고속철도 폐색분할 설계를 위한 요구사항 도출

이강미*, 신덕호*, 이재호*, 윤태구*
*한국철도기술연구원 열차제어통신연구실
e-mail : kmlee246@krri.re.kr

The Requirement Elicitation for Block Section Design of The High Speed Train

Kang-Mi Lee*, Ducko Shin*, Jae-Ho Lee*, Tae-Goo Yoon*
*Train Control & Communication Department,
Korea Railroad Research Institute

요 약

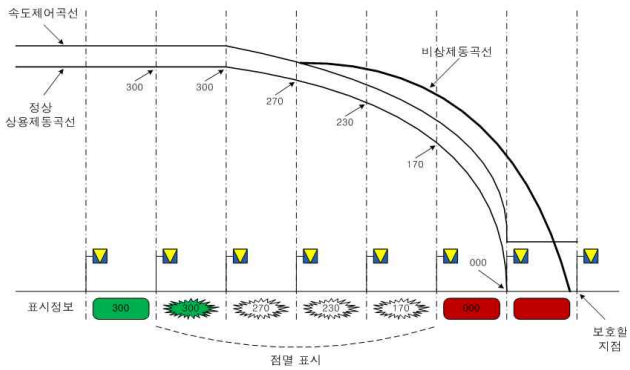
본 논문에서는 고속철도 폐색분할 설계를 위한 요구사항을 도출하였다. 경부고속철도 열차제어시스템은 고정폐색방식으로 KTX가 차량의 물리적 특성, 선로환경 등을 고려하여 분할된 폐색구간을 진입할 때, 선행열차의 점유폐색을 기준으로 궤도회로로부터 해당폐색의 열차 진입/진출속도, 운행가능거리, 감속도 등의 운행정보를 전송받는다. 그리고 차상열차제어시스템은 지상에서 수신한 운행정보를 통해 열차제어곡선을 생성하고 열차가 해당폐색의 기준속도를 초과했을 경우, 비상제동명령을 내려 열차의 안전한 운행을 보장한다. 폐색분할은 열차의 안전한 운행을 위해 고정폐색방식에서 수행되는 기본설계로, 폐색분할 설계 결과는 궤도회로를 비롯한 지상열차제어장치의 수량을 산정하는 기준이 된다. 따라서 본 논문에서는 최고운행속도 300km/h로 운행하는 경부고속철도 폐색분할 설계를 기준으로 폐색분할을 위한 입력요구사항에 대해 분석하였다.

1. 서론

1.1. 고속철도 열차제어시스템 분석

고속철도는 고속으로 주행하는 열차의 안전을 보장하기 위한 고정폐색방식을 채택하였다. 고정폐색방식이란, 열차가 운행할 수 있는 선로를 운행환경에 따라 일정길이, 즉, 폐색구간으로 분할하여, 분할된 폐색에 열차가 운행할 수 있는 속도시퀀스를 할당하여, 열차의 안전운행을 보장하는 방식이다. 경부고속철도의 열차제어시스템인 ATC(Automatic Train Control)는 선행열차의 궤도점유폐색을 기준으로 후속열차에 진입/진출속도, 운행목표거리, 감속도 등의 운행정보를 전송하여, 열차간 안전하고, 효율적인 운행을 보장한다. 이러한 폐색구간은 대상구간에 운행하는 차량의 제원, 운영적인 측면의 최고운행속도, 궤도 및 신호측면의 기본궤도특성에 의해, 계산된 속도시퀀스에 의해 분할되고, 분할된 폐색의 안전 및 운행시격 또한 속도시퀀스에 의해 검증되야한다.

본 논문에서는 경부고속철도 폐색분할을 위한 요구사항 즉, 증속 및 고속철도 개량시 폐색분할을 위해 고려해야할 항목을 도출하였다.



