제차를 개발하는 것이다.

본 고속전철 개발사업은 1999년 11월에 제 1단계 연구사업이 종료되고 제 2단계 사업이 계속하여 추진되고 있다. 전기분야의 1단계 사업기간 동안 변압기, 유도전동기, 전력변환장치 등의 추진시스템에 필요한 전장품의 1차 시제품이

개발되었다. 차량 제어시스템 분야에서는 동력차, 동력객차, 객차를 연결하는 축소된 Working Sample을 차량시스템 제어 사양서에 따라 구현하여 성공적으로 수행을 하였다. 추진시스템을 위한 전장품 및 TCN network module 등을 보완하고 2002년에는 현차시험을 2 단계 사업의 목표로 진행중이다. 본 고에서는 이러한 시점에서 세계적인 고속전철의 기술개발 동향을 불란서, 독일, 일본의 고속전철 개발 현황에 주안점을 두고서 상세히 살펴 보고, 그리고 “고속전철 기술개발” 사업의 연구개발 현황과 계획에 대하여 간략하게 기술하고자 한다.

2. 세계적인 기술개발 동향

고속전철 분야에 있어서 세계적인 기술개발의 최우선 목표는 속도향상이며, 이를 위하여 차체 경량화, 추진시스템의 성능개선, 고속에서의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위한 진단·제어시스템의 개발 등에 개발의 초점이 맞추어져 있다. 속도향상을 달성하기 위한 설계 및 기술개발의 방향은 그림 1과 같으며, 본 고에서는 전기분야에 국한하여 현재 세계에서 고속전철 산업이 가장 발달된 프랑스, 독일, 일본의 추진시스템과 진단·제어시스템의 최근의 기술동향에 대하여 살펴본다.

2.1 추진시스템

2.1.1 프랑스의 고속전철
 프랑스 고속전철의 추진시스템 기술개발 특징을 살펴보면, 제 1세대 직류기 (TGV-

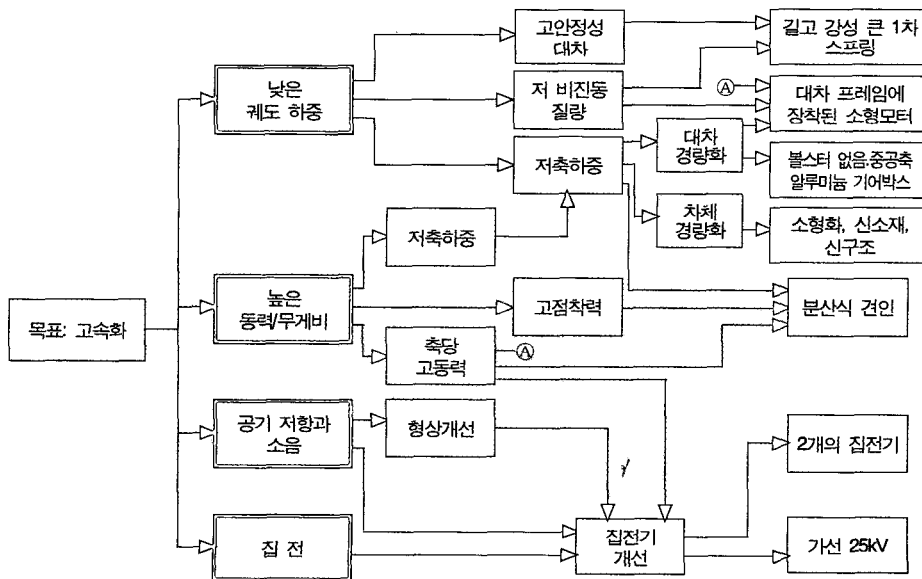


그림 1. 속도향상을 위한 설계 및 기술개발 방향



PSE, TGV-La Poste) 추진 기술에서 제 2세대 및 제 3세대 동기기 (TGV-Atlantique, TGV-Reseau) 추진기술 개발까지 영국 벨기에와 함께 개발한 TGV-Eurostar에 영국에서 개발한 유도전동기를 채택한 것을 제외하고는 견인전동기로 동기전동기를 사용하고 있다는 점과 동력집중식 차량 구성을 사용하고 있다는 점이다. 그러나 프랑스도 제 4세대 고속전철인 TGV-NG에서는 유도전동기를 견인전동기로 채택하는 흐름을 보이고 있다. 또한 아직까지는 많은 자료가 공표되지는 않았지만, 2004 ~ 2005년에 상용운전을 시작할 차세대 TGV로는 관절대차를 유지하면서 3대의 차량을 기본으로 하는 'modular concept'를 적용하는 유도전동기 구동에 의한 분산식 구동방식을 적용할 예정이다.

가장 최신에 막대한 연구비를 투자하여 시속 360 km/h의 운행속도를 목표로 개발중인 TGV-NG의 특징을 살펴보면 먼저 차체의 경량화를 위해 TGV-Duplex에 사용한 알루미늄차체를 채택하여 20 %의 차체 경량화를 도모하고, power unit 의 프레임으로도 고강도 철제를 사용하여 10 %의 무게감소를 목표로 개발중이다. 또한 고조파전류를 기존의 TGV라인에서 대폭 줄여 1A 이하의 고조파발생으로 억제하고, 전동기의 개별 제어방식을 채택하였다. 제동에서도 다양한 전기제동방식을 채택하고 견인전동기로 유도전동기를 채택하였으며, 다양한 입력전원 조건에서 구동 가능하도록 한 멀티링크 시스템의 구성도 큰 특징이다.

최근 개발된 프랑스 고속전철의 대표적 특징을 살펴보면 아래 표 1과 같다.

