

고정패색구간에서 복합열차운행에 대한 신호제어기술 고찰

The study on the signal controls for the mixed train operation on the fixed block

이영훈1* 김종기2** 류상환** 이영형3***
Lee Young-Hoon Kim Jong-Ki Ryu Sang-Hwan Lee Yeong-Hyeong

요 약

본 논문은 고정패색구간에서 차량운전 특성과 속도패턴이 다양한 다종의 열차들이 동일선로에서 복합되어 고밀도 운영을 위한 방법으로, 신호현시에 대한 제반정보를 차상으로 전송받아 기관실 신호표시반에 신호를 현시하는 차상신호방식(Cab Signalling System)중에서, 선행열차의 위치, 선로조건 등 지상의 상태정보를 후속열차가 수신하여 열차 자신의 제동특성 등 차량정보와 비교 분석하여 제동거리를 계산하는 distance to go 방식으로 열차운전속도를 제어하는 ATP (Automatic Train Protection) 시스템을 제안하였다.

패색구간별 고정된 신호속도단계가 부여되는 ATC(Automatic Train Control) 시스템에서는 운행패턴이 같은 단일차종의 열차만 운행하는 구간에서는 일정속도에 의한 패색구간 분할로 구간내 distance to go 신호체계가 이루어지지만, 차종과 속도패턴이 서로 상이한 복합열차들의 운행구간에서는 안전거리 확보를 위하여 저속열차의 제동거리를 기준으로 패색구간 분할 및 속도결정이 이루어지므로 ATP 방식보다 운행효율이 다소 떨어짐을 알 수 있었다. 이를 차량특성과 속도패턴이 다른 3개의 열차를 모델로 하여 열차별 감속도에 의한 제동특성을 ATC와 ATP 신호제어체계에 접목시켜 시뮬레이션을 하였다.

1. 서 론

철도신호설비는 운행중인 열차에 대하여 전방의 운행여부의 조건을 제시하여 주는 것으로서 선로의 이용률을 최대한 향상시키고 열차의 안전 확보를 위하여 운행열차 상호간 방호를 구축하는 철도의 핵심 시스템으로서 철도의 수송력증가, 안전도확보 및 경영합리화와 서비스향상 등 철도 발전에 선도적인 역할을 수행하여 왔다.

산업사회의 발달로 수송수요가 증가하여 동일 선로상에 보다 많은 열차를 안전하고 신속, 정확하게 소통시켜야 하는 필요성에 따라 초기의 수동식 기계신호보안장치에서 계전기 로직을 이용한 전기식으로 자동화되었고, 오늘날 컴퓨터 이용기술의 확산이 철도신호시스템에까지 영향을 끼쳐 이제 고속철도시대를 열게 된 시점에서 보다 현대화된 최첨단 신호방식에 의한 열차운행을 눈앞에 두고 있다.

2004년 개통을 목표로 건설중인 경부고속전철이 기존 경부선 일부구간과 호남선 전구간을 일반열차와 복합운행계획에 따라 고속전철의 기존선 운행구간 속도향상과 안전운행을 기대하고 일부 병목구간의 포화상태에 도달한 선로용량 개선이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 논문을 통하여 차량특성과 속도패턴이 다양한 열차들의 제동거리 특성을 ATC와 ATP방식의 열차제어체계와 접목시켜 분석해 봄으로써, 우리나라 철도의 고속화 및 고밀도 운전에 보탬이 되고자 한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
*** 철도청 신호제어과 사무관, 정회원

2. 철도신호제어방식 고찰

2.1. 철도신호현황

2.1.1. 국내 철도신호

국내철도의 수도권 지하철 1, 2호선과 국철구간 대부분에서는 지상신호방식을 사용하고 있으며, 열차속도는 speed step 방식으로 제어되고 있다. 열차자동정지장치(ATS : Automatic Train Stop)를 사용하고 있으며 1969년 서울~부산간의 점제어식 도입초기에는 열차의 운행이 빈번하지 않아 기관사의 보조장치로 열차의 안전을 확보하여 왔으며, 1988년 경부선에 5현시 신호체계의 ATS 차상속도조사식으로 개량한 뒤 오늘에까지 이르고 있다. 최근 철도이용환경의 호전으로 이용승객의 증가추세와 속도향상 요구에 따라 열차의 고속화 및 고밀도화를 위한 신호기 확인 소요인식거리 증대 등으로 인하여 점차 새로운 신호방식을 요구하고 있는 실정이다.