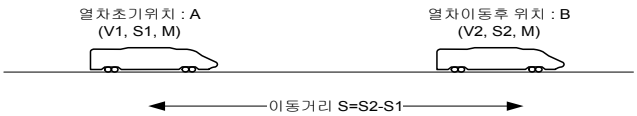
[그림 1] 경부고속철도 속도제어체계

2. 고속철도 폐색분할설계 분석

2.1. 고속철도 속도제어체계분석

고속철도 속도제어체계는 선행열차와의 안전거리를 유지하면서 안전하게 열차를 운행하기 위해, 각 폐색에 할당된 운행제한속도로, 경부고속철도의 경우 최고운행속도 300km/h에서 정지하기 위해 4개의 정

지폐색과 300-270-230-170-000의 열차속도제어체계로 운영된다. 경부고속철도 열차속도제어체계의 경우 기본폐색길이를 1500m으로 하고, 평지에서 KTX 차량이 최고운행속도 300km/h에서 정지하기까지 전체 상용제동거리를 균등한 운동에너지로 분할했을 때의 위치에서의 속도로 구성된다. 즉, 속도시퀀스는 평지에서의 열차의 이동에 따른 에너지 변화를 모델링하여 산출된다.[1]



[그림 2] 열차이동모델링

그림2는 평지에서의 열차이동을 모델링 한 것으로, 각 위치에서의 에너지는 운동에너지만으로 구성된다.(평지를 고려하므로, 중력에 의한 위치에너지는 존재하지 않는다.) 이때, 열차의 초기위치 A에서 속도는 V1, 거리는 S1, 중량은 M이고, 이동후 B지점에서의 열차 속도는 V2, 거리는 S2, 중량은 M이다. 열차가 S1에서 S2로 이동했을 때, 열차의 에너지 변화는 다음과 같다.

- A지점에서의 에너지 : $E_A = \frac{1}{2}MV_1^2$
- B지점에서의 에너지 : $E_B = \frac{1}{2}MV_2^2$
- 이동에 따른 에너지 변화 : $E_B - E_A = \frac{1}{2}M(V_2^2 - V_1^2)$

  (단, $V_1 > V_2$일 때)

따라서, 열차의 이동에 따른 에너지 변화량은 식(1)로 표현할 수 있다.

$$W = F \cdot \triangle S = \frac{1}{2}M(V_2^2 - V_1^2)$$

$$(V_2^2 - V_1^2) = \frac{2}{M}(F \cdot \triangle S)$$

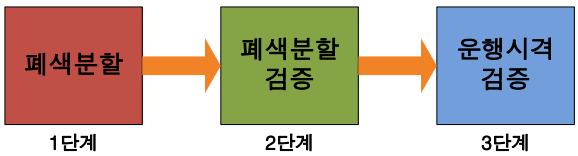
$$V_2^2 = V_1^2 + \frac{2}{M}(F \cdot \triangle S) = V_1^2 + \int_{S1}^{S2} F \cdot ds$$

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

식(1)과 같이, 열차의 속도시퀀스는 평지에서 열차가 상용제동시 에너지 방정식으로 모델링하여 산출할 수 있다. 따라서, 속도시퀀스 계산을 위해서는 열차의 최고운행속도, 열차의 질량, 기준폐색길이 및 상용제동력에 대한 데이터가 입력으로 요구된다.[2,3].

2.2. 고속철도 폐색분할 절차

궤도회로기반의 고정폐색방식은 이동폐색방식에 비해 운영효율성이 떨어지지만, 선행 차량과 충돌을 방지할 수 있는 고정안전거리(폐색)를 둠으로 열차의 안전운행을 보장한다. 폐색분할기술은 열차제어시스템 경부고속철도의 경우, 운행차량 물리적·제동특성 및 선로환경을 고려하여 속도제어체계에 따라 폐색을 분할하고, 열차제어시스템의 오류시나리오를 적용하여, 폐색분할의 안전성을 검증하고, 마지막으로, 경부고속철도의 운영시격목표만족을 위한 검증절차가 수행한다.



