

고속전철의 제어시스템

김 양 모* · 김 영 진**

(*충남대 공대 전기공학과 부교수,

**철도청 제천기관차 사무소 기술과장)

1. 서 론

1830년 영국 리버풀~맨체스터구간에서 최고속도 47km/h로 영업운전에 들어간지 160년, 철도의 역사로 볼때 SL(Steam Locomotive)로 부터 DL(Diesel Locomotive), EL(Electric Locomotive), EC(Electric rail Car)를 거쳐 케도, 신호체계및 制動器등의 급속한 발전과 Power Electronics의 발달에 힘입은 전력제어의 효율화를 통해 끈임없이 고속화가 추진되어 왔다.

1964년 일본 신간선의 운영으로 유럽철도계는 커다란 자극을 받아 프랑스, 서독등을 중심으로 속도향상에 주력하여 왔고 급기야 프랑스 TGV(Train à Grande Vitesse)가 최고속도 285km/h로 영업운전에 들어감으로써 고속화로의 경쟁은 더욱 날카롭게 되었다. 현재 차륜과 레일과의 마찰에 의한 재래식 승객용 철도방식에 있어 최고속도기록은 서독 ICE(Intercity Express)의 406.9km/h로 1991년 영업운전을 목표로 하고 있다.

그런데 철도의 고속화에서 불가결의 조건은 가벼운 차체에 高出力の 原動機를 사용하는 것이라 할 수 있는데 경량화의 문제는 臺車및 차체의 구조, 외장에 대한 연구가 진행되고 있고 原動機로서는 젯트엔진및 가스터빈이 출력대 중량비가 가장 큰 것으로 한때는 가스터빈을 사용한 고속화가 추진되었으나 기술적으로 동력전달기구, 소음, 에너지효율등에서 문제가 노출되고 더구나 오일쇼크에 의해 개발이 중

지되었다. 따라서 동력으로 電氣와 디젤만이 개발되어 왔는데 이들을 비교하여 보면 차량의 중량당 출력은 전기쪽이 월등 우수하나 電氣發展을 디젤과 같이 석유에 의존한다고 하면 석유소비량과 성능면에서는 양자 대등하다고 볼 수 있다. 이 디젤, 전기양 방식의 단점으로는 디젤기관의 소음, 배기가스를 들 수 있고 전기방식은 集電音, 전력공급시설에 의한 미관상의 문제, 전파및 유도장해등을 들 수 있다. 그러나 전기의 쪽은 1차에너지를 다양하게 택할 수 있을 뿐 아니라 효율향상의 여지가 내연기관보다 크고 또한 전력회생 등 개선의 가능성이 크다고 볼 수 있다.

본 해설에서는 고속철도중 전기철도에 초점을 맞춰 고속전철의 일반적 제어방식에 대해 논하고 또한 세계의 고속전철중 대표적 예인 프랑스의 TGV, 일본의 新幹線, 서독의 ICE의 주회로에 대해 소개하기로 하고 특히 실제로 영업운행중인 TGV와 新幹線의 가감속특성과 集電方式에 대하여 비교하여 보기로 한다.

2. 제어방식으로 본 전기철도의 구성

전기철도의 급전방식에 따라 직류및 교류로 나눌 수 있고 차량의 견인 방식에 따라 전기 기관차와 전차로 구분된다. 다양한 종류의 차량이 있지만 일반적으로 차량구동을 위한 전기·기계의 에너지 변환을 일으키는 원동기로서 直流直卷電動機가 많이 사용되

