

## 고정폐색 열차제어시스템 속도제어코드 설계에 관한 연구

### Study on the Speed Control Code Design for Fixed Block TCS

이강미<sup>1†</sup> · 신경호<sup>1</sup> · 신덕호<sup>1</sup> · 이재호<sup>1</sup>

Kang-mi Lee · Kyung-ho Shin · Ducko Shin · Jae-ho Lee

**Abstract** Kyung-Bu High Speed Railway is operated in train control system(tcs) of fixed block operated in a way of dividing track circuits into several blocks in accordance with operation circumstances such as rolling stocks, grade, curves and facilities. The TCS of fixed block system refers to a continuous train control system, which transfers operational information such as entry and exit speed, distance-to-go, and deceleration etc. into on-board train control equipment on the basis of block occupancy of a preceding train. It guarantees a safe operation of trains by giving an emergency braking order, in case that a train exceeds an entry and exit speed of a corresponding block. In this paper, we analyze the speed control code deducing in accordance with maximum operation speed and characteristics of rolling stocks by analyzing principles of generation of speed control code allocated in blocks for safe operation, then train operational efficiency was analyzed by means of analysis of operation headway in accordance with the deduced speed control code. This study will be used to design in case of getting an increase in speed for existing high speed line or new high speed line TCS.

**Keywords** : High Speed Railway Train Control System(TCS), ATC(Automatic Train Control), Block, Speed Control Code, Headway

**초 록** 경부고속철도는 운영환경(차량,구배,곡선,시설물 등)에 따라 궤도회로를 여러 개의폐색으로 분할하여 운행하는 고정폐색방식의 열차제어시스템으로 운행된다. 고정폐색방식 열차제어시스템은 선형열차의 점유폐색을 기준으로 진입/진출폐색속도, 목표거리, 감속도와 같은 운행정보를 차상열차제어장치로 전송하여 연속적으로 열차를 제어하는 방식으로, 경부고속철도 열차제어시스템은 열차가 해당 폐색의 진입/진출속도를 초과할 경우, 비상제동명령을 내려 열차의 안전한 운행을 보장한다. 본 논문에서는 안전한 운행을 위해 폐색에 할당되는 속도제어코드의 생성원리를 분석하여, 최고운행속도와 운행차량특성에 따른 속도제어코드를 도출하고, 도출된 속도제어코드에 따른 운행시각 분석을 통해 열차 운행효율을 분석하였다. 이와 같은 연구는 기존 고속철도의 증속 및 신규 고속철도 열차제어시스템 설계 자료로 활용될 수 있다.

**주요어** : 고속철도 열차제어시스템, 자동열차제어시스템, 폐색, 속도제어코드, 시격

## 1. 서 론

경부고속철도는 선형열차와 후속열차 사이에 일정한 공간(폐색)을 확보하여 열차의 안전운행을 보장하는 고정폐색방식으로 열차안전을 보장하고 있다[1,2]. 즉, 선형열차와 후속열차 사이에 할당된 폐색에는 열차의 제동성능 및 선로환경을 고려하여 열차의 안전운행을 보장하기 위한 제한속도가 할당되고, 기관사는 차상에 표시된 속도가이하로 열차를 제어해야 한다.

기관사의 취급오류 및 장치 오류로 열차의 속도가 해당 폐색의 진입/진출속도를 초과할 경우 차상열차제어장치(TVM430)는 비상제동명령이 내려 열차의 안전한 운행을 보장하게 된다. 경부고속철도의 경우, KTX차량의 상용제동거리, 즉 최고운행속도에서 정지하는데 필요한 거리가 6,000m이고, 단

위폐색의 길이가 1,500m일때, 선형열차와 후속열차 사이에는 4개의 폐색이 필요하며, 각 폐색에 할당된 속도제어코드는 300-270-230-170-000이다. 물론 실제 열차운영에서는 열차의 안전을 확보하기 위해 정지폐색과 과주어유거리 폐색을 포함하여 열차간격을 제어한다. 국내 고속철도는 경부고속철도가 최고운행속도 300km/h로 운영하고 있으며, 2014년 운영을 목표로 호남고속철도가 건설 중에 있다. 국내외 고속철도 증속수요가 증가함에 따라 기존 노선 및 신규고속철도의 최고운행속도가 기존보다 높아질 수 있다. 최고운행속도 증속을 위해서는 운행 가능한 차량의 개발과 더불어 인프라 구축이 핵심이 된다. 특히 열차의 안전운행을 보장하는 열차제어시스템은 최고운행속도와 차량에 따른 속도제어코드와 최적화된 폐색설계가 재 수행되어야 한다.