또한 불란서에서 차세대TGV로 준비하고 있는 열차는 분산구동방식을 사용하며, IGBT소자를 채용한 인버터에 의해 구동되는 유도전동기를 견인전동기로 사용한다. 3대의 차량으로 구성되는 기본 모듈에는 4개의 구동축과 3개의 비구동축을 가지게 된다. 각 모듈은 거의 동일한 견인력과 제동력을 발휘할 수 있다. 모듈형으로 개발하므로 열차의 편성을 기본적으로 6, 9, 12차량으로 하게되며, 비구동객차(non-motorized coach)도 손쉽게 추가하여 7, 10, 또는 14량 편성도 용이하게 할 수 있다. 이 열차는 운행속도가 320과 350 km/h의 2가지 형으로 개발될 예정이며, 320 km/h 열차에는 킬링 보기도 옵션으로 채택될 것이다. 이 열차는 스페인의 마드리드 - 바르셀로나 구간과 불란서에서는 TGV East구간에 2004 ~ 2005년에 상용운전을 시작할 예정이다.

2.1.2 독일의 고속전철

독일의 고속전철 추진시스템의 특징은 4상한 PWM 컨버터와 PWM 인버터로 구성되는 전력회로의 사용이다. 견인전동기로 3상 유도전동기를 채택하여 VSI 인버터에 의해 구동하며, VSI 인버터와 동일한 구성을 갖는 PWM Converter를 입력컨버터로 사용하여 전력회로의 유지·보수가 용이하며 컨버터의 병렬운전을 통해 입력역률을 단위역률로 제어한다.

표 1. 프랑스 고속전철의 대표적 특징

	TGV Eurostar	TGV Duplex	TGV Thalys	KTX (TGV-Korea)	TGV NG
제작기간	1993 ~ 1995	1995 - 1997	1995 ~ 1998	1997 ~ 2002	2000년 이후
최고운행속도	300 km/h	300 km/h	300 km/h	300 km/h	360 km/h
견인전동기	3상 유도전동기 (12개×1020 kW)	3상 동기전동기 (8개×1100 kW)	3상 동기전동기 (8개×1100 kW)	3상 동기전동기 (12개×1100 kW)	3상 유도전동기 (12×1500 kW:동력차 한대)
전원공급	25 kV - 50 Hz, 3 kVDC, 750 VDC, 1.5 kVDC	25 kV - 50 Hz, 1.5 kVDC	25 kV - 50 Hz, 15 kV - 16.6 Hz, 3 kVDC, 1.5 kVDC	25 kV - 60 Hz	25 kV - 50 Hz, 15 kV - 16.6 Hz, 3 kVDC, 1.5k VDC
전력회로	쇼퍼 + Mixed Bridge + VSI + IM	쇼퍼 + Mixed Bridge + CSI + SM	쇼퍼 + Mixed Bridge + CSI + SM	쇼퍼 + Mixed Bridge + CSI + SM	쇼퍼 + Mixed Bridge + CSI + IM
차량구성	쇼퍼 + Mixed Bridge + VSI + IM	2P+8T	2P+8T	2P+2M+16T	1 power unit prototype (2P+8T 또는 2P+2M+16T)
좌석 수	794석	545석	377석	935석	미정
출력비	16 kW/ton, 0.98 ton/seat, 15.90 kW/seat	23 kW/ton, 0.7 ton/seat, 16.15 kW/seat	23 kW/ton, 1.02 ton/seat, 23.34 kW/seat	19 kW/ton, 0.75 ton/seat, 14.12 kW/seat	
특징	프랑스, 영국, 벨기에의 공동개발, 유도전동기 채택(영국 개발)	알루미늄차체로 경량화 실현	프랑스, 벨기에, 네델란드, 독일 공동개발		<ul style="list-style-type: none"> • magnetic induction brake 추가 (220 km/h이상에서 사용) • 6개의 동력차(최대축중 - 16ton) • 주위온도 45℃에서도 효과적 냉각가능 • 전동기 개별제어 • Psophometric current 1A (c.f. 15A, TGV Atlantique) • 경량화 설계 (알루미늄차체 사용)

최초 개발된 ICE1과 ICE2의 차이점은 ICE2에서 차량편성을 줄여 증편편성이 가능한 구조로 융통성있게 사용 가능하다는 점과 단위 시트당 에너지 소비를 ICE1의 80%가량으로 줄인 점 외에 추진시스템의 편성에 큰 변화는 없다. 그러나 독일의 3세대 고속전철 ICE3의 개발에서는 기존의 ICE1, ICE2와 커다란 차이를 보이며 가장 최근에 개발된 ICE3을 중심으로 추진시스템의 최근 기술동향을 살펴보면 다음과 같다.

먼저 가장 큰 특징은 동력분산식의 채택이다. 기존의 ICE1, ICE2에서 채택한 동력집중식에서 변화하여 선두부와 후두부를 기준으로 첫 번째 차량과 세 번째 차량의 언더플로어에 견인전동기를 장착하고 두 번째 차량의 언더플로어에 변압기가 장착된 4P+4M의 형태로 구성하였다. 이로 인해 낮은 이용점착계수가 가능하게 되어 최대 이용점착계수를 기존 ICE1의 기동 시 0.26에서 0.13으로 줄일 수 있고 최대 축중을 ICE1과 ICE2의 19.5톤에서 14톤/15톤으로 줄일 수 있게 되었다.

견인유도전동기를 500 kW로 용량을 낮추어 최대 6000 rpm까지 운전 가능하도록 하여 기존의 2병렬운전에서 4병렬운전으로 변환한 것도 큰 특징이며, 환경친화적인 수냉식 냉각방법을 사용한 GTO 인버터에 의해 구동한다. 또한 비접촉 제동방식인 와전류 제동방식을 채택하여 고속에서의 제동효율을 높이고 이로 인해 상용제동시 디스크 제동장치의 사용을 50 km/h 이하 속도인 저속영역만으로 제한할 수 있어 유지·보수비의 절감을 가져 올 수 있게 되었다. 입력 컨버터, PWM 인버터, 와전류 제동장치용 초퍼를 동일 모듈로 설계하여 유지·보수가 간편하도록 하였다. 또 한가지 특징은 여러나라의 급전구간에서 운전 가능한 멀티링크 시스템이다. 다양한 입력전원으로 구동이 가능한 시스템으로 제작되어 독일 뿐 아니라 유럽내의 다른 구간에서도 운행 가능한 장점을 지니며, 이로 인해 차단기와 변압기의 설계 시 몇 가지 고려사항이 추가되었다.

