

다단계 속도제어를 위한 폐색구간 분할에 대한 최적화에 관한 연구 (I)

論 文

52B-8-5

A Study on Optimization of Block Sectioning for Step Speed Control (I)

李 鍾 宇*
(Jongwoo LEE)

Abstract - This paper is focused on an optimal block sectioning technique which are widely used in conventional railway system. We studied braking distance with pure train braking performance to generalize train braking. We tried to apply the braking distance to wayside signaling system to decide optimal block sectioning to reduce headway. The braking distances are obtained for 2 aspects, 3 aspects, 4 aspects and n aspects such that step speed control, are longer than the pure braking distance. We found an optimal solution with the generalized n aspects, and a minimum block distance for ATO mode.

Key Words : block, bstep speed control, optimal block length, aspects, braking distance

1. 서 론

열차는 레일 위를 고속으로 주행하고, 레일과 차륜간의 점착력이 작은 관계로 다른 육상 교통보다 제동거리가 길다. 또한 동일 궤도상을 주행을 하기 때문에, 충돌·추돌의 위험이 항상 존재한다. 연속해서 주행하는 2개 열차의 충돌·추돌을 방지하기 위해서, 후속열차가 선행열차의 후미에서 정지할 수 있는 제동거리를 항상 확보할 수 있도록, 열차간의 간격을 후속열차속도에 따라 조절을 한다. 열차의 제동거리는 열차의 속도와 제동성능, 구배 등 여러 가지 변수에 따라 결정되어 진다.

선행열차의 위치검지와 후속열차의 속도제어에 현재 가장 많이 사용하고 있는 방법은 궤도회로를 이용하여 궤도를 일정구간으로 전기적으로 분할하여 열차를 검지하고, 검지된 선행열차위치에 따라 후속열차의 속도를 제어한다. 이 검지 방법은 안전성이 뛰어나 가장 많이 활용되고 있다. 그러나 이 방법에 의한 열차의 점유위치는 궤도회로단위 즉 폐색의 단위로 하기 때문에 궤도회로의 길이가 바로 열차위치로 나타나기 때문에 열차의 간격을 미세하게 조절할 수 없다. 이 경우에 선행열차와 후속열차간의 안전한 제동거리는 점유된 폐색의 맨 끝점에 열차가 존재하는 것으로 간주하여 제동거리가 계산이 되므로 그만큼 많은 구간을 점유하게된다. 따라서 폐색길이는 작게하면 할수록, 열차운용 효율은 증가하게 된다[1]. 선로용량을 증가시키는 것은 선행열차의 후미로부터 얼마큼 제동거리를 축소하느냐에 달려있다.

폐색길이는 수송능력에 직접적인 영향을 미치므로, 최적화의 설계가 요구된다. 폐색길이의 설계는 구배, 에너지 절약, 선형과 선로 형태에 따른 속도의 제약, 폐색길이의 최소화에 의한 용량의 최대화를 고려해야 한다[2].

현재까지의 연구는 속도단계가 결정된 단계에서 폐색길이를 구하는 방법([1],[2],[3])이 도출되었으며, 주로 제동장치의 반응속도와 그에 따른 과주구간에 대한 연구가 수행되었다. 또한 ATO장치에서 장비의 단계별 운동속도에 대한 최적화가 수행되었다([4],[5]).

본 논문에서 제2장은 열차제동길이에 대해서 언급하였으며, 3장에서는 폐색길이 설정에 대한 일반식을 유도하였으며, 이 식에 의해서 2현시 신호가 가장 최적의 방식이라는 것을 입증하였으며, 최소 폐색길이를 제시하였다.

2. 열차의 제동거리

속도 v 로 주행중인 열차의 제동거리를 산정하기 위해서는 열차의 감속도와 감속도에 미치는 인자들을 고려해야 한다. 열차의 감속도는 열차의 차륜과 레일간의 마찰력에 의해서 1차적으로 결정되며, 선로의 기울기에 따라서 감속도가 가감이 된다. 열차의 감속도에 미치는 변수는 열차의 제동력, 선로의 기울기, 윤축과 레일간의 마찰력과 제동장치의 운동속도, 신호장치가 설치되어 있는 위치 등이 변수로서 결정이 된다. 감속도의 상한은 정상적인 제동인 경우에 승객의 승차감에 의해서 결정되며, 다른 열차와 충돌·추돌의 위험이 있는 경우에 시행하는 비상제동의 최대 감속도는 레일과 차륜의 마찰계수에 의해서 결정된다[1].

