

Working Paper

2011-BR-04

# 대중교통카드를 활용한 도시철도 혼잡도 지표개발연구

신성일

2011

Working Paper

2011-BR-04

## 대중교통카드를 활용한 도시철도 혼잡도 지표개발연구

Congestion Index of Urban Rail Transit Using Public Transportation  
Card Data

2011

## ■ 연구진 ■

---

연구책임 신 성 일 • 도시교통연구실 연구위원  
연구원 이 창 훈 • 도시교통연구실 연구원  
연구원 정 현 진 • 도시교통연구실 연구원

---

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서  
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

## I. 연구 개요

### 1. 연구의 배경 및 목적

- 도시철도 혼잡도는 도시철도의 운영상태 진단을 위한 가장 중요한 지표로서, 열차 및 역사의 혼잡도를 파악하여 열차운행횟수 결정, 정시성 확보, 통행속도 결정, 시설용량 증대 등 서비스제공을 위한 기초자료로 활용됨.
- 대중교통카드자료는 대중교통 이용객의 행태에 대한 전수화 확보가 가능하나, 버스 혼잡도 추정에만 이용되었으며, 도시철도 혼잡도 산정에는 보조자료로만 사용되는 실정임.
- 이 연구는 대중교통카드자료를 활용하여 도시철도 차량 및 환승역사의 혼잡도를 추정하는 방법론을 제안함.

### 2. 연구의 내용

- 핵심 연구내용은 열차스케줄을 고려한 도시철도 네트워크 경로배정 모형 구축임. 이 모형에서는 기·종점 승객의 열차스케줄을 고려한 최적 경로탐색 방안과 탐색된 최적경로에 승객의 열차차량 탑승 및 환승역 이용패턴을 구현하는 방안에 대한 검토가 요구됨.
- 대중교통카드자료에서 승객의 출발시간과 열차의 스케줄을 고려하여 경로를 탐색하는 동적 최소시간경로탐색 알고리즘으로 시간대별 열차 혼잡의 변화현상을 반영함.
- 도시철도 운행스케줄은 각 차량의 운행노선과 역별 출발·도착시간이 지정되어 있음. 이 스케줄을 하나의 링크로 가정하고 운행노선과 열차스케줄을 고려하면서 환승역에 대한 적절한 반영을 위하여 링크표지기반 네트워크 이론을 응용하는 방안을 제안함.
- 열차 간의 환승을 비용에 반영하기 위하여 열차 내 이동시간, 환승이동시간, 열차대기시간 등을 일반화 비용(Generalized Cost)으로 환산하여 적용함.

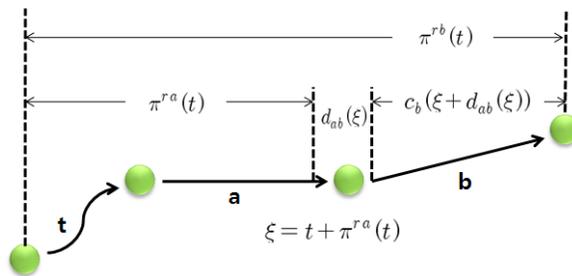
## II. 주요 연구 결과

### 1. 응용 이론

○ 동적 최적경로탐색 알고리즘

- 동적 최적시간경로탐색 알고리즘은 모든 출발지점에서 단일도착지점까지 최적통행비용을 계산하는데 여기에 시간을 변수로 고려하였음.

- 기점  $r$ 에서  $t$ 시간에 출발해 링크  $a$ 의 도착링크까지의 최소시간  $\pi^{ra}(t)$ 와 두 인접링크  $a$ 와  $b$ 로의 회전시간  $d_{ab}(t + \pi^{ra}(t))$ 와 링크  $b$ 의 통행시간  $c_b(t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)))$ 을 합산하여 동적 최소시간경로탐색을 위한 최적식으로 구축됨.



(그림 1) 동적 최소시간 경로탐색

$$\pi^{rb}(t) = \pi^{ra}(t) + d_{ab}(\xi) + c_b(\xi + d_{ab}(\xi))$$

여기서

$$\xi : t + \pi^{ra}(t)$$

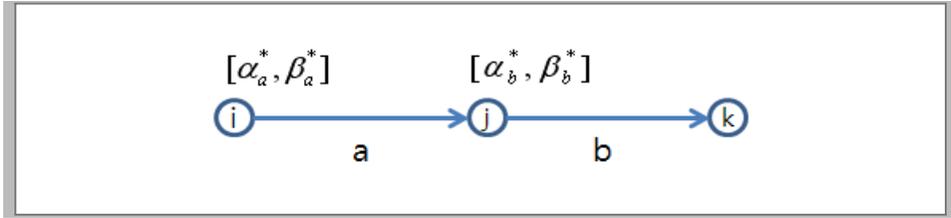
$\pi^{ra}(t)$  : 출발지  $r$ 에서  $t$ 시간에 출발하여 링크  $a$ 의 도착노드까지 최소통행시간

$d_{ab}(t)$  : 링크  $a$ 에서 링크  $b$ 로 통행 시 시간  $t$ 에서 발생하는 환승시간

○ 시간창의 적용

- 시간창(Time Window)이란 도착 및 출발시간이 한 쌍으로 이루어진 것으로, 여기서는 열차의 도착시간과 출발시간을 의미함.

- <그림 2>는 도시철도 네트워크의 기본개념으로 시간창을 설명한 것임. 링크(노선) $a$ 와 링크(노선) $b$ 는  $i, j, k$  3개의 노드(역)로 순차적으로 연결된 것으로, \*번호의 열차가 링크 $a$ 의 시작노드에서 시간창이  $[\alpha_a^*, \beta_a^*]$ 이고 다음 역인 링크 $b$ 의 시작노드는  $[\alpha_b^*, \beta_b^*]$ 임.



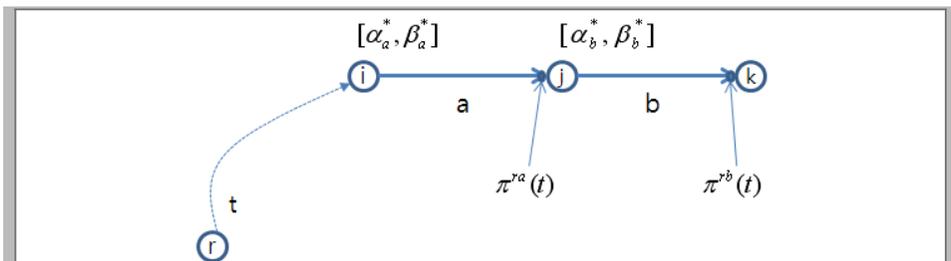
〈그림 2〉 도시철도 네트워크와 시간창

- 시간창은 Hard 시간창(HTW : Hard Time Window)과 Soft 시간창(STW : Soft Time Window)으로 구분됨.
- Hard 시간창은 시간창 내에서만 대기와 탑승행위가 이루어지는 것을 의미하여 대괄호를 이용해 [도착, 출발]로 표현됨.
- Soft 시간창은 시간창 전에 대기가 가능하며, 출발시간까지 탑승이 가능함을 표현하여, 도착시간에 대하여 열린 괄호를 이용해 (도착, 출발)로 표현됨. 도시철도에서는 승객이 열차의 도착 전에 대기가 Soft 시간창의 기본개념임.

○ Soft 시간창을 고려한 경로탐색

- Soft 시간창 제약이 존재하는 최적경로탐색은 Soft 시간창이 부과하는 제약하에 승객의 일반화 비용을 최소화하는 문제임.
- 도시철도의 분석을 위하여 승객이 이용한 통합 철도수단의 총통행비용은 개별 철도수단의 통행비용, 대기비용, 시간창 및 환승비용을 고려하여 산정함.
- <그림 3>에서 환승이 없는 열차의 탑승진행과정에서 최적비용은 다음의 최적식으로 표현되며, 여기서  $\pi^{ra}(t) = \alpha_b^*$ 로 표현되므로 환승에 대한 고려가 필요하지 않음.

$$\pi^{rb}(t) = \pi^{ra}(t) + c_b(t + \pi^{ra}(t))$$



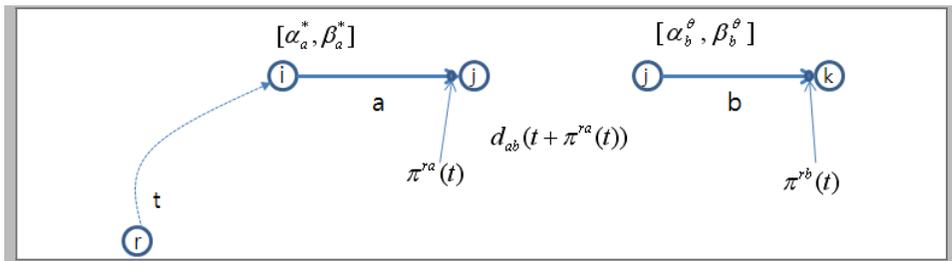
〈그림 3〉 환승이 없는 경우의 열차탑승 진행

-<그림 4>에서 노선a의 \*번호열차에서 노선b의 열차 $\theta$ 로 환승이 존재하는 경우까지 고려한 탑승진행의 최적비용식은 다음과 같음.

$$\pi^{rb}(t) = \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)) + c_b(t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)))$$

$$\text{여기서 } t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)) \leq \beta_b^\theta$$

-라인b까지 환승을 포함한 도착시간  $t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t))$ 에서 열차  $\theta$ 의 출발시간 전에 도착하는 제약이 포함됨.



<그림 4> 환승이 존재하는 경우의 열차탑승 진행

## 2. 도시철도 네트워크 구축

### ○호선별 네트워크 구축

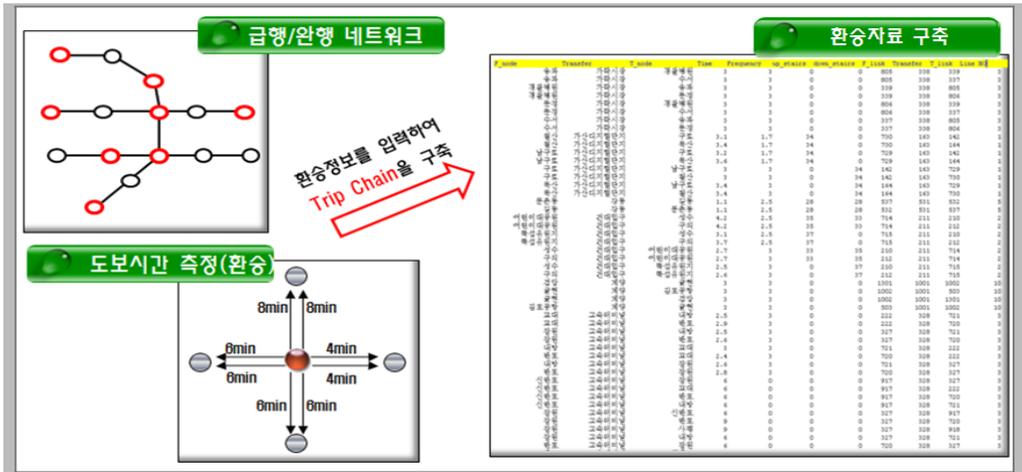
-지하철은 도로를 주행하는 버스와 달리 지하·지상에서 지하철 전용 레일(Right of way)을 이용하므로 이동에 방해가 주는 다른 요인이 없으며, 수도권 전체를 통행하는 광역교통의 성향을 띠고 있어 승객들이 장거리 이동을 하는데 주로 이용하고 있음.

