

폐색구간 결정을 위한 기법연구

A Study on Decision method of block section

이 종 우*, 황 종 규*, 정 의 진*, 정 철 범*
Jong-Woo Lee, Jong-Gyu wang, Eui-Jin Joung, Chul-Beum Jung

ABSTRACT

In railway train operations, a braking distance between two trains must be controlled on their speeds to avoid rear end collisions. The distance is decided by some parameters such that propulsion and braking performance of trains, gradient and etc. When determining this block distance, it is important to consider the two aspects that safety insurance at train running and increase of train running frequency. In this paper, we showed a methodologies of equiblock by consideration gradients and calculated optimal block speeds on the basis of the equivalent block distance.

1. 서론

열차는 레일 상에서 고속의 주행과 차륜과 레일간의 점착력이 작은 관계로 다른 육상 교통보다 제동거리가 길다. 또한 동일 궤도상을 주행을 하기 때문에, 충돌·추돌의 위험이 높다. 열차의 충돌·추돌을 방지하기 위해서 열차사이의 간격을 속도에 따라 적절히 조정할 해야한다. 열차의 간격조정은 열차의 속도와 제동성능, 구배에 따라 결정되어 진다.

또한 피크 시간에, 열차의 운행시간을 최소화 해야하며, 시간 당 열차의 운행능력을 최대화가 요구되는 요구사항이 있다. 신호시스템은 열차의 간격을 조정하기 때문에, 폐색구간의 길이는 수송능력에 직접적인 영향을 미친다. 폐색구간의 설계는 구배, 에너지 절약, 선형과 선로 형태에 따른 속도의 제약, 폐색구간의 최소화에 의한 용량의 최대화를 고려해야 한다.

현재까지의 연구는 속도단계가 결정된 단계에서 폐색구간을 구하는 방법이 도출되었으며, 주로 제동장치의 반응속도와 그에 따른 과주구간에 대한 연구가 수행되었다. 또한 ATO 장치에서 장비의 단계별 용동속도에 대한 최적화가 수행되었다[1]-[4].

본 논문에서는 구배를 고려한 제동거리와 폐색구간의 분할에 대해서 논하였다. 폐색구간의 분할에는 정상적인 과주구간의 확보, 과속에 대한 열차의 보호 및 ATC의 폐색 분할에 대해서 이론적인 식을 도출하였다.

* 한국철도기술연구원, 정회원
* 한국철도기술연구원, 비회원

2. 폐색구간 설정이론

2.1 폐색구간 설계 기본

운전 시격이 짧은 선로에서 폐색구간 설계에서 일반적인 접근법으로서 역 사이는 비교적 길며, 플랫폼 부근에서는 짧다. 2개의 연속적인 역 A, B 사이를 고려하여 보면, 설계는 먼저 B역의 플랫폼에 진입을 제어하는 장내신호기를 설치한 후에 시작된다.

선행 열차가 장내신호기를 통과해서 앞서서 과주구간을 벗어날 때 즉 폐색구간에 열차가 없을 때에 열차가 플랫폼 A를 출발하는 것을 허용한다. 궤도의 길이가 사용되는 크기는 열차가 폐색구간을 통과하여, 완전히 벗어나는데 요구되는 시간에 의해서 결정된다. 이 시간이 설정된 값을 초과한다면, 그 때에는 폐색구간은 중간신호를 설치하여 나누어야 한다. 따라서 플랫폼 A의 열차가 보다 빨리 출발할 수 있도록 한다. 이 방법에 대한 것을 단순화된 그림 1에서는 나타내고 있다. 신호기 S_1 와 S_2 는 폐색구간 B_1 와 B_2 의 진입을 허용하는 신호이다. 신호기 S_1 가 진입허용 신호를 내기 위해서는 열차의 후미가 완전히 O_2 를 통과하여야 한다.

일반적인 예로서 그림 2에서 나타내고 있다. 신호기 S_i 에 대해서는 3개의 제어 점(p_{a1} , p_{a2} , p_{a3})들을 필요로 한다. 첫 번째 제어 점은 정지신호에 대해서 상용제동을 인가하는 점이고, 두 번째 점은 열차가 공주를 한 후에 제동력이 인가되는 점이며, 세 번째 점은 신호기 S_i 를 통과하여 비상제동의 과주거리이다. 일반적으로 열차의 후미가 세 번째 제어 점 p_{a3} 를 통과할 때, 신호기 S_{i-1} 는 녹색신호로 변한다.