기본적인 제동거리 산출 식은 열차의 속도를 v_i 에서 v_{i+1} 로 감속을 할 때를 고려하여 다음의 식에 의해서 구해진다.

* 正 會 員 : 韓國鐵道技術研究院 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2003年 5月 8日

最終完了 : 2003年 6月 15日

$$D(v_i, v_{i+1}) = \frac{v_i^2 - v_{i+1}^2}{2a} + l_a \quad (1)$$

2.1 점착력 영향

열차를 정지시키기 위해 제동장치는 열차의 운동에너지를 열에너지 혹은 전기에너지로 변환을 한다. 따라서 최대 제동율은 차륜과 레일사이의 점착력에 비례한다. 그림 1은 휠과 레일사이의 점착력에 대한 실험결과이다[12]. 열차의 제동력은 열차의 성능에 따라 다르나 감속도로 표시를 하면은 비상제동의 경우는 $1.0m/sec^2$, 상용제동의 경우는 $0.4 \sim 0.7m/sec^2$ 범위이다[12]. 비상제동의 경우는 열차가 위험을 피하기 위해 최대 감속도를 얻는 경우이며, 상용제동의 경우는 승객의 승차감을 고려하여 선정된 값이다.

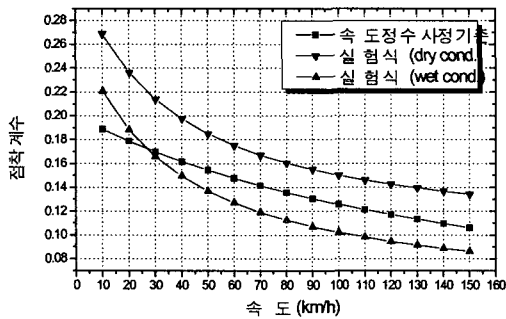


그림 1 휠과 레일사이의 점착력을 나타내는 곡선으로 점착력은 속도에 따라 감소하며, 휠과 레일사이의 건식 혹은 습식 상태에 따라 달라진다.

Fig. 1 Adhesion between wheel and rail is decreased with train speed increasement and is dependant on rail surface condition such as wet or dry.

따라서 감속도는 레일의 점착력에 따라서 달라진다. 그림 1에서의 점착력 곡선 일반식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu = \frac{c_1}{v+c_2}$$

c_1, c_2 : 상수

점착력 μ 과 제동력 a 의 관계는 다음의 관계가 성립한다.

$$\mu g > a$$

따라서 감속도는 $a < 9.8 \mu$ 이어야 한다. 그렇지 않을 경우에는 슬라이딩 혹은 슬립이 발생한다. 따라서 제동거리는 다음과 같이된다.

$$D(v_i, v_{i-1}) = \frac{v_i^2 - v_{i-1}^2}{2a(\mu)} \quad (2)$$

$a(\mu)$: 차륜과 레일의 점착계수 비를 고려한 감속도

2.2 제동장치 반응속도의 영향

제동력이 최대로 도달할 때까지는 감속도가 지속적으로 변한다. 감속도의 변화량(m/s^3)을 저크(jerk)라고 한다. 이것은 물리적 의미로는 충동률이라 한다. 가속도가 급격하게 변하면 승차감에 영향을 주어 승객이 불편하게된다. 고속철도의 경우는 $0.5m/s^3$ 으로 제한되어 있다. 감속초기에는 감속도 증가하여 최대 제동력에 도달하게 되고, 제동 끝 부분에서는 감속도가 감소한다. 감속도는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$a(t) = Jt, \quad t_r \leq t \leq t_r + t_j$$