본 논문에서는 열차 이동을 운동방정식으로 모델링하여, 안전한 운행을 위해 폐색에 할당되는 속도제어코드 산출식을 도출하고, 경부고속철도에 사용중인 속도제어코드로 이를 검증하였다. 또한, 최고운행속도 증속(350km/h, 370km/h, 400km/h)과 운행차량특성(KTX, HEMU-400X)에 따른 속

<sup>†</sup>교신저자 : 한국철도기술연구원 지능형도시철도제어연구실  
E-mail : kmlee246@krri.re.kr

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 지능형도시철도제어연구실

도제어코드를 도출하고, 도출된 속도제어코드로 운행시격을 분석하였다. 이와 같은 연구는 기존 고속철도의 증속 및 신규 고속철도 열차제어시스템 설계를 위한 자료로 활용될 수 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 경부고속철도 열차제어시스템

경부고속철도의 경우, 차상장치는 궤도회로를 통해 열차 폐색진입시, 폐색진입/진출속도, 운행목표거리, 감속도의 운행정보를 전송 받아 Fig. 1과 같이 상용제동곡선을 생성하고, 정상상용제동곡선에 각 속도단계별 마진을 적용한 속도 제어곡선으로 열차의 과속주행을 감시한다. 즉, 기관사가 속도 제어곡선을 초과할 경우, 비상제동명령을 내려 열차의 안전한 운행을 보장한다. Fig. 1은 열차가 최고운행속도 300km/h로 운행 중에 정지신호를 수신했을 때, 상용제동곡선이다[2].

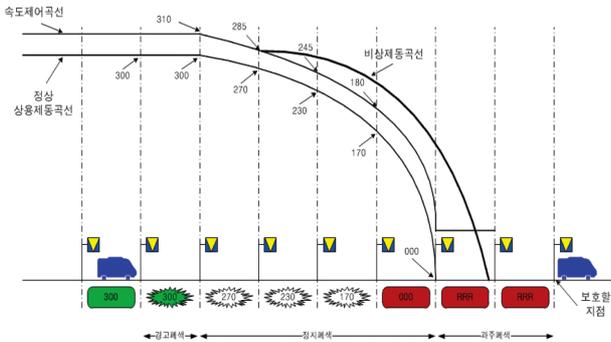


Fig. 1 Kyung-Bu high speed rail speed control code

### 2.2 경부고속철도 속도제어코드 설계 원리분석

#### 2.2.1 속도제어코드 원리 분석

열차의 속도변화에 따른 열차이동을 운동에너지법칙으로 모델링 하기 위해, Fig. 2와 같이, 평지에서 열차이동을 가정한다. 열차의 초기위치 A에서 속도는  $V_1$ , 거리는  $S_1$ , 중량은  $M$ 이고,  $S$ 만큼 이동 후 B지점에서의 열차 속도는  $V_2$ , 거리는  $S_2$ , 중량은  $M$ 이다. 이때, 평지를 고려하므로, 중력에 의한 위치에너지는 고려하지 않는다.