2.1.2. 국외 철도신호

국외 특히 유럽에서의 철도 신호시스템의 큰 특성은 신호원의 실수에 대한 보호 대책을 제공하는 것으로, 이러한 운전자의 실수를 막기 위하여 AWS(Automatic Warning System)라는 지상신호 방식의 신호설비를 사용하였는데, 이 신호체계에서 운전자는 차량을 운전하면서 마지막 신호현시를 기억해야 할 뿐만 아니라 전방의 선로상태, 구배와 곡률, 영구 및 임시 속도 제한, 날씨에 따른 차량의 가속 및 제동특성, 운행시각표 등을 끊임없이 고려해야 한다. AWS 신호설비는 운전자의 실수를 크게 감소시켰으나, 사회가 발전하면서 열차의 운행빈도가 점차 증가하는 등 철도교통의 대중화로 위험 신호를 지나치는 경우가 일반적으로 늘어나는 현상이 발생하였다. 이에 따라 위험신호를 지나치는 것을 방지하고 단호히 속도제한을 집행하는 차상신호방식의 신호설비가 필요하게 되었으며, 오늘날 유럽의 주요 국가에서는 차상신호방식인 ATP 또는 ATC 장치를 많이 사용하고 있다. 이러한 장치는 현재 유럽을 중심으로 표 1과 같이 다양한 제품이 있으며, 유럽이 단일화되면서 ERRI(유럽연합철도연구소)를 주축으로 각 나라에서 사용하고 있는 ATP시스템을 통합하여 ERTMS/ETCS 시스템 사양을 표준화하였다.

2.2. 신호제어방식 기술고찰

ATP 시스템과 ATC 시스템은 모두 연속정보전송이나 불연속정보전송이 가능하나, 본 논문에서는 현재 국내에서 논의되고 있는 것과 같이 정보전송방식에 의해 구분하였음을 밝힌다.

2.2.1. ATS 지상신호방식

지상신호방식은 폐색구간마다 자동폐색장치(ABS : Automatic Block System)와 신호기를 설치하고 기관사가 육안으로 전방의 신호현시를 확인하며 열차의 가·감속 또는 제동을 기관사의 판단에 따라 운전하게 하는 방식이다. 이는 각 폐색구간에서 신호현시별 제한속도에 맞추어 단계별로 열차의 속도를 수동으로 제어하는 것으로 신호현시 속도보다 운행속도가 높을 경우에는 열차자동정지장치(ATS)가 개입하여 열차의 안전운행을 도모한다.

ATS 시스템은 그림 1에서와 같이 동력차 하부에 설치되어 있는 차상자가 궤도 내에 설치되어 있는 지상자를 통과할 때 폐색구간 통과속도 정보(98kHz~130kHz)에 감응하여 허용속도를 초과하여 운행할 경우 5초간 경보를 울리고 경보 시간동안 제동취급이 시행되지 않을 경우 자동적으로 비상제동이 체결되어 열차를 정지시킨다.

2.2.2. ATC 차상신호방식

열차자동제어장치(ATC)는 레일 또는 양선로의 내측에 설치한 루프 케이블을 정보전송의 매체로 활용하여 열차운전을 제어하는 신호방식으로 세계 여러나라에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 차상신호방식이다. 지상ATC장치에서는 선형열차의 운행에 따른 전방 궤도회로의 조건과 선로 데이터, 진로 개통조건 및 신호현시에 필요한 제반조건 등 후속열차 운행에 필요한 모든 정보를 종합하여 작성한 신호속도 정보를 코드화하여 AF궤도회로장치를 통해 레일로 전송한다. 이때 레일위를 운행하는 열차는 차상ATC장치에서 정보를 수신받아 분석하여 차상신호 표시반에 운전 허용속도를 표시함과 동시에 열차의 실제 운행속도와 신호 제한속도를 비교 분석하여 속도를 감속시키는 열차운전제어 시스템이다. ATC 시스템은 차량특성 및 속도패턴이 동일한 도시철도나 고속철도 등에 적합하며, 이에 대한 구조는 각각의 사용국가에 따라 약간의 차이를 가져오지만 대부분이 같은 형태의 구조와 기능을 가지고 있다. 그림 2는 고속전철용 시스템인 TVM430 ATC 시스템의 속도단계별 신호현시 및 제동곡선을 나타낸 것이다.

