

운전시격의 계산 알고리즘에 관한 연구

A Study on Minimum Headway Calculation

이종우*
Jong-Woo Lee

정의진*
Eui-Jin Joung

황종규*
Jong-Gyu Hwang

정철범**
Chul-Beum Jung

ABSTRACT

Headway calculation is a important mean to evaluate railway system performance. A accurate headway calculation can be needed to headway reducing being achieved line capacity increasing by regulating signals spacing without any line construction. This paper introduced the theories and algorithms of calculating headways on wayside, multi step, one step braking and moving block signalling systems and showed some results of headways.

1. 서론

운전시격은 노선의 운용효율을 계산하는데 가장 중요한 요소이다. 수송력 증강의 하나로써 가장 효과적인 방법의 하나는 폐색을 세분화시켜 운전시격을 단축시키는 방법이 있다. 운전시격 단축기준의 평가는 최소운전시격이다.

운전시격의 계산은 비교적 간단하다고 할 수 있다[1][2][3][4]. 그러나 최적의 운전시격의 계산은 기관사의 습성, 각종 환경과 상황에 따라 열차의 동적특성 등이 달라지기 때문에 일률적인 최적의 값을 도출하기는 어렵다. 따라서 최소운전시격을 구하기 위해서는 각종 변수들을 고정시키고, 즉 기관사는 훈련을 통하여 일정수준을 유지하고, 차량은 유지보수를 통하여 일정상태이상을 유지시켜야 한다.

본문에서는 신호계통을 제외한 모든 변수는 불변이라 하여, 지상신호, 다단계신호, 1단제동, 이동폐색에 관한 운전시격의 알고리즘을 소개하였다.

2. 운전시격 계산이론

운전시격은 2개의 열차가 주행 시에, 후속열차가 선행열차의 신호에 연동되지 않고, 운전선도에 따라 주행할 수 있는 최소의 시간이다. 운전시격에 직접적인 영향을 미치는 것은 열차의 속도, 제동능력 및 열차 제어시스템에 따라 달라진다.

운전시격을 계산하기 위해서는

- 역 데이터 : 역명, 역 키로정

* 한국철도기술연구원 정회원

** 한국철도기술연구원 비회원

- 신호 데이터 : 신호명, 신호 키로징, 신호현시
- 운전곡선 데이터 : 운전곡선에 관한 데이터
- 차량 데이터 : 가감속도, 열차길이, 공주시간

등의 각종 데이터가 주어진 상태에서 지상신호, 다단계신호, 1단 제동, 이동폐색의 최소운전시각 계산을 한다.

본문에서는 열차의 제동능력과 구배에 대한 요소는 고정된 것으로 하고, 각각의 신호시스템에 대한 최소운전시각과 알고리즘에 대해서 소개를 한다. 제약 조건으로서는 각 폐색을 최고속도로 통과할 때는 통과시간이 일정하도록, 구배 및 곡선저항을 고려하여 폐색을 분할하였다고 가정한다.

2.1 지상신호방식

운전시각을 계산하기 위해서 현재 경부선에서 사용하고 있는 신호현시인 5현시(G, YG, Y, YY, R) 방식을 이용하였다. 그림 1은 5현시 지상신호에 대해서 단선 착발선에서의 최소운전시각을 계산한 예이다. 제4신호기는 장내신호기이며, 제5신호기는 출발신호기이다. 정상속도로 진입하는 열차는 제3신호기에서부터 제동을 인가하여야 한다는 가정을 한다. 장내에 열차가 있다면, 이 때에 후속열차는, YG현시로 되어 있는 제1폐색구간에 진입할 수 있지만, 제1폐색의 YG현시를 보고 제동을 체결하게되어, 운전선도에 따라서 운전을 할 수 없게 된다. 후속열차를 운전선도에 따라 운전할 수 있게 하기 위해서는, 후속열차가 제1, 제2 폐색신호기의 현시확인을 할 때, 선행열차의 후미부가 출발신호기인 제5신호기를 통과하여 6폐색에 진입하고, 신호현시 변화시간이 경과하여, 제6폐색의 신호기가 R이 되도록 한다. 후미가 제6폐색에 진입을 하면 제2신호기는 G로 변환된다. 최소운전시각은 열차의 후미가 완전히 제5폐색을 벗어난 상태, 즉 제6폐색에 진입한 상태시기와 역에 정차하기 위해서 제3신호기부터 제동을 체결하여 정지하는데 소요되는 시간 및 정차시간을 합한 값이다.

