

대피선이 없는 철도 Skip Stop Scheduling에 관한 연구

An analysis on Optimal Subway Skip Stop Scheduling without siding track

서원호 전경수 박창호 이성모
 (서울대학교 도시공학과 대학원) (서울대학교 교수) (서울대학교 교수) (서울대학교)

목 차

I. 서론	IV. 알고리즘 구축
II. 현행지하철 운행방식에 대한 고찰	1. 알고리즘
1. 열차제어	2. 열차간 최단거리 계산
2. 최소운전시각	3. 시스템총통행시간 계산
3. 폐색분할	V. 적용 및 효과분석
4. 격역정차제의 가능성	1. 첨두시
III. 기존 연구 및 정차시스템 고찰	2. 비첨두시
1. 기존연구 고찰	3. 시격단축시
2. 각 정차시스템의 비교	VI. 결론 및 향후연구과제

I. 서론

서울시는 지하철의 연장이 길어지고 장래 수도권 방사순환전철과 연결될 것을 감안, 지하철이 다른 교통수단에 더 많은 경쟁력을 갖도록 3기 지하철은 물론 기존의 지하철에도 급행 지하철 시스템의 도입을 검토하고 있다.

하지만 급행 지하철의 도입은 대피선 설치와 추월 장소 및 시각 결정, 안전거리, 배차간격에 따른 스케줄의 변화 등 제약조건이 발생한다.

급행선을 도입하지 않을 경우 대안으로 삼을 수 있는 것이 격역정차 Skip Stop System이다. 격역정차의 경우 열차의 추월은 없지만 몇 개의 역을 통과함으로써 전체 통행시간을 단축시키는 결과를 가져온다. 또 격역정차 시스템은 급행 지하철 시스템과 달리 대피선의 추가 건설 없이 현행 시스템에 적용할 수 있다는데 그 장점이 있다.

본 논문에서는 역간수요, 역간거리, 배차간격, 최고속도 등이 주어졌을 경우 안전거리를 만족하는 Skip Stop Scheduling 및 실제 5호선 구간에 적용하여 이에 따른 시간 절감효과를 분석해보고자 한다.

II. 현행지하철 운행방식에 대한 고찰

1. 열차제어

ATC(Automatic Train Control)는 열차의 운전을 제어하고 안전을 확보하여 열차운전을 지시하는 전반적 기능을 총칭한다. ATC 설비에 ATP(Automatic Train Protection)과 ATO(Automatic Train Operation)가 있으며, 이 중에서 ATP만을 ATC라 부르는 경우도 있다.

ATP(Automatic Train Protection)는 열차 운전속도의 Monitoring 및 열차의 안전확보를 담당하는 ATC의 Subsystem이며 주요한 기능으로는 전체시스템내 모든 열차위치를 지속적으로 검지, 열차사이의 안전간격 유지 (안전제동거리 확보 및 자동제어기능), 기타 연동장비 정보에 의한 안전기능이 있다.

ATO(Automatic Train Operation)는 열차의 기동, 가속, 속도제어, 정점정지 등의 조작을 자동적으로 하는 장치이다. 최근 기술의 진보에 따라 자동열차 운전장치는 운송량의 증가, 운전의 안전성 향상, 표정속도의 향상, 열차간격의 단축, 운전 Dia의 확보, 운전사의 숙련도 경감 및 전력 소비량의 감소 등 여러 가지 효과를 목적으로 하여 실용화되고 있다.

<표 1> 열차제어기술의 변화

구분	1990년대	2000년대
제어주체	지상(Waysides)	차상(Smart Vehicles)
폐색장치	고정폐색(固定閉塞)	무선전자토큰폐색(RETB), 이동폐색(移動閉塞)
제반기술	전기, 전자, 컴퓨터	현재기술을 기반으로한 무선통신 및 인공지능기술
열차위치검지	궤도회로	지상무선통신 및 GPS위성을 이용한 AVLS 또는 ATLAS
궤도회로역할	열차위치검지, 속도코드전달, 선로파손검지등	선로파손검지 등으로 국한될 것으로 전망

2. 최소운전시격

선행열차의 후속열차의 관계는 구간 최고속도에서의 제동거리+여유의 간격이 있으면 안전한 운전이 된다. 따라서 열차간격 L_i 은 다음 거리까지 접근할 수 있다.