-지하철은 일반 노선 외에 급행노선이 존재하므로 완행, 급행의 노선을 별개로 보고 링크를 새로이 연결하여야 함. 지하철 노선은 각기 다른 열차를 이용하나 동일한 역을 통과하기 때문에 링크 표지 기반(Link-Mode Label) 이론을 응용하여 동일노드에 노선별 링크를 연결함.

### ○환승 네트워크 구축

-열차 간 환승, 완행↔급행 간 환승은 각 환승역에서 열차별로 이동이 가능하도록 가상의 링크를 연결함. 가상의 환승링크에는 환승거리와 여타 변수들을 고려하여 환승 이동시간과 환승대기시간, 이동파라메타를 링크 속성으로 부여함.

- 환승링크는 실제론 존재하지 않지만 수단 간 환승연결을 위해 필요한 가상의 링크로 환승노드에 다음 경로의 정보를 사전에 저장해놓은 상태에서 경로선택과정을 시작하게 됨.
- 이 방법은 환승노드마다 다음 경로의 정보가 저장되어 있기 때문에 많은 메모리를 차지하나 계산방법이 단순하고 빠르며, 모든 환승링크를 직접 연결하는 방식이 아니기 때문에 환승링크의 급격한 증가를 방지할 수 있다는 장점을 가지고 있음.

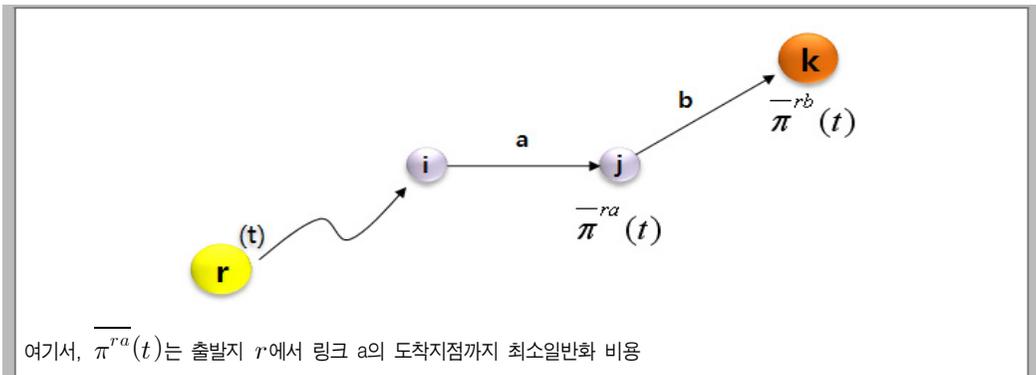


〈그림 5〉 급행 · 완행을 고려한 환승네트워크 구축

### 3. 스케줄 기반 네트워크 구축

#### ○ 일반화 비용의 추정

- 〈그림 6〉은 출발지 r을 출발하여 링크 a에서 b로 환승 후 도착지인 k에 도착하는 경로를 링크로 표현한 것임.



〈그림 6〉 최소시간경로 표현

- $r$ 에서  $b$ 의 도착지점( $k$ )까지의 경로탐색 시 최소시간을 고려한 경로는 다음의 식과 같이 표현이 가능하고, 출발지  $r$ 에서 링크  $a$ 의 도착지점( $j$ )까지 소요시간  $\pi^{ra}$ 와 환승이동시간  $M_{ab}$ , 그리고 링크  $b$ 의 주행시간  $c_b$ 를 더한 값이 최소가 되는 경로를 선택하게 되며 수식은 아래와 같음.

$$\overline{\pi}^{rb}(t) = \overline{\pi}^{ra}(t) + M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi)) + c_b(\xi + M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi)))$$

여기서,

$$\xi : t + \pi^{ra}(t)$$

$\overline{\pi}^{rb}$  : 출발지  $r$ 에서 수단-링크  $b$ 의 도착역까지 최소일반화비용

$\pi^{rb}$  : 출발지  $r$ 에서 수단-링크  $a$ 의 도착지점까지의 통행시간

$M_{ab}$  : 수단  $a$ 에서 수단  $b$ 로 환승을 위한 이동시간

$w_{ab}$  : 수단  $a$ 에서 수단  $b$ 로 환승 이동 후 대기시간

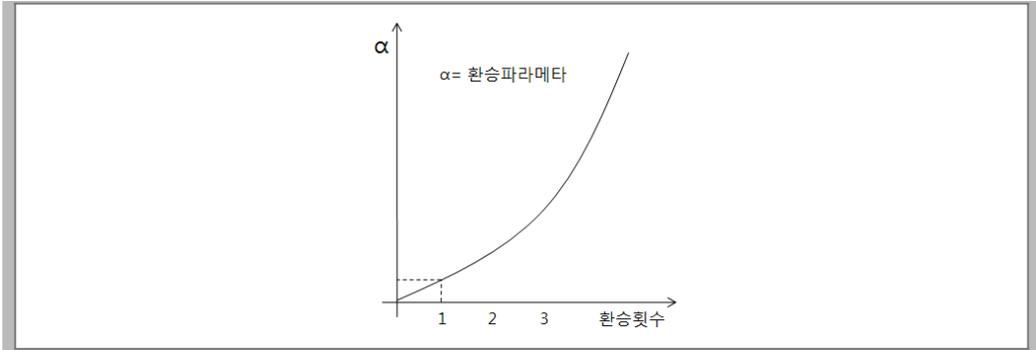
$c_b$  : 수단-링크  $b$ 의 주행시간

-이 식은 출발지  $r$ 에서 도착지  $k$ 까지 경로 중 통행시간을 나타낸 것으로, 실제 대중교통을 이용하는 승객은 통행시간 외에 이동 목적이나 환승횟수, 통행비용 등 이동에 필요한 모든 정보를 고려하여 경로를 선택하게 됨.

-<그림 7>과 같이 환승횟수에 대한 저항으로 환승이 많아질수록 승객이 부담감을 느끼는 식으로 전환하는 일반화비용계수( $\alpha$ )를 도입하며,  $\alpha$ 는 환승횟수가 비선형적인 증가를 나타내는 함수로 표시됨.

$$\overline{\pi}^{rb}(t) = \overline{\pi}^{ra}(t) + \alpha(M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi))) + c_b(\xi + M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi)))$$

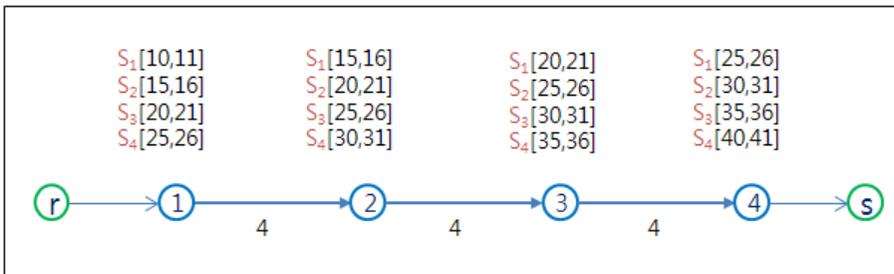
여기서,  $\alpha$ 는 일반화비용 계수 추가



〈그림 7〉 환승횟수에 대한 일반화비용 계수

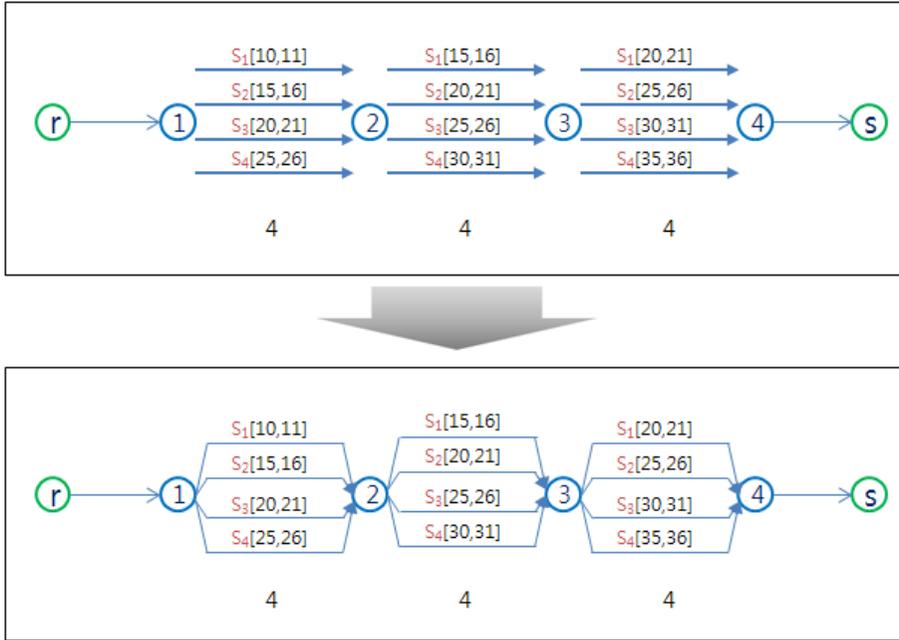
○ 스케줄링크 기반 네트워크

- 도시철도 네트워크의 열차 스케줄 도착·출발 시간을 연결하는 과정이 우선되어야 함. 이때 해당 노드에는 각 열차 차량에 따른 스케줄 정보(Time Window)를 입력함(<그림 8> 참조).



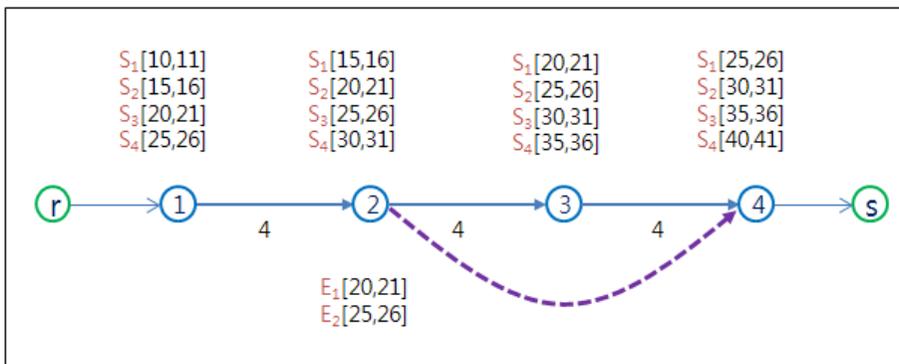
〈그림 8〉 네트워크와 운행 스케줄

- 각 노드에 있는 스케줄 정보를 아래와 같이 링크로 변환하여 연결하는 과정을 거침. 스케줄정보는 도착·출발 시간으로 구성되어 있으므로 (당 역 도착노드)-(다음 역 출발노드) 형식의 링크로 구성이 가능함(<그림 9> 참조).
- 스케줄링크의 연결 방식은 수단-링크라벨 개념을 적용하여 열차 차량들을 별개 수단으로 보고 각 역을 연결함(<그림 9> 참조).