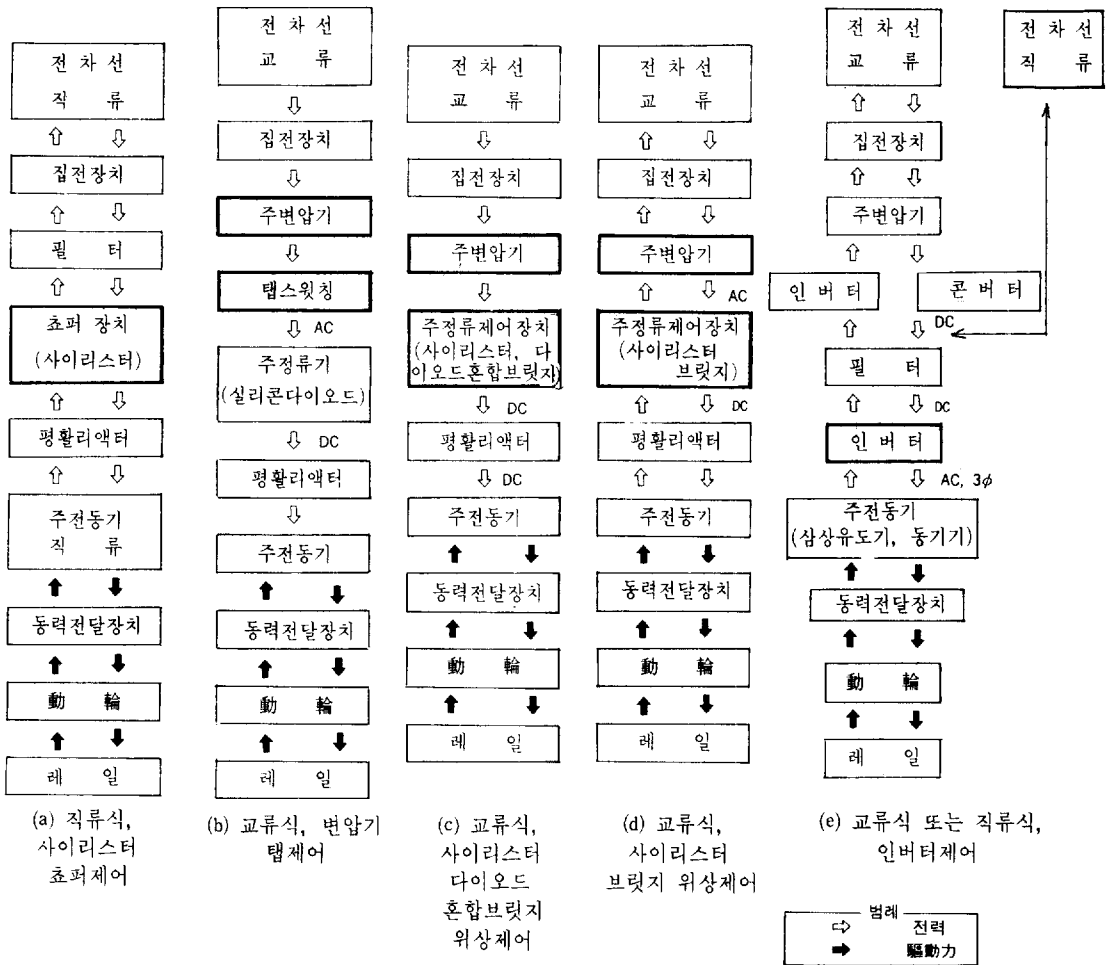


그림 1. 전기철도의 대표적 제어회로

어 왔다. 그러나 최근 Power Electronics 기술의 발달에 힘입어 직류·교류, 단상·다상 및 주파수를 포함한 이들간의 상호변환기술이 획기적인 발전을 이루어 철도관계자의 오랜 꿈이었던 고효율, 저보수의 유도전동기와 동기전동기를 사용한 구동방식도 많이 실용화되고 있다.

전기철도에서는 직류·교류를 포함하여 차량의 주전동기에 가해지는 전원을 어떻게 제어하는가에 따라 主回路方式이 정해진다고 볼 수 있다. 그림1은 현재 많이 채용되고 있는 主回路方式을 분류하여 電力과 驅動力의 흐름으로써 나타낸 것이다. 그림1(a)는 直流式 사이리스터 초퍼제어로 직류전압이 초퍼에 의해 제어되고 재래의 抵抗制御에 있어서의 열손실을 없이 하였고 제동시 주전동기에서 발생하는 전

력을 초퍼에 의해 전압제어하여 전원에 회생시키는 특징을 갖고 있다. 또한 전류의 맥동을 억제하기 위하여 평활리액터가 사용된다. 그림1의 (b)는 주변압기 권선 탭을 변화시켜 교류전압을 제어하는 교류식 변압기 탭제어방식이다. 제어된 교류는 주정류기에 의해 직류로 변환되어 주전동기에 인가된다. (c)는 사이리스터 다이오드혼합브릿지로 구성된 주정류제어장치에 의해 정류와 동기에 위상제어되어 적절히 제어된 직류전압이 주전동기에 가해지는 교류식 위상제어방식이다. (d)는 사이리스터브릿지를 사용한 교류식 위상제어방식으로 구동시 교류를 직류로 변환제어함과 동시에 제동시 직류를 교류로 변환하여 전원으로 회생하는 것이 가능하다. 그림1(e)는 직류 또는 교류로부터 전력변환장치에 의해 3상교류의

주파수, 전압을 제어하여 유도전동기 또는 동기전동기에 가함으로써 구동 및 회생 제어하는 방식으로 이미 실용화되어 널리 각광받고 있다.