$$L_i = \frac{V_{\max}^2}{7.2 \times (\beta + \frac{S'}{31})} + \frac{V_{\max}}{3.6} \times t + \text{여유거리}$$

V_{\max} : 역간 최고속도

β : 감속도

S' : 구배상수 ($S' = S + \frac{800}{R}$)

t : 공주시분

최소 운전시격은 다음 식으로 나타낸다.

$$H_i = 3.6 \times \frac{L_i + \text{열차장}}{V_i}$$

H_i : 최소운전시격

V_i : 역 중간의 열차속도

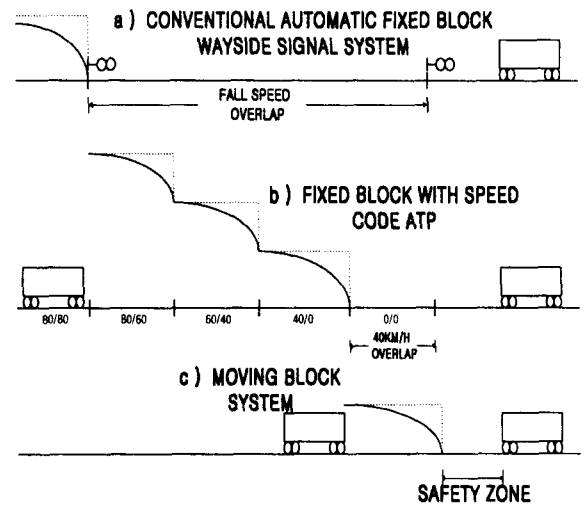
$V_{\max} = 82\text{km/hr}$ 인 경우를 검토하면

$$L_i = 355.16\text{m}$$

$$H_i = 3.6 \times \frac{355.16 + 160}{60} = 30.9 \text{ sec}$$

3. 폐색분할

철도시스템에서는 선로를 일정구간별로 나누어 한 구간에 한 열차만을 진입시켜 열차간 간격 조정(Train to Train Regulation)을 하기 위해 공간을 확보한다. 이렇게 열차의 절대안전운행을 위해 확보한 공간을 폐색(閉塞:Block)이라 하며 어떠한 경우라도 열차제동거리보다 폐색구간이 짧아질 수 없다.



<그림 1> 열차제어시스템의 종류

과거의 폐색구간은 역 또는 신호기 사이를 한 폐색구간으로 설정, 이 구간에는 1개의 열차만 운행하였으나 현재는 이를 여러 개의 폐색구간으로 세분화(분할)하여 보다 많은 열차가 운행할 수 있는 기술로 발전, 운전시격 단축을 이룰 수 있는 계기가 되었다.

폐색방식의 개념은 크게 궤도회로를 기본으로 한 고정(固定)폐색(Fixed block)과 유무선 통신을 기본으로 한 이동(移動)폐색(Moving block) 방식이 있다. 현재 국내철도에서 사용되고 있는 폐색방식은 고정폐색으로 이는 선행(先行)열차의 위치와 관련, 전방 폐색구간에 있는 열차는 무조건 정지해 있는 것으로 판단하고 이를 기준으로 후속열차는 추돌(追突)방지 등 안전을 위해 단계적으로 속도를 줄인다. 열차제동 및 안전거리 확보를 위해 선행열차 위치에 따라 각 신호단계마다 다단계 속도로 제어를 하기 때문에 단계마다 제동 및 공주거리를 필요로 하므로 이에 따른 거리적 손실이 많아진

다. 또한 여러 속도단계는 곡선(曲線), 구배(勾配), 분기부(分岐部)에서의 제한속도에 적절히 대응할 수 없어 필요이상의 속도저하를 초래할 수 있으나, 이동폐색은 특정한 폐색구간 없이 선행열차와 후속열차의 속도 및 위치에 따라 연속적으로 열차운행을 제어 할 수 있다.

이동폐색 열차제어방식은 고정폐색에 비해 불필요한 공주시간 및 안전거리 확보 필요성이 적어져 그만큼 운전시각 단축과 이로 인한 선로이용 증가를 가져올 수 있다. 국내에서도 지하철 9호선에 이 기술을 도입하고 있다.