2개의 열차가 신호기에 의해서 상호 연관되는 것을 피하기 위해서, 후속열차는 선행열차의 후미가 $p_{(i+1)3}$ 점을 통과한 후에 후속열차는 첫 번째 제어 점 p_{a1} 을 진입하여야 한다.

장내신호기의 위치가 고정되어 있고, 반면에 중간 신호는 가변적이다. 한 개의 중간신호기가 필요하다면 2개의 폐색구간의 주행이 동일하도록 하여, 중간신호기가 설치되도록 한다. 운전시격이 설계 값보다 초과하면은 또 다른 중간신호 S_i 를 필요로 한다.

따라서 주어진 신호기 S_i 에 대해서, p_{a1} , p_{a2} , p_{a3} 들 사이의 거리는 신호기 S_i 의 위치에 따라 변하는 최대속도 및 구배, 열차의 제동장치에 따라서 변하게 된다.

2.2 과주구간 및 제동거리

단독 신호와 관련하여 정상제동에서의 과주구간과 비상제동의 과주구간은 그림 3에서 보인다. 폐색구간의 진입하기 위해서 하나는 충분한 제동 혹은 저속으로 진입하는 경우이며, 다른 한 경우는 속도를 초과하여 비상제동을 하여 열차를 방호하는 경우이다. 고속철도의 경우는 정지신호의 경우 35km/h 이하로 속도를 낮추어야 한다. p_{a3} 의 주어진 위치(혹은 신호위치)에서, 평균 구배의 함수로서 35km/h 과주구간의 시작점(끝점)을 찾는 것이다. 최대 진입속도를 가지고, 최소 과주거리는 다음과 같다.

$$D_b = V \cdot t_r + \frac{(1 + \beta) V^2}{2 \left(\frac{F_e}{m} + g \cdot G \right)} \dots \dots (1)$$

35km/h의 과주구간에 있어서, 평균구배는 폐색구간에서 연속적으로 변하게 되기 때문에, D_b 의 값은 trial and error 방법에 의해서 평가하여야 한다.

2.3 다단계 신호

다단계 신호시스템에서는, 궤도를 여러 개의 폐색구간으로 나누고, 각 폐색구간은 최악의 상태를 고려하여 열차가 진입속도에서 진출속도로 제동할 수 있도록 충분한 거리로 이루어져 있다.

한 열차는 주어진 시간에 단지 한 폐색구간을 점유할 수 있으며, 폐색구간의 진입은 ATC 참조 속도를 갖고있는 속도정보를 전송하는 궤도회로에 의해서 제어된다. 그림 3은 ATC속도와 ATP속도에 사이의 관계를 나타내고 있다. ATC참조속도는 ATC가 폐색구간 내에서 목표로 하는 속도에 해당한다. ATP의 주행속도는 폐색구간에서 최대 안전속도에 해당한다. 그림4에서는 일정 크기의 폐색구간에서 매끄러운 ATC제동곡선이 되도록 만들어진 이상적인 경우를 나타내고 있다. ATC에 의한 최대 효율은 ATP에 의한 속도제어에 의해서 열차를 제어하는 것이다. 실제에 있어서, 안전 값을 설정하여 ATP운전이 되지 않도록 ATP 속도이하에서 열차를 제어한다.

어느 폐색구간에서도 ATP의 속도를 초과하면은 비상제동을 인가하며, 최악의 경우에서도 열차의 전두부가 정지 점의 바로 앞에 정지할 수 있도록 비상제동을 한다.

2.4 공주시간 및 가가속도(jerk) 제어

실제에 있어서 ATC 장치는 속도코드의 수신과 코드를 복조 하는 약간의 시간을 필요로 한다. 그리고 제동시스템에 제동체결을 인가한다. 제동력이 순간적으로 최대로 되는 것은 가가속도의 변화율이 무한대라는 것을 의미하며, 제동종료 시에도 같은 경우이다. 실제적으로 승차감을 고려하여, 제동체결과 해방에 대하여 가가속도를 제한하고 있다. 그림 6에서 폐색구간의 길이, 가가속도 제어 시간, ATC 장치의 응답시간에 대한 영향을 나타내고 있다. 그림에서는 열차가 현재의 폐색구간 B_i 의 속도 V_i 에서 낮은 속도 V_{i+1} 인 다음 폐색구간 진입할 때에 속도, 제동률, 가가속도 크기를 나타내고 있다. 최소제동거리는 제동곡선의 면적과 일치한다. 제동거리는 다음의 식에 의해서 나타내어진다.