Fig. 2 Train movement model

A지점에서의 열차의 역학적에너지 :  $E_A = \frac{1}{2}MV_1^2$

B지점에서의 열차의 역학적에너지 :  $E_B = \frac{1}{2}MV_2^2$

열차이동에 따른 에너지 변화량 :  $E_B - E_A = \frac{1}{2}M(V_2^2 - V_1^2)$   
 (단,  $V_1 > V_2$ 일 때)

따라서, 열차의 이동에 따른 에너지 변화량은 다음과 같다.

$$W = \int_{S_1}^{S_2} F \cdot ds = \frac{1}{2}M(V_2^2 - V_1^2)$$

$$(V_2^2 - V_1^2) = \frac{2}{M} \int_{S_1}^{S_2} F \cdot ds \quad (1)$$

$$V_2^2 = V_1^2 + \frac{2}{M} \int_{S_1}^{S_2} F \cdot ds$$

위 수식 (1)을 고정폐색방식의 경부고속철도에 적용한 속도 제어코드 산출식은 수식 (2)와 같다.

$$V_{i(p)}^2 = V_{i(p+1)}^2 + \frac{2}{Md} \int_{s=0}^{s=Ltc} Effort(v) \cdot ds \quad (2)$$

- $V_{i(p)}$  : p번째 폐색에서의 진입속도
- $V_{i(p+1)}$  : p+1번째 폐색에서의 진입속도
- $Md$  : 열차의 동적 질량
- $Ltc$  : 기본폐색길이
- $Dtol$  : 열차의 총 제동거리
- $Effort(v)$  : 속도가 v일 때 상용제동력

식 (2)를 통해 알 수 있듯이, 고정폐색시스템은 열차의 제동을 위한 에너지를 폐색구간( $Dtol/Ltc$ )에 일정하게 분할한다. 속도제어코드 산출을 위해서는 초기속도, 질량, 제동력, 기본폐색길이에 대한 차량, 신호, 궤도특성이 요구되며, 이와 같이 고속철도 열차제어시스템은 관련분야의 특성을 반영하여 설계됨을 알 수 있다.

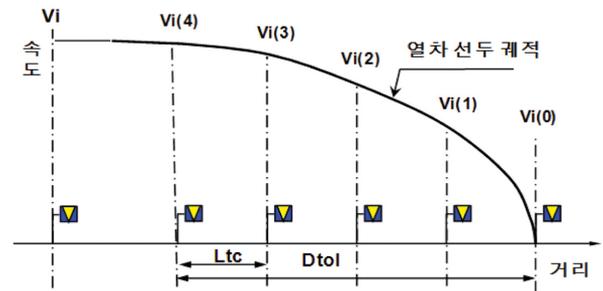


Fig. 3 Kyung-Bu high speed control curve

#### 2.2.2 속도제어코드 원리 검증

열차의 이동을 모델링하여 수립한 속도제어코드 산출식을 검증하기 위한 절차는 Fig. 4와 같다[3].

- 1) 1단계 - 속도제어코드 산출식 검증을 위한 입력조건
  - 최고운행속도 : 300km/h(경부고속철도 기준)
  - 운행차량 : KTX 20편성
  - 차량특성 : 질량, 상용제동력, 주행저항계수[4]
- 2) 2단계 - 속도제어코드 산출식 검증을 위한 열차모델
  - 열차 상용제동거리 : 6,000m[4]
  - 기본폐색길이 : 1,500m[4]
  - 상용제동을 위한 폐색 수 : 6,000/1,500=4[4]
  - 열차이동 모델 :  $V_{i(p)}^2 = V_{i(p+1)}^2 + \frac{2}{Md} \int_{s=0}^{s=Ltc} Effort(v) \cdot ds$  [5]

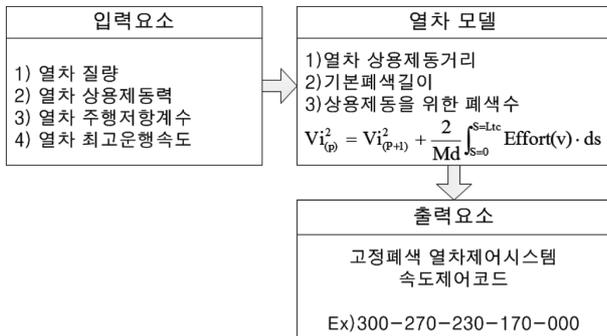


Fig. 4 The procedure of deducing speed control code

3) 3단계- 속도제어코드 계산

열차 이동모델식 수식 (2)에 경부고속철도 차량 및 신호 제원을 입력하여 계산하면 다음과 같다.