4. 격역정차제의 가능성

97년 10월에서 11월에 조사된 지하철 5호선 일일 평균 역간 수요를 살펴보면 편도 이용인원이 418,025명으로 조사되었다. 이를 각역별 승하차 인원으로 분석한 결과 역별 편차가 상당히 큰 것으로 나타났다. 역별(방화역-천호역) 승하차 인원의 평균은 20,375명이었고, 표준편차는 18,520으로 분석되었다. 그리고 3분 시격, 50km/hr로 운행을 가정한다면 1분 30초의 평균 대기시간과 15분 56초의 평균 주행시간을 가지는 것으로 나타났다. 평균 대기시간이 평균 주행시간의 8.9%에 해당한다.

위 수치들은 지하철 이용수요가 일정 역에 집중되어 있고, 총 통행시간에서 주행시간의 비중이 상당함을 의미한다. 급행 열차나 격역정차제를 통해 주행시간을 줄임으로 총 통행시간을 줄일 수 있음을 시사한다. 우선 급행열차나 격역정차제는 안전거리, 시격과 폐색조건을 만족시키는지에 대한 고려가 선행되어야 한다.

① moving block system의 경우 : 열차의 최소 운전시격인 열차공주거리+정지거리+열차장 조건만 만족하면 운행이 가능하다.

② 고정 block(폐색) system의 경우 : 지하철 1-4호선의 경우 평균 폐색구간은 200-250m이다. 지하철 5호선의 경우 폐색구간이 이보다 더 짧게 나누어져 있다. 그러므로 급행열차 시스템이나 격역정차 시스템이 두 개의 폐색구간 이상의 헤드웨이를 유지하는 범위 내에서 운행이 가능하다.

III. 기존연구 및 정차시스템 고찰

1. 기존연구 고찰

급행지하철에 관한 국내연구로는 원제무, 황준환의 『급행지하철의 시간절감 효과분석 연구』가 있다. 이 연구에서는 급행지하철을 3호선에 도입하였을 경우를 가정하고, 시간단축효과에 대하여 분석하고 있다. 이 연구에서는 한역 건너 정차하는 격역제와 여러 역을 지나 정차하는 Skip Stop 시스템을 혼용하였을 때 단축되는 총 통행시간의 변화를 추정하였다.

대피선을 이용한 급행지하철에 관한 연구로는 김경철의 『도시철도 급행화 계획을 위한 기초연구』가 있다. 이 연구에서는 급행열차운영효과 부문에서 대상노선이 모두 제3선 이상 혹은 대피선 등으로 급행 운행이 가능하다는 전제하에 급행지하철의 도입으로 인한 총 통행시간 단축효과측면을 대상으로 분석하였다. 해외 도시철도의 급행운행 사례와 함께 5호선과 경의선을 대상으로 급행지하철의 운행회수와 구간 최고속도, 정차시간, 총통행량의 변화의 경우에 대하여 각각 개선효과를 분석하였다. 이 연구의 결과 급행지하철의 도입으로 급행지하철의 운행빈도에 따라 다르지만 일반 지하철만 운행할 경우보다 10%이상의 총 통행시간 단축을 가져온 것으로 분석되었다.

2. 각 정차시스템의 비교

1) 각역정차의 경우

각역정차 시스템은 우선 노선장이 짧고, 수요가 각 역에 골고루 분산되어 있을수록 효과적이다. 운영측면에서는 우선 스케줄링에는 아무런 제약이 없다. 첨두시나 비첨두시의 경우 배차간격만 조정하면 가능하다. 감가속 정차시간의 비율이 많다. 예를 들어 역간 평균거리 1000미터를 최고속도 70km/hr로 주행하는데 있어서 20초 가속, 30초 최고속도 정속, 20초 감속, 30초 정차하게 된다. 노선간 환승이 많지 않은 단일 노선이 경우 더 효율적이다.

2) 급행선 도입의 경우

역 내 플랫폼이 세 곳 이상 존재하게 되어 기존 시스템에 익숙해져 있던 승객의 혼란이 발생한다. 두 번 갈아타는 것이 빠른 승객이 발생한다. 급행선을 도입하는 경우 전체 노선 길이가 일정 이상이어야 효과적이다. 그리고 구간이 장거리인 몇 개의 역(급행선이 정차하는 역)과 몇 개의 역(급행선이 정차하는 역) 사이에 수요가 집중될 수록 효과적이다. 또 여러 노선이 교차, 환승역간 수요가 많은 경우 유리하다.