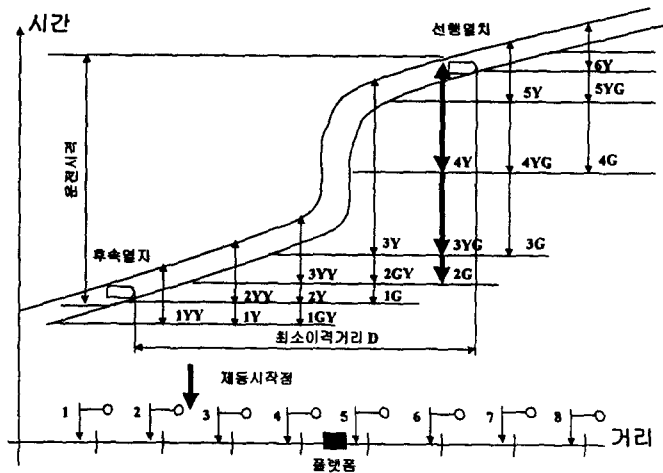


그림 1. 중간 역에서의 5현시 운전시각

그림 1의 D는 운전선도에 따라서 주행할 수 있는 최소 이격거리라 하고, 최소운전시각은 붉은 선으로 된 수직화살 표시선(4Y, 3YG, 2G)으로 표시되어 있다.

운전시격을 계산하기 위하여 필요한 시간을 그림 2에서 나타내었다.

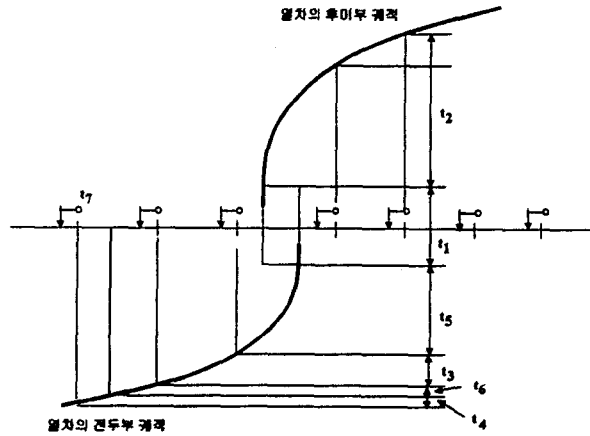


그림 2. 운전시격계산에 필요한 시간

- 역정차시간 : t_1
- 선행열차의 후미부가 정해진 폐색에 진입하는 시간 : t_2 (열차가 정상적으로 제동을 체결하기 전의 신호기가 보이는 곳에 도달하기 전에 G신호(2번 폐색)로의 변경에 필요한 시간, 즉 6번 폐색을 선행열차 후미부가 통과하는 필요한 시간)
- 제3폐색과 장내신호기를 통과하는 시간 : t_3
- 계획속도에서 감속에 필요한 거리를 계획속도로 주행하는 시간 : t_4
- 열차 전두부가 장내신호기의 내방에 진입 후 정차할 때까지의 시간 : t_5
- 공주거리시간 : t_6
- 신호현시변환시간 : t_7

등이 포함되어야 한다. 그림 2에서 고려한 것과 같이 최소운전시격은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{total} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 \quad \dots (1)$$

역과 역사이의 폐색에서는 열차가 속도제한 폐색 내에 접근을 하지 않으면 제동을 체결할 이유가 없으므로, 역과 역사이의 폐색구간에서의 운전시격은 폐색구간의 길이를 최대주행 속도로 나눈 것이 운전시격이다. 반면에 정차역을 고려할 경우, 식 (1)에서 나타난 것과 같이, 감·가속, 정차시간, 신호기 변환시간 등을 고려해야 하므로, 열차가 역에서 정차한 경우를 고려한 것이 운전시격이라 할 수 있다.