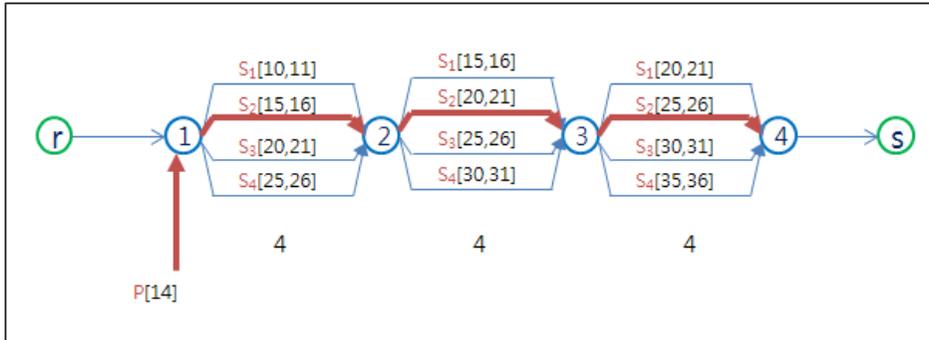
〈그림 9〉 스케줄링기반의 네트워크

- 일반 완행노선의 스케줄은 역의 도착시간과 출발시간 사이에 일정한 시간 간격이 있음. 이는 해당역의 승하차를 위한 열차 대기시간이며 이 간격은 노선마다 차이는 있지만 평균 30초 정도의 시간을 가짐.
- 급행노선의 경우 위의 일반 스케줄링 네트워크의 방법을 사용하는데 정차역을 제외하고 그냥 지나치는 역은 스케줄의 도착시간과 출발시간을 동일하게 설정하여 입력함 (<그림 10> 참조).



〈그림 10〉 급행 스케줄링과 네트워크 표현

- 승객이 지하철을 이용할 때 일반적으로 열차 스케줄을 고려하여 정확한 시간에 역에 진입하는 경우는 드물며 일반적으로 역에 차량이 진입하는 시간까지 대기하게 됨.
- 아래의 그림처럼 승객을 P[14]라고 가정하고 승객은 역에 진입한 시간 이후에 이용하려는 열차 중 최초로 도착하는 열차  $S_2$ 에 탑승하여 목적지인 4번 역까지 이동하게 됨.
- 이를 경로탐색 모형으로 표현하려 하면 목적지까지의 이동시간과 1번 역의 대기시간을 모두 고려하여 최적경로를 선택하게 됨(<그림 11> 참조).

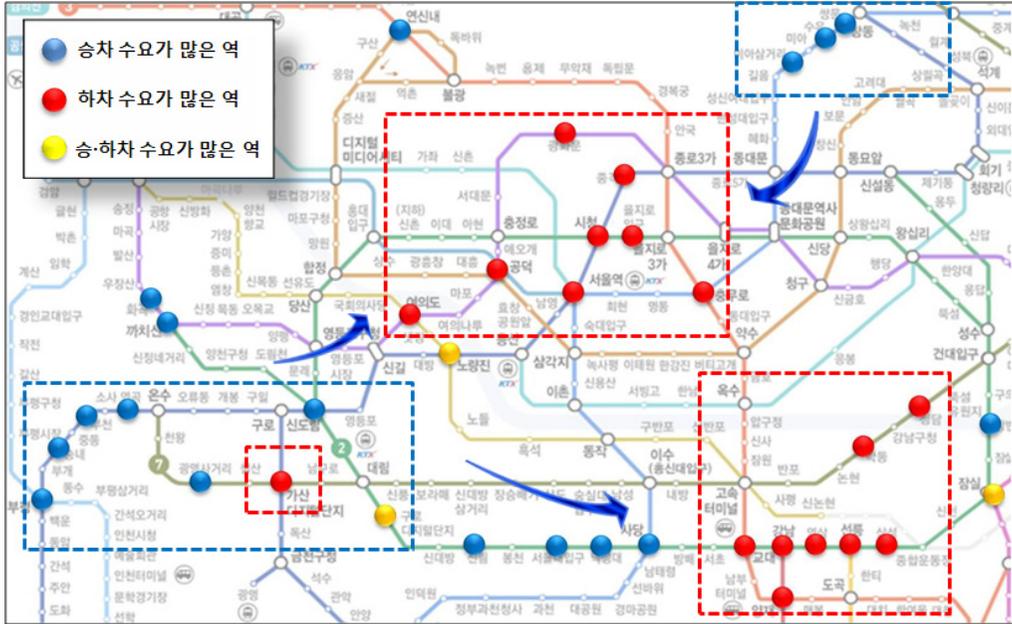


(그림 11) 승객도착과 최적경로 탐색

#### 4. 혼잡도 추정사례

##### 1) 침두시 혼잡역의 구분

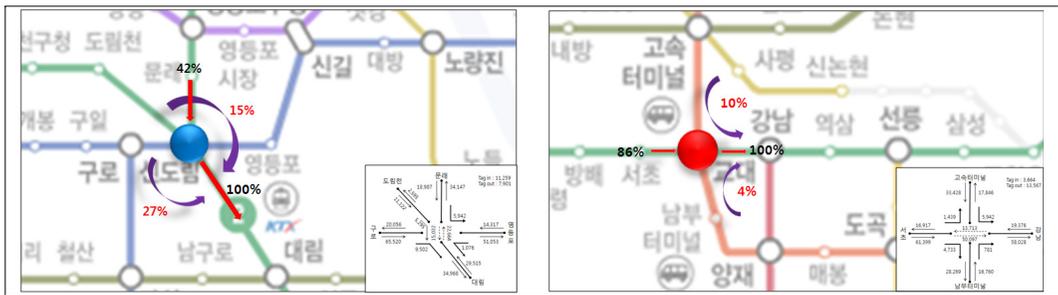
- 아래의 <그림 12>는 수도권 지하철의 출근 침두시 통행수요를 분석한 결과임. 주로 강남과 서울역 인근에 업무지구가 형성되어 있고, 인천에서 서울로 출근하는 인구와 신도림 및 강북 인근에 주거지구가 형성되어 있는 수도권의 특성상 출근 침두시 통행수요의 이동 패턴이 명확하게 드러남.



〈그림 12〉 침두시 지하철 혼잡 패턴(상위 20위)

## 2) 침두시 주 혼잡 환승역 분석

○〈그림 13〉은 환승역의 수요이동 패턴을 분석한 결과임. 출근 침두시에 1호선과 3호선에서 강남 인근으로 진행하는 2호선에 수요가 집중되고 있으며, 환승수요가 많은 신도림역(1호선→2호선)과 교대역(3호선→2호선)의 방향별 환승비율을 표현하였음.



〈그림 13〉 침두시 신도림역과 교대역의 환승패턴

### Ⅲ. 정책 건의

- 대중교통카드자료를 활용하여 도시철도 혼잡도 추정방법 개선
  - 도시철도 차량의 혼잡도
  - 도시철도 환승역의 혼잡도
  
- 도시철도 운영정책에 대한 주요 판단기준으로 활용
  - 최적 배차간격 조정
  - 최적 열차 운행횟수 조정
  - 열차 정시성 확보 판단을 위한 근거
  - 열차 통행속도 결정
  - 역사·환승역 시설용량 판단을 위한 근거
  
- 도시철도 최적 운행스케줄 시뮬레이션 모형으로 활용
  - 승객의 이동패턴 파악
  - 적정 서비스수준 유지를 위한 도시철도 시뮬레이션 모형체계 구축

# 목 차

---

제1장 서론 .....	3
제1절 연구의 배경 및 목적 .....	3
1. 연구 배경 .....	3
2. 연구 목적 .....	4
제2절 연구의 범위 및 절차 .....	5
1. 연구의 범위 .....	5
2. 연구의 절차 .....	6
제2장 열차 혼잡도 추정방법 .....	9
제1절 기존 혼잡도 추정방법 .....	9
1. 서울메트로 혼잡도 추정방법 .....	9
2. 서울도시철도 혼잡도 추정방법 .....	11
제2절 혼잡도 산정 관련 연구 .....	14
1. 대중교통 서비스지표 산출 연구(1~2단계) .....	14
제3절 시사점 .....	18
제3장 이론적 배경 .....	23
제1절 동적 최적경로기법 .....	23
1. 최적경로탐색기법 .....	23
제2절 네트워크 이론 .....	25
1. 링크 표지(Link-Mode Label) 기반 네트워크 .....	25
2. 시간창(Time Window) .....	26
제4장 수도권 도시철도 네트워크 구축 .....	33
제1절 대중교통카드를 활용한 네트워크 구축방안 .....	33
1. 대중교통카드자료의 특성 .....	33
2. 대중교통 통행배정예의 활용 .....	35

제2절 도시철도망 구축 .....	36
1. 도시철도 네트워크의 구조 .....	36
2. 네트워크 구축 .....	40
3. 도시철도 이용객의 환승행태 분석 .....	42
제3절 도시철도 스케줄 기반 네트워크 구축 .....	45
1. 도시철도 운행 스케줄 .....	45
2. 일반화 비용 모형식 .....	46
<b>제5장 혼잡도 추정방안 구축사례 .....</b>	<b>53</b>
제1절 대중교통카드자료를 활용한 지하철 통행배정 .....	53
1. 분석 데이터 .....	53
2. 지하철 통행배정 .....	54
제2절 지하철 혼잡특성 분석 .....	55
1. 지하철 혼잡 패턴 .....	55
2. 지하철 혼잡 분석 .....	58
<b>제6장 결 론 .....</b>	<b>61</b>
제1절 연구의 결론 .....	61
제2절 향후 활용방안 .....	62
제3절 정책 건의 .....	63
<b>참고문헌 .....</b>	<b>67</b>
<b>영문요약 .....</b>	<b>71</b>

# 표 목 차

---

〈표 1-1〉 도시철도 네트워크의 구조 및 호선별 운영횟수 .....	5
〈표 2-1〉 서울메트로 교통량 조사에 사용되는 데이터 .....	9
〈표 2-2〉 지하철 혼잡도 기준 .....	10
〈표 2-3〉 서울메트로 호선별 최고혼잡구간 및 혼잡도 .....	10
〈표 2-4〉 호선별 연도별 최고혼잡도 변화 추이 .....	11
〈표 2-5〉 서울도시철도 교통량 조사 자료 .....	12
〈표 2-6〉 서울도시철도 2007, 2009년 혼잡도 조사결과 .....	13
〈표 2-7〉 평일 출근시간대 혼잡도(08~09시) .....	14
〈표 2-8〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 구간별 지하철 혼잡률 .....	17
〈표 2-9〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 지역별 지하철 혼잡률 .....	18
〈표 4-1〉 교통카드이용자료 활용방안의 장점 .....	34
〈표 4-2〉 교통카드 수록 정보 및 정보 내용 .....	35
〈표 4-3〉 수도권 지하철 노선별 운영기관 .....	37
〈표 4-4〉 급행 노선별 운행시간 .....	38
〈표 4-5〉 환승노드에서 다음 경로 데이터 저장 .....	39
〈표 4-6〉 교통카드 수록 정보 및 정보 내용 .....	42
〈표 4-7〉 운행노선별 스케줄 수 .....	46
〈표 5-1〉 침두시 역별 이용수요 .....	56