운영상에 있어서 대피선 도입이 필요하다. 기존 지하철이 운행하고 있는 역에 대피선 새로 건설하기가 쉽지 않다. 첨두 비첨두시의 배차간격이 달라짐에 따라 추월하는 곳 혹은 스케줄에 변화가 생긴다.

일반적으로 급행선 시격이 크다. 이는 급행선 대기시간이 길다는 것을 의미하고, 통행거리가 길어 급행선을 이용하여 얻는 시간이익이 대기시간 증가분보다 큰 장거리 구간에 효율적이다. 장래 도시가 광역화되어 노선장의 연장되는 것을 감안하면 효과가 증가하리라 예상된다.

3) Skip Stop Scheduling 시스템 도입의 경우

Skip Stop System을 도입할 경우, 같은 노선이지만 한 번 갈아타야 하는 경우가 발생하여 기존 시스템에 익숙해져 있던 승객의 혼란이 발생한다.

노선 길이가 길수록 효과적이다. 급행선 도입의 경우는 몇 개의 역에서 몇 개의 역으로 장거리 승객이 많을 경우 효과적인데 반해, 이 시스템은 상대적으로 여러 역에서 여러 역으로의 장거리 승객이 많을수록 효과적이다. 수요가 적은 역끼리의 단거리 통행 비율이 많은 경우 비효율적이다. 여러 노선 환승이 가능하여 환승역간 수요가 많은 경우 유리하다.

두 번 갈아타는 경우는 없다. 출발지와 목적지에 따라 한 번 갈아타는 경우가 발생한다. 중간에 모두 서는 역이 없는 경우 더 멀리 갔다가 되돌아 오는 경우 혹은 반대 방향으로 갔다가 가는 경우가 발생한다.

운영상 대피선을 도입하지 않는다. 특별한 추가 시설 없이 현재 운행중인 시스템에 도입이

가능하다. 배차간격이 달라져도 스케줄링에 큰 문제가 없다.

Skip 하는 역의 이용객 대기 시간이 증가한다. 이 대기 시간의 증가분을 통행시간 단축에서 상쇄시킬 수 있느냐가 운영의 효율을 좌우한다. 급행선 도입과는 달리 추월이나 대피가 없으므로 역간거리의 장단에 큰 영향을 받지 않는다.

IV. 알고리즘 구축

1. 알고리즘

- ① 역 $n+1$ 개, 링크 n 개가 생긴다.
- ② 1번 열차가 정차하는 역의 조합을 정한다.
- ③ 2번 열차가 서야하는 역의 조합을 정한다. 1번 열차가 정차하지 않은 역에 반드시 정차하고, 1번 열차가 정차한 역 중 정차하는 조합을 만든다.
- ④ 열차 출발 : 1번 열차가 시간 0초에 0번역을 출발한다. 시간 h 에 2번, 시간 $2h$ 에 3번 열차가 출발한다. 3번 열차는 1번 열차와 출발시간 $2h$ 시간만 차이가 나고, 동일하게 진행한다. 먼저 모든 링크에 최대 속도 v_{max} 을 배정한다.
- ⑤ 안전거리 조건 확인 : 시간을 1초씩 증가시키면서 1번 열차와 2번 열차가 안전거리 조건을 만족하는가, 2번 열차와 3번 열차가 안전거리 조건을 만족하는가를 확인한다. 안전거리 조건이 만족되지 않을 경우, 속도 조합을 변화시켜 반복한다. 속도조합을 변화시키는 방법에 있어서, 프로그램의 계산량을 줄이기 위해 링크의 최대 속도조합은 전체 링크 최대속도 총합이 큰 순서부터 하나씩 낮추어 가며 반복한다.
- ⑥ 전 운행시간에 걸쳐 안전거리 조건을 만족하는 속도의 조합을 찾으면, 운행중 열차간 최단거리를 계산하고, 주어진 역간수요에 따른 총 통행시간을 계산한다.