2개 열차사이의 운전시격은 다음과 같은 방법으로 구하여 진다. 각 변수들을 다음과 같이 정의한다.

- 신호현시종류 수 b_{vm}
- 각 폐색에서 허용된 속도 V_i
- 선행열차의 후미부가 i 번째 폐색통과시간 $t_{ahead,i}$

- 선형열차의 k번째 역 도착시간 $t_{ahead,k_stationarrive}$
- 후속열차의 후미부가 i번째 폐색통과시간 $t_{follow,i}$
- 후속열차의 전두부가 k 번째 역 도착시간 $t_{follow,k_stationarrive}$
- 후속열차의 $i-b_{vm}$ 폐색에서 발차시간 $t_{follow,i-bm}$
- 후속열차의 전두부의 i번째 폐색진입속도 $V_{follow,i}$

5현시의 경우는 $b_{vm} = 5$ 이며, $V_i = (V_{max}, V_1, V_2, V_3, 0)$ 으로 되며, i 폐색에 열차가 있는 경우는 $i-b_{vm}$ 의 신호기는 G를 현시한다. 속도를 감속해야 하는 폐색은 $i-b_{vm}+1$ 폐색이 된다. 따라서 최소운전시격은 다음과 같이 된다.

$V_{follow,i-bm+1} > V_1$ 일 경우 최소운전시격은

$$t_{total_1} = t_{ahead,i} - t_{ahead,k_station} + t_{follow,k_station} - t_{follow,i-bnum} + 1 \dots (2)$$

이다.

역 중간의 경우에 $t_{follow,k+1_stationarrive} > t_{follow,i+1} > t_{follow,i-bnum} > t_{follow,k_stationarrive}$ 일 때

$$t_{total_1} = t_{follow,i+1} - t_{follow,i-bnum} + 1 \dots (3)$$

이 된다.

$V_{follow,i-bm+1} < V_1$ 이라면, 후속열차는 G 현시에서도 1 폐색의 내방에도 계획속도로 진입할 수 있다. 이 때에 진입 가능한 폐색보다 1개의 폐색내방의 신호현시 R이라면, 공주시간을 포함하여 신호기 앞에서 정지할 수 있도록 후속열차의 감속 개시 점을 산출한다.

또한 다음의 현시가 R이 아닐 경우는 반복적으로 지속하여, 진입 가능한 폐색보다 1개일 때까지 지속한다. 이 때 $i-b_{vm}$ 의 후속열차의 발차시간을 $t_{follow,2,i-bnum}$ 라하고, 이 때의 최소운전시격 t_{total_2} 는 다음과 같다.

$t_{follow,i} > t_{follow,k_stationarrive} > t_{follow,2,i-bnum}$ 일 때

$$t_{total_2} = t_{ahead,i} - t_{ahead,k_station} + t_{follow,k_station} - t_{follow,2,i-bnum} + 1 \dots (4)$$

$t_{follow,k+1_stationarrive} > t_{follow,i+1} > t_{follow,2,i-bnum} > t_{follow,k_stationarrive}$ 일 때

$$t_{total_2} = t_{follow,i+1} - t_{follow,2,i-bnum} + 1 \dots (5)$$

이와 같은 방법으로 매 폐색마다 수행하여, 각 폐색과 열차에 대해서 최소운전시격을 구할 수 있다.

2.2 다단계속도제어

다단계속도제어 방식은 주행열차의 각 폐색구간 전방의 개통구간 수에 대하여 허용속도를 단계별로 정하여, 이것을 다단계신호로서 레일을 통하여 차상에 송신하며, 열차의 실제의 속도가 다단계 속도보다 큰 경우에는 자동적으로 제동이 인가되는 방식으로 되어있다.