2.2.3. ATP 차상신호방식

열차자동방호장치(ATP)는 지상신호방식과 차상신호방식을 혼용하여 사용하기도 하는데, 폐색 구간 경계지점의 양선로 중앙에 지상자를 설치하고 이 지상자를 통해 폐색구간의 길이, 구배, 분기위치 등 지역정보(불변정보)와 지상신호기 현시정보(가변정보) 등의 지상정보를 차상으로 전송하면 차상안테나를 통해 전송된 이 지상정보와 열차길이, 제동력, 열차종별 등에 대한 차상정보와 결합하여 목표속도와 제동목표거리를 계산하여 열차운전속도를 분석 제어하는 distance to go 방식의 열차제어시스템이다.

ATP 시스템은 표1에서와 같이 국가 또는 제작사별로 기능과 성능은 비슷하지만 서로 호환성이 없는 시스템을 사용하여 왔으나 유럽 통합과 더불어 상호운용성(interoperability)을 극대화하기 위해 ETCS(European Train Control System)로 표준화·규격화되고 있다. 그림 3은 ATP 시스템에 의한 정지제어 곡선도이다

3. 열차운전에 관한 이론

3.1. 운전이론

3.1.1. 열차저항

열차가 출발 또는 주행하고 있을 때 열차의 진행을 방해하려는 힘을 열차저항이라고 하며 차륜과 레일간의 마찰저항, 차륜과 축수간의 마찰저항, 구배선을 올라갈 때의 구배저항, 속도를 증가 시킴에 따른 저항, 공기에 의한 저항 등에 따라 영향을 받게 된다

- ① 출발저항 : 정지상태에서 출발시 차륜과 선로간의 접촉력으로 열차진행을 방해하는 힘
- ② 주행저항 : 열차가 주행할 때 그 진행방향과 반대로 작용하는 모든 저항의 총칭
- ③ 구배저항 : 구배선을 운전할 때 지구의 중력에 반한 힘
- ④ 곡선저항 : 곡선 통과시의 마찰에 의한 저항의 총칭
- ⑤ 가속도저항 : 열차의 가속에 필요한 힘(가속력)의 반작용에 의해 생기는 것

3.1.2. 가속력

열차가 출발하여 주행을 시작하게 되면 속도는 관성에 의해 가속력을 갖게되며 열차의 가속력은 운동의 법칙으로부터 구할 수가 있다.

$$f = \frac{F}{W} = \frac{102W_a}{W} = 102a \text{ [kg/ton]}$$

- ① 가·감속과, 속도 및 시간과의 관계 : $a = \frac{v_2 - v_1}{t}$
- ② 가·감속과, 속도 및 거리와의 관계 : $S = \frac{V_2^2 - V_1^2}{7.2A}$
- ③ 가속력(가속저항)과, 속도, 시간의 관계 : $F = 30 \frac{V_2 - V_1}{t}$
- ④ 가속력(가속저항)과, 속도, 거리의 관계 : $F = 4.17 \frac{V_2^2 - V_1^2}{S}$
- ⑤ 가·감속시의 속도, 거리, 시간의 상호관계 : $t = 30 \frac{VS}{4.17V^2} = \frac{7.2S}{V}$

3.1.3. 열차제동(감속)

제동은 기본적으로 역가속을 의미하며, 열차가 정지 또는 목표속도까지 감속하는 동안 주행한 거리를 제동거리라고 하고 이것에 필요한 시간을 제동시간이라고 한다.