2. 열차간 최단거리 계산

알고리즘의 ⑤ 안전거리 조건에 따라 1초마다 열차간 거리를 계산하여 최소운전시격을 만족하는지 확인한다. 프로그램 상에서 열차간 거리를 매초 확인하면서 최소값을 업데이트하는 방식을 추가하여, 다음과 같이 결과물에 각 열

차의 링크 최대속도조합과 역별 도착시간과 함께 언제 열차간 거리가 최소가 되었는지를 출력하게 하였다. 이로써 최소운전시각 및 폐색구간 조건을 만족하는지 확인할 수 있다.

```

=====
T1(VEL): 16.7 16.7 16.7 16.7 16.7
T2(VEL): 16.7 16.7 16.7 16.7 16.7
T1(TIME): 0    70    187    304    415    532
T2(TIME): 180  250    367    484    595    712
T3(TIME): 360  430    547    664    775    892
Minimum Distance(1,2): 1498.25 at 354,
Minimum Distance(2,3): 1498.25 at 534
=====
1 results returned. Program terminated

```

3. 시스템총통행시간 계산

① 모두 정차하는 역에서 모두 정차하는 역으로 가는 경우

	출발역	도착역
1번 열차	a	b
2번 열차	c	d
3번 열차	a + 2h	b + 2h

· 주행시간 × 수요

$$OD \times \frac{c-a}{2h} \times (b-a) + OD \times \frac{a+2h-c}{2h} \times (d-c)$$

· 평균대기시간 × 수요

$$OD \times \frac{c-a}{2h} \times \frac{c-a}{2} + OD \times \frac{a+2h-c}{2h} \times \frac{a+2h-c}{2}$$

② 한 역에서는 모두 정차하지만 나머지 한 역에서 SKIP 하는 경우

· 주행시간은 출발역과 도착역에 모두 정차하는 열차시간에서 계산

· 평균 대기시간은 $\frac{2h}{2}$

③ 한 열차가 두 역에 모두 정차하지만 다른 열차는 모두 정차하지 않는 경우

· 주행시간은 모두 정차하는 열차시간에서 계산

· 평균 대기시간은 $\frac{2h}{2}$

④ 한 번 갈아타야 하는 경우로 출발역과 도착역 사이에 모두 정차하는 역이 존재하는 경우

· 주행시간은 도착역 열차시간에서 출발역 열차시간의 차

· 평균 대기시간은 $\frac{2h}{2} +$ (모두 정차하는 역에서의 대기시간)

⑤ 한 번 갈아타야 하는 경우로 출발역과 도착역 사이에 모두 정차하는 역이 존재하지 않는 경우 - 모두 정차하는 역까지 역행하거나 진행하여야 한다.

· 주행시간은 다음 두 경우의 최소값

① (출발역에서 도착역 방향으로 가장 근접한 모두 정차하는 역으로의 주행시간) + (모두 정차하는 역에서 도착역까지의 주행시간)

② (출발역에서 도착역 역방향으로 가장 근접한 모두 정차하는 역으로의 주행시간) + (모두 정차하는 역에서 도착역까지의 주행시간)

· 평균 대기시간은 $\frac{2h}{2} + \frac{2h}{2}$ (모두 정차하는

역에서의 평균대기시간)

· 역방향 플랫폼으로 이동하는 시간 2분

V. 적용 및 효과분석

지하철 5호선 39개역 40.5km 구간을 대상으로 6개의 Skip Stop Scheduling 시나리오를 설정하였다. 역간 수요는 1997년 10월에서 11월에 조사된 수요를 이용하였다.

1. 침두시

5호선은 침두시 2분 30초 시격을 유지한다.

<표 2> 침두시 열차간 최소거리

	열차간 최단거리	%
각역정차	2547초에 702.85m	100.0
시나리오1	2074초에 504.00m	71.7
시나리오2	2378초에 404.00m	57.5
시나리오3	3807초에 600.19m	85.4
시나리오4	3853초에 588.92m	83.8
시나리오5	3406초에 669.60m	95.3
시나리오6	974초에 686.90m	97.7

시나리오 3, 5, 6을 대상으로 각역정차 경우와 주행시간 대기시간 통행시간의 합을 비교하면 다음과 같다.