3. 대표적 고속전철의 주회로

3.1 프랑스의 TGV

TGV 차량은 전후에 전동기관차를 붙인 형태의 고정편성으로 양단의 3臺車씩 Bogie 臺車이고 각축에 부착된 525kw 전동기에 의해 구동되어 합계 출력 6300kw이다. 전후의 동력차는 기본적으로 동일하며 출력 3150kw의 6動軸의 기관차와 같은 것이고 신설구간인 25kv 50Hz 구간에서는 교류용 Z형 2단식 팬터그래프(Pantagraph)를 사용하여 사이리스터 위상 제어에 의한 제어정류기식으로 제어하며 재래선의 직류구간에서는 직류용 팬터그래프를 올려 제어정류기용 사이리스터를 사용하여 직류차폐제어한다. 전후의 각 유닛트에 교류·직류용 각각 1개의

팬터그래프가 있지만 객차의 지붕위로 연결케이블을 관통시켜 전후의 유닛트를 연결하여 신설구간에서의 고속주행시는 앞의 팬터그래프를 접어 전차선사고방지 및 주행저항의 경감을 꾀했다. 또한 직류구간에서는 저속으로 집전전류도 크기 때문에 전후 각 유닛트의 팬터그래프를 올려 주행하도록 하고 있다. TGV는 재래선 구간도 주행하는 관계로 제동기성능이나 신호방식등에서 제약을 받아 保安을 확보하기 위하여 동력축에 다이내믹 제동기와 縱軸에는 디스크 제동기를 부착하였고 또한 粘着性能改善을 꾀하여 全軸에 디스크 제동기가 부착되어 있다.

TGV의 주회로를 그림2에 나타내었다. 그림에서 주변압기의 2차측을 3분할하여 각 분할권선뒤에 서로 독립된 혼합브릿지를 접속시키고 있고 그출력을 각 전동대차의 주전동기에 공급하고 있다.

상기의 TGV는 파리 南東線(TGV-PSE)으로 이 구간의 대성공에 의해 大西洋線(TGV-A)의 영업운행을 1990년에 계획하고 있다. 이 大西洋線은 최고속도 300km/h를 목표로 전후 800kw 동기전동기 4