# 그림 목차

---

〈그림 1-1〉 교통카드 태그 현황(버스) .....	4
〈그림 1-2〉 교통카드 태그 현황(도시철도) .....	4
〈그림 1-3〉 도시철도 네트워크 .....	5
〈그림 1-4〉 연구 수행 절차 .....	6
〈그림 2-1〉 서울도시철도 교통량 조사 과정 .....	12
〈그림 2-2〉 시간대별 이용률 .....	14
〈그림 2-3〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 버스 서비스수준 진단 방법론 .....	15
〈그림 2-4〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 재차인원 산출 방법론 .....	16
〈그림 3-1〉 정적 최소시간 경로탐색 .....	23
〈그림 3-2〉 동적 최소시간 경로탐색 .....	24
〈그림 3-3〉 지하철 완행·급행 노선 .....	25
〈그림 3-4〉 링크 확장방안 .....	26
〈그림 3-5〉 링크기반의 복합교통망 확장 예 .....	26
〈그림 3-6〉 2호선 열차스케줄 .....	27
〈그림 3-7〉 도시철도 네트워크와 시간차 .....	28
〈그림 3-8〉 환승이 없는 경우의 열차탑승 진행 .....	28
〈그림 3-9〉 환승이 존재하는 경우의 열차탑승 진행 .....	29
〈그림 4-1〉 대중교통카드자료 수집체계 .....	33
〈그림 4-2〉 KSCC 교통카드 거래내역 수집 프로세스 .....	34
〈그림 4-3〉 대중교통카드자료를 활용한 통행배정 과정 .....	36
〈그림 4-4〉 지하철역 데이터 구조 .....	37
〈그림 4-5〉 지하철 노선 데이터 구조 .....	37
〈그림 4-6〉 급행Network 구축(인천급행 중 구로~역곡 구간) .....	38
〈그림 4-7〉 가상 환승링크 연결(ex. 버스↔철도) .....	39
〈그림 4-8〉 급행·완행을 고려한 환승네트워크 구축 .....	40
〈그림 4-9〉 수도권 도시철도 네트워크 .....	40
〈그림 4-10〉 노드자료 : 역number에 해당 역명 매칭 .....	41
〈그림 4-11〉 노드자료 : 역명에 node번호 부여 .....	41

〈그림 4-12〉 링크자료 .....	42
〈그림 4-13〉 환승통행자료 .....	44
〈그림 4-14〉 열차 운행 스케줄 .....	45
〈그림 4-15〉 최소시간경로 표현 .....	47
〈그림 4-16〉 네트워크와 운행 스케줄 .....	48
〈그림 4-17〉 스케줄링크기반의 네트워크 .....	49
〈그림 4-18〉 급행 스케줄링크와 네트워크 표현 .....	49
〈그림 4-19〉 승객도착과 최적경로 탐색 .....	50
〈그림 5-1〉 지하철역 간 수요 .....	54
〈그림 5-2〉 지하철 통행배정 결과 .....	54
〈그림 5-3〉 침두시 지하철 혼잡 패턴(상위 20위) .....	55
〈그림 5-4〉 침두시 신도림역 방향별 환승수요 패턴 .....	57
〈그림 5-5〉 침두시 교대역 방향별 환승수요 패턴 .....	57
〈그림 6-1〉 대중교통자료를 활용한 도시철도 네트워크의 표현과 활용 .....	62

# 제1장 서론

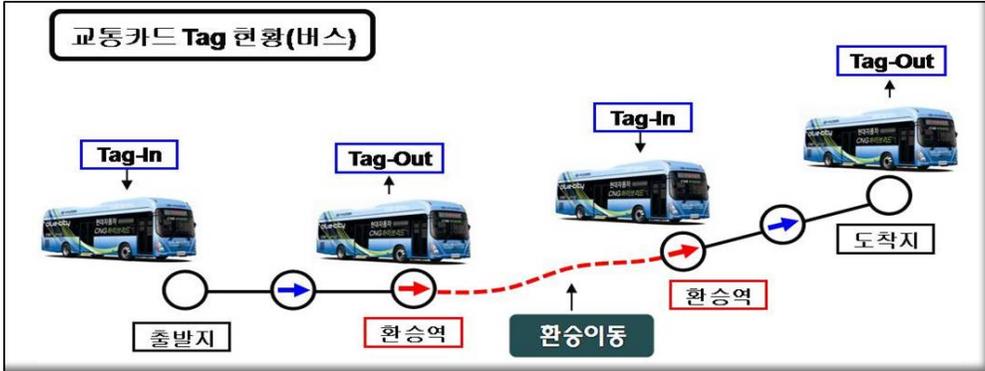
제1절 연구의 배경 및 목적

제2절 연구의 범위 및 절차

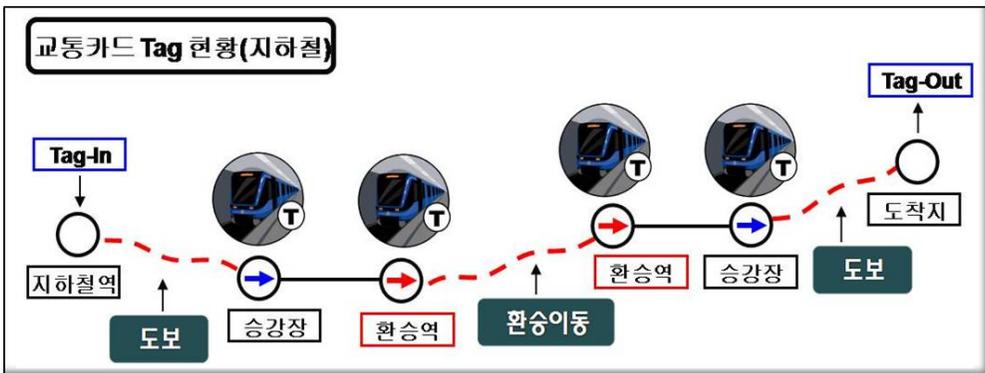
## 제1절 연구의 배경 및 목적

### 1. 연구 배경

- 도시철도 혼잡도는 도시철도의 운영상태를 나타내는 가장 중요한 지표로서, 차량 및 역사의 혼잡도를 파악하여 차량의 운행횟수 결정, 정시성 확보, 통행속도 개선, 적정재차인원 결정, 시설용량 결정 등 도시철도 서비스 제공을 위한 기초자료로 활용됨.
- 지하철 운영기관은 2년마다 지하철 구간별 혼잡도 및 환승인원을 조사하여 발표하고 있으나, 도시철도의 운영상태를 효과적으로 진단하기 위한 목적으로 활용하기에는 역 및 노선별로 나타나는 실시간적인 수요 특성에 대한 반영이 부족함.
- 그동안의 대중교통카드자료를 이용한 혼잡도 지표 산출은 버스에 집중되었는데, 버스는 승·하차 단말기가 장착되어 있으므로 대중교통카드자료를 이용하여 버스의 혼잡도를 계산하는 것이 용이하며, 현재 버스관리체계(BMS)와 버스정보체계(BIS) 등의 실제 교통정책에도 활용되고 있음(<그림 1-1> 참조).
- 철도는 역사 Gate에서의 승객 진입(Tag-In)과 진출(Tag-Out)이 대중교통카드에 기록되므로, 버스와 달리 승객의 Tag-In, Tag-Out시간이 열차차량의 승·하차시간과 일치되지 않음(<그림 1-2> 참조).
- 따라서 대중교통카드자료를 활용하여 도시철도 차량 및 환승역사 등의 혼잡도를 파악하는 방안은 개별승객의 기·종점 역사별 Tag-In, Tag-Out 시간을 정보로 하여 승객의 이동행태에 대한 시뮬레이션을 통해 열차 및 환승역사이용에 대한 정보를 파악하는 방안이 요구됨.



〈그림 1-1〉 교통카드 태그 현황(버스)



〈그림 1-2〉 교통카드 태그 현황(도시철도)

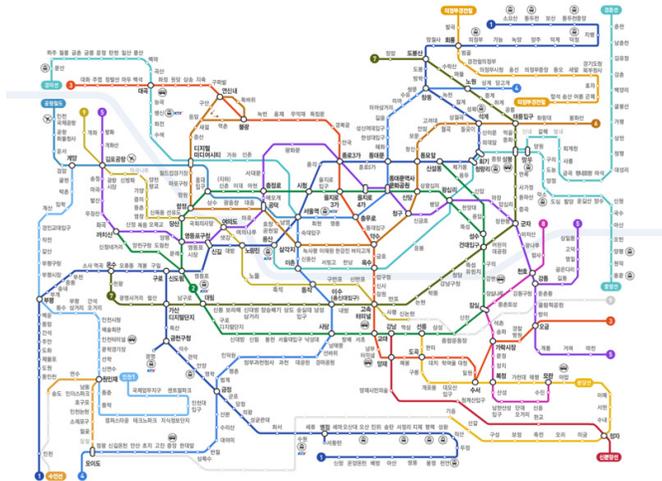
## 2. 연구 목적

- 이 연구는 대중교통카드자료를 활용하여 도시철도의 혼잡도 지표를 산출하는 방법론을 제안하고, 이를 서비스지표로 활용하는 방안을 제시함.
- 전술했듯이, 도시철도는 승객의 대중교통카드 Tag-IN과 Tag-Out이 철도역 내부에서 이루어져 교통수단(지하철) 승·하차의 정확한 파악이 어려움.
- 주요 연구내용으로 1) 개별승객의 통행경로를 예측하고, 2) 통행경로에 나타나는 열차차량의 스케줄을 고려하여 탑승시키며, 3) 환승이 발생하는 경우 환승이동시간, 환승대기시간을 탑승열차의 스케줄과 매칭시키는 방안을 제안함.
- 또한 제안된 방안을 통하여 계산된 열차차량, 역사, 환승역의 혼잡도를 도시철도의 운영 전략에 이용하는 방안을 강구함.

## 제2절 연구의 범위 및 절차

### 1. 연구의 범위

- 공간적 범위는 수도권 통합환승요금제가 시행 중인 6개 도시철도 운영기관이 운영하는 지역인 도시철도 네트워크를 대상으로 함.