$$D(V_i, V_{i+1}) = t_r V_i + \frac{b_s}{2j} (V_{i+1} + V_i) + \frac{1}{2b_s} (V_i^2 - V_{i+1}^2) \dots \dots (2)$$

3. 시뮬레이션

3.1 정상 과주구간 설정

한 신호에 대한 위치가 선정된 후, 정지신호 즉 35km/h의 과주구간을 결정하는 β_B 를 찾기 위하여 반복적인 방법을 사용하였다. 해답에 접근하는 방법으로는 그림 3에서 나타내었다. 여기서, 곡선 $\mu(G)$ 는 신호기 이후 과주구간의 거리와 그 거리에 대한 평균 구배 사이의 관계를 나타내었다. 곡선 $D_\beta(G)$ 는 일정 진입속도에 대한 식 1에서 주어진 과주함수이다. 원하는 값은 두 곡선이 만나는 점이다.

첫 번째 과주거리의 추측 값 x_1 으로, 평균구배 G_1 를 구할 수 있다. 이 평균구배 값 G_1 과 과주거리를 구하는 함수 $D_\beta(G_1)$ 을 이용하여 과주거리를 구한다. 추측 값 x_1 과 계산 값 $D_\beta(G_1)$ 이 허용 값보다 크다면, $D_\beta(G_1)$ 을 이용하여 과주거리 x_2 를 구하고, 다시 그 거리에 해당하는 G_2 를 구한다. 추측 값과 계산 값의 차가 허용차보다 크다면 계산을 반복한다. n 번째 계산 후에 해당

에 도달하게 되면 다음의 조건을 만족하게 된다. 따라서 이 조건을 만족하는 x_n 의 값이 과주거리에 해당한다.

$$|D_b(G_n) - D_b(G_{n-1})| \leq \epsilon_1$$

3.2 ATP 과주구간 설정

두 번째 반복 알고리즘은 평균구배와 과주속도의 2개 함수로서 통과속도에 대하여 과주구간 D_b 을 결정하는데 사용이 된다. 그림 2의 점선으로 표시된 것으로, $D_b(p_2)$ 의 시작은 35km/h 정상 제동거리의 시작점보다 정지신호기에 가까워질 수는 없다. $D_b(p_2)$ 의 제동끝점은 정지신호기를 통과해서 35km/h 과주구간의 끝점에 오도록 한다. p_2 에 대해서 정확한 위치를 찾는 문제이다. p_2 에 대한 초기 값 $x_{pi 2,1}$ 예측은 35km/h의 상용제동 시작점이다. 평균구배 G_1 는 $x_{\mu,1}$ 와 p_3 사이의 거리에서 결정되어 진다. 식3은 진입속도 $V_{calculated e1}$ 을 계산할 수 있도록 하며, 식은 다음과 같다.

$$V_{calculated e1} = \frac{b_r}{1 + \beta} \left(\sqrt{t_r^2 + \frac{2(1 + \beta)(p_3 - x_{pi 2,1})}{b_r}} - t_r \right) \dots \dots (3)$$

단 b_r 는 유효 비상제동률이며, 다음과 같다.

$$b_r = \frac{F_\epsilon}{m} + gG_1 \dots \dots (4)$$

계산된 속도 $V_{calculated e1}$ 은 $x_{\mu,1}$ 위치에서 실제속도와 비교한다. 실제속도 $V_{actual e1}$ 은 고려대상인 노선에 대하여 속도 대 거리의 선형적으로 값을 유출하여 결정한다. 실제 속도가 계산된 속도보다 크다면, D_b 의 값은 고정된 양까지 확장시켜며, 계산을 반복한다. 반복계산은 다음의 조건을 만족하면 중지한다.

$$V_{actual en} \leq V_{calculated en}$$

정상제동 과주구간과 ATP 과주구간에서 사용된 같은 알고리즘은 첫 번째 제어 점을 찾기 위해서 사용한다. 그림3에서 보여준 것과 같이, 최악의 상태에서, p_2 점에 도달하기 위해서 최대속도에서 35km/h로 제동을 인가하기에 충분한 상용제동의 시작점에 위치하여야 한다. 그림4에서는 ATC와 ATP의 제동곡선을 나타낸다.