[그림 3] 폐색분할 절차

2.2.1 폐색분할

폐색분할길이(Lc)는 속도제어체계의 각 단계별 상용제동거리 Lcs(p), 제어제동길이 lck(p), 경고폐색길이 Lwarning의 길이는 이중 가장 긴 값으로 결정되고, 식(3),(4),(5)를 통해 산출된다.

$$Lc = MAX_{(p=1)} \quad (2)$$

$$Vi_{(p)}^2 = Vi_{(p+1)}^2 - \frac{2}{Md} * \int_{s=0}^{s=lcs(p)} Effort(v,s) * ds \quad (3)$$

$$lck_{(p)} = (tcapt + tbc) * Vci_{(p)} + \frac{Vci_{(p)}^2 - Vcf_{(p)}^2}{2 * (gfc_{(p)} + g*ptvm)} \quad (4)$$

$$Lwarning = (tcapt + tcond + tbs) * VA \quad (5)$$

각 변수는 아래와 같다.

- Md : 열차의 동적질량(정적질량+회전질량)
- $Vi_{(p)}$: p 폐색에서의 진입속도
- $Vi_{(p+1)}$: $p+1$ 폐색에서의 진입속도
- $V_{ci_{(p)}}$: p폐색의 진입제어속도
- $V_{cf_{(p)}}$: p폐색의 진출제어속도
- $Effort(v)$: 속도가 v일 때 열차의 상용제동력+주행저항
- $gfc_{(p)}$: 감속도
- $ptvm$: TVM차상장치에 코딩된 구배
- VA : 해당 폐색의 허용속도
- tcapt : 차상장치에 의하여 지상의 TVM정보를

수신하는 시간(초)

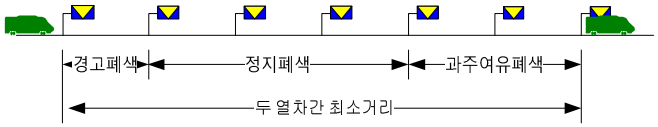
- tbc : 제어제동이 작용 개시되는 시간(초)
- tbs : 상용제동이 작용 개시되는 시간(초)
- tcond : 상용제동을 취급하기 위한 운전자의 반응 시간(초)

2.2.2 폐색분할검증

선로를 운행할 수 있는 모든 열차에 대해서 폐색구간분할이 안전성, 열차운전의 인간공학적 측면에서 성능제약조건들을 만족하는지에 대해서 검증하는 절차로, 인간공학적 제약조건들은 수행된 폐색구간분할이 열차를 인간공학적으로 운전하면서 상용제동력을 가지고 실행지점 앞에 모든 열차들을 정지시킬 수 있다는 것을 검증한다. 안전성에 대한 제약조건은 각각의 폐색분할지점과 각 종류의 열차형태에 대하여 가장 최악인 경우의 정지위치를 계산하고 그것이 보호지점(protected point)를 넘어가지 않는다는 것을 확인해야한다. 이를 위해 경부고속철도의 경우 주행계 오차, 속도계 오차, 폐색구간 진입시 메시지 불능시에 발생하는 비상제동으로 인한 과주거리 계산을 통해 폐색분할검증을 수행한다.

2.2.3 폐색분할검증

시격검증의 경우, 본선구간, 분기구간, 합류구간에서 주행하는 두 열차의 주행곡선을 통해 두 열차간 시격을 계산하여, 목표시격의 만족여부를 검증하는 절차로, 두 열차의 최소거리는 그림 3과 같다.