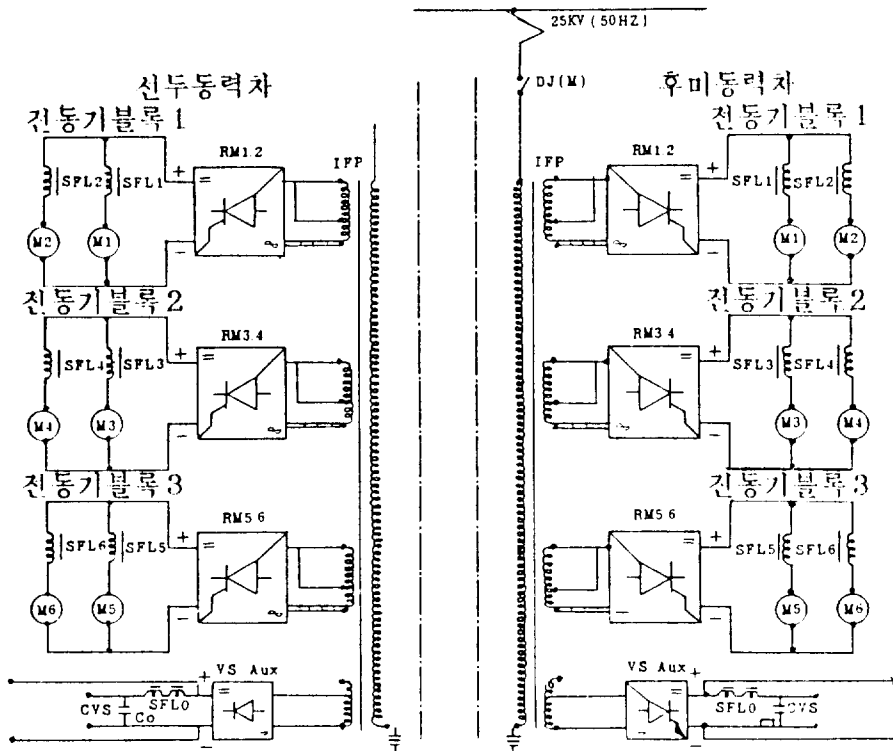


그림 2. TGV의 주회로

대가 각 4축에 설치되어 총 6400kw의 출력을 얻도록 설계되었고 이미 이것의 Prototype이 완성되었다.

3.2 日本의 新幹線

1964년 10월 “꿈의 超特急”으로 일컬어진 東海道新幹線이 東京올림픽을 앞두고 스타트하여 대량수송의 대성공을 거둔 이래 東海道, 山陽및 東北, 上越新幹線이 개통되어 동서및 남북으로 연결시키고 있다. 이중 여기에서는 東北, 上越新幹線차량을 소개하기로 한다.

그림3은 新幹線의 주회로를 나타낸 것으로 新幹線의 가속제어방식은 사이리스터 연속위상제어방식으로 완전한 가속이 가능하고 승차감이 개선되어 공전 발생도 방지되고 있다. 그 반면 사이리스터 위상제어에 의한 고조파 함유율및 방해전류의 증가가 예상되는데 이러한 유도장해의 방지를 위하여 그림3(a)와 같이 변압기2차측을 不等6分割(2:2:2:2:1:1)로 하여 제1브릿지만을 연속적으로 위상제어하여 완만히 승압하는 방식으로 하였다. 가속시의 notch와 點孤브릿지, 출력전압의 관계는 그림3(b)에 보인 바와 같고 6분할이지만 10분할에 상당함을 알 수 있다. 이것에 의해 등가방해전류를 다이오드제어시와 같은 정도로 억제할 수 있다.

制動制御方式은 사이리스터 초퍼에 의한 연속제어

발전제동기와 기계적 제동기의 겸용방식으로 (c)에 보인 바와 같이 가속시의 출력전압제어와 같이 저항기의 1단만을 초퍼로 연속제어하고 나머지는 캠(cam)축의 점점으로 저항류를 on, off하는 것으로 全抵抗領域에 걸쳐 실질상 연속제어하는 방식을 취하고 있다. 연속제어하게 됨으로 인해 滑走하지 않는 속도-점착특성의 패턴에 따라 제동력을 제어하는 것이 가능하고 제동시 쇼크가 경감되어 승차감이 향상되도록 하고 있다.

3.3 서독의 ICE(Intercity Express)

독일 공업계및 연방철도는 새로운 세대의 고속열차는 300km/h의 고속 운전이 가능하고 또한 각 도시간 소요시간을 대폭 줄일 수 있는 ICE 체계를 추구해 왔다. 1991년 함부르크~뮌헨구간에서 영업개시 예정인 ICE 고속열차는 1985년부터 시험운전을 계속하여 왔고 우선 250km/h의 주행을 목표로 금년 8월 완공예정이다. 여기에서는 부상열차와 ICE 고속열차에서 사용된 BR 120 기관차의 시스템을 소개하기로 한다.

이 기관차는 교류 16 2/3Hz, 15kv의 전원으로 1900kw의 견인력을 갖는 두개의 비동기전동기를 포함한 두개의 Bogie로 이루어져 있는데 이것을 그림4(a)에 나타내었다. 제어회로는 4상한초퍼, 평활캐패시터, 3상인버터를 지닌 4개의 전력전자유닛트를 포