독일 고속전철의 대표적 특징을 살펴보면 다음과 같다.

표 2. 독일 고속전철의 대표적 특징

	ICE1	ICE2	ICE3
제작기간	1990 ~ 1993	1996 ~ 1998	1997 ~ 1998
최고 운행속도	280 km/h	280 km/h	330 km/h
견인전동기	3상 유도전동기 (8개×1200 kW)	3상 유도전동기 (4개×1200 kW)	3상 유도전동기 (16개×500 kW)
전원공급	15 kV - 16.7 Hz	15 kV - 16.7 Hz	15 kV - 16.7 Hz, 25 kV - 50 Hz, 3 kVDC, 1.5 kVDC
차량구성	2P+13T	1P+6T+1DT	4P+4T
전력회로	4상한 PWM Converter + VSI + IM	4상한 PWM Converter + VSI + IM	4상한 PWM Converter + VSI + IM
좌석수	669석	370석	418석
출력비	10.91 kW/ton, 1.27 ton/seat, 13.85 kW/seat	11.48 kW/ton, 1.13 ton/seat, 12.97 kW/seat	21.92 kW/ton, 0.87 ton/seat, 19.14 kW/seat
제동방식	회생, 디스크제동	회생, 디스크제동	회생, 디스크제동, 와전류제동
특 징			동력분산식, 낮은 이용 점착계수 (최대0.13), 낮은 최대 축중(14.5톤)

2.1.3 일본의 고속전철

일본 고속전철의 가장 큰 특징은 동력분산식 차량의 선택이다. 최근 개발된 신칸선 300계와 500계, 700계로 이루어지는 고속전철 추진시스템의 발달 상황을 살펴보면 신칸선 500계의 추진시스템의 특징은 차체의 경량화 및 전장품의 경량화 설계로 신칸선 300계의 전체 중량 635톤에 비하여 5톤이 줄은 630톤의 무게로, 출력은 300계의 12000 kW에서 약 50%향상시킨 18240 kW를 달성할 수 있었으며, 주행저항을 300계에 비해 약 25%감소시킬 수 있게 되었고, 최고속도에서의 전력소모량을 300계의 약 92.8%수준으로 저감하였다. 차량의 구조도 전체 차량이 모두 견인전동기를 탑재한 전동객차로 구성되는 16M의 형태를 취하므로 회생제동을 더욱 효과적으로 사용 가능하게 되어 회생제동력을 신칸선 300계의 251% 정도로 높일 수 있었으며 이로 인해 더욱 효율적인 운용이 가능하게 되었다.

주변압기의 권선으로 알루미늄 권선을 사용하여 5400 kVA의 용량에 4020 kg의 경량화를 실현하였고, 컨버터와 인버터의 스위칭 소자로는 각각 4500 V - 4000 A, 4500 V - 3000 A급의 GTO 소자를 채택하였고 독일의 ICE와 신칸선 300계와 마찬가지로 컨버터의 병렬운전을 통해 고조파를 저감하는 방식을 채택하였다. 견인전동기 역시 frameless구조와 알루미늄 브라켓 구조를 적용하여 285 kW견인전동기의 무게를 375kg으로 경량화 하였다.

신칸선 700계의 가장 주요한 특징은 에너지 절감형 고속전철로 제조비용을 줄이고 중량 및 에너지 소비를 줄이며 효율을 향상시킨 환경친화적 고속전철이라는 점이다. 추진시스템의 관점에서 살펴보면 전력회로의 스위칭 소자로 기존의 GTO 소자가 아닌 2500 V, 1800 A급의 IGBT 소자를 채택하였다는 점이 특징이다. 이로 인해 스위칭 주파수를 기존 300계의 420 Hz대에서 1500 Hz로 올려 NPC(Neutral Clamp Control)방법에 의해 제어함으로써 power converter의 고조파를 더욱 줄일 수 있었으며, 인버터측의 주파수도 최대 1000 Hz의 스위칭 주파수로 구동하여 비동기 모드 운전영역을 시속 120 km/h 영역까지 연장하였으며, 이로 인한



표 3. 일본 고속전철의 대표적 특징

	신칸선 300계	신칸선 500계	신칸선 700계
제작기간	1989 ~ 1998	1995 ~ 1998	1997 ~
최고 운행속도	270 km/h	300 km/h	300 km/h
견인전동기	3상 유도전동기 (40개×300 kW)	3상 유도전동기 (64개×285 kW)	3상 유도전동기 (48개×275 kW)
전원공급	25 kV - 60 Hz	25 kV - 60 Hz	25 kV - 60 Hz
차량구성	10M+6T	16M	12M+4T(6M+2T)
전력회로	PWM Converter + VVVF Inverter(GTO)	PWM Converter + VVVF Inverter(GTO)	PWM Converter + VVVF Inverter(IGBT)
좌석수	1323석	1324석	1323석
출력비	19 kW/ton, 0.48 ton/seat, 9.07 kW/seat	28.5 kW/ton, 0.48 ton/seat, 13.79 kW/seat	20.49 kW/ton, 0.49 ton/seat, 9.98 kW/seat
제동방식	회생, 디스크제동, 와전류제동	회생, 디스크제동	회생, 디스크제동, 비접촉 와전류제동
특 징		차체 및 전장품 경량화 설계, 에너지 저감 (효과적인 회생제동이용)	제조비용 절감 (cost effective)

노이즈 감소 및 토크리플 저감의 장점을 지니게 되었다. 고주파 스위칭으로 인한 소음도 줄었고 변압기에서 발생하는 고조파 전류성분에 의한 열로 인한 손실을 줄일 수 있게 되었다.