$$a(t) = -Jt, \quad t_r + t_j + t_k \leq t \leq t_r + 2t_j + t_k$$

$$\text{if } a(t) \geq a_{\max}, \quad a(t) = a_{\max}$$

$$\text{if } a(t) \leq 0, \quad a(t) = 0$$

$$\Delta v = \frac{1}{2} J t_j^2 \quad (3)$$

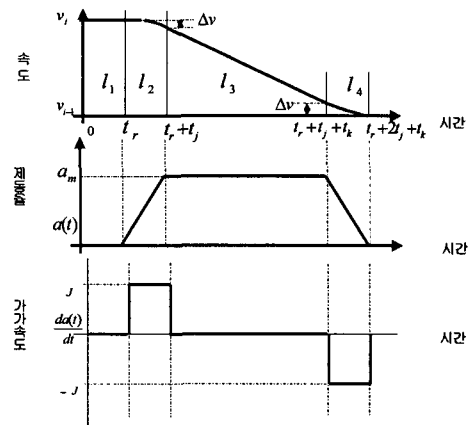


그림 2 속도변화곡선, 가속도 및 저크의 곡선을 나타내고 있다. 제동력이 최대의 경우는 제동력이 일정하다 (l_1 은 공주구간, l_2 와 l_4 는 제동력이 증감이 있는 구간, l_3 는 최대 제동력으로 제동을 하는 구간).

Fig. 2 The three curves represent speed change, acceleration rate and jerk curves, respectively. (l_1 : running distance during braking preperation, l_2 and l_4 is interval that braking forces is changing, l_3 is interval with maxim braking force).

그림 2는 속도변화곡선, 가속도 곡선이며 및 Jerk의 변화율을 나타내고 있다. 가속도의 변화에 따라 제동거리를 계산하는 식은 다음과 같다[3].

$$D(v_i, v_{i-1}) = l_2 + l_3 + l_4 = v_i t_r + \frac{a(\mu)}{2J} (v_i + v_{i-1}) + \frac{1}{2a(\mu)} (v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (4)$$

이 식은 열차의 제동거리를 구하는 가장 기본적인 식으로서 제동거리는 이 이상 단축할 수 없으며, 각 신호 시스템은 이 거리에 가깝도록 최적화를 하고 있다.

2.3 구배

열차의 제동력은 평지에서 고려한 값이다. 따라서 열차가 상향구배 혹은 하향 구배를 주행할 때에는 제동력을 가감을 하게된다. 선형에 따라 제동력에 영향을 미치므로 열차에서 같은 제동력을 인가하더라도 제동거리는 증감을 하게된다. 영국철도에서는 “W”과 “표준복합제동곡선”이라 하여 선로 구배에 따른 표준 제동 거리표를 사용하고 있다[1]. 위에 식에서 구배는 제동력에 해당하는 것으로 $g \cdot G$ 으로 표시할 수 있다. g 는 중력가속도, G 는 평균구배를 나타낸다. 따라서 위의 제동거리 표시 식을 구배를 고려하면은 다음과 같이 된다.

$$D(v_i, v_{i-1}) = \frac{(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))}{2J}(v_i + v_{i-1}) + \frac{1}{2(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))}(v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (5)$$

l_d : 제동 시작 후 주행한 거리

g : 중력가속도

$G(l_d)$: 제동 후 l_d 에서 평균 구배

평균 구배는 폐색구간에서 연속적으로 변하게 되기 때문에, $D(v_1, v_2)$ 의 값은 trial and error 방법에 의해서 평가하여야 한다.

2.4 공주시간

실제에 있어서 제동장치는 기관사의 지상신호의 인지 혹은 지상신호를 차상에서 수신하여 처리하여 제동을 체결하는 데에는 약간의 시간 t_r 을 필요로 한다. 이는 공주시간으로 정의되며 다음 식으로 표시된다.

$$D(v_i, v_{i-1}) = t_r \cdot v_i + \frac{(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))}{2J}(v_i + v_{i-1}) + \frac{1}{2(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))}(v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (6)$$

$l_1 = t_r \cdot v_1$

t_r : 기관사 반응시간

v_1 : 기관사 반응시간동안의 주행속도

2.5 과주거리(overrun)

과주구간은 정지신호 지점을 과주 할 수 있는 가능성에 대비하여 약간의 안전여유를 준비하여 놓은 것이다. 선행열차의 후미가 과주구간을 완전히 벗어나기 전에 신호상태를 바꿀 수 없다는 것을 의미한다. 보통 과주구간이 축소되는 곳은 열차의 운행이 저속으로 운행되는 곳으로 운전자에 의해서 허용되는 곳이다. 일부 철도에서는 열차정지는 열차 신호를 통과하여 위험한 상태 시에 비상제동을 인가하는 지점에 설치된다. 경고신호가 없는 시스템에서는 여유구간은