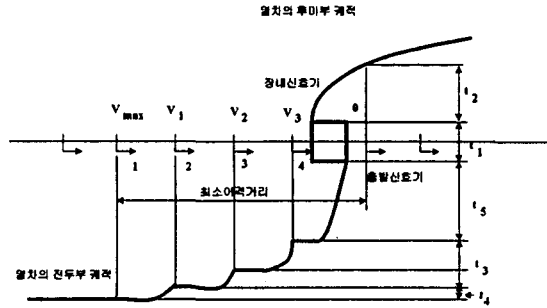


그림 3. 다단계 속도제어의 운전시격

그림 3과 같이 선행열차가 장내 폐색구간에 있을 때, 제1 폐색은 V_{max} 신호, 제2 폐색은 V_1 신호, 제3 폐색은 V_2 신호, 제4 폐색은 V_3 신호로 되어 있다. 이 때 후속열차는 최고속도로 V_{max} 신호구간에는 진입할 수 있고, V_1 신호구간에 진입에는 ATC 제동이 체결되며, 운전선도곡선에 따라 운전할 수 없게된다. 후속열차를 운전선도곡선에 따라, 운전시키기 위해서는, 후속열차의 선두부가 V_1 신호구간에 도달할 때, 바로 선행열차가 장내폐색구간을 통과하여, ATC 신호변화 시간이 경과하여 현시 하도록 하면 된다. 그림 3의 최소 이격거리가 되고, 최소운전시격 T_{total} 는

$$T_{total} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 \quad \dots (6)$$

이 된다.

다음에 시뮬레이션의 최소운전시격계산 알고리즘에 대해서 기술한다. 여기에서 i 번째 폐색에 열차가 있고, $i - b_{vm}$ 번 폐색의 속도신호는 V_1 으로 된다. $V_{follow, i - bnum} > V_1$ 이고, ATC의 신호변환시간을 1초로 한다면, 최소운전시격은 일 경우 최소운전시격 t_{total} 은 식 (6)에 의해

$$t_{follow, i+1} > t_{follow, k_stationarrive} > t_{follow, i - bnum}^{front} \text{ 일 때}$$

$$t_{total} = t_{ahead} - t_{ahead, k_station} + t_{follow, k_station} - t_{follow, i - bnum}^{front} + 1 \quad \dots (7)$$

$$t_{follow, k+1_stationarrive} > t_{follow, i+1} > t_{follow, i - bnum}^{front} > t_{follow, k_stationarrive} \text{ 일 때}$$

$$t_{total} = t_{follow, i+1} - t_{follow, i - b}^{front} + 1 \quad \dots (8)$$

이 되며, $V_{follow, i - bnum} < V_i$ 일 경우, 지상신호방식에서 설명한 방법과 동일하다 .

2.3 연속제동

운전시격 단축효과가 있는 효율이 높은 열차제어를 목표로 하는 새로운 보안 시스템의 하나인 1단계 제동방식이 진행되고 있다. 현행 신호방식과, ATC는 폐색단위의 열차검지를 행하고, 속도지시도 폐색단위로 단계적으로 행하고 있기 때문에, 그림 4와 같이 폐색구간마다 공주 및 여유 거리가 축적되어 제동거리가 길다.

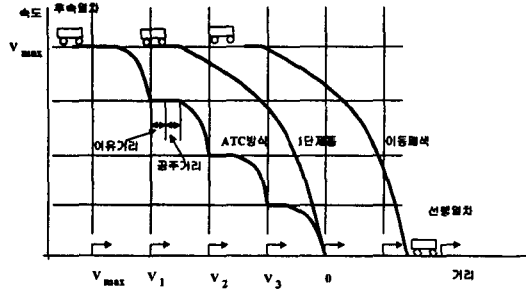


그림 4. 현행 ATC, 1단 제동 및 이동폐색의 제동거리 비교

반면에 1단 제동제어방식은 후속열차의 전방개통구간 수, 위치, 속도, 감속도 등의 정보를 이용한다. 선행열차가 있는 폐색구간의 앞에서 정지할 수 있도록 1단계 제동방법으로 감속 제어하는 방식으로, 각 속도단계에서 공주와 여유거리가 생략되어 제동거리를 단축할 수 있다.