-  $p = 0$ 일 때,  $V_{i(0)}^2 = V_{i(1)}^2 + \frac{2}{Md} \int_{s=0}^{s=1500} Effort(v) \cdot ds$ ,

-  $p = 1$ 일 때,  $V_{i(1)}^2 = V_{i(2)}^2 + \frac{2}{Md} \int_{s=0}^{s=1500} Effort(v) \cdot ds$

-  $p = 2$ 일 때,  $V_{i(2)}^2 = V_{i(3)}^2 + \frac{2}{Md} \int_{s=0}^{s=1500} Effort(v) \cdot ds$ ,

-  $p = 3$ 일 때,  $V_{i(3)}^2 = V_{i(4)}^2 + \frac{2}{Md} \int_{s=0}^{s=1500} Effort(v) \cdot ds$

즉,  $p=0$ 일 때, 열차의 진출속도  $V_{i(0)}$ 를 기준으로,  $p = 1$ 일 때의 열차 진출속도,  $V_{i(1)}$ 를,  $p = 1$ 일 때, 열차의 진출속도,  $V_{i(1)}$ 를 기준으로  $p = 2$ 일 때의 열차 진출속도,  $V_{i(2)}$ 를,  $p = 2$ 일 때, 열차의 진출속도,  $V_{i(2)}$ 를 기준으로  $p = 3$ 일 때의 열차 진출속도  $V_{i(3)}$ 를,  $p = 3$ 일 때, 열차의 진출속도,  $V_{i(3)}$ 를 기준으로  $p = 4$ 일 때의 열차 진출속도,  $V_{i(4)}$ 를 역산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 각 폐색별 진출속도를 계산하면 000-158.57-221.90-264.08-300와 같다. 계산된 속도제어코드는 열차제어장치인 TVM차상장치에서 인식이 가능하도록 안전측으로 올림하여, 000-170-230-270-300으로 결정되고, 이는 경부고속철도 열차제어를 위한 속도제어코드와 동일함을 확인할 수 있다. 경부고속철도 차상장치에서 인식가능한 속도는 000, 30, 60, 80, 90, 100, 110, 130, 170, 230, 270, 300이다[6].

2.3 최고운행속도와 차량특성에 따른 속도제어 코드 도출

기존의 경부고속철도의 최고운행속도를 300km/h이상으로 증속하여 운행할 경우, 궤도회로또는 신규고속철도의 설계시, 차량특성과 최고운행속도의 변경에 따라 속도제어코드, 폐색 설계와 같은 열차제어시스템 기본설계는 재수행되어야 한다.

본 논문에서는 열차이동모델인 수식 (2)를 적용하여 최고운행속도는 300km/h, 350km/h, 370km/h, 400km/h이고, 증속에 따른 시설물(토목, 궤도, 노반)의 변경이 가능할 때, KTX, HEMU-400X 차량(현재 개발중) 특성에 따른 속도제

어코드를 도출하였다. HEMU-400X 차량의 경우, 차세대고속철도사업단으로부터 현재까지 개발된 차량특성정보를 입수하였으며, 관련 특성정보는 향후 갱신이 가능하다.

수식 (2)의 적용결과, 300km/h에서 350km/h로 증속했을 때, 두 차량 모두 속도제어단계 330, 350이 추가되고, 370km/h으로 증속했을 때, 330,350,370이 400km/h로 증속했을 때, KTX의 경우, 330, 350, 370,400의 속도제어단계가 HEMU-400X의 경우 310, 340, 360, 380, 400 또는 330, 350, 370, 400, 또는 330, 350, 380, 400가 추가되어야 함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 경부고속철도에 가장착된 열차제어시스템과의 호환성을 고려한 것으로, 기존의 속도코드를 그대로 유지하면서, 필요한 속도제어단계만 추가하였다.