최대속도에서 비상제동거리에 30%의 안전계수를 고려하여 설정한다. 이러한 경우 여유구간은 실제로는 과주구간으로 주어진다. 최대 진입속도에 대한 최소 과주거리는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D(v_i, v_{i-1}) = (1 + \alpha)(t_r \cdot v_i + (\alpha\mu) + \frac{g \cdot G(l_d)}{2J}(v_i + v_{i-1}) + \frac{1}{2(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))}(v_i^2 - v_{i-1}^2)) \quad (7)$$

α : 안전계수

2.6 제동거리의 일반화

위에서 언급한 제동식(7)을 고려하여 제동거리에 영향을 미치는 것은 제동력, 점착계수, 구배, 공주거리 및 안전여유 등의 변수가 영향을 미친다. 그림 2에 식 (7)을 고려하면 최소과주거리는 다음과 같이 다시 표시할 수 있다.

$$D(v_i, v_{i-1}) = (1 + \alpha)(l_1 + l_2 + l_3 + l_4) + (1 + \alpha) \left(t_r v_i + \frac{\alpha\mu + g \cdot G(l_d)}{2J}(v_i + v_{i-1}) + \frac{1}{2(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))}(v_i^2 - v_{i-1}^2) \right) \quad (8)$$

이 식을 간단히 하기 위하여 α 를 1로 하고, 가속도 값은 대표 값 a_s 로 치환하면 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(v_i, v_{i-1}) = t_r v_i + \frac{a_s}{2J}(v_i + v_{i-1}) + \frac{1}{2a_s}(v_i^2 - v_{i-1}^2) \quad (9)$$

a_s : $(\alpha\mu + g \cdot G(l_d))$ 을 나타내는 평균 값

a_s 의 값은 0.4 ~ 1.0 m/s^2 범위에 있다[6].

3. 다단계 속도제어 방법[1]

열차의 운행허가는 정지, 통과와 신호로 가능하며, 통과 신호는 열차가 허용최대 속도로 주행할 수 있다. 신호시스템을 이용하여, 열차를 최고속도로 주행하기 위해서는 선행열차를 검지하고 선행열차 후미에서 후속열차 선두까지의 거리는 제동거리보다 크거나, 최소한 같아야한다. 그림 3은 2현신호를 이용하여 열차의 제동거리를 나타낸 것이다. 정지신호 인지거리는 열차의 제동거리보다 커야한다. 그렇지 않으면 선행열차와 충돌할 위험이 있다. 열차의 운행속도가 높아지면 제동거리가 길어지므로 정지신호 인지거리도 커져야한다. 그러나 사람이 인지하는 정지신호인지거리는 속도가 빠를 수록 작아진다. 정지신호라고 판단하는 데 필요한 시간은 거의 일정하지만, 정지신호를 판단하는 동안의 열차의 공주거리는 커지기 때문이다. 속도가 향상됨으로서 지상신호의 인지거리를 짧게 하기 위한 반복신호나 다단계신호를 사용한다.

정리 1 : 최적의 열차제동거리는 공주거리 s 와 열차길이 L 를 최소한으로 하는 것이다.

증명 : 열차의 제동거리 $D_{brake} = s + D + o + L$ 에서 D는 승차감에 의해서 결정이 되고, 과주거리 o는 규정에 의해서 결정이 된다. 공주거리 s는 신호기에 따라서 결정이 되고, 열차길이 L은 $L = l_f(\text{열차길이}) + l_{ta}(\text{폐색의나머지부분})$ 으로 나누어진다. s와 l_{ta} 를 최소화하는 것이 제동거리 D_{brake} 를 최소화하는 것이다.

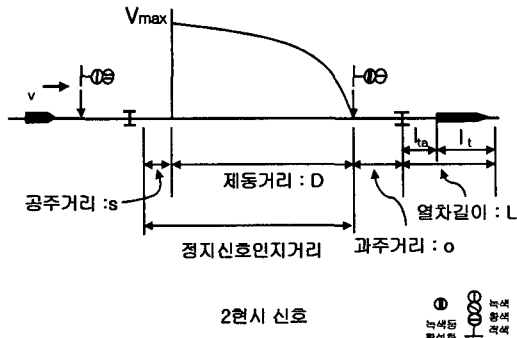


그림 3 2현시 시스템에서는 열차의 최고속도는 신호기의 현시 거리에 따라 결정된다. 최고속도를 향상시키기 위해서는 2현시의 경우 반복신호기를 추가한다.

Fig. 3 The maximum running speed for 2 aspects signaling system is dependant on signaling visible sight distance. A repeat signal is required for increasing the maximum operational train speed of 2 aspects signaling system.