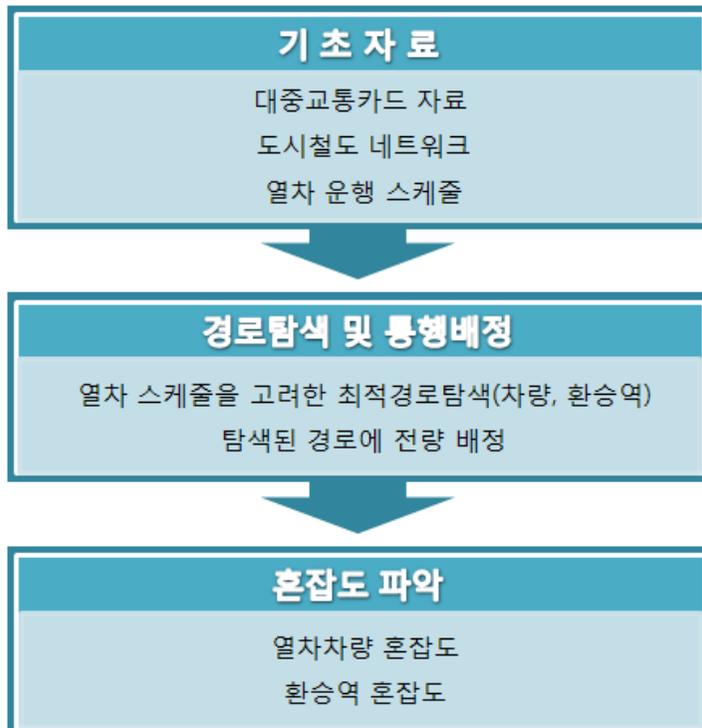
〈그림 1-3〉 도시철도 네트워크

〈표 1-1〉 도시철도 네트워크의 구조 및 호선별 운행횟수

구분	내 용			
시간적 범위	- 2011년 10월			
역 수	- 469개 (환승역 72개)			
지하철 노선	- 31개 (완행 22 +급행 9)			
호선별 일일 운행횟수	1호선 : 617, 경원선 : 612, 경부선 : 327, 경인선 : 429			
	2호선 본선 : 560, 성수 지선 : 137, 신정 지선 : 224			
	3호선 : 440			
	4호선 : 513			
	5호선 : 461	6호선 : 338	7호선 : 408	8호선 : 312
	9호선 : 366	경의선 : 152	경춘선 : 138	중앙선 : 176
	공항철도 : 422	분당선 : 336	인천1호선 : 312	

## 2. 연구의 절차

- 연구의 절차는 <그림 1-4>와 같음.
- 우선 승객의 이동 차량 및 경로 추정을 위한 기초자료 준비
  - 대중교통카드자료로부터 승객의 Gate Tag-In, Tag-Out 시간 및 기·종점역(OD)
  - 도시철도 네트워크
  - 도시철도운영기관으로부터 파악된 각 역의 열차스케줄(열차번호, 도착시간, 출발시간)
- 열차스케줄을 고려한 도시철도 네트워크 경로배정 모형 구축
  - 기·종점 승객의 열차스케줄을 고려한 최적 경로탐색 방안
  - 탐색된 최적경로에 승객의 열차차량 탑승 및 환승역 이용패턴 구현 방안
- 열차차량 및 환승역 혼잡도 파악
  - 전체 승객의 통행배정으로 차량의 혼잡도 파악
  - 환승역에서 이동패턴을 구현하여 환승역 혼잡도 파악



<그림 1-4> 연구 수행 절차

## 제2장 열차 혼잡도 추정방법

제1절 기존 혼잡도 추정방법

제2절 혼잡도 산정 관련 연구

제3절 시사점

# 제 2 장

## 열차 혼잡도 추정방법

### 제1절 기존 혼잡도 추정방법

#### 1. 서울메트로 혼잡도 추정방법

- 서울메트로는 신규노선 개통, 증차계획, 편의시설 확충 등의 서비스 개선을 목적으로 매년 교통량 조사를 통하여 승객들의 지하철 이용행태를 분석하고 있음.
- 교통량 조사는 크게 혼잡도와 환승인원 조사로 나뉘며 이 중 혼잡도 분석방법은 다음과 같음.
- 사용 데이터 : 지하철 6개 운영기관의 토, 일, 평일 3일간 이용자료
- 혼잡도 분석방법
  - 개개인 승차역 → 하차역(OD자료)에 대한 가장 효율적인 이동경로를 설정하고, 역 간 소요시분과 환승시분 등을 고려하여 이동경로(Trip course) 작성
  - 이동경로와 소요시간이 정의된 개별 Trip course에 승객 개개인의 승·하차 역 및 시간을 대입해 기초 데이터베이스를 만들고 이를 기초로 조건에 맞는 구간별 시간대별 총 이용인원 산출

〈표 2-1〉 서울메트로 교통량 조사에 사용되는 데이터

구 분	자료 구조	자료 내용
환승자료	환승역 환승 소요시분 등	각 환승역의 환승방향별 (○호선→○호선) 환승에 소요되는 시간 등
권역별·종류별 OD자료	승객 개인별 승·하차 역 및 승·하차 시간	권역별·종류별 이용승객의 승·하차 역 및 시간을 기록한 자료
열차운행자료	열차 DIA	조사 대상일 모든 열차의 시종착역, 경유역 등 열차 운행 경로 및 시간에 관한 정보

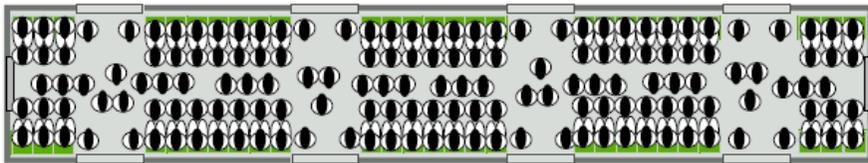
〈표 2-2〉 지하철 혼잡도 기준

인원(명)	38	54	94	120	160	184	216	240	280	<b>320</b>	268	400	432
혼잡도(%)	24	34	59	75	100	115	135	150	175	<b>200</b>	230	250	270

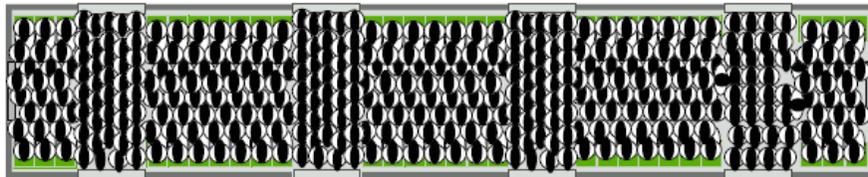
- 34% : 좌석에 모두 앉은 상태



- 100% : 객실통로 3열 입석, 각 출입문에 2명씩 서 있는 상태



- 230% : 객실통로 5열 입석, 각 출입문에 30~40명(8열) 입석, 승차한계



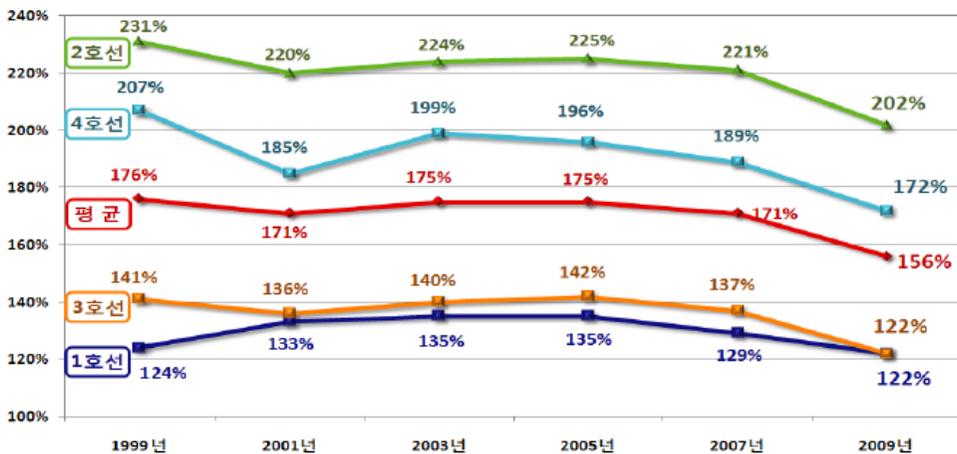
○2009년 혼잡도 조사결과는 다음과 같음.

〈표 2-3〉 서울메트로 호선별 최고혼잡구간 및 혼잡도

노 선 별	구 간	시간대	차량대수	재차인원	혼잡도	
1호선	2007년	동묘→동대문	08:20~08:50	90	18,600	129%
	2009년	청량리→제기동	08:00~08:30	100	19,215	122%
2호선	2007년	사당→방배	08:20~08:50	110	38,930	221%
	2009년	사당→방배	08:10~08:40	120	38,252	202%
3호선	2007년	독립문→경복궁	08:00~08:30	100	21,999	137%
	2009년	독립문→경복궁	08:00~08:30	100	19,249	122%
4호선	2007년	한성대→혜화	08:00~08:30	90	27,171	189%
	2009년	한성대→혜화	08:00~08:30	90	24,435	172%

〈표 2-4〉 호선별 연도별 최고혼잡도 변화 추이

연도	혼잡도(%)				
	평균	1호선	2호선	3호선	4호선
1999년	176%	124%	231%	141%	207%
2001년	171%	133%	220%	136%	185%
2003년	175%	135%	224%	140%	199%
2005년	175%	135%	225%	142%	196%
2007년	171%	129%	221%	137%	189%
2009년	156%	122%	202%	122%	172%



## 2. 서울시철도 혼잡도 추정방법

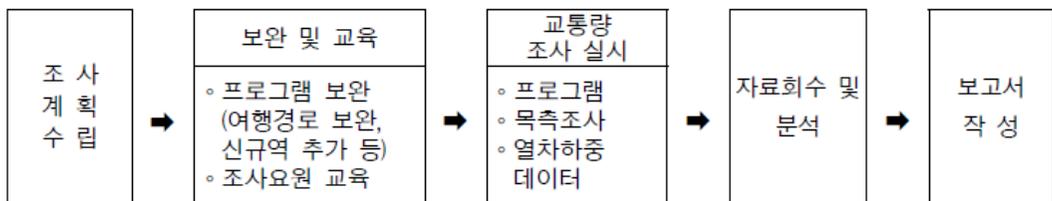
- 수도권 5,6,7,8호선을 운영하고 있는 서울시철도는 연도별로 정기 교통량 조사를 통하여 혼잡도와 환승인원을 조사하고 있음.
- 수도권 전역을 범위로 하여 여행경로(Trip thread)를 설정하고 열차 운행정보(time schedule)를 기반으로 조사를 수행함.
- 조사 내용은 다음과 같음.
  - 혼잡도 : 역 · 요일 · 시간대 · 방향별(상 · 하행) 통과차량의 재차인원
  - 환승인원 : 환승역 · 요일 · 시간대 · 방향별(유 · 출입) 환승인원

〈표 2-5〉 서울시철도 교통량 조사 자료

구분	자료내용
여행경로 작성 (Trip thread)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수도권 전역 역 간 여행경로</li> <li>- 역 간 소요시간, 환승소요시간</li> <li>- 다중경로 채택 후 인원배분</li> <li>- 상하행, 유입출 등</li> </ul>
RF 교통카드 O/D 정기권 카드 O/D	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수도권 전역에 대한 일시간대별</li> <li>- 출발역·출발시간 동행량</li> <li>- 도착역·도착시간 동행량</li> </ul>
역·환승역 정보	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 역별 기초정보</li> <li>- 역번호, 역명, 역 간 정보, 상·하행</li> <li>- 신규노선, 신규역 추가</li> </ul>
열차운행정보	○ 평·토·휴일 열차운행시각표(5~8호선)

자료: 서울시철도, 2010, 도시철도 수송계획

- 교통량 조사는 실측조사와 교통카드데이터를 바탕으로 수행되며 수행순서는 다음과 같음.
- 교통량 프로그램에 의한 조사(수송 O/D자료 활용) + 목측조사 + 열차 하중데이터(6~8호선)



〈그림 2-1〉 서울시철도 교통량 조사 과정

- 혼잡도는 구간·시간대별 총 재차인원과 구간·시간대별 운행열차수로 나누어 산출하는 방법을 적용하고 있음.
- 또한 5·6·7호선은 8량을 기준으로 운행하고, 8호선은 6량을 기준으로 운행하므로 열차당 정원을 구분하여 산정함.