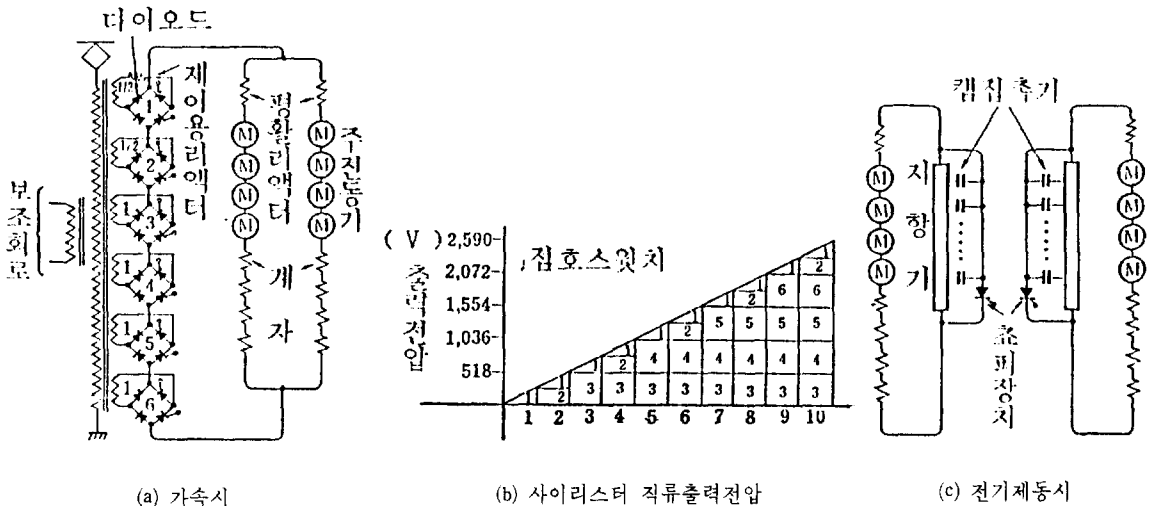


그림 3. 新幹線의 주회로구성

함하고 있으며 각 유닛트는 5位相回路로서 이루어져 있다. 각 Bogie의 두 인버터는 전동기 인덕턴스 L_m 을 지나 ac 쪽은 물론 dc 쪽에서 일반흡수회로를 사용하여 병렬로 연결되어 있고 4개의 입력초퍼는 ac 전류의 고조파성분을 더욱 감소시키기 위하여 펄스 위상천이로 변조되고 있다. 제동은 저항제동은 물론 회생제동도 스위칭에 의해 가능하도록 하고 있다. 그런데 전시스템은 퓨우즈를 전혀 사용하고 있지 않는데 그림4에서 사이리스터 점호가 주스위치 S가 차단될 때까지 사이리스터 보호를 위해 충분히 역할을 하고 있기 때문이다.

그림4(b)는 BR 120 인버터의 출력특성곡선이다. 펄스주파수가 변화하는 모드를 볼 수 있는데 가장 낮은 20Hz에서 非同期 PWM이 사용되고 약 50Hz에서 극히 좁은 펄스천이영역을 갖고 동기된 PWM으로 동작된다. 또한 80Hz에서 전동기 인덕터를 단락함으로써 전류를 한단계 낮춰 전력을 일정하게 유지한다.

4. TGV와 신간선 제어회로비교

상기의 3절에서 예로 든 3국의 고속전철중 현재 실용되어 영업운전에 들어간 것은 TGV와 신간선으로 서독의 ICE는 1991년 완전개통을 목표로 하고 있다. 본 절에서는 현재 영업운전되고 있는 TGV와 新幹線의 두 시스템에 대하여 비교하여 보기로 한다. 본 해설의 범주를 벗어나는 車體 및 臺車構造, 信號시스템 등의 비교는 다른 부분으로 미루기로 하고 여기에서는 가감속장치와 집전장치에 대해서만 논하기로 한다.

4.1 集電裝置와 팬터그래프

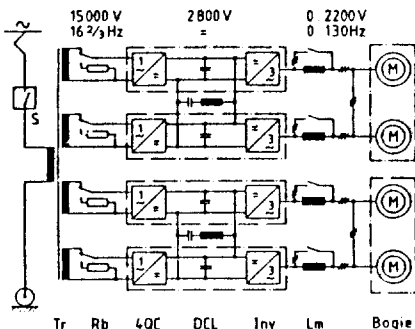
고속시의 집전기술개발은 전차선절단사고나 아크에 의한 집전잡음, 전파장해, 전차선마모등 전기철도의 장애가 빈번히 일어나므로 중요한 문제라고 할 수 있다.