3.1 다단계신호 및 다단계신호 수의 결정방법

열차의 속도제어는 정지, 통과로 제어할 수 있다. 이는 지상의 신호를 이용하여 열차속도에 따라 제동거리를 확보하여야 한다. 열차가 진행함에 따라, 신호시스템은 열차의 속도에 따라 안전거리를 확보해야 한다. 그림4에서는 열차가 제동을 체결하는 지점을 기준으로 한 열차제동거리와 신호에서 폐색을 기준으로 한 제동거리를 나타내고 있다.

신호기를 설치하여 신호기에 의해서 필요한 제동거리 D_{signal} 는 열차제동거리 D_{brake} 와는 다음과 같은 관계가 성립하여야 한다.

$$D_{signal} > D_{brake} \quad (10)$$

각 신호기 현시별로 고려한 열차의 제동거리 D_{signal} 는 다음과 같다.

(1) 2현시

2현시에서의 제동거리는 2개 신호기간의 거리가 열차의 제동거리가 된다. 그림 5(a)에서와 같이 신호기의 거리(d), 신호기 가시거리(s), 과주거리(o) 및 열차거리(L)가 열차의 제동거리가 된다.

$$D_{2aspect} = s + d + o + L \quad (11)$$

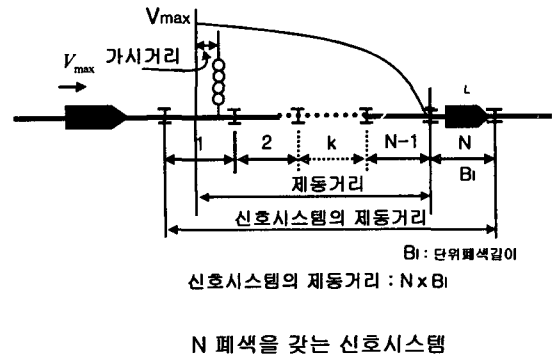


그림 4 N현시 시스템은 제동거리를 N개의 다단계 속도로나누고, 각 단계에 따라 제동을 한다. Fig. 4 N aspects signaling system is to divide braking distance into N step speed signals and braking is performed out to N step speeds.

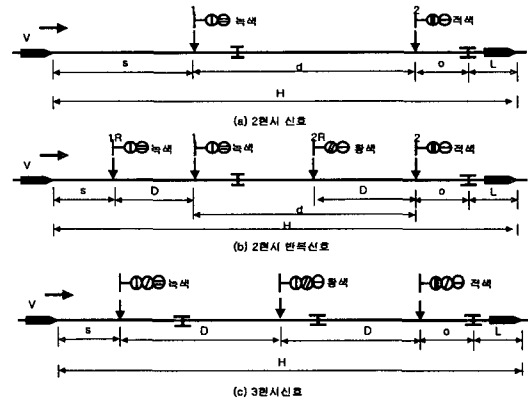


그림 5 (a)2현시, (b)2현시반복 및 (c) 3현시 신호 : 위 그림의 2현시는 통과, 통과, 정지, 정지를 순서를 표시하였으며 3현시 신호는 통과, 주의 및 정지 신호를 나타낸다.

Fig. 5 (a) 2 aspects signal (b) 2 aspect with repeater (c) 3 aspects signal : The above figures signal represent pass, pass, stop and stop for 2 aspects and pass, warning and stop signal for 3 aspects.

(2) 2현시 반복신호

2현시 신호기는 기관사가 가끔 신호기를 무시하여 발생하는 사고가 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 2현시 반복신호를 사용한다. 2현시 반복신호는 2개의 신호기를 중복으로 설치한다. 첫 번째 신호현시가 녹색신호이고, 다음 신호기가 적색일 경우에는 첫 번째 신호의 반복신호기는 녹색으로 표시하고, 두 번째 적색일 경우에는 반복신호기는 황색으로 표시된다. 그림 5(b)에서는 1R은 첫 번째 신호기의 반복신호기를 표시하고, 2R은 두 번째 신호기의 반복신호기를 나타낸다. 따라서 반복신호기의 제동거리는 다음과 같이 표시된다.

$$D_{2Aspect} = s + D + d + o + L \quad (12)$$

(3) 3현시

3현시의 신호기는 그림5(c)와 같이 2현시 반복신호기를 녹색신호기 자리에 위치를 하도록 한 것이다. 따라서 3현시 신호기의 제동거리는 다음과 같이 표시된다.