[혼잡도 산정기준]	
- 5·6·7호선(8량)	1열차당 혼잡도 : 재차인원 + 열차당 정원(1,256명) X 100
- 8호선(6량)	1열차당 혼잡도 : 재차인원 + 열차당 정원(936명) X 100

- 2009년 예측한 차내 혼잡도는 5호선 168%, 6호선 177%, 7호선 179%, 8호선 176%로 나타남.
- 5호선은 2007년에 비해 8% 감소하였고, 6호선은 2% 증가하였으며, 8호선은 혼잡구간이 변경되었음. 2007년 혼잡도와 2009년 혼잡도는 <표 2-6>과 같음.

〈표 2-6〉 서울도시철도 2007, 2009년 혼잡도 조사결과

호선	2007년 10월 조사결과			2009년 11월 조사결과		
	구간	통과열차	혼잡도	구간	통과열차	혼잡도
5호선	(하) 신길→여의도	21	176%	(하) 신길→여의도	22	168%
6호선	(하) 망원→합정	13	175%	(하) 망원→합정	14	177%
7호선	(하) 중곡→군자	21	179%	(하) 중곡→군자	21	179%
8호선	(상) 석촌→잠실	12	176%	(하) 몽촌토성→잠실	13	176%

주: 혼잡도 175% 수준 - 좌석에 모두 착석해 있으며 손잡이를 모두 잡고 좌석 앞 중앙에 3명이 서 있고, 각 출입문 부근에 35명 정도 서 있는 정도의 혼잡상태

-5호선 : 기존 176%에서 168%로 8% 감소

(9호선 개통 이후 강서지구 위치역 탑승인원 감소 및 9호선역 분산탑승으로 혼잡도 감소)

-6호선 : 기존 175%에서 177%로 2% 증가

(경의선 환승 시행 및 DMC 개발에 의한 승차인원의 지속적인 증가로 혼잡도 증가)

-7호선 : 기존 179%와 동일

(북단 위치 역에서 탑승하는 의정부, 강북지역민과 5호선에서 유입되는 고객의 강남지역으로의 이동으로 중곡→군자 구간 최고 혼잡 발생)

-8호선 : 혼잡구간 변경 ((상)석촌→잠실 ⇒ (하)몽촌토성→잠실)

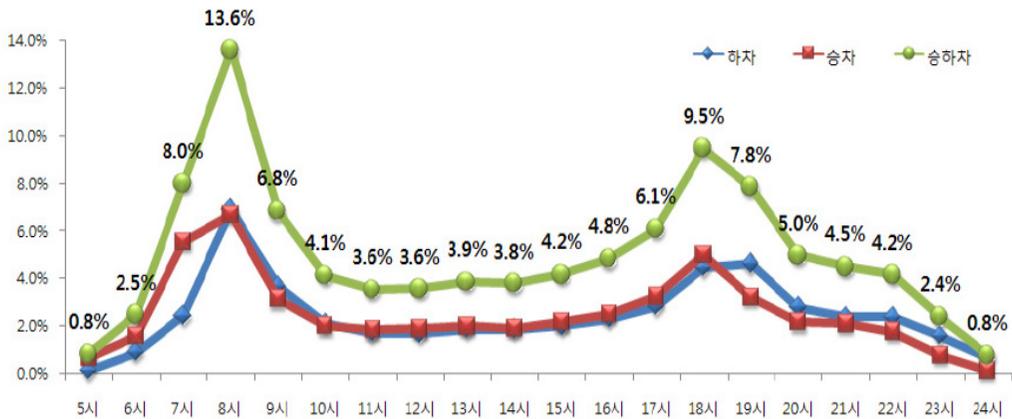
(성남 재개발에 따른 성남지역 탑승인구 감소로 석촌→잠실 구간 혼잡도 감소 및 잠실·강남 이동에 따른 유동인구 증가로 몽촌토성→잠실 구간 혼잡도 증가)

○첨두시 점유비를 보면 출근시간대(07~09시) 승·하차 점유비가 1일 전체 중 21.6%를 차지하며, 퇴근시간대(18~20시) 승·하차 점유비가 1일 전체 중 17.3%를 차지하는 것으로 조사됨.

○이 중 출근시간대의 최고 혼잡구간은 5호선이 168%, 6호선이 177%, 7호선이 179%, 8호선이 176%이며, 서울 내부로 유입되는 하선의 혼잡도가 더 높은 것으로 나타남.

〈표 2-7〉 평일 출근시간대 혼잡도(08~09시)

호선	방향	구간	시격	통과열차	재차인원	혼잡도
5호선	상선	마장→왕십리	2.5	23	45,072	156%
	하선	신길→여의도	2.5	22	46,361	168%
6호선	상선	창신→동묘앞	4.0	13	26,737	164%
	하선	망원→합정	4.0	14	31,056	177%
7호선	상선	이수→내방	2.5	18	36,645	162%
	하선	중곡→군자	2.5	21	47,326	179%
8호선	상선	석촌→잠실	4.5	12	19,526	174%
	하선	몽촌토성→잠실	4.5	13	21,357	176%

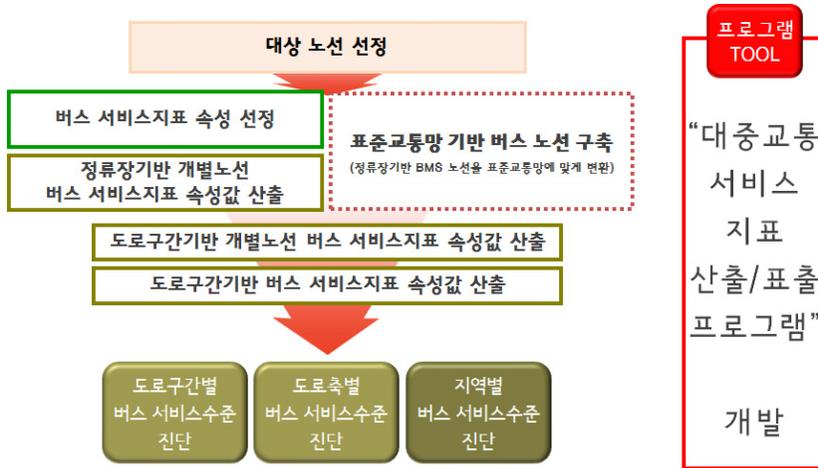


〈그림 2-2〉 시간대별 이용률

## 제2절 혼잡도 산정 관련 연구

### 1. 대중교통 서비스지표 산출연구(1~2단계)

- 서울시정개발연구원(2011)에서 수행하였던 연구는 ‘대중교통 서비스지표 산출연구(1단계 : 버스 서비스지표를 중심으로)’를 기반으로 그 한계점을 극복하여 더 현실성 있는 대중교통 서비스지표를 산출하고자 하는 추가 보완 연구임.
- 대중교통의 운영 및 이용 현황을 가장 잘 파악할 수 있는 교통카드 자료, BMS 자료, 지하철 운행 및 이용현황 자료를 이용하여 대중교통 서비스지표를 산출하고 대중교통 서비스 수준을 진단하였음.



(그림 2-3) 대중교통 서비스지표 산출연구의 버스 서비스수준 진단 방법론

## 1) 버스 서비스지표 산출(정류장 기반)

### (1) 버스 혼잡률 산출

- 교통카드 자료를 이용하여 혼잡률 속성값을 산출하며, 재차인원의 산출이 선행되어야 함. 재차인원과 운행횟수를 이용하여 혼잡률 속성값을 산출함.

#### ① 버스 재차인원 산출

- 교통카드 자료의 노선별 정류장의 승·하차인원을 활용하여 재차인원 속성값을 산출함.
  - 정류장 순서에 따른 운행출발 일시별 승·하차인원을 계산함.
  - 첫 번째 정류장은 ‘해당정류장 승차인원에서 하차인원을 뺀 값’이 첫 번째 정류장에서 두 번째 정류장까지 구간의 재차인원이 됨.
  - 두 번째 이후 정류장부터 마지막의 전 정류장까지는 ‘전 정류장에서 해당정류장까지 구간의 재차인원에서 해당정류장 승차인원을 더한 값에 하차인원을 뺀 값’이 해당 정류장에서 다음 정류장까지 구간의 재차인원이 됨.1)

1) 해당노선의 정류장 개수가 S개라 하면, 정류장과 정류장을 연결하는 구간은 S-1개로 구성되어 마지막 정류장을 시점으로 하는 정보가 없음.

노선번호	운행출발일시	정류장1	정류장2	...	정류장S	노선번호	운행출발일시	정류장1	정류장2	...	정류장S
노선1	1회					노선1	1회				
노선1	...										
노선1	N회										
...	...										
노선K	1회										
노선K	...					노선K	1회				
노선K	...										
노선K	N회										
...	...										
노선K	N회										

노선번호	운행출발일시	정류장1	정류장2	...	정류장S-1
노선1	1회	(승차인원)			(전 정류장 재차인원)
노선1	...				
노선1	N회				
...	...				
노선K	1회				
노선K	...	(하차인원)	-	(승차인원)	-
노선K	N회				(하차인원)

〈그림 2-4〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 재차인원 산출 방법론

- 산출된 재차인원을 현금승차율과 노선별 하차미태그율에 따른 교통카드 자료 보정방안을 활용하여 보정함.

$$\text{보정된 재차인원} = \text{재차인원} \times \frac{100}{100 - \text{현금승차율}(6.5\%)} \times \frac{100}{100 - \text{노선별 하차미태그율}}$$

## ② 버스 혼잡률 산출

- 혼잡률은 재차인원과 운행횟수, 버스정원의 관계식으로 산출됨.
  - 버스정원은 버스차량별로 다르나 노선별 운행차량에 대한 정보 부족으로 모든 차량의 정원을 60명으로 설정하여 분석을 수행함.

$$\text{혼잡률} = \frac{\text{보정된 재차인원}}{\text{운행횟수} \times \text{버스정원}(60\text{명})}$$

## 2) 지하철 서비스지표 산출

- 노선별 지하철 서비스지표 산출
  - 지하철 노선별 자료를 활용하면 노선별 서비스수준 분석이 가능
  - 노선에 해당되는 구간들의 속성값을 이용하여 노선별 지하철 서비스지표 산출

### (1) 지하철 운행횟수 산출

- 지하철 열차운행계획표를 이용해서 운행횟수 속성값 산출

- 열차 운행계획표를 기반으로 시간대별 구간별 운행횟수 산출
- 광역철도에서 운영 중인 급행열차의 운행횟수도 반영
- 하루 운행횟수는 전체 시간대별 운행횟수의 합계

$$\text{하루 운행횟수} = \sum_{i=1}^{24} N_i$$

여기서, N : 운행횟수, i : 시간대

### (2) 지하철 혼잡률 산출

- 지하철 정기교통량 조사 자료를 이용해서 혼잡률 속성값 산출
- 시간대별 혼잡률 자료를 기반으로 하여 하루 혼잡률 자료 재구축
  - 하루 평균 혼잡률 자료는 기본적으로 구축되어 있지 않아, 시간대별 혼잡률과 시간대별 운행횟수를 사용하여 재구축

$$\text{하루 혼잡률} = \frac{\sum_{i=1}^{24} N_i \times c_i}{\sum_{i=1}^{24} N_i}$$

여기서, N : 운행횟수, c : 혼잡률, i : 시간대

### (3) 지하철 구간별 혼잡률

- 지하철 구간별 혼잡률은 구간에 따라 2%~77.7%로 큰 차이를 보였으며, 지하철 전체 구간의 평균 혼잡률은 41.2%로 나타남.
- 하루 전체 혼잡률이 가장 높은 구간은 어린이대공원→건대입구 구간으로 78%에 달함.