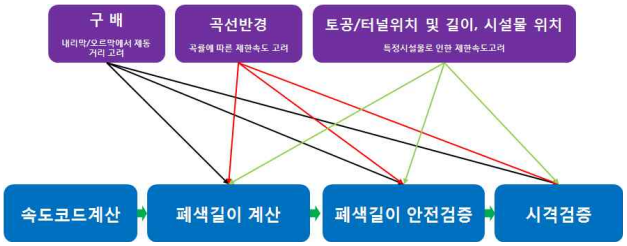
[그림 3] 시격검증을 위한 열차간 최소거리

3. 고속철도 폐색분할설계를 위한 입력요구사항

폐색분할기술은 열차제어시스템 경부고속철도의 경우, 운행차량 물리적·제동특성 및 선로환경을 고려하여 속도제어체계에 따라 폐색을 분할하고, 열차제어시스템의 오류시나리오를 적용하여, 폐색분할의 안전성을 검증하고, 마지막으로, 경부고속철도의 운영시격목표만족을 위한 검증절차가 수행한다. 3장에서는 2장에 폐색분할단계별 필요항목을 토목, 차량, 신호 특성별로 정리하였다.

3.1 설계노선의 토목특성

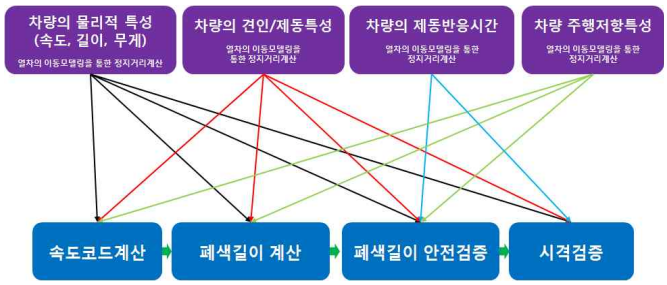
폐색분할을 위한 토목특성은 그림4와 같이, 구배, 곡선반경 및 토공/터널의 위치 및 길이, 시설물 위치에 대한 정보가 요구된다.



[그림 4] 설계노선의 토목특성

3.2 설계노선에 운행될 차량 특성

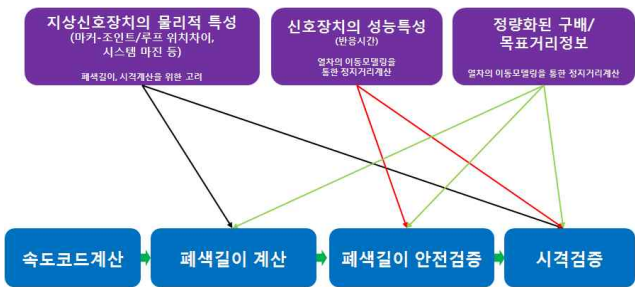
폐색분할을 위한 차량특성은 그림5와 같이, 차량의 물리적특성(속도,길이, 무게), 차량의 견인/제동특성, 차량의 제동반응시간, 차량의 주행저항특성에 대한 정보가 요구된다. 이는 식(1)을 비롯한 열차의 이동을 모델링하기 위한 요구사항으로, 특히 차량특성은 폐색분할설계를 위한 모든 단계에서 필수입력사항이다.



[그림 5] 설계노선에 운행될 차량특성

3.3 설계노선에 운행될 신호 특성

폐색분할을 위한 신호특성은 그림6과 같이, 지상신호장치의 물리적특성(마커-조인트/루프 위치차이, 시스템마진 등), 신호장치의 성능특성(반응시간), 정량화된 구배/목표거리정보가 요구된다.



[그림 6] 설계노선에 운영될 신호특성

4. 결론

폐색분할설계는 궤도회로 기반의 고속철도 신호시스템 기본설계과정으로써, 폐색분할설계 결과를 바탕으로, 설계노선의 신호시스템 상세설계가 수행되며, 필요한 궤도회로(폐색) 및 지상신호장치의 수량산정을 위한 필수과정이다. 이는 설계노선의 토목특성과 운행될 차량의 제동/견인특성 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.

참고문헌

[1] 이강미 외, “고속철도 속도시퀀스 산출방법에 관한 연구”, 2010년도 대한전기학회 춘계학술대회.
[2] ATC Funtional Description, "K631-31-E1141-AY+T-002", 2004.06
[3] Blocksection Function Description, “K631-319-E1280-AY+T003+K”, 2007.06
[4] Interface Specification IAN09A,“K690-0-IAN09-GL+T-001+K”, 2009.04