$$D_{3Aspect} = s + 2D + o + L \quad (13)$$

(4) 4현시

4현시 신호기의 경우에는 황색경보를 2개 두어서 열차의 속도를 단계적으로 제어하는 방법이다. 신호기의 설치는 그림 6의 (c), (d)와 같은 방법으로 설치될 수 있다. 따라서 각각의 제동거리는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$D_{4Aspect} = 1.5D + o + L + s$$

$$D_{4Aspect} = D + o + L + s \quad (14)$$

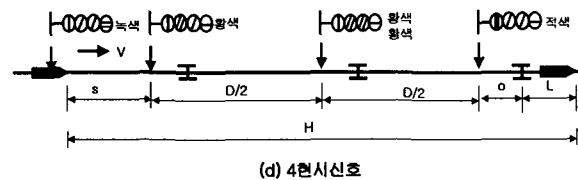
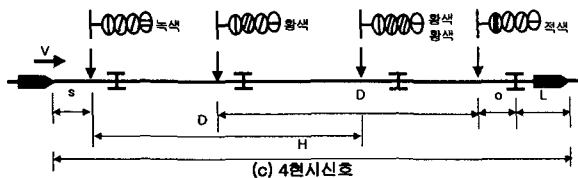


그림 6 4현시 신호의 속도제어 : 4현시 속도제어는 통과, 경계, 주의를 표시하고 있으며, 폐색길이에 따른 제동거리를 나타내고 있다.

Fig. 6 Speed control for 4 aspects : the figure represents pass, warning, double warning and stop 4 aspects signaling, and braking distance for the signaling system.

4현시 신호시스템의 경우에는 2가지 경우로 분류하여 볼 수 있다. 그림 (c)의 경우에는 각 폐색길이를 $D/2$ 로 설정하고, 신호를 녹색, 황색, 황색·황색 및 적색인 경우로서 신호 시스템에서 고려되는 제동거리는 $D_{4Aspect} = 1.5D + o + L + s$ 와 같이된다. 그리고 기관사가 황색신호를 인지하는 것에서부터 고려하면 제동거리는 $D_{4Aspect} = D + o + L + s$ 이 된다. 신호 시스템에서 실제의 제동거리는 $D_{4Aspect} = 1.5D + o + L + s$ 로 고려한다.

(5) n 현시

n 현시 신호시스템을 사용할 경우에는 열차제동거리 D 를 n 으로 나누는 것과 같다. 4현시에서 사용한 원리를 그대로 도입을 하면은 n현시 신호시스템의 제동거리는 다음과 같이 표시된다.

$$D_{nAspect} = s + D + \frac{D}{n} + o + L = s + \frac{n+1}{n} \cdot D + o + L \quad (15)$$

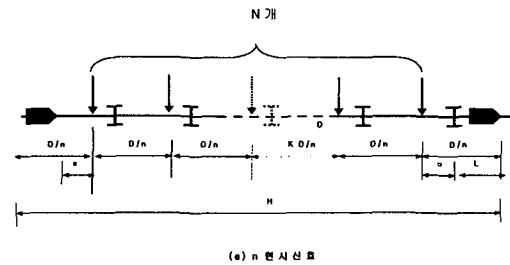


그림 7 n현시에서 제동거리를 계산하는 방법을 표시한다. Fig. 7 Braking distance calculation for n aspects

정리 2 : 폐색을 이용한 최적의 제동거리는 2현시 제동거리 $D_{2Aspect} = s + D + o + L$ 와 같다.

증명 : 증명은 식(15)를 이용하면 간단하게 증명이 된다. n이 무한히 커진 경우에는 $n+1 \approx n$ 이 되므로 위에 식은 다음과 같이 표시할 수 있다. 이 식은 2현시 형태와 동일한 형태를 갖는다.

$$D_{\infty Aspect} = s + D + o + L \quad (16)$$

3.2 다단계 제동패턴

다단계 속도제어장치는 열차의 속도제어를 이미 결정된 제한 속도에 따라가는 방식이다. 아래 그림8 에서와 같이 다단계를 나누어 진입속도와 진출속도를 제어한다.