<표 3> 시나리오별 시간 비교

	주행시간		대기시간		총통행시간	
각역	16분 56초	100.0%	1분 15초	100.0%	18분 11초	100.0%
3	14분 59초	88.5%	1분 50초	147.0%	16분 49초	92.5%
5	15분 6초	89.2%	1분 48초	143.8%	16분 54초	92.9%
6	14분 49초	87.1%	1분 57초	156.3%	16분 46초	92.2%

<표 4> 시나리오별 시간 비교

	대기시간/ 총통행시간합	대기시간증가분/ 각역정차시간합	대기페널티(150%) 적용하였을 경우	
각역	0.069	0.000	18분 48초	100.0%
3	0.109	0.032	17분 45초	94.4%
5	0.106	0.030	17분 48초	94.6%
6	0.116	0.039	17분 45초	94.4%

<표 5> 시나리오별 시간 비교

각역	역방향인원		역방향페널티(2분)+ 대기페널티(150%)		표정속도(km/hr)	
	0	0.000	18분 48초	100.0%	35.466	100.0%
3	1393	0.003	17분 45초	94.4%	40.128	113.1%
5	780	0.002	17분 48초	94.6%	39.874	112.4%
6	2284	0.005	17분 45초	94.4%	40.898	115.3%

2. 비첨두시

5호선은 첨두시 5분 시격을 유지한다.

<표 6> 시나리오별 시간 비교

각역	총통행시간		대기시간/ 총통행시간합	대기시간증가분/ 각역정차시간합
	19분 26초	100.0%	0.129	0.000
3	18분 40초	96.0%	0.194	0.058
5	18분 41초	96.2%	0.190	0.054
6	18분 45초	96.5%	0.206	0.099

<표 7> 시나리오별 시간 비교

각역	대기페널티(150%) 적용하였을 경우		역방향페널티(2분) +대기페널티(150%)	
	20분 41초	100.0%	20분 41초	100.0%
3	20분 29초	99.0%	20분 29초	99.0%
5	20분 27초	98.9%	20분 27초	98.9%
6	20분 41초	100.1%	20분 41초	100.1%

3. 시격단축시

시나리오에 따라 표정속도가 12-15%가 증가하는데 이는 동일한 전동차수로 운행할 때, 안전거리 조건만 만족된다면 시격을 단축시킬 수 있다는 것을 의미한다.

<표 8> 시격단축 경우 비교

	대기시간		총통행시간	
	시나리오 3-132초시격	1분 38초	130.1%	16분 36초
시나리오 6-130초시격	1분 42초	136.0%	16분 30초	90.8%
시나리오 3-265초시격	3분 12초	128.1%	18분 14초	93.8%
시나리오 6-260초시격	3분 21초	134.2%	18분 13초	93.8%

VI. 결론 및 향후 연구과제

첨두시 시격과 비첨두시 시격에 따라 최적 시나리오가 달라지는 결과를 얻었다. 첨두시에는 통과하는 역이 많은 시나리오가 유리하였고, 비첨두시에는 반대 현상을 보였다. 그리고 역방향 인원은 전체의 0.5% 정도로 수요가 적은 역에서 수요가 적은 역으로 가는 승객이 그리 많지 않음을 알 수 있고, 표 5에서 보다시피 전체에 영향을 거의 미치지 않았다.

앞에서 설명한 Skip Stop 시스템은 추가 시설의 건설없이, 이동 폐색 시스템 혹은 비첨두시의 고정폐색 구간에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 각 개별 폐색 구간에 대해 이 시스템이 첨두시 고정폐색 구간에 적용이 가능한지에 대한 조사가 필요하다. 그리고 급행선 도입을 고려할 때, 각역정차, 급행선, Skip Stop 시스템의 추가비용과 시간 절감효과를 같이 고려해 보는 것도 바람직하리라 사료된다.

참고문헌

1. Vuchic Vukan R., *Urban Public Transportation-System and Technology*, Prentice-Hall, Inc., 1981.
2. 김경철(1998), 도시철도 급행화 계획을 위한 기초 연구, 서울시정개발연구원
3. 원제무, 황준환(1997. 12), "급행지하철의 시간절감 효과분석" 대한국토도시계획학회지 국토계획 32권 6호 통권 92호 pp 121-130
4. 진수봉(1999. 6), "GIS 수신기를 이용한 폐색분할 및 열차위치 추적에 관한 연구", 홍익대학교 대학원, 석사학위논문
5. 황기연(1997), 서울시 대중교통수단 다양화에 관한 연구, 서울시정개발연구원
6. 교통개발연구원(1998. 8), 수도권전철 3개 운영기관간 연결운송에 따른 운임정산을 위한 정산금액 산출