Table 1 Speed control code to Max.speed and rolling stock

Max. speed	Rolling stock	Speed Control Code
300km/h	KTX	300-270-230-170-000
	HEMU-400X	300-270-230-170-000
350km/h	KTX	350-330-300-270-230-170-000
	HEMU-400X	350-330-300-270-230-170-000
370km/h	KTX	370-350-330-300-270-230-170-000
	HEMU-400X	370-350-330-300-270-230-170-000
400km/h	KTX	400-370-350-330-300-270-230-170-000
	HEMU-400X	400-370-350-330-300-270-230-170-000(1) 400-380-350-330-300-270-230-170-000(2)

2.4 속도단계에 따른 운행 시격 계산

운전시격은 비점유 궤도에서 연속으로 주행하는 두 대의 열차 사이의 최소 시간이다. 전체 거리에 걸쳐 열차가 비점유 궤도에서 주행할 때, 열차는 신호 시스템에서 어떠한 제한 정보도 수신하지 않는다. 거리상으로 열차가 단독으로 있을 때와 같다. 따라서, 운전시격 계산을 위해, 아래와 같은 항목을 고려해야 한다.

- 열차가 보호해야 할 지점의 위치
- 열차의 안전운행을 위한 정지거리
- 기관사가 반응시간(기관사가 충분히 예상하여 정지하도록 알려주고 기관사가 당황하지 않고 감속 명령을 내리기 적합한 시간으로 정지명령을 받으며, 기관사는 진입을 차단하고 제동 명령을 내린다).

고정폐색방식의 TVM430 시스템의 운전시격은 열차와 열차사이의 폐색구간의 개수로 결정된다. 따라서, 운전시격거리는 경고폐색구간을 고려하여 경고(주의)폐색거리+정지폐색길이+과주거리+열차위치+열차길이를 합산한 거리가 된다. 또한 운전시격을 시간단위로 산출하기 위해서는 최대운행속

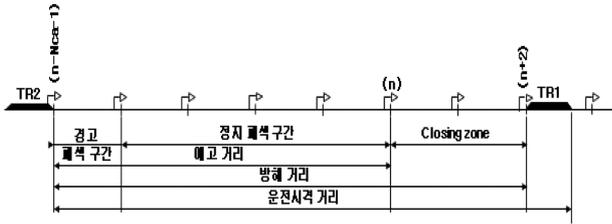


Fig. 5 TVM430 system headway

도의 95% 속도와 제한속도수신, 차상장치연산, 기관사반응, 제동실행시간 15초의 운행여유시간을 고려하여야 한다[7].

$$\text{시격} = \frac{(\text{주의폐색길이} + \text{정지폐색길이} + \text{과주거리} + \text{열차위치} + \text{열차길이})}{\text{최대운행속도} \times 0.95} + \text{여유시간} \quad (3)$$

최고운행속도 300km/h의 KTX시격은 다음과 같이 계산할 수 있다.

운전시격 = 137.5초 + 15초(여유시간) = 152.5초  
 여기서 : 주의폐색길이 ; 1,500m  
 : 정지폐색길이 ; 1,500m×4개 (300-270-230-170-000)  
 : 과주거리 ; 1,500m  
 : 열차위치 ; 1,500m  
 : 열차길이 ; 388m  
 : 최고운행속도 ; 300km/h(83.33m/s)  
 : 여유시간 : 제한속도수신, 차상장치연산, 기관사반응, 제동실행시간 등 : 15초

따라서 표 1에서 계산된 속도제어코드를 기반으로 식 (3)을 이용하여 운행속도 및 차량에 따른 운전시격을 다음과 같이 분석하였다(단, 한 폐색당 길이를 1,500m으로 동일하게 계산하였다).

최고운행속도와 차량에 따른 운전시격을 계산한 결과, 모든 조건에서 운전시격은 경부고속철도의 운전시격 요구사항인 3분이내를 만족하며, 열차 안전거리를 유지하기 위한 폐색의 수가 증가할수록 운전시격이 증가하였고, 신규개발중인 HEMU-400X차량을 운행했을 때 운전시격이 더 짧아짐을 확인할 수 있었다.