줄어든 열손실과 알루미늄 합금 권선과 polyimide, 저밀도 glass-epoxy 등의 경량의 절연재료를 사용하여 변압기의 경량화 설계가 가능하여 신칸선 700계는 3000 KVA용량의 300계 변압기에 비해 4000 KVA로 그 용량이 증가하였으나 변압기의 중량은 동일한 3 ton 수준으로 제작이 가능하며 100계 추진시스템 대비 중량 40 %, 에너지 소비 20 %를 감소시키고 전력/중량비 200 %의 향상 효과를 가져 왔다.

2.2 열차 진단·제어시스템

철도시스템의 제어시스템은 지상 신호시스템과 열차에 탑재되는 차상 제어시스템으로 구분할 수 있다. 신호시스템은 ATS(Automatic Train Stop), ATC(Automatic Train Control), ATO(Automatic Train Operation) 등으로 구분되며, 노선의 특성에 따른 block별 제한속도 정보를 차상장치로 전송하여 열차의 과속에 의한 사고를 방지하고, 노선 전체의 효율적인 운행관리를 위해서 적용된다. 신호시스템은 국가별, 노선별, 구간별로 다르게 설계되어 있어 특정 구간을 운행하기 위해서는 열차에 해당 신호시스템의 차상장치가 탑재되어 있어야 한다. 유럽에서 열차가 국경을 통과할 때 국경역에서 선두차를 교체하기도 하는데 이러한 작업은 신호시스템이 다르기 때문에 필요한 것이다. 어떤 열차는 선두차의 교체 없이 국경을 통과하기도 하는데, 이러한 열차에는 두 구간의 신호시스템에 대응하는 차상장치를 모두 갖추고 있는 경우이다.

차상 제어시스템의 기능은 크게 열차장치의 제어와 진단으로 구분할 수 있다. 제어 기능은 초기 기관차에도 적용되었던 개념이지만 진단 개념은 열차의 고속화가 이루어지고 안전성에 대한 필요성이 커지면서 장치 고장의 감시와 사고에 대처한다는 개념으로 도입되었다. 초기 고속전철의 차상 제어시스템의 제어는 릴레이와 밸브 등으로 조합된 하드와이어 로직(hardwired logic)에 의해 수행되었으며, 진단 기능은 네트워크 인터페이스를 갖춘 마이크로프로세서 시스

템에 의해 수행되었다.

디지털 기술의 비약적인 발전에 따라 네트워크 통신과 마이크로프로세서 시스템의 신뢰도가 하드와이어 시스템 수준으로 높아지면서 차상 제어시스템도 마이크로프로세서 시스템으로 변화해 왔으며, 기능과 성능측면에서도 우수성을 인정받아 현재는 대부분의 열차 제어 및 진단 기능을 마이크로프로세서 시스템이 수행하도록 설계하고 있다. 차상 제어시스템이 차상 컴퓨터시스템으로 통합된 것이다.

2.2.1 고속전철의 차상 컴퓨터시스템

세계적으로 고속전철은 일본의 신칸선, 독일의 ICE, 프랑스의 TGV를 중심으로 개발되고 있다. 스페인의 AVE, 네델란드를 중심으로하는 Thalys, 도버해협을 Eurostar는 경부선의 KTX(Korea Train eXpress)와 같은 TGV의 변형모델이며, 독자적으로 개발한 이태리의 ETR, 러시아의 고속전철 등의 차상 컴퓨터시스템은 Siemens의 시스템을 근간으로 설계되었다. 하드와이어를 중심으로 구성되는 차상 제어시스템과는 달리 차상 컴퓨터시스템은 그 기능과 성능이 소프트웨어에 의해 결정된다. 각 국의 고속전철 제작사에서는 이러한 소프트웨어기술을 철저한 자체 노하우로서 보유하고 있다. 열차의 전반적인 시스템과 차상 컴퓨터의 네트워크 인터페이스 분야는 유럽을 중심으로 표준화가 이루어져 있지만, 차상 컴퓨터시스템에 대한 표준화는 각 사가 노하우 유출을 꺼리기 때문에 이루어지지 못하고 있다. 경부고속전철의 도입 조건인 기술이전 분야에서도 차상 컴퓨터기술은 제외되어 있으며, 국내에서 제작하는 차량에도 차상 컴퓨터시스템은 Alstom에서 직접 공급하도록 되어 있다.

프랑스의 GEC-Alstom사의 차상 컴퓨터시스템은 하드웨어적으로는 표준화를 넓게 적용하고 있다. VME 시스템을 기본으로 채택하고 있으며, OS도 Vertex를 적용하고 있다. 그러나 네트워크 인터페이스는 IEC 및 UIC의 표준으로 채택된 TCN을 적용하지 않고 있다. 독일의 Siemens사는 자체적으로 개발한 하드웨어와 OS를 이용하고 있으나 네트워크 인터페이스 분야에서는 자사가 이용하고 있는 TCN의 표준화를 위해 적극적인 활동을 하여 IEC와 UIC의 표준으로 채택되도록 하였다. 독일 Siemens의 차상 컴퓨터시스템은

고속전철을 위한 전용 차상 컴퓨터시스템이 아닌 일반적인 전기열차의 차상 컴퓨터시스템에 비중을 두고 있다. 반면 프랑스의 경우는 고속전철 전용의 차상 컴퓨터시스템의 개념으로 개발을 하고 있다.