선행열차가 있는 폐색구간에 대하여, 후속열차 상에는, 전방의 개통구간 수와 후속열차의 위치, 속도, 감속도 등에 근거하여 1단의 제동패턴을 발생시키고, 선행열차에 가깝게 접근하면 제동이 인가되어, 운전선도에 따르는 운전을 할 수 있게된다. 후속열차를 운전선도에 따라 운전할 때에는, 후속열차가 공주시간을 포함하여 선행열차가 있는 폐색구간의 바로 전에 정지시킬 수 있는 감속개시 지점에 도달할 때 제동을 인가하며, 바로 선행열차가 폐색구간을 벗어나면은, 제동곡선이 소멸 또는 경신되도록 한다. 그림 3의 최소 이격거리에서 여유거리와 공주시간을 고려되지 않는 최소운전시각 T_{total} 는

$$T_{total} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$$

이 된다.

이 때의 최소운전시각 계산방식은 식(4), 식(5)과 동일하게 고려되며, 선행열차가 i 번호 신호폐색이 있을 때, 공주시간을 포함된 그 폐색의 앞 50m에서 정지할 수 있는 후속열차의 감속 시작점을 구하고, 그 때의 후속열차의 발차 시간에서의 시간을 $t_{follow,2-i-bnum}$, 패턴 혹은 경신되는 시간을 1초로 하면, 최소운전시각 $t_{total,2}$ 은 2.1절에 나타난 변수를 사용하여

$$t_{follow,i} > t_{follow, k_stationarrive} > t_{follow,2-i-bnum} \text{ 일 때}$$

$$t_{total,2} = t_{ahead,i} - t_{ahead,k_station} + t_{follow,k_station} - t_{follow,2-i-bnum} + 1 \dots (9)$$

$$t_{follow,k+1_stationarrive} > t_{follow,i+1} > t_{follow,2-i-bnum} > t_{follow,k_stationarrive} \text{ 일 때}$$

$$t_{total,2} = t_{follow,i+1} - t_{follow,2-i-bnum} + 1 \dots (10)$$

로 된다.

2.4 이동폐색

이동폐색방식은 또한 선행열차의 위치와 속도정보를 이용하여, 선행열차의 후미부를 가상적인 폐색경계로 보아, 1단 제동에 의해 제어하는 방식으로서, 가장 짧은 운전시각이 실현될 수 있는 이상적인 열차제어방식이 된다.

다음의 이동폐색 방식에서의 최소운전시격을 구하는 것에 대하여 기술한다. 1단 제동방식에는 선행열차가 있는 폐색구간 마다, 최소운전시격을 계산하기도 하고, 이동폐색방식에서는 폐색구간의 길이를 0m로 보고, 선행열차 전체의 위치에 대한 최소운전시격을 계산한다. 본 시뮬레이터에서는 선행열차의 1초마다의 위치에 대하여 최소운전시격을 구한다. 단 선행열차는 감속도가 무한대로 정차하는 것(탈선)에 의해 나타나는 것은 없는 전제를 세워, 선행열차의 속도는 고려하지 않는다. 즉 선행열차의 속도와 연계해서 속도제어를 하지 않는다. 최소운전시격은 1단 제동과 동일하나 양단의 폐색의 여유거리를 제하고 계산한다.