〈표 2-8〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 구간별 지하철 혼잡률

구 분	혼잡률		
	오전첨두	오후첨두	하루평균
최대값	179%	169%	78%
구 간	7호선	7호선	7호선
	중곡→군자	군자→중곡	어린이대공원→건대입구

### (4) 지하철 지역별 혼잡률

- 지역별 지하철 혼잡률은 지역에 따라 18.6%~65.5%로 큰 차이를 보였으며, 서울시내 지하철 구간의 평균 혼잡률은 41.1%로 나타남.

○ 하루 전체 혼잡률이 가장 높은 지역은 금천구(65.5%), 가장 낮은 지역은 강서구(18.6%)로 조사됨.

〈표 2-9〉 대중교통 서비스지표 산출연구의 지역별 지하철 혼잡률

구 분	혼 잡 률		구 분	혼 잡 률	
	평균	순위		평균	순위
강남구	40.8	9	서대문구	41.6	11
강동구	31.0	4	서초구	57.6	23
강북구	34.7	6	성동구	49.3	19
강서구	18.6	1	성북구	34.8	7
관악구	53.9	21	송파구	41.3	10
광진구	60.8	24	양천구	42.7	13
구로구	49.4	20	영등포구	48.4	18
금천구	65.5	25	용산구	35.7	8
노원구	29.6	3	은평구	27.4	2
도봉구	33.1	5	종로구	43.8	116
동대문구	42.1	12	중구	43.1	14
동작구	46.7	17	중랑구	54.4	22
마포구	43.6	15	서울시	41.4	-

### 제3절 시사점

- 서울메트로는 혼잡도를 산정할 때 지하철의 최소환승, 최단거리소요경로를 가상의 이동경로로 결정하고, 대중교통카드자료의 승객 승·하차 정보를 입력하여 구간별 시간대별 총 이용인원을 산출함.
- 지하철 탑승 인원당 혼잡도 기준에 위의 총 이용인원을 적용하여 최종적으로 구간별 시간대별 혼잡도를 추정하는 방식임.
- 서울도시철도는 이동경로를 설정하는 방식이 서울메트로와 같으나, 자체적인 교통량 조사를 통해 나온 실측자료와 대중교통카드자료를 이용해 승객 통행 O/D를 구축함.
- 여기에 열차 하중데이터와 열차 수량에 따른 수용인원을 적용하여 열차당 혼잡도를 산정하고 있음.
- 이러한 방식들은 혼잡도의 현황분석 위주 정책 및 운행 스케줄을 구축하기 위한 목적에서 기인한 것으로 판단되며, 신규 노선 진입이나 긴급상황에 의한 실시간 스케줄 변경의 영향

을 파악하기 어렵다는 단점이 있음.

- 이러한 한계점을 극복하기 위해 이 연구는 대중교통카드자료와 열차 스케줄을 바탕으로 시물레이션 분석을 통한 동적 혼잡도 추정 방식을 적용함.
- 주변의 방해요인이나 새로운 체계의 도입에도 실시간으로 분석이 가능하며, 더 나아가 최적 열차 스케줄링 기법으로도 확대가 가능함.

## 제3장 이론적 배경

제1절 동적 최적경로기법

제2절 네트워크 이론

# 제 3 장

## 이론적 배경

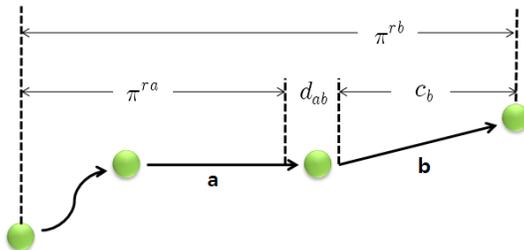
### 제1절 동적 최적경로기법

#### 1. 최적경로탐색기법

- 시간과 통행특성이 동일하다는 가정을 배경으로 하는 정적 경로탐색 알고리즘은 첨두시간대 등 시간변화에 따른 교통혼잡 분석에 취약한 부분이 있음.
- 동적 경로탐색 알고리즘은 시간변화에 따른 교통혼잡현상의 형태를 파악하고 이를 반영하여 분석을 수행함.
- 동적 경로탐색 알고리즘은 시간대별로 변화하는 교통망의 통행의 변화를 반영하기 위해 연구되었으며, 특히 ITS 분야와 같은 교통정보제공 분야에서 활용되고 있음.

#### 1) 정적 최적경로탐색 알고리즘

- 정적 경로탐색 알고리즘은 교통망에서 단일경로만이 존재한다는 가정으로 시작됨. 최적경로의 탐색을 위해 노드표지기반과 링크표지기반을 적용하는 방안이 있으나 최근 회전으로 인한 패널티의 반영이 가능한 링크표지기반의 활용도가 높음.
- 식 (1)은 링크표지에 근거한 정적 최적경로탐색에 대한 최적식을 나타냄.



〈그림 3-1〉 정적 최소시간 경로탐색

$$\pi^{rb} = \pi^{rb} + d_{ab} + c_b \quad (1)$$

여기서

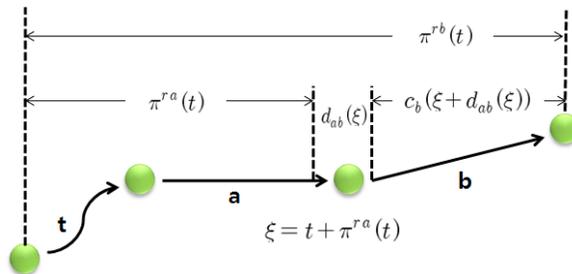
$\pi^{rb}$  : 출발지  $r$ 에서 링크  $b$ 의 도착노드까지 최적통행시간

$d_{ab}$  : 링크  $a$ 에서 링크  $b$ 로 통행에 따른 환승시간

$c_b$  : 링크  $b$ 의 통행시간

## 2) 동적 최적경로탐색 알고리즘

- 동적 최적시간경로탐색 알고리즘은 모든 출발지점에서 단일도착지점까지 최적통행비용을 계산하는데 여기에 시간을 변수로 고려하였음.
- 식 (2)는 식 (1)의 링크표지기반 정적 최소시간경로탐색 최적식을 동적 최소시간의 개념으로 표현하였음. 기점  $r$ 에서  $t$ 시간에 출발해 링크  $a$ 의 도착링크까지의 최소시간  $\pi^{ra}(t)$ 와 두 인접링크  $a$ 와  $b$ 로의 회전시간  $d_{ab}(t + \pi^{ra}(t))$ 와 링크  $b$ 의 통행시간  $c_b(t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)))$ 를 합산하여 동적 최소시간경로탐색을 위한 최적식으로 구축됨.



〈그림 3-2〉 동적 최소시간 경로탐색

$$\pi^{rb}(t) = \pi^{ra}(t) + d_{ab}(\xi) + c_b(\xi + d_{ab}(\xi)) \quad (2)$$

여기서

$$\xi = t + \pi^{ra}(t)$$

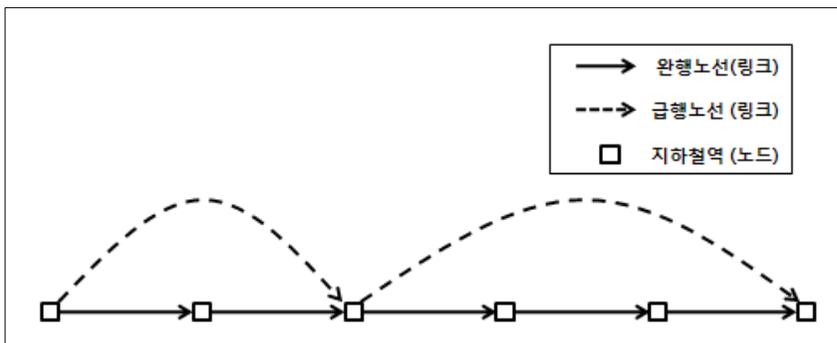
$\pi^{ra}(t)$  : 출발지  $r$ 에서  $t$ 시간에 출발하여 링크  $a$ 의 도착노드까지 최소통행시간

$d_{ab}(t)$  : 링크  $a$ 에서 링크  $b$ 로 통행 시 시간  $t$ 에서 발생하는 환승시간

## 제2절 네트워크 이론

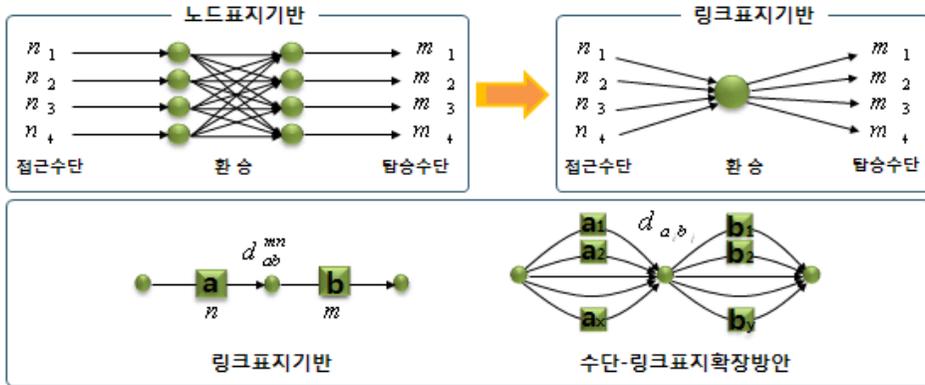
### 1. 링크 표지(Link-Mode Label) 기반 네트워크

- 복합교통망에서의 수단 간 환승처리를 위해 링크기반(Link-Based)의 경로탐색 이론을 적용함.
- 링크기반 경로탐색 알고리즘은 각 링크의 종점에 대한 도착비용과 링크의 전 링크를 저장하여 경로를 탐색하기 때문에 교통망의 모든 연속 링크 간의 회전비용·환승비용을 고려할 수 있으며, 하나의 노드에 대해 접근로 수만개의 이전 링크와 도착비용이 저장되어 연속 회전 별점이나 환승문제도 해결할 수 있음(천승훈 외, 2008).
- 이 연구에서는 동일 링크에서 주행하는 열차(지하철의 완행, 급행)의 스케줄을 링크로 가정하여 연결하는 방법을 적용하였으며, 이 경우 출발지와 목적지는 동일하나 속성이 다른 링크가 추가됨.