- ① 공주시간과 공주거리 : $S_1 = \frac{V}{3.6} t_1 (m)$, $V =$ 열차의운행속도[Km/h], $t_1 =$ 공주시간[sec]
- ② 실제동 거리 : $S = \frac{4.17V^2}{\frac{P}{W}f_m + R_r \pm R_g + R_e} + \frac{V}{3.6} t_1$
- ③ 제동시간 : $t = t_1 + t_2 = t_1 + \frac{7.2S_2}{V}$

3.1.4. 선로용량

일정 선구단위로 실제에 운전 가능한 편도 1일의 최대 총 열차횟수를 말하며 역간 거리, 선로의 상태, 열차운행형태에 따라 인수가 변화한다. 복선구간의 선로용량식은 다음과 같다.

$$N = \frac{f \cdot T}{hw' + (r + u + 1)v}$$

N : 선로용량 (회/일), f : 선로이용률 (60%), T : 1,440 (24시간×60분)

h : 고속열차상호간의 운전시격 (분)

r : 역에 선착한 저속열차와 후착하는 고속열차간 최소운전시격

u : 역에 선발하는 고속열차와 후착하는 저속열차간의 최소운전시격

v' : 저속열차 횡수비 (열차수/편도열차횡수), v : 고속열차 횡수비 (열차수/편도열차횡수)

3.2. 속도제어곡선

속도제어곡선은 폐색구간에서의 지시속도와 폐색구간의 길이, 폐색구간에서의 선로도의 평균 구배값, 열차의 제동성능(감속도) 등을 사용해서 계산된다. 그림 4에서 감속도 $a[km/h/h]$ 가 구간에서 일정하다고 가정하면 속도 V 는 다음 식과 같다.

$$V = \int_t^{t'} -a dt = -at_f + at = at - V_c$$

그림 5와 같이 최종적으로 구배 및 직선부의 주행거리를 고려한 계산식은 다음과 같다.

$$D_b - d = \frac{V^2 - V_{cf}^2}{2(g_{fc} + g \cdot i)} + t_{bc} \cdot V,$$

단, $t_{bc} = 3$ 초(제동반응시간), $g_{fc} =$ 평균감속도, $i =$ 평균구배

3.3. 폐색방식에 대한 고찰

3.3.1. 고정 폐색구간의 운전시각

고정폐색구간에서는 열차검지를 위한 궤도회로 즉 폐색구간 길이와 속도변화단계 등이 운전시각에 영향을 미치게 된다. 속도단계 상수(현시방식)를 k , 폐색구간 길이를 L_b 로 할 때 단계별 속도 V_i ($i=1 \sim k$)는 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$L_b = \frac{V_m^2}{2\beta \times k} + l_o + V_m \times t_c, \quad V_i = V_m \left(\frac{1 - (i-1)}{k} \right)^{1/2}$$

L_b : 폐색구간길이(m), V_m : 최고속도(km/h), β : 감속도(k/h/s), l_o : 열차 전두부와 폐색구간 경계까지의 여유거리(m), t_c : 제동지연시간(sec), V_i : V_1, V_2, V_3, V_4 단계별 속도(km/h), i : 속도단계(1 ~ k), k : 현시단계 (3, 4, 5현시)

위 식을 이용하여 최고속도와 현시단계 및 속도단계를 정하게 되면 폐색신호기의 설치간격을 설정할 수가 있다.

3.3.2. 선로 폐색구간분할

폐색구간은 열차가 선택된 방향으로 진행할 수 있고 같은 궤도에 다른 열차가 따라 갈 수 있는 두개의 연동구간의 궤도거리로써, 폐색구간의 분할은 운행하고자 하는 열차의 성능 즉, 가속력 및 감속력 등과 선로의 구배 또는 곡선 등 차량운행의 제한적인 요소가 가장 중요하게 작용한다. 또한, 폐색구간을 운행하는 열차의 신호현시 조건을 최소 2개구간 이상의 진행(G 또는 Y/G) 신호를 현시할 수 있는 조건이라야 열차가 운행하고자하는 전방에서 선행열차의 정차시간 지연 등 다소간의 지장이 발생하여도 후속열차의 정상적인 운행이 보장받을 수 있게 된다.