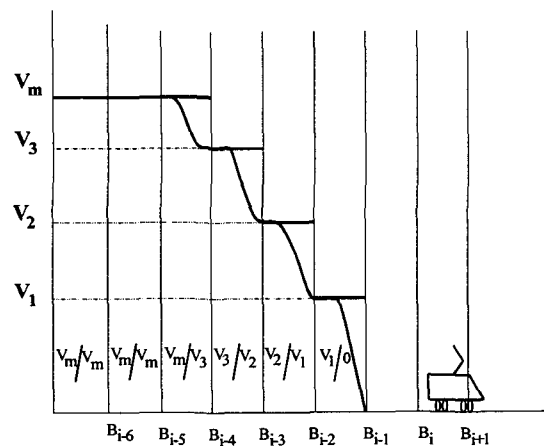


그림 8 다단계 속도제어를 이용한 ATO 운전 Fig. 8 ATO train control using multiple speed step

3.2.1 n의 최대 수

정리 2에서 속도제어 단계를 무한대로 늘리면, 1 단 제동이 최적 제동거리이다. 여기서는 가시거리 s 를 고려하지 않았다. 실제적으로는 가시거리를 고려하면은 n 수를 무한대로 늘릴 수 없다. 따라서 최적의 n 개를 구하는 것이 필요하다.

정리 3 : 최소 폐색구간 길이는

$$D(v_i, v_{i-1}) = t_r v_i + \frac{a_s v_i^2}{J} \quad (17)$$

이다.

증명 : n 의 수를 무한대로 하여, 제동거리 D_{signal} 를 나누면 폐색길이는 0에 수렴을 한다. 따라서 폐색길이가 0이 되면 진입속도 v_{in} 와 진출속도 v_{out} 는 $v_{in} \cong v_{out}$ 이 된다. 식

$$(9)에 이 값을 적용하면 $D(v_i, v_{i-1}) = t_r v_i + \frac{a_s}{2J}(v_i + v_{i-1})^2 + \frac{1}{2a_s}(v_i^2 - v_{i-1}^2)$ 이 되므로 폐색의 길이는 $D(v_i, v_{i-1}) = D_{bmin} = t_r v_i + \frac{a_s v_i^2}{J}$ 이 된다. 이것은 D_{bmin} 는 폐색구간에 반드시 필요한 길이에 해당이 된다..$$

최소폐색길이 D_{bmin} 은 정리 3에서 결정되었다. 따라서 제동거리 D_{brake} 에서의 최대 n 의 수는 다음과 같다.

$$n_{max} = \frac{D_{brake}}{t_r \cdot v_1 + \frac{a_s v_1^2}{J}} \quad (18)$$

3.3 폐색 n이 정해졌을 때 열차의 최적 진입 및 진출속도

각 폐색이 일정하게 나누어져 있을 때, 각 폐색의 진입과 진출속도의 최적 값을 식(9)를 이용하여 구하였다. 일정한 폐색이므로 $D_n = D_i = D_1$ 은 같다. 이 값을 만족시키는 $\{v_{max}, v_{max-1}, \dots, v_i, \dots, v_1, 0\}$ 을 구하였다.

$$D_n = t_r v_{max} + \frac{v_{max}^2 - v_{max-1}^2}{2a_s} + t_r(v_{max} + v_{max-1})$$

$$\dots$$

$$D_i = t_r v_i + \frac{v_i^2 - v_{i-1}^2}{2a_s} + t_r(v_i + v_{i-1})$$

$$\dots$$

$$D_1 = t_r v_1 + \frac{v_1^2}{2a_s} + t_r v_1$$

이 식은 v_{max} 이 정해지면 경우에 순차적으로 방정식을 풀면은 쉽게 답을 구할 수 있다.

위 식을 풀기 위해서 다음과 같은 값을 주었다. $t_r = 2.0\text{sec}$, $t_b = 1.47\text{sec}$, $a_s = 0.7\text{m/sec}^2$, $v_{max} = 83.3\text{m/sec}^2$, $n=4$ 의 값을 설정하여서 풀면 다음과 같다[10]. 이에 따른 결과는 표3으로 주어진다

표 1 이론적 계산 값과 서울-부산간 다단계 속도

Table 1 Step speed values from calculation and step speed values in KTVG signaling system.

속도(km/h)	v_{max}	v_1	v_2	v_3	v_4
경부고속 철도속도 값	300	270	220	170	0
실험값	300	261.11	213.61	148.4	0

이 값은 서울-부산간 고속철도에서 채용하고 있는 자동 열차제어장치의 단계별 속도설정속도와 근사적으로 일치한다[10].