信幹線은 動力分散시스템으로 全電動車로 구성되어 1유닛트 1팬터그래프, 즉, 다수의 팬터그래프방식을 채용하고 있다. 다수의 팬터그래프를 사용한 이유로는 1팬터그래프당 集電電流를 작게하여 押上力을 작게 할 수 있고 팬터그래프를 소형, 경량화할 수 있으며 架線도 가능하게 할 수 있기 때문이다.

한편, TGV는 직류 1.5kv의 재래선 구간과 교류 25kv의 高速 新線區間을 주행하는 교직류 차량으로 직류구간에서는 2팬터그래프로, 교류구간에서는 1팬터그래프로 집전하는 것은 전술한 바와 같다. TGV는 動力集中方式에 가까운 방식으로 1편성당 팬터그래프수가 적게 되어 팬터그래프당 집전전류가 많이 흐르게 된다. 따라서 新幹線과는 달리 押上力을 높혀 전차선에서 떨어짐을 적게 하고 있다.

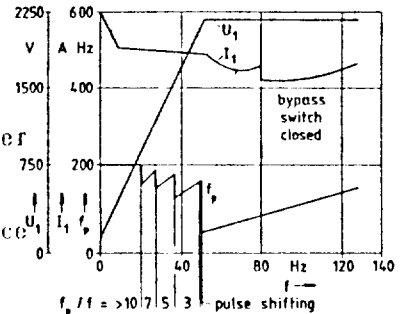
4.2 가감속

TGV와 新幹線電車の 차량에서의 가장 큰 차이점은 전술한 바와 같이 動力分散과 動力集中方式이다. 일반적으로 동력집중방식은 기관차+객차로 주행성능에서 동력분산식보다 떨어지는데 그 이유로는 구동축의 수 또는 중량전체에 대한 비율이 적으면 空轉을 일으키지 않는 한계 가속도가 낮게 되고 狹軌의 대차에는 대출력 전동기를 搭載하기 어렵고 전동



(a) 전인시스템

Tr=transformer
Rb=braking resistor
4QC=four-quadrant chopper
DCL=dc link
Inv=inverter
 L_m =motor series inductance
M=squirrel-cage motor



(b) BR 120 인버터의 출력곡선

그림 4. 고출력기관차 BR 120

5. 결 언

기수가 적다는 것은 전력이 적은 것을 의미하므로 고속영역에서의 가속도가 작게 된다. 또 하나 전동기가 붙은 축밖에 전기제동기를 사용할 수 없다는 것이다. 그럼에도 동력집중방식이 택하여지는 이유로는 승차감으로부터 정해지는 가속도, 감속도의 상한에 대하여 현재의 동력분산식의 粘着重量比(驅動軸重量/全重量)는 지나치게 크고 또한 현재의 탑재 전동기는 지나치게 적은 것이므로 분산방식보다 집중방식으로 선호가 바뀌고 최대의 단점은 전기제동력으로 이것에 대해서는 강한 제동력이 필요할 때는 동축이 아닌 縱軸에 제동기를 설치할 수 있고 집중방식을 택함으로써 총중량을 줄일 수 있고 騒音源을 특정한 부분으로 모을 수 있을뿐 아니라 補修費도 적게 든다고 하는 장점을 갖고 있다. TGV의 경우 시험선인 TGV-001에서는 300km/h 고속운전을 전제로 전축구동방식으로 하였으나 고속영역에서도 점착력이 예상보다 좋지 않음을 밝혀내 일부의 기기가 고장을 일으켜도 35%에서의 기동이 가능하도록 동력축을 감소시켜 10량편성중 6대를 전동대차로 7대를 연결한 부수차로 하였다.

한편, 일본의 新幹線은 1량의 전동차에서 空轉, 滑走가 일어난다고 하여도 운전사에 전해지지 않는 경우가 있어 空轉, 滑走의 발생확율이 낮은 영역에서 가감속도를 정해 놓고 있다.

4.3 制動

일본 新幹線電車が 全電動車로 된 최대의 이유는 고속영역에서의 전기제동기의 이용을 고려하였기 때문이다. 고속영역에서의 기계적제동기에 의한 정지는 디스크 라이닝 및 바퀴면등의 열 균열 및 마모등의 문제를 극복해야만 했다.