4. 시뮬레이션

4.1. 기본자료

속도패턴이 상이한 복합열차(Mixed traffic)가 동일한 선로에서 운행하는 경우로서 운행속도와 열차특성이 서로 다른 KTX(경부고속열차), 특급열차(새마을호), 화물열차의 3개 열차운행 패턴으로 가정하였으며 각 열차에 차상장치를 탑재(ATC 또는 ATP장치)하고 열차의 운전효율을 시뮬레이션하기 전에 제동곡선을 산출하기 위해 각각의 열차들에 대한 최고속도(V) 및 상용감속도(β)를 이용하여 열차의 상용제동거리를 계산하고, 열차안전운행을 위한 폐색구간 거리를 도출하였다. 표 2에 이를 요약하였으며 그림 6은 이들 특성을 그래프로 표시한 것이다.

4.2. 시뮬레이션

그림 7과 그림 8은 각각 복합열차가 운행되는 선로에서 KTX 열차에 대한 ATC와 ATP장치에 의한 제어곡선이며, 그림 9는 각 열차의 ATP 및 ATC 제어곡선에 대한 비교이며, 그림 10은 ATP 및 ATC장치에 의한 KTX 열차의 주행시간을 비교한 것이다.

4.3. 결과에 대한 고찰

열차별 감속도 특성에 의한 열차제동거리 조건만 가지고 시행한 것으로서 정확한 표현이라고 할 수는 없으나 그림 10에서와 같이 KTX 열차의 ATC/ATP 시스템의 속도대비 주행시간 곡선으로서 주행중에는 최대 52.5초(7,700m지점), 정지시에는 약 20여초 차이로 ATP 시스템이 제동시간이 절감되어 운행효율이 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 속도패턴이 다른 복합열차를 운행하는 선구에서는 ATC 시스템의 운전패턴은 ATP 시스템보다 운행효율이 다소 떨어지는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

차상신호방식의 한계와 함께 고속전철의 기존선로 일부구간을 복합 운행함에 따라 열차의 고속 운전과 한정된 선로에서 열차운행의 효율을 증대시키기 위하여 차상신호방식 도입의 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 고정패색구간에서 차량운전 특성과 속도패턴이 다양한 다중복합 열차들이 동일선로에서 고밀도 운행을 위한 방법으로 ATP 시스템을 제안하였다.

차량특성과 속도패턴이 다른 3개의 열차를 모델로 시뮬레이션한 결과 고속열차를 기준으로 속도 대비 제동시간을 비교할 때 주행중에는 52.5초, 정지지점에서는 약 20여초 차이로 ATP 신호제어방식이 더 효과적인 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 시뮬레이션은 열차별 감속도 특성 등 한정된 열차제동 조건만 가지고 시행한 것으로서 역구내 배선, 구배, 곡선 등 선로제원과 열차저항 등 열차운행 환경변화의 운전조건이 추가되어야 할 것이며, 향후 일정 선구단위로 실제의 모든 운전조건을 반영한 열차다이나를 작성하여 운행효율을 분석하는 연구도 계속되어야 할 것이다.