3.3 ATC 단계속도결정

주어진 속도와 차량과 레일의 물리적인 상태에 의해서 결정된 제동거리에 대해서, 최소의 운전 시격을 갖는 신호시스템에 대해서, n 단계 ATC 참조속도 $\{V_m, V_1, V_2, \dots, V_{n-2}, 0\}$ 의 집합은 동

시에 다음과 같은 조건들을 만족하여야 한다.

$$\left. \begin{aligned} D_b(V_m, V_1) &= D_b(V_1, V_2) \\ D_b(V_1, V_2) &= D_b(V_2, V_3) \\ &\vdots \\ D_b(V_{n-3}, V_{n-2}) &= D_b(V_{n-2}, 0) \end{aligned} \right\} n \geq 3 \quad \dots \dots (5)$$

식 2와 5를 이용하여 행렬형태로 다시 표현할 수 있다.

$$AV^2 + BV + C = 0 \quad \dots \dots (6)$$

단,

$$V = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_{n-2}]^T$$

$$A = \frac{1}{2b_s} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad B = \frac{1}{2J} \begin{bmatrix} -2Jt_r & -b_r & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_r+2Jt_r & -2Jt_r & -b_r & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b_r+2Jt_r & -2Jt_r & -b_r & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & b_r+2Jt_r & -2Jt_r \end{bmatrix}$$

$$C = V_m \left(\frac{b_r}{2J} + t_r + \frac{V_m}{2b_r} \right) [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$$

그림 5, 6, 7에서 거리에 대한 속도, 가속도, 가가속도(jerk)를 나타내고 있다. 이것에 대한 목적 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$F(V_1, V_2, \dots, V_{n-2}) = (D_b(V_m, V_1) - D_b(V_1, V_2)) + \sum_{i=1}^{n-4} (D_b(V_i, V_{i+1}) - D_b(V_{i+1}, V_{i+2})) + (D_b(V_{n-3}, V_{n-2}) - D_b(V_{n-2}, 0)) \quad (7)$$

진입 점에서 t_r 과 $J \rightarrow \infty$ 인 경우를 가정을 하면은, 위의 식은 간단하게 나타나게 된다.

$$V_i = V_m \sqrt{1 - \frac{i}{n-1}}, \quad i = 1, n-2 \quad \dots \dots (8)$$

3.4 계산결과

각 신호에서 참조속도를 구하기 위해서는 앞에서 언급한 구배를 고려한 제동거리를 계산하였다. 위에서 도출된 식을 이용하여 제동거리는 경부고속철도에 사용되는 값이다. 경부고속철도 고속에

서 사용하고 있는 속도체계와 비교하여 보았다.

- 제동거리 : 6,600m
- 등거리 폐색 : 1,650m
- 참조속도 : { 300, 260, 220, 150,0 [km/h]}

다시 폐색구간을 1,500m으로 조정하여 최고속도에서 하향속도로 구한 결과다음과 같다.

- 폐색구간 : 1,500m
- 참조속도 : { 300, 270, 220, 170,0 [km/h]}

이 값은 경부고속철도에서 사용하는 값과 일치한다. 영업운행속도가 350km/h인 한국형 고속철도의 참조속도는 다음과 같다.

- 제동거리 : 8,100m
- 폐색구간 : 1,500m
- 참조속도 : {350, 320, 290, 250, 210, 150 0 [km/h]}

4. 결론

위에서 도출된 식은 폐색구간을 경부고속철도에서 사용되는 결과 잘 일치하고 있다. 실제적으로 제동은 평상시에 제동장치의 급속한 열화를 막기 위해서 고속에서는 제동력을 작게 인가하고, 저속에서 크게 인가한다. 참조속도가 도출된 후 폐색구간을 적절하게 조정하여 참조속도를 설정하여야 한다.

< 참고문헌 >

- [1] 유상환 and et al., '폐색구간설계 프로그램 개발', 고속철도연구보고서(전기분야), pp. 261-307, 1995.
- [2] 황희수 and et al., '폐색구간설계 프로그램 개발', 고속철도연구보고서(전기분야), pp. 59-121, 1996.
- [3] 유상환 and et al., '폐색구간설계 프로그램 개발', 대한전기학회 하계학술대회, pp. 451-454, 1995.
- [4] D.C. GILL and et al, ' Computer based Optimization techniques for mass transit railway signalling Design, IEE Proceeding-B, Vol. 139, No. 3, pp. 261-275, May 1992.