이 때의 최소운전시격 계산 알고리즘은 선행열차가 발차 시의 t 초 후에 있는 선행열차의 위치에서, 공주시간을 포함한 그 선행열차후부의 50m에 정차할 수 있는 후속열차의 감속개시지점을 구하고, 그 때의 후속열차의 발차 시에서의 시간, 후속열차가 선행열차의 위치에 도달하는 발차 시에서의 시간, 패턴이 소거 또는 경신되는 시간을 1초로 하면, 최소운전시격 $t_{total,3}$ 는

$$t_{follow,i} > t_{follow,k_stationarrive} > t_{follow,3,i-bnum}^{front} \text{ 일 때}$$

$$t_{total,3} = t_{ahead,i} - t_{ahead,k_station} + t_{follow,k_station} - t_{follow,3,i-bnum}^{front+1} \dots (11)$$

$$t_{follow,k+1_stationarrive} > t_{follow,i+1}^{front} > t_{follow,2,i-bnum} > t_{follow,k_stationarrive} \text{ 일 때}$$

$$t_{total,2} = t_{follow,i+1} - t_{follow,2,i-bnum}^{front} + 1 \dots (12)$$

로 된다.

3. 시뮬레이션

위에서 도출된 기본이론을 근거로 하여, 다단계 신호에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5에서는 주행속도 350km/h, 제동력 0.7m/sec², 제동거리 6760m, 폐색구간 1500m, 폐색 수 5개, 6현시 조건으로 하였다. 시뮬레이션 결과로 얻어진 결과는 186.9초이나, 안전계수 1.25 곱하여 234초가 얻어졌다.

제동력 0.7 [m/s²]

운전 시격 table =

31.4251	47.0807	64.6195	85.4225	112.5293	186.8458
32.1783	49.7171	70.5200	97.6268	171.0453	241.5632
35.1372	55.9401	83.0469	157.8635	226.9833	260.6046
40.2816	67.3884	144.7049	211.3248	244.9461	272.1654
51.3768	125.6934	195.3132	228.9345	256.1539	280.1225
84.8165	153.9363	187.5577	214.7770	238.7456	260.7702
92.1218	125.7432	152.9625	176.9311	198.9557	219.6321
54.5027	81.7221	105.6907	127.7152	148.3916	168.0739
46.7158	70.6844	92.7090	113.3854	133.0677	151.9752
42.6349	64.6594	85.3358	105.0181	123.9256	142.2139
40.1530	60.8294	80.5117	99.4192	117.7075	135.4851
38.3980	58.0803	76.9878	95.2761	113.0537	130.4041
37.0925	56.0000	74.2883	92.0659	109.4163	126.4036
36.0659	54.3541	72.1318	89.4821	106.4694	123.1442
35.2421	53.0197	70.3701	87.3574	104.0321	120.4368
34.5589	51.9093	68.8966	85.5713	101.9761	118.1438
33.9856	50.9729	67.6477	84.0524	100.2201	116.1780
33.4970	50.1718	66.5765	82.7442	98.7021	114.4746
33.0752	49.4799	65.6476	81.6055	97.3781	112.9863

운전 시격 = 186.8458 * 1.25 = 233.5573 [sec]

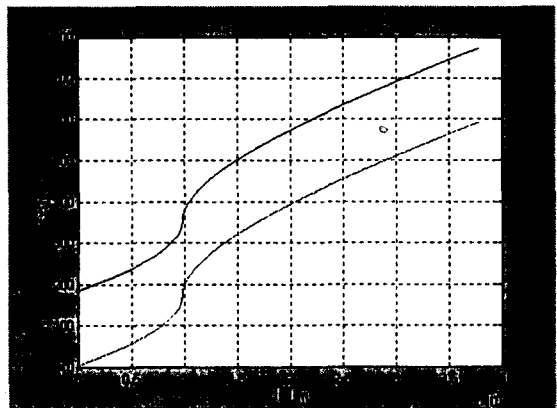


그림 5. 감속도 0.7m/sec²로 제동한 경우의 운전시격

그림 6에서는 주행속도 350km/h, 제동력 0.5m/sec², 제동거리 9460m, 폐색구간 1500m, 폐색 수 7개, 8현시 조건으로 하였다. 시뮬레이션 결과로 얻어진 결과는 207.9초이나, 안전계수 1.25 곱하여 260초가 얻어졌다.