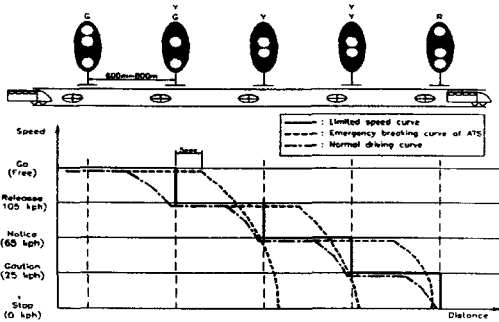


그림 1. ATC 시스템의 속도제어

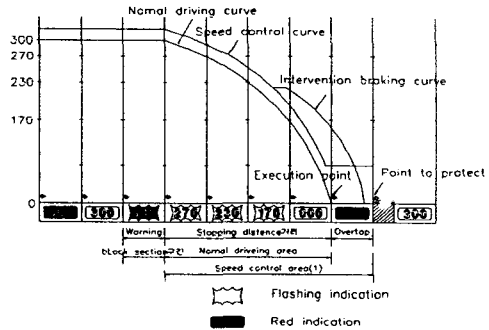


그림 2. TVM430 시스템 속도제어

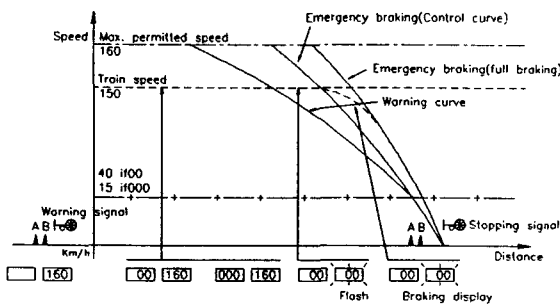


그림 3. ATP시스템의 정지 제어

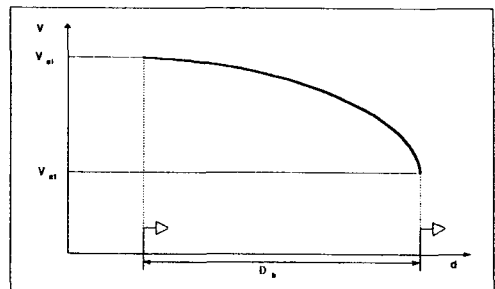


그림 4. 속도 제어 곡선

SPEED CONTROL CURVE
IN AN ANNOUNCEMENT BLOCK SECTION

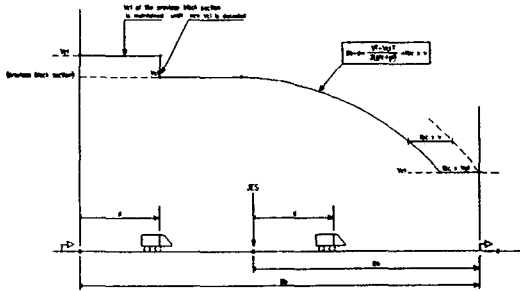


그림 5. 폐색구간에서의 속도 제어 곡선

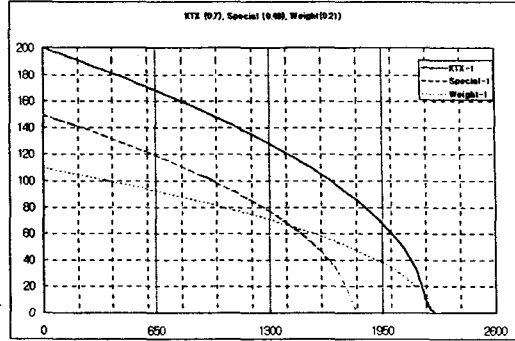


그림 6. 열차별 정상 제동곡선

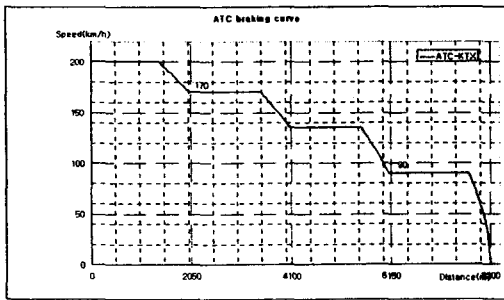


그림 7. ATC 시스템의 제동곡선(KTX)

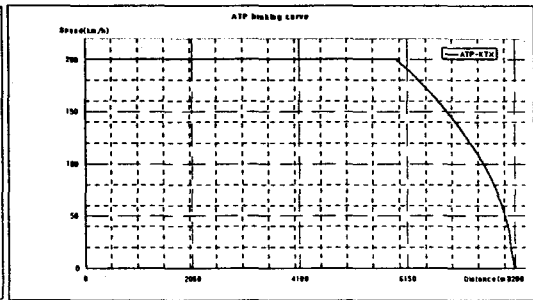


그림 8. ATP시스템의 제동곡선(KTX)

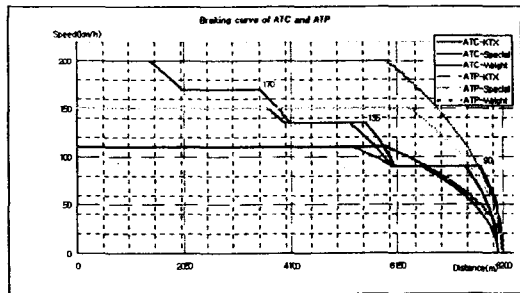


그림 9. 열차별 ATC/ATP 제동곡선 비교

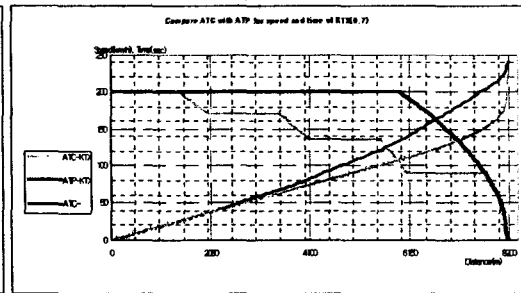


그림 10. 제동곡선 및 주행시간 비교(KTX)