TGV-K의 차상 제어시스템은 소수의 차상 컴퓨터시스템으로 이루어진 기능 집중형 설계를 바탕으로 하는데, VME 시스템을 기본으로 RTOS(Real-Time Operating System)을 채택하고 있다. TGV의 차상 컴퓨터시스템 구성을 살펴보면, 선두차에 MPU(Main Processing Unit), APU(Auxiliary Processing Unit)이 탑재되어 차차 및 열차편성 전체의 제어 및 진단을 총괄한다. 객차에 설치되는 TPU(Trailer Processing Unit)은 선두차의 MPU의 명령에 의해 객차 장치의 제어를 수행하며, 모니터링을 통해 입수한 정보를 MPU로 네트워크를 통해 전송한다. 모터 블럭의 제어 및 진단을 담당하는 MBU는 선두차의 명령에 의해 추진 및 제동 제어를 수행하며, 모터 블럭의 상태정보를 네트워크를 통해 MPU로 전송한다. MPU, APU, TPU, MBU를 제외한 ATC를 비롯한 다른 제어기들은 이들 제어기에 serial link를 통해 인터페이스되어 있다.

ICE의 차상 컴퓨터시스템은 일반 열차에도 적용할 수 있도록 시스템을 설계하여 local 장치별로 독립적인 다수의 unit을 이용하여 기능을 분산시키고 있다. 열차의 중앙제어를 담당하는 unit과 차량별 제어 unit, 추진과 제동을 제어하는 unit들이 있는 것은 TGV의 설계와 비슷하지만 anti-slide제어기를 별도로 두고 있으며 에어컨, 출입문 등 보조적인 제어기들과 ATC도 모두 동일한 네트워크를 통해 인터페이스되어 정보와 데이터의 공유가 용이하도록 하였다.

2.2.2 열차 통신 네트워크

열차의 속도가 고속화됨에 따라 차량에 설치되는 각종 제어 설비들의 신뢰성 및 안정성이 절대적으로 요구되는 상황에서 이러한 제어 설비 및 전체 열차 시스템의 감시 및 제어 기능을 수행하기 위해서 네트워크를 이용한 데이터의 통신이 필수적으로 요구된다. 프랑스의 TGV에 사용된 Tornado 네트워크, 북미의 LON 또는 Arcnet을 적용한 열차 통신 네트워크는 이러한 열차 내의 진단 및 제어를 위한 통신 네트워크의 예라고 할 수 있다. 다양한 열차 장비의 표준화 및 각 국 차량간의 호환성 있는 운전을 위해 IEC(International Electrical Commission)와 UIC(International Railways Union)는 차량 내부의 장치들을 서로 연결하기 위한 실시간 통신 방식의 열차 통신 네트워크(TCN: Train Communication Network)의 표준안을 제시하였다. TCN은 유럽에서 현재까지 600여개의 차량에 탑재되어 운용되고 있으며 독일의 고속 열차인 ICE3에도 적용되었다.

2.2.3 TCN의 구조와 특징

TCN은 한 차량내의 제어장비들을 연결하기 위한 차량내부 버스인 MVB(Multifunction Vehicle Bus)와 차량과 차량을 연결시켜주는 버스인 WTB(Wire Train Bus)의 2 단계 버스로 구성되어 있으며 구조는 그림 2와 같다.

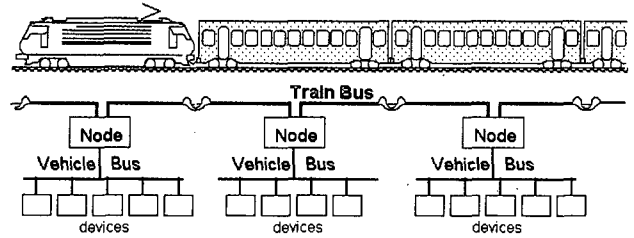


그림 2. TCN의 구조

2.2.3.1 WTB

편성을 자주 변경해야 하는 국제 열차를 위해서 WTB가 설계되었는데, 리피터 없이 860 m까지 신호를 전송할 수 있고 최대 노드는 32개이다. 각 열차는 트렁크 케이블로 연결이 되며, 편성이 변경되는 경우 WTB는 Inauguration 모드상태로 되어 네트워크를 재구성한다. Inauguration의 결과로 각 노드는 자신의 네트워크 주소, 마스터를 기준으로 한 좌우 구별, 다른 차량의 주소 및 위치, 다른 차량의 형태 및 버전정보 등의 열차 구성 정보를 획득한다.

2.2.3.2 MVB

MVB는 차량 내부의 장치들 간의 데이터 전송을 위한 네트워크로 RS485(ESD), 트랜스포머로 분리된 Twisted Wire Pair(ESD), 광 파이버(OGF)의 3종류의 매체에서 1.5 Mbps의 속도로 데이터를 전송한다.

표 4. WTB와 MVB의 특징

특징	WTB	MVB
버스구조	가변구조, 편성 변경 시 자동 구조형성	고정구조
전송매체	2중, 실드된 Twisted Wire Pair (860 m, 32 노드)	ESD(20 m, 32장치) EMD(200 m, 32장치) OGF(2 km, 2장치)
신호속도	1.0 Mbit/sec	1.5 Mbit/sec
기본주기	25 msec	1 msec(또는 배수)
유용 프레임크기	4-132 OCTETs	16, 32, 64, 128 bits
데이터 점검	FCS-16, 프레임 크기, 맨체스터 인코딩	IEC60870 Check Sequence, 프레임 크기
마스터권 이전	각 노드가 마스터가 될 수 있음	버스 관리자(다수)

2.2.3.3 통신 프로토콜

WTB와 MVB는 물리층과 링크층이 다르지만 동일한 통신 프로토콜을 사용한다. 전송되는 데이터에는 3가지 종류가 있는데, 첫째가 주기적인 데이터의 전송을 목적으로 하는 프로세스 데이터이고, 두 번째가 각 장치가 필요할 때마다 전송하는 메시지 데이터, 그리고 마지막이 네트워크의 관리를 위한 관리 데이터이다. 그림 3에서 주기 및 비 주기 데이터 전송 방식을 볼 수 있다. 기본 주기(Basic Period)는 네트워크 마스터에 의해 60%의 주기 데이터 전송구간과 40%의 비 주기 데이터 전송구간으로 나누어진다.