4. 결 론

본 논문에서는 다단계속도제어의 최적제어 제동거리를 제시하였다. 열차제어에서 제동속도단계 세분화시키는 것에 의해서 선로의 용량증대를 기대할 수 있다. 다단계 속도제어에서 최적 값은 $D_{coast} = s + D + o + L$ 이며, 이것은 1단 제동제어와 동일한 형태이다. 열차제어의 안전성을 높이기 위하여 제동제어를 다단계로 하여 반복신호 혹은 단계 속도를 제시한다. 안전성을 높이기 위해서 다단계 속도제어에 의해서 제동거리가 부가적으로 증가하여, 선로용량이 증대된다는 이론과 반대가 된다. 최적제동거리를 확보하기 위해서는 1단 제동으로 하고, 안전성의 확보를 위해서는 부가적인 장치가 필요하다. 그리고 공주거리 s 및 열차길이 중 폐색길이 l_w 를 단축시키면 선로용량 증대효과가 있다. 따라서 효율적인 시스템은 공주거리 s , 열차길이 l_w 및 제동거리를 $\alpha D \cong D (\alpha \geq 1)$ 가 되도록 하여야 한다.

<기 호>

- α : 안전계수
- μ : 점착력
- a : 감속도
- a_{max} : 최대 제동력
- $a(t)$: t에서의 감속도
- $a(\mu)$: 차륜과 레일의 점착계수 비
- $a_s : (a(\mu) + g \cdot G(l_d))$ 을 나타내는 평균 값
- c_1, c_2 : 상수 d : 2개 신호사이의 거리
- D : 상용제동거리
- $D(v_i, v_{i+1})$: v_i 에서 v_{i+1} 로 감속에 필요한 제동거리
- D_{brake} : 열차순수제동거리
- D_{bmin} : 최소 폐색길이

- $D_{naspect}$: n 현시제동거리
- D_{signal} : 신호에서의 제동거리
- g : 중력 가속도
- $G(l_d)$: 제동 후 l_d 에서 평균 구배
- J : jerk
- L : 신호에서의 열차길이
- l_1 : 공주구간
- l_2 : 제동력이 증가 구간
- l_3 : 최대 제동력 구간
- l_4 : 제동력이 감소 구간
- l_a : 안전여유거리
- l_d : 제동 시작 후 주행한 거리
- l_t : 순수열차길이
- l_{ta} : $L-l_t$
- o : 과주거리
- s : 가시거리
- t_j : 감가속도의 증감시간
- t_r : 기기 응답시간
- v : 차량속도

[12] 최경진, '열차제동거리 기준치 설정에 관한 연구', 철도청, 1997

저 자 소 개



이 종 우(李鍾宇)

1959년 3월 20일생. 1983년 한양대학교 공과대학 기계설계과 졸업, 1986 Ecole Centrale de Nantes 석사, 1993 Unitversite de Paris VI 공학박사, 1994년~현재 한국철도기술연구원 전기신호본부 책임연구원

Tel : 031-460-5433

Fax : 031-460-5459

E-mail : jwlee@krri.re.kr

감사의 글

본 연구는 1996년도~2002년도 G7 고속철도개발사업에 의해서 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] O.S. NOCK, "Railway Signalling", A & C Black, London
- [2] 山口 欽一, 電氣鐵道要覽, 社團法人, 鐵道電化協會, 日本, 1972
- [3] D.C. GILL, et al, 'Computer based Optimization techniques for mass transit railway signalling Design, IEE Proceeding-B, Vol. 139, No. 3, May 1992 pp 261-275
- [4] 유상환, et al, '폐색구간설계 프로그램 개발', 고속철도연구보고서(전기분야), 1995, pp.261-307
- [5] 황희수, et al, '폐색구간설계 프로그램 개발', 고속철도연구보고서(전기분야), 1996 pp59~121
- [6] Guido Lauriks, 'Comfort in A Rail Transport Environment', Rail International, Feb. 2003
- [7] H. Yoshimura and S. Yoshikoshi, "Railway Signal", Japan Association of Signal Industries, 1983
- [8] Watanabe et al., technologies on safety and reliability of computerized railway signalling system, RTRI Internal report
- [9] CENELEC, "Eupopean Standards Railway Application - EN50126 and EN50129", 1997
- [10] KTGv Contracts, KHRC, part TCS, 1993
- [11] H. Fukohoka, Introduction to Safety Engineering on Railway, RTRI internal report