Table 2 Headway to Max.speed and rolling stock

Max. speed	Rolling stock	Num of block	Headway	비고
350km/h	KTX	9개	165.4초	운전시격 3분 이내
	HEMU-400X	9개	163.3초	
370km/h	KTX	10개	172.6초	
	HEMU-400X	10개	170.6초	
400km/h	KTX	11개	175.0초	
	HEMU-400X	11개	173.1초	

### 3. 결 론

본 논문에서는 열차이동을 운동에너지 법칙을 수학 모델링하여, 고속철도 열차제어시스템 속도제어코드를 도출하고, 경부고속철도를 대상으로 검증을 수행하였다. 또한 검증된 산출식을 이용하여 차량의 특성, 최고운행속도에 따른 속도 제어코드 및 운전시격을 분석하였다. KTX, HEMU-400X차량을 대상으로 최고운행속도를 300km/h에서 350km/h로 증속했을 때, 두 차량 모두 속도제어단계 330, 350이 추가되고, 370km/h으로 증속했을 때, 330,350,370이 400km/h로 증속했을 때, KTX의 경우, 330, 350, 370,400의 속도제어단계가 HEMU-400X의 경우 310, 340, 360, 380, 400 또는 330, 350, 370, 400, 또는 330, 350, 380, 400가 추가되어야 함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 경부고속철도에 기 장착된 열차제어시스템과의 호환성을 고려한 것으로, 기존의 속도 코드를 그대로 유지하면서, 필요한 속도제어단계만 추가하였다. 또한, 운전시격은 경부고속철도의 운전시격 요구사항인 3분이내를 만족하며, 열차 안전거리를 유지하기 위한 폐색의 수가 증가할수록 운전시격이 증가하였고, 신규개발중인 HEMU-400X차량을 운행했을 때 운전시격이 더 짧아짐을 확인할 수 있었다.

속도제어코드는 고정폐색 열차제어시스템 설계를 위한 기본 요건으로, 속도제어코드를 이용하여, 고속철도 열차제어시스템의 기본설계인 폐색분할을 수행할 수 있다. 따라서, 기존의 경부고속철도 증속 및 신규 고속철도 건설시, 본 논문에서 수립한 속도제어코드가 활용될 수 있으며, 본 논문의 연구성과를 기반으로 고속철도 폐색분할에 대한 연구를 수행할 것이다.

폐색분할설계는 궤도회로 기반의 고속철도 열차제어시스템 기본설계과정으로써, 폐색분할설계 결과를 바탕으로, 설계노선의 열차제어시스템 상세설계가 수행되며, 필요한 궤도회로(폐색) 및 지상신호장치의 수량산정이 가능하다. 이는 설계노선의 토목특성과 운행될 차량의 제동/전인특성 그리고 운영될 신호 특성을 이용한 열차이동에 대한 모델링을 통해 수행되므로, 기존 고속철도 노선의 개량설계 및 신규 고속철도 노선의 폐색분할설계를 위해서는 해당 노선에 대한 토목, 차량, 신호특성에 대한 정보가 반드시 필요하다. 폐색분할 설계방법은 기존 고속철도 개량시 폐색변경 및 신규 고속철도 노선에 대한 폐색분할에 활용될 수 있으며, 이를 통해 운영기관에서는 합리적인 설계비용을 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

[1] Y.S. Cheon, S.H. Ahn, C.S. Kim (2010) A Study on the Driving Regulation of the Urban Railway Electric Multiple Units with Block Systems Block system, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(1), pp. 92-98.  
 [2] ATC Functional Description (2004) Ansaldo STS.  
 [3] S.H. Chang, G.Y. An, J.H. Lee, K.M. Lee (2010) A Study on

Speed-Up Technology for Train Control System of High Speed Line, 2010 Autumn conference, pp. 202-202.

[4] Interface Specification IAN09A (2009) Ansaldo STS.

[5] Blocksection Function Description (2007) Ansaldo STS.

[6] System parameters TGV Coree (2003) Ansaldo STS.

[7] Project LGV350 Coree du Sud Expertise/Conseil, SNCF-I. 2010.

접수일(2011년 10월 14일), 게재확정일(2011년 12월 16일)