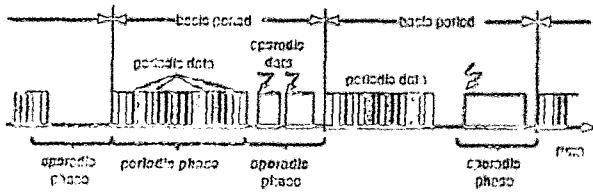


그림 3. 주기 및 비주기 데이터의 전송

그림 4에서 프로세스 데이터의 전송방식인 Source Addressed Broadcast의 개념을 볼 수 있다. 프로세스 데이터의 전송 시작은 버스 마스터(또는 버스 관리자)가 시작하여 미리 계획된 변수의 목록에 의해 어떤 변수의 전송을 요구하면 그 변수를 전송하기로 되어있는 장치(Publisher)는 버스에 방송(Broadcast)한다. 한편 그 변수를 수신하기로 되어있는 장치들(Subscribers)은 방송된 변수의 값을 읽어 자신의 메모리(Traffic Store)에 저장한다.

프로세스 데이터는 주기적 방송 방식으로 전송되며 메시지 데이터는 필요할 때마다 Call/Reply의 Client/Server 개념을 이용하여 전송된다. 메시지 패킷은 각각 Source와 Destination에 대한 정보를 가지고 있어서 열차 버스의 어느 곳이나 원활하게 전송될 수 있다. 열차 버스의 노드 역할을 하는 게이트웨이는 어느 장치가 어떤 기능(Function)을 수행하는 지에 대한 정보인 Function Directory를 통해서 메시지 패킷을 최종 목적지까지 전달하는 역할을 한다.

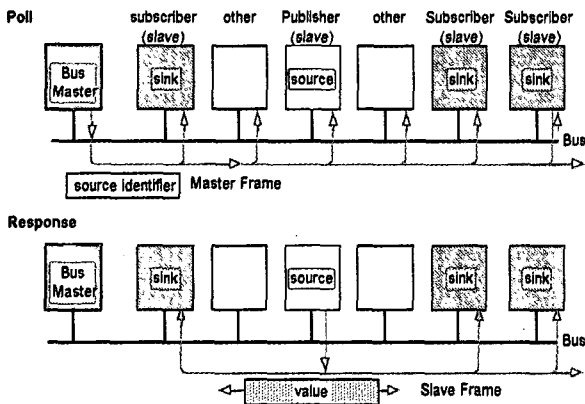


그림 4. Source Addressed Broadcast의 개념

2.2.4 열차 통신 네트워크 표준화 동향

IEC TC9은 국제 철도 연합(UIC)과 협동하여 열차 차량 내부 및 차량간에 설치되는 장비들의 연결 호환성을 목적으로 1988년 WG22를 구성하였다. 1992년에 열차 통신 네트워크의 첫 번째 드래프트 표준이 배포되었으며, 철도 차량 장비의 제작업체들인 Adtranz와 Siemens 그리고 Firema-Encole Marelli 등이 공동으로 열차 통신 네트워크의 유용성 및 가능성을 검토할 수 있도록 개발자 연합(JDP: Joint Development Project)를 결성하여 TCN의 하드웨어 및 소

프트웨어의 시제품을 개발하였고 기술을 공유하고 있다. ERRI가 주축이 되고 각 국의 개발자들이 참여하여 1994년부터 약 1년간 Interlaken(스위스)-Amsterdam(네덜란드) 구간의 실차 적용 경험으로 여러 개발자간의 호환성 문제 등 실용화에 있어서의 많은 문제점을 해결하였다. 그때까지 미국에서는 화물차를 중심으로 한 열차 통신 네트워크로서 LON을 사용하다가 IEC 중심의 TCN의 표준화 작업에 참가하여 LON 및 MVB/WTB를 기반으로 하는 드래프트 표준안인 IEEE1473을 제시하여 1999년 9월 IEC표준(IEC 61375)으로 확정되었다.

2.3 추진시스템과 진단·제어시스템의 현황 및 전망

상기에서 살펴본 바와 같이 최근의 고속전철 기술개발동향을 추진시스템 및 진단·제어시스템의 관점에서 보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

2.3.1 추진시스템 기술동향

고속전철의 추진시스템은 동력 집중식에서 동력 분산식으로 전환을 하는 추세가 대세이다. 이는 지금까지 유일하게 고속전철에서 동력 집중식 방식을 고집해온 불란서도 차세대 TGV로는 분산식으로 방향전환을 한 사실로 알 수가 있다. 그 이유는 너무나 명백한데, 먼저 동력 집중식 차량에서 동력 분산식 차량으로의 전환으로 인해 구동축이 증가하므로 날짜와 관계없이 높은 가속력과 감속력을 얻을 수 있고, 수송능력이 증대되며, 낮은 축중 및 낮은 점착계수 이용으로 회생제동을 효과적으로 이용하고, 트랙의 유지보수가 쉬운 장점을 지니게 된다. 또한 동력이 전차량에 분산되므로 전장품의 고장시의 운행신뢰성을 향상시킬 수 있으며 회생 및 비접촉 전기제동을 최대한으로 이용하고, 각 전장품의 효율을 높여 전력소비가 적은 에너지절약형 고속전철 추진시스템의 개발이다.

전장품의 측면에서 살펴보면 가장 두드러진 특징은 전장품의 경량화 설계를 들 수 있다. 이로 인해 차체의 경량화와 함께 더욱 효율적인 고속전철시스템이 가능하며, 이를 위해 주변압기의 코일을 알루미늄으로 사용하거나 무프레임 견인전동기의 채택, 냉각방식의 고효율화를 통한 전력변환장치의 경량화 등을 들 수 있다.