* <부호>

b_r : 제동력 ($\frac{F_e}{m} + gG_1$)

D : 제동거리

g : 중력에 기인된 가속도

G : 평균구배

F_e : 최소 비상제동력

J : 가가속도(jerk)

m : 전체 유효질량

d_{ij} : j 신호기의 i 번째 제어 점

S_i : 신호기

t_r : 전체 장비의 응답 시간

v_i : 속도변수

V : 진입속도

x : 거리

β : 제동거리에 대한 안전계수

35km/h : TGV 정지신호에서의 허용속도

※ <그림>

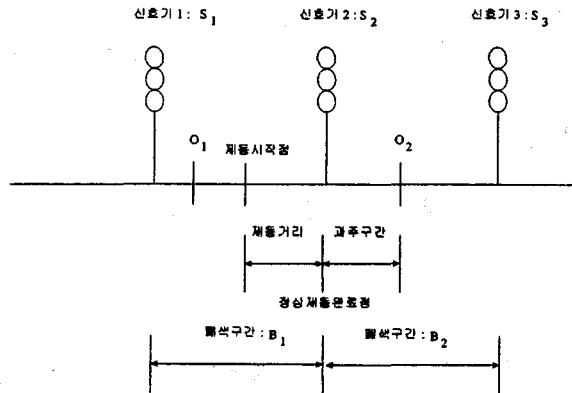


그림 1 제동거리, 과주거리 및 신호기와 폐색의 표시

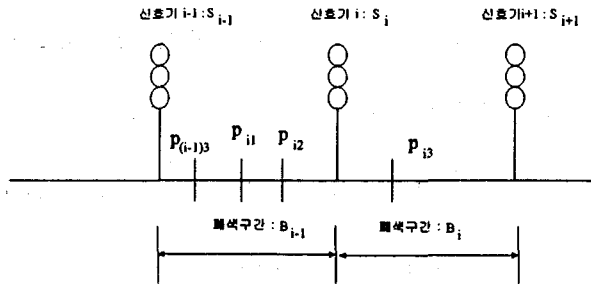


그림 2 제동명령, 공주거리 및 신호기제어점

서 사용하고 있는 속도체제와 비교하여 보았다.

- 제동거리 : 6,600m
- 등거리 폐색 : 1,650m
- 참조속도 : { 300, 260, 220, 150,0 [km/h]}

다시 폐색구간을 1,500m으로 조정하여 최고속도에서 하향속도로 구한 결과다음과 같다.

- 폐색구간 : 1,500m
- 참조속도 : { 300, 270, 220, 170,0 [km/h]}

이 값은 경부고속철도에서 사용하는 값과 일치한다. 영업운행속도가 350km/h인 한국형 고속철도의 참조속도는 다음과 같다.

- 제동거리 : 8,100m
- 폐색구간 : 1,500m
- 참조속도 : {350, 320, 290, 250, 210, 150 0 [km/h]}

4. 결론

위에서 도출된 식은 폐색구간을 경부고속철도에서 사용되는 결과 잘 일치하고 있다. 실제적으로 제동은 평상시에 제동장치의 급속한 열화를 막기 위해서 고속에서는 제동력을 작게 인가하고, 저속에서 크게 인가한다. 참조속도가 도출된 후 폐색구간을 적절하게 조정하여 참조속도를 설정하여야 한다.

< 참고문헌 >

- [1] 유상환 and et al., '폐색구간설계 프로그램 개발', 고속철도연구보고서(전기분야), pp. 261-307, 1995.
- [2] 황희수 and et al., '폐색구간설계 프로그램 개발', 고속철도연구보고서(전기분야), pp. 59-121, 1996.
- [3] 유상환 and et al., '폐색구간설계 프로그램 개발', 대한전기학회 하계학술대회, pp. 451-454, 1995.
- [4] D.C. GILL and et al, ' Computer based Optimization techniques for mass transit railway signalling Design, IEE Proceeding-B, Vol. 139, No. 3, pp. 261-275, May 1992.