표 1. 국외 차상 신호제어장치

신호방식	시스템 종류	제조사	제어방식
ATC	TVM 시리즈	-Alstom TGV(프랑스)	Distance to Go
	LZB	-ICE(독일)	Go
	신칸센 ATC	-High Speed(일본)	Speed Step
ATP	ERTMS/ETCS	-Invensys(Westinghouse)	Distance to Go
	Eurocab and Eurobalise in ERTMS/ETCS	-Ansaldo CSEE	
		-Alcatel	
		-Siemens	
		-ADtranz(Bombardier)	
		-Alstom	
	Ebicab 시리즈	-ADtranz(스웨덴)	
	KVB	-Alstom(프랑스)	
	ZUB 시리즈	-Siemens(독일)	

표 2. 열차별 특성

구분	단위	KTX	특별열차	화물열차
최대속도	km/h	200	150	110
	m/s	55.56	41.67	30.56
감속도 (구배=0)	km/h	2.52	1.75	0.75
	m/sec ²	0.70	0.49	0.21
정상 제동거리	m	2,204.59	1,785.71	2,240.74
수정 제동거리	m	2,400	1,800	2,400
폐색구간 수	개	4	4	4
폐색거리	m	600	450	600

표 3. 폐색구간별 속도

속도단계	폐색거리 [m]	초기속도 [m/sec]	속도 [km/h]	최대속도 [km/h]
V ₁	0	55.6	200	200
V ₂	2,050	47.2	169.9	170
V ₃	4,100	37.1	133.6	135
V ₄	6,150	22.9	82.4	90
V ₅	8,200	0	0	0

참고문헌

1. "An integrated Train Control System based on digital ATP", RTRI, WCRR97, pp327~334, 1997. Italy.
2. Transport ferroviaire : ASTREE ou revolution dans la gestion du traffic ferroviaire, Technologie France, No8, 1997, ADIT, France.
3. 김용규, "유럽의 차상신호방식(ATC,ATP,ATO) 정의 및 기술동향 상세분석", 고속철도운행을 위한 철도시설정비사업 및 기존선전철화사업 기술자문보고서, pp119~150, 2000.
4. 류상환 외, "ATP 도입을 위한 기술조사", 한국철도기술연구원, pp34~59, 1998.
5. 강규현, "열차의 고밀도운전을 위한 신호보안시스템에 관한 연구" pp14~34, 1996.
6. 김용규 외, "ATS 기존선 신호방식과 TVM430 ATC 신호방식의 속도 Profile에 따른 Compatibility", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp1423~1425, 2000.
7. 류상환 외, "폐색구간 분할", 고속철도연구보고서(전기분야), pp308~320, 1996.
8. 김종기 외, "양방향 신호설비에 관한 연구", 한국철도기술연구원, pp111~113, 1997.
9. 김용규, "유럽에 있어서의 열차제어시스템 개발 동향", 철도기술정보지 제17호, pp97~106, 1999.
10. 철도경영연수원, "고속철도 열차제어시스템(상)", pp195~210, 2000.
11. 김의일, "운전이론", 한국철도운전기술협회, 1999.
12. 철도청, "신호업무자료", pp74~78, p119, p455, 2001.
13. 한국철도기술연구원, "호남선전철화 타당성조사 및 기본계획(제4권)", 2001.
14. SNCF Direction de l'infrastructure. "Ligne a grande vitesse Signalisation de cabin TVM 430 Principes de signalisation", SNCF, France, 1992.
15. ADtrance, "Ebicab 900 System description", pp18~22, 1997.
16. Gec Alsthom, "SASEM Automatic Train Control", 1996.
17. Siemens transport, "ZUB 2000", 1999.