스위칭 소자와 전력전자기술의 발달은 고주파 스위칭이 가능한 IGBT소자의 채택으로 고조파 저감과 토크리플 저감, 경량화에 더욱 박차를 가하고 있으며, 벡터제어 인버터에 의한 3상 유도전동기를 견인전동기로 사용하는 추세이다.

2.3.2 차상 제어시스템의 적용현황 및 전망

현재 사용되고 있는 고속전철의 차상 제어시스템은 독일의 기능 분산식과 프랑스의 기능 집중식으로 나눌 수 있고, 네트워크 분산식과 집중식에 적합한 시스템이 병용되고 있는 상황이다. 차상 제어시스템의 분산식, 집중식 흐름은 단일 모델의 시장규모에 의해 결정될 것으로 판단된다. 프랑스의 경우 TGV를 비롯해 KTX, AVE, Thalys, Eurostar

등에 꾸준한 수요가 있기 때문에 기존의 집중식을 고수할 것이며, TCN을 적용할 가능성은 거의 없을 것이다. 반면, 독일의 경우 고속전철 분야에서 ICE가 TGV에 비해 시장 점유율이 낮으며, 당초 고속전철 전용의 차상 제어시스템이 아닌 범용시스템으로 설계를 하였기 때문에 전체적인 차상 제어시스템 시장을 분산화, TCN화 시키고 있다.

열차용 네트워크로서 TCN이 IEC 표준으로 정의되었고, 독일을 중심으로 이루어진 그룹의 노력으로 TCN의 열차네트워킹인 WTB가 UIC의 열차네트워킹으로 제정되었지만 이는 일반 열차를 대상으로 한 것이다. UIC는 차량간 연계 운전 에 관점을 두고있기 때문에 특정 차량네트워킹을 표준으로 정의하지는 않을 것이며, 향후에도 다양한 네트워크가 적용될 것이다. 또한, 고속전철의 경우 이중 차량간 연계운전을 시도하지 않고 있어 열차네트워킹도 반드시 UIC 표준을 따를 필요는 없는 것이다.

그러나 많은 분야에서 표준화 및 개방화 된 기술을 적용하여 부품의 호환성을 통해 경제성을 확보한 것처럼 이미 유럽을 중심으로 TCN 인터페이스를 생산하는 다수의 기업이 경쟁을 통해 저렴한 제품을 공급하고 있다. 그러므로 향후 세계적으로 고속전철을 비롯한 전기철도에 TCN이 보다 광범위하게 적용될 전망이다. 그러한 이유에서 G7사업에서도 차상 제어시스템은 TCN을 근간으로 하는 분산식으로 설계한 것이며, 최근에 고속전철을 개발한 이태리와 러시아의 경우도 차상제어시스템은 개방된 기술인 TCN을 적용한 분산식의 설계를 도입한 것을 보아도 이것이 충분히 예견되는 것이다.

3. 한국의 고속전철 기술개발 현황

한국형 고속전철을 개발하기 위한 최종 목표는 최고 운행 속도가 350 km/h인 초고속전철 시스템 개발 및 관련 핵심 기술확보에 있다. 고속 철도 차량은 토목, 신호 등의 지상 설비와 연계하여 복합 기술이 종합적으로 개발되어야 한다. 따라서 연구 과제는 기술분야별로 시스템 엔지니어링 기술개발, 차량시스템 개발, 차량부품 개발, 전기 신호시스템 개발 그리고 선로 구축물 기술개발의 다섯 분야로 분류되었다. 추진시스템은 현대중공업, 한국철도차량, 광명기전 등의 산업체와 한국전기연구소, KIST, 한국기계연구원, 서울대학교, 한양대학교, 한국기술교육대, 단국대학교, 고려대학교, 성균관대학교, 중앙대학교 등의 국책 연구소와 학계가 공동으로 참여하여 왔다. 열차 제어시스템은 현대중공업, 한국철도차량 등의 산업체와 한국전기연구소, KIST, 생산기술연구원, 인하대학교, 한양대학교, KAIST 등이 참여하여 왔으며, 제동시스템은 유진기공과 한국전기연구소, 서울대학교, 홍익대학교, 창원대학교 등이 공동으로 참여하여 왔다.

한국형 고속전철 시스템의 주요 사양은 다음과 같다.

- 시제차 편성: 동력차 2대 + 동력 객차 2대 + 객차 3대
- 최고 운행 속도: 350 km/h

- 동력 집중식
- 개량 관절형 대차
- 전두부: 독자 형상
- 차체: 알루미늄 및 복합 재료
- 견인전동기: 유도전동기
- 제동시스템: 마찰제동, 회생제동 및 와전류제동
- 열차 최소 시격: 3분

지난해 10월까지 진행된 1단계 연구사업의 결과를 추진 시스템의 관점에서 살펴보면 견인전동기로 1100 kW급의 3상 유도전동기를 국산화 기술로 개발하였으며, 최신개발소자인 IGCT를 채택한 PWM 컨버터와 PWM 인버터로 구성되는 전력변환장치의 국산화 개발에 성공하였다. 제어기술의 향상으로 필터 리액터 등의 사용을 최대한 줄인 전력변환장치의 경량화 설계 등으로 변압기의 경량화 설계가 완료되었으며, 670V DC 버스라인으로 단일화 설계한 보조전원 계통의 국산화 개발 등 핵심 기술의 국산화 개발을 이룩하였다. 또한 제동장치에 비접촉 제동방식인 와전류 제동장치를 채택하기 위한 기본설계가 완료되었고, 능동필터의 사용 및 컨버터의 병렬운전 등을 통한 고조파 저감 및 전력품질 개선 등을 위한 전장품 개발을 하였다.

이어지는 2단계 기술 개발 사업에서는 1단계 연구를 통해 설계·제작된 단품들의 성능시험 및 시제차 운행을 통한 신뢰성 확보를 위해 먼저 국산화 개발된 주전력변환장치와 주변압기, 견인전동기 및 보조전원장치로 구성되는 통합시험장치를 구성하여 추진시스템의 통합성능시험을 수행하고 이어 제어시스템을 연계한 추진·제어시스템의 성능시험을 추진할 예정이다.