제동력 0.5 [m/s²]

운전시격 table =

31.4251	46.9102	63.4396	81.7224	102.4733	127.0856
31.7325	48.2619	66.5447	87.2956	111.9080	143.9765
33.3964	51.6793	72.4302	97.0425	129.1110	167.3163
36.0001	56.7511	81.3634	113.4319	148.2516	261.8716
39.7408	64.3532	96.4217	137.2416	244.8614	278.4827
45.8264	77.8949	156.7148	226.3346	259.9559	287.1753
58.9486	137.7685	207.3883	241.0097	268.2290	292.1976
88.6199	158.4397	192.0610	219.2804	243.2490	265.2736
92.1218	125.7432	152.9625	176.9311	198.9557	219.6321
54.5027	81.7221	105.6907	127.7152	148.3916	168.0739
46.7158	70.6844	92.7090	113.3854	133.0677	151.9752
42.6349	64.6594	85.3358	105.0181	123.9256	142.2139
40.1530	60.8294	80.5117	99.4192	117.7075	135.4851
38.3980	58.0803	76.9878	95.2761	113.0537	130.4041
37.0925	56.0000	74.2883	92.0659	109.4163	126.4036
36.0659	54.3541	72.1318	89.4821	106.4694	123.1442
35.2421	53.0197	70.3701	87.3574	104.0321	120.4368
34.5589	51.9093	68.8966	85.5713	101.9761	118.1438
33.9856	50.9729	67.6477	84.0524	100.2201	116.1780
33.4970	50.1718	66.5765	82.7442	98.7021	114.4746
33.0752	49.4799	65.6476	81.6055	97.3781	112.9863

운전시격 = 207.9309 * 1.25 = 259.9136

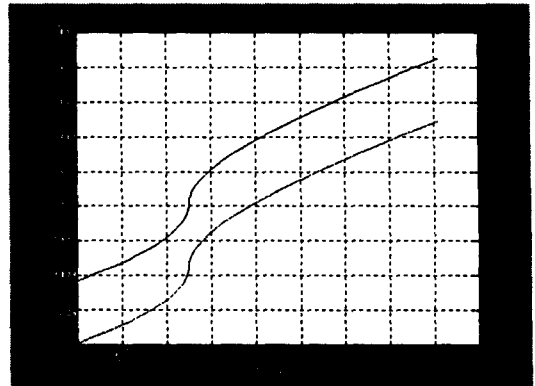


그림 6. 감속도 0.5m/sec²로 제동한 경우의 운전시격

4. 결론

운전시격단축 효과의 평가는 운전시격 단축을 고려하고, 열차속도가 지연되는 역근방의 폐색을 세분화시키고, 세분화된 열차검지를 행하면 효과가 있다. 실제로, 지상신호 방식에서는 장내신호기와 출발신호기 간에 0신호기라고 칭하는 신호기를 신설하는 것으로 한다. 그러나 이와 같은 신호기의 신설·이설에 의해 시격단축 효과를 평가하기 위해서는 신호기의 신설·이설에 따른 현시계통의 재 설정, 폐색마다 운전시격을 작성, 신호기의 추가와 위치변경을 행하여야 한다. 신호기의 현시는 다음에 나타나는 각 현시단계마다의 폐색거리가 확보될 수 있는가를 결정하여, 이것들에 의해 신호현시 계통이 결정되어진다. 또한 운전시격을 단축하기 위해서는 열차의 제동력을 강화시킬 필요가 있다.

<참고문헌>

- [1] 황희수, et al, "폐색구간설계 프로그램 개발", 고속철도연구보고서(전기분야), 1996, pp 59~121
- [2] 류상환, et al, "폐색구간설계 프로그램 개발", 대한전기학회 하계학술대회, 1995. 7, pp 451~454
- [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] O.S. NOCK, "Railway Signalling", A & C Black, London