한편 TGV의 경우는 동력집중방식과도 연관이 있지만 기계적 제동기를 채용하고 있는데 이것은 TGV의 平均驛距離가 新幹線보다 3배정도 길어 제동기의 동작횟수가 적은데도 기인된다. 그러나 보다 근본적인 차이는 프랑스와 일본의 제동기 취급자체가 프랑스는 매뉴얼로 작동시키는 것에 대해 일본의 경우는 정차시마다 ATC를 작동시키는 시스템이기 때문이다.

交通기술발달의 역사는 速度向上을 위한 도전의 역사라 하여도 과언이 아니고 철도기술에서는 차량, 궤도, 신호설비, 급전설비등 많은 기술을 종합하여 安全確保라는 大前提아래 속도향상을 꾀하여 왔다. 철도는 지극히 안전하고 정확한 교통기관이면서도 이용 Share면에서 다른 교통기관에 우위를 빼앗겨 왔고 이것은 도시간 교통에서 더욱 심하다. 그런데 다양한 교통기관 중에서 이용자가 어떤 기관을 선택하여 여행할 것인가는 교통기관이 지니는 快速性, 安全性, 快適性, 正確性, 便利性 중 제일 먼저 고려하는 것은 快速性일 것이고 이것은 사회가 발달할수록 더욱 도착시간의 단축을 요구하게 된다.

서울~釜山간 고속전철의 계획이 다시 거론되어 다방면의 검토가 진행되고 있는 즈음 크게는 磁氣浮上列車와 在來式 列車와의 선택으로 귀결지을 수 있고 이것에 대한 판단기준은 投資와 投資에 대하여 얻을 수 있는 효과일 것이다. 본 해설에서는 레일-바퀴의 마찰에 의한 재래식 철도방식중 고속전기철도에 초점을 맞춰 차량에서 본 制御方式에 대해 논하였고 대표적 고속전철인 프랑스의 TGV, 일본의 新幹線, 서독의 ICE의 차량의 주제어회로를 소개하였으며 영업운전중인 TGV와 新幹線에 대하여 차량의 전기회로에 대하여 비교고찰하였다.

참 고 문 헌

- [1] 丸山弘志·片岡軌夫, 鉄道工学, 丸善, 1982.4
- [2] 渡辺寿夫編著, 新幹線の電子制御通信システム, 電子通信学会, 1982.12
- [3] 曾根悟, 新しい鉄道システム, オーム社, 1987.10
- [4] 曾根悟, “將來の高速電氣車のあり方について(上),” 電氣車の科学, vol. 27, no. 1, pp. 12-15, 1974.1
- [5] 島隆, “鉄道車輛の高速化とその諸問題,” 日本機械学会, 第84卷 752号, pp. 53-58, 1981.7
- [6] Henry Molins, “Supplying the Power,” Railway Gazette International, p. 740, 1981.9
- [7] Raymonde Garde, “Speed and Power,” Railway Gazette International, pp. 731-733, 1981.9

-
- [8] 本田修一, “新幹線とTGVとHST,” 運輸と経済, 42巻2号, pp. 38-44, 1982.2
- [9] 藤田敏, “ヨーロッパにおける列車の高速化(Ⅰ)(Ⅱ),” 電気鉄道, vol. 36, no. 3-4, 1982.3-4
- [10] 鉄道ファン, vol. 253, 1982.5
- [11] G.F. Allen, “World rail high-speed developments,” Modern Railways, pp. 394-395, 1982.9
- [12] 谷脇康生, “各国鉄道高速化への努力,” 運輸と経済, 43巻3号, pp. 68-81, 1983.3
- [13] 須田忠治, “海外における鉄道の高速化,” 電気車の科学, vol. 36, no. 9, pp. 31-38, 1983.9
- [14] JREA, vol. 27, no. 2~11, 1984.2-11
- [15] “特集 電気機関車,” 鉄道ジャーナル, no. 211, 1984.9
- [16] 秋山芳弘, “海外の高速鉄道網計画,” JREA, vol. 30, no. 3, pp. 3-9, 1987.3
- [17] L. Abraham, “Power Electronics in German Railway Propulsion,” Proc. of IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 472-480, 1988.4
- [18] Jerome Rosen, “High Time For U.S. High Speed Rail,” ASME, pp. 34-40, 1989.2
- [19] “海外消息,” 電気車の科学, vol. 42, no. 2, p. 61, 1989.2