한편 진단·제어시스템 분야는 고속전철 및 전동차의 진단 및 제어 기술의 습득이 어려운 상황에서 사업이 시작되었으므로 국내의 고속전철 및 전동차의 차상 제어시스템과 네트워크 시스템의 사양조사 및 분석을 1단계에서 수행하였다. 이를 통하여 G7 차량의 차상 제어시스템 설계 개념을 수립하였으며, 기본적인 제어 사양서를 작성하면서 정보 및 데이터의 인터페이스를 정의하였다. 기능별로 시스템 unit의 제어시스템 사양을 작성하였으며, 이를 통해 각 unit이 수행할 진단 및 제어기능의 사양을 정의하고, unit별 하드웨어 시스템의 사양을 확정하여 시제품을 제작하였다. TCN의 기술 습득과 분석을 위해 국제 표준을 검토하고 해외 제품을 도입하여 시뮬레이터 시스템을 구축하여 시험을 수행하였다.

2단계에서는 차상 제어시스템의 시제품의 개발 및 시험을 통해 시제차에 사용될 탑재품을 개발하는 것을 목표로 한다. 차상 제어시스템의 기능 및 성능을 좌우하는 소프트웨어의 알고리즘을 위하여 데이터 처리 사양을 작성하며, 기능의 신뢰성 확보를 위해 Casetool을 이용한 알고리즘의 검증 실시한다. 개발된 각 unit들은 차량단위 네트워크를 구축하여 지상 네트워크 통신 시험을 실시하게되며, 추진시스템과의 연계 시험도 계획되어있다. 모든 전장품이 시제차에 탑재되면 차상시험이 수행되는데, 차상 제어시스템의 모든 인터페이스를 구현하여 실차 운전 소프트웨어를 시험하게

된다. 이러한 단계를 거쳐 시제차량에 국산화 개발된 전장 품 및 진단·제어시스템을 탑재하여 시험운행을 통해 시속 350km/h로 안전하고 경제적으로 서울-부산간을 왕복할 세계 최고성능의 고속전철이 개발될 것이다.

4. 결 론

한국형 고속전철은 경제성과 신뢰성을 동시에 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 차량 가격과 토목 건설비만을 고려하는 것이 아니라 20년 이상의 운영을 통한 유지비와 보수비를 고려한 Life Cycle Cost의 개념이 도입되어야 한다. 고속전철 보유국인 독일, 불란서, 일본 그리고 이태리도 독자적으로 모든 부품을 조달하지 않고 있으며, 국제 공동 개발에 의한 표준화된 시스템과 부품을 도입하고 있다. 따라서 세계적인 시스템과 부품의 표준화 방향을 고려하여 해외 협력에 의한 시스템과 부품의 out-sourcing 전략이 도입되어야 한다. 350 km/h를 최대 운행속도로 운행하고 있는 초고속전철은 일본의 JR-500으로 동력 분산식을 채택하고 있다. 독일의 ICE3도 330 km/h의 최대 운행속도를 목표로 개발된 동력 분산식 고속전철이다. 또한 불란서도 최대 운행속도 320과 350 km/h를 목표로 동력 분산식에 의한 고속전철의 개발을 계획하고 있다. 제어·진단시스템의 열차 통신 네트워크로는 이미 불란서를 제외한 유럽국가들과 미국에서 표준화된 TCN을 사용하고 있다. 유도전동기 구동의 동력 집중식과 제어·진단시스템에 TCN을 채택하여 350 km/h의 최대 운행속도로 주행할 수 있는 한국형 고속전철은 이와 같은 선진국의 기술개발 현황을 면밀히 분석하여 기술의 첨단성, 경제성 그리고 신뢰성을 확보하는 기술 방식을 채택하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- [1] 고속전철 전기시스템 엔지니어링 기술개발, 한국전기연구소, 1999년 10월
- [2] 김용주, 임근희, 김국현, 황돈하, 전정우, "고속전철 전기시스템의 엔지니어링 기술개발", 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 산·학·연 협동 특별 Session 논문집, pp.93~96, 1999. 7. 19.-21.
- [3] 김용주, "고속전철 기술개발 현황", 1998년도 하계학술대회 논문집, pp.51-56, 1998. 7. 20.-22.
- [4] Railtech Vision 21, 철도청, 1999년 9월
- [5] 고속전철 기술개발 사업, 한국철도기술연구원, 1998년 2월
- [6] Series 700 New Generation Train, Central Japan Railway Company
- [7] 30 Years of High Speed Railways, Japan Railways & Transport Review, Number 3, October 1994
- [8] High Speed Technologies, RTRI Report, Vol. 38, No. 4, 1997
- [9] The Overview of Trends of High Speed Trains, PAI, 1997
- [10] Very High Speed Rail Project, DE-Consult, 1997

제 자 소개



김용주(金容柱)

1953년 11월 12일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 R.P.I. 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년-1993년 한국전기연구소 전력기기연구실장. 1993년-1999년 한국전기연구소 발전기진단연구팀장. 1996년-1999년 한국전기연구소 고속전철사업그룹장 겸임. 1999년-현재 한국전기연구소 산업전기연구단장 겸 고속전철 T.F.T. 팀장



김중수(金鍾洙)

1959년 12월 26일생. 1982년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 경남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 책임연구원.



류흥제(柳泓齊)

1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 선임연구원.



조창희(趙昌熙)

1967년 2월 4일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 선임연구원.



이주훈(李柱勳)

1967년 3월 4일생. 1990년 2월 아주대 제어공학과 졸업. 1992년 8월 동대학원 제어공학과 졸업(석사). 1999년 1월 한국전기연구소 입소. 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 선임연구원.



박도영(朴都永)

1962년 3월 19일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Queen's Univ. 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 산업전기연구단 선임연구원.