* <부호>

b_r : 제동력 ($\frac{F_e}{m} + gG_1$)

D : 제동거리

g : 중력에 기인된 가속도

G : 평균구배

F_e : 최소 비상제동력

J : 가가속도(jerk)

m : 전체 유효질량

d_{ij} : j 신호기의 i 번째 제어 점

S_i : 신호기

t_r : 전체 장비의 응답 시간

v_i : 속도변수

V : 진입속도

x : 거리

β : 제동거리에 대한 안전계수

35km/h : TGV 정지신호에서의 허용속도

※ <그림>

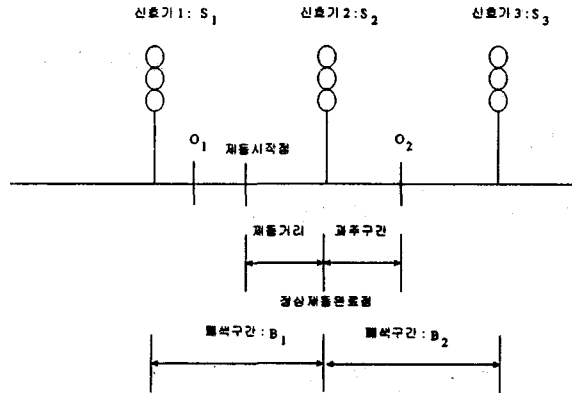


그림 1 제동거리, 과주거리 및 신호기와 폐색의 표시

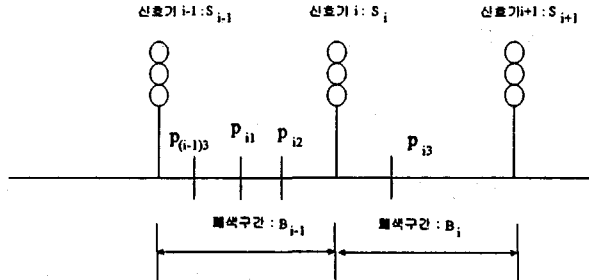


그림 2 제동명령, 공주거리 및 신호기제어점

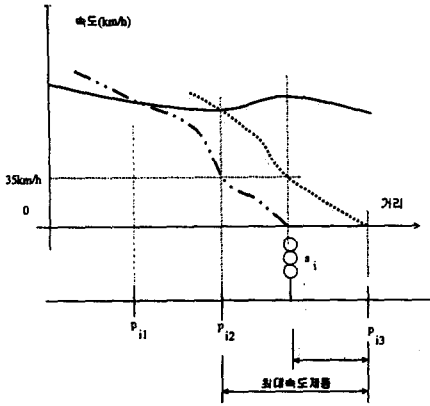


그림 3. 정상제동 및 ATP제동

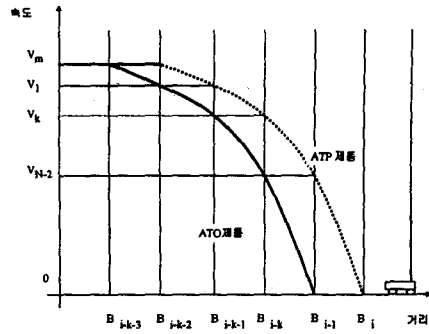


그림 3 ATC와 ATP의 제동곡선

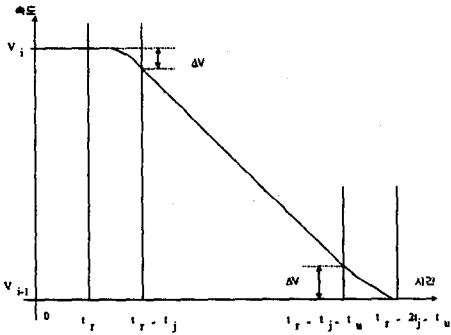


그림5 속도곡선

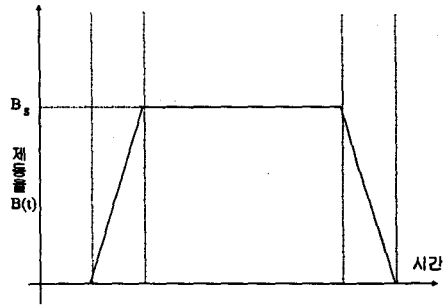


그림6 가속도 곡선

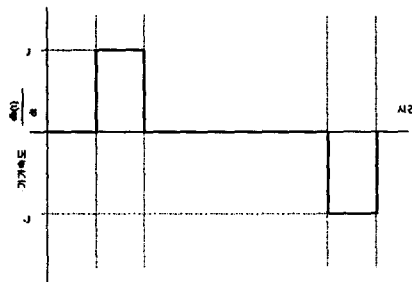


그림7 jerk 곡선