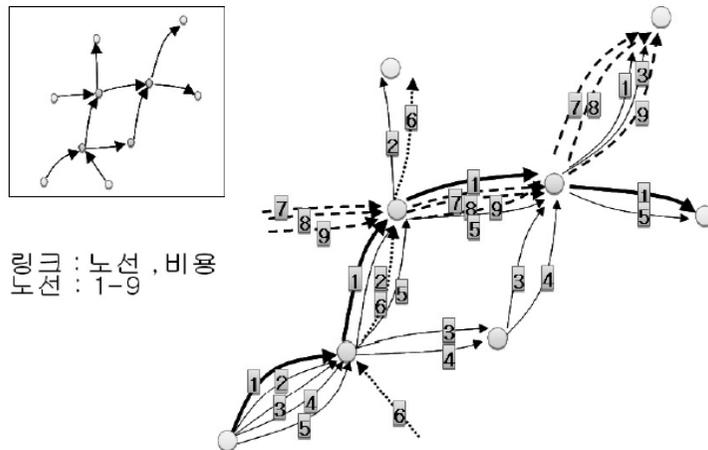
〈그림 3-3〉 지하철 완행·급행 노선

- 이 방법은 실제 링크를 이용하는 수단이나 노선이 많은 만큼 가상링크 또한 증가하기 때문에 복잡성과 분석시간이 증가하지만, 운행열차별 특성과 호선 간 환승의 표현이 가능하며, 각 노선을 링크로 설정하였기 때문에 링크기반 최적경로탐색 알고리즘의 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있음.
- 수단별 이동경로가 모두 링크로 표현되었기 때문에, 통합교통망에서 최적경로 알고리즘을 적용한 환승문제도 해결할 수 있음.
- 〈그림 3-4〉는 링크표지기반의 개념을 설명하고, 호선  $n$ 에서 호선  $m$ 으로 환승 시에 발생하는 환승비용  $d_{ab}^{mn}$ 이 수단-링크표지 확장방안을 적용할 경우  $d_{ab}$ 로 단순화됨을 보여줌.



〈그림 3-4〉 링크 확장방안

○〈그림 3-5〉는 수단-링크표지 확장방안을 적용하여 4개의 환승노드와 10개 링크로 구성된 네트워크를 9개의 수단이 통과할 수 있도록 도로망에서 31개의 수단-링크로 확장되는 사례임.



〈그림 3-5〉 링크기반의 복합교통망 확장 예

## 2. 시간창(Time Window)

### 1) 시간창의 개요

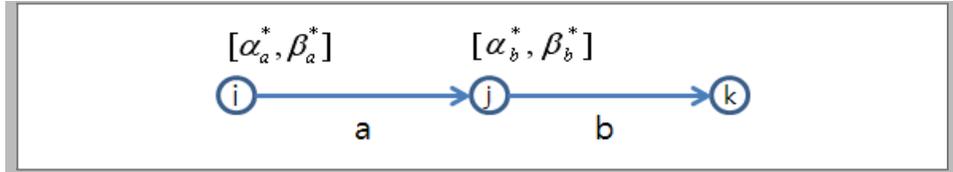
○시간창(Time Window)이란 도착 및 출발시간이 한 쌍으로 이루어진 것으로, 여기서는 열차의 도착시간과 출발시간을 의미함.

- <그림 3-6>에서 서울메트로 2호선 각 역의 열차스케줄을 예를 들면, 서울대입구에서 성수 역으로 진행되는 2010호 열차는 대림역에 5:40:00에 도착하고 5:40:30에 출발하여 30초 동안의 정차시간을 가지며, 2010호의 대림역에서의 시간차는 [5:40:00, 5:40:30]로 표현됨.
- 또한 이 열차는 신도림역에 5:43:00에 도착하여 5:43:30에 출발하는 것이 스케줄상에 나타나며, 이때 신도림역 시간차는 [5:43:00, 5:43:30]로 표현됨.
- 역 간 두 시간차를 비교하면 열차의 배차간격이 2분 30초로 파악됨.

열차번호	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014
출발역	율지로입	용대입구	신도림	신도림	서울대입	신도림	신도림
도착역	성수	성수	성수	성수	성수	성수	성수
대림					5:40:00 5:40:30		
신도림			5:30:00	5:38:00	5:43:00 5:43:30	5:50:00	5:55:30
문래			5:32:00	5:40:00	5:45:00	5:52:00	5:57:30
영등포구청			5:32:30	5:40:30	5:45:30	5:52:30	5:58:00
영등포구청			5:33:30	5:41:30	5:46:30	5:53:30	5:59:00
당산			5:34:00	5:42:00	5:47:00	5:54:00	5:59:30
당산			5:35:00	5:43:30	5:48:30	5:55:30	6:01:00
합정			5:35:30	5:44:00	5:49:00	5:56:00	6:01:30
합정			5:37:30	5:46:30	5:51:30	5:58:30	6:03:30
합정			5:38:00	5:47:00	5:52:00	5:59:00	6:04:00
용대입구		5:30:00	5:39:30	5:48:30	5:53:30	6:00:30	6:05:30
신촌		5:32:00	5:40:00	5:49:00	5:54:00	6:01:00	6:06:00
신촌		5:32:30	5:41:30	5:51:00	5:56:00	6:03:00	6:08:00
이대		5:33:30	5:43:00	5:52:30	5:57:30	6:04:30	6:09:30
이대		5:34:00	5:43:30	5:53:00	5:58:30	6:05:00	6:10:00
역현		5:35:00	5:44:30	5:54:00	5:59:30	6:06:00	6:11:00
역현		5:35:30	5:45:00	5:54:30	6:00:00	6:06:30	6:11:30
중정로		5:37:00	5:46:00	5:56:00	6:01:30	6:08:00	6:13:00
중정로		5:37:30	5:46:30	5:56:30	6:02:00	6:08:30	6:13:30
시정		5:39:00	5:48:00	5:58:00	6:03:30	6:10:00	6:15:00
시정		5:39:30	5:48:30	5:58:30	6:04:00	6:10:30	6:15:30
율지로입구	5:30:00	5:41:30	5:50:30	5:59:30	6:05:30	6:12:00	6:17:00
율지로3가	5:31:30	5:42:30	5:52:00	6:01:00	6:07:00	6:13:30	6:19:00
율지로3가	5:32:00	5:43:00	5:52:30	6:01:30	6:07:30	6:14:00	6:19:30
율지로4가	5:33:00	5:44:00	5:53:30	6:02:30	6:08:30	6:15:00	6:20:30
율지로4가	5:33:30	5:44:30	5:54:00	6:03:00	6:09:00	6:15:30	6:21:00

(그림 3-6) 2호선 열차스케줄

- <그림 3-7>은 도시철도 네트워크의 기본개념으로 시간차를 설명한 것임. 링크(노선)a와 링크(노선)b는 ij,k 3개의 노드(역)으로 순차적으로 연결된 것으로, \*번호의 열차가 링크a의 시작노드에서 시간차가  $[\alpha_a^*, \beta_a^*]$ 이고 다음 역인 링크b의 시작노드는  $[\alpha_b^*, \beta_b^*]$ 임.



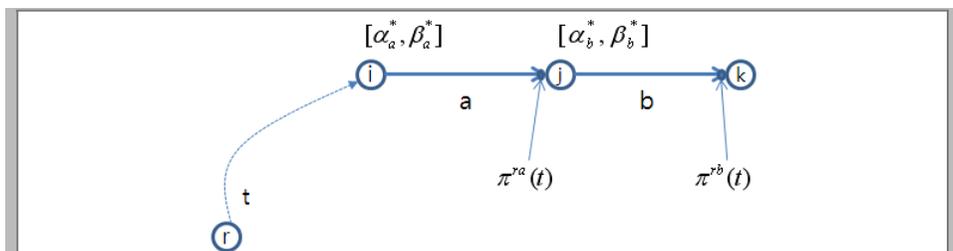
(그림 3-7) 도시철도 네트워크와 시간창

- 시간창은 Hard 시간창(HTW : Hard Time Window)과 Soft 시간창(STW : Soft Time Window)으로 구분됨.
- Hard 시간창은 시간창 내에서만 대기와 탑승행위가 이루어지는 것을 의미하여 대괄호를 이용해 [도착, 출발]로 표현됨.
- Soft 시간창은 시간창 전에 대기가 가능하며, 출발시간까지 탑승이 가능함을 표현하여, 도착시간에 대하여 열린 괄호를 이용해 (도착, 출발)로 표현됨. 도시철도에서는 승객이 열차의 도착 전에 대기가 Soft 시간창의 기본개념임.

## 2) Soft 시간창을 고려한 경로탐색

- Soft 시간창 제약이 존재하는 최적경로탐색은 Soft 시간창이 부과하는 제약하에 승객의 일 변화 비용을 최소화하는 문제임.
- 도시철도의 분석을 위하여 승객이 이용한 통합 철도수단의 총통행비용은 개별 철도수단의 통행비용, 대기비용, 시간창 및 환승비용을 고려하여 산정함.
- <그림 3-8>에서 환승이 없는 열차의 탑승진행과정에서 최적비용은 다음의 최적식으로 표현되며, 여기서  $\pi^{ra}(t) = \alpha_b^*$ 로 표현되므로 환승에 대한 고려가 필요하지 않음.

$$\pi^{rb}(t) = \pi^{ra}(t) + c_b(t + \pi^{ra}(t))$$



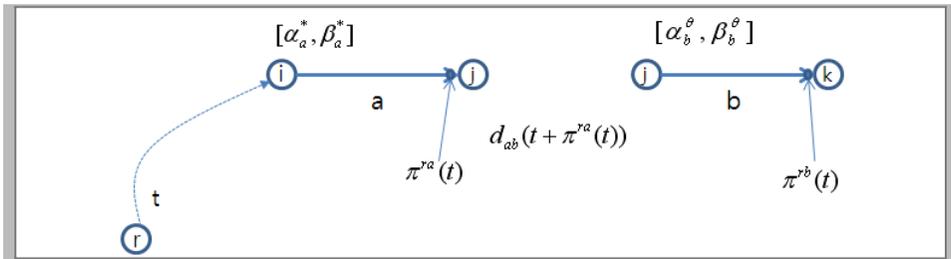
(그림 3-8) 환승이 없는 경우의 열차탑승 진행

○ <그림 3-9>에서 노선a의 \*변호열차에서 노선b의 열차 $\theta$ 로 환승이 존재하는 경우까지 고려한 탑승진행의 최적비용식은 다음과 같음.

$$\pi^{rb}(t) = \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)) + c_b(t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)))$$

$$\text{여기서 } t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t)) \leq \beta_b^\theta$$

○ 라인b까지 환승을 포함한 도착시간  $t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t))$ 에서 열차  $\theta$ 의 출발시간전에 도착하는 제약이 포함됨.



<그림 3-9> 환승이 존재하는 경우의 열차탑승 진행

# 제4장 수도권 도시철도 네트워크 구축

제1절 대중교통카드를 활용한 네트워크 구축방안

제2절 도시철도망 구축

제3절 도시철도 스케줄 기반 네트워크 구축

# 제 4 장

## 수도권 도시철도 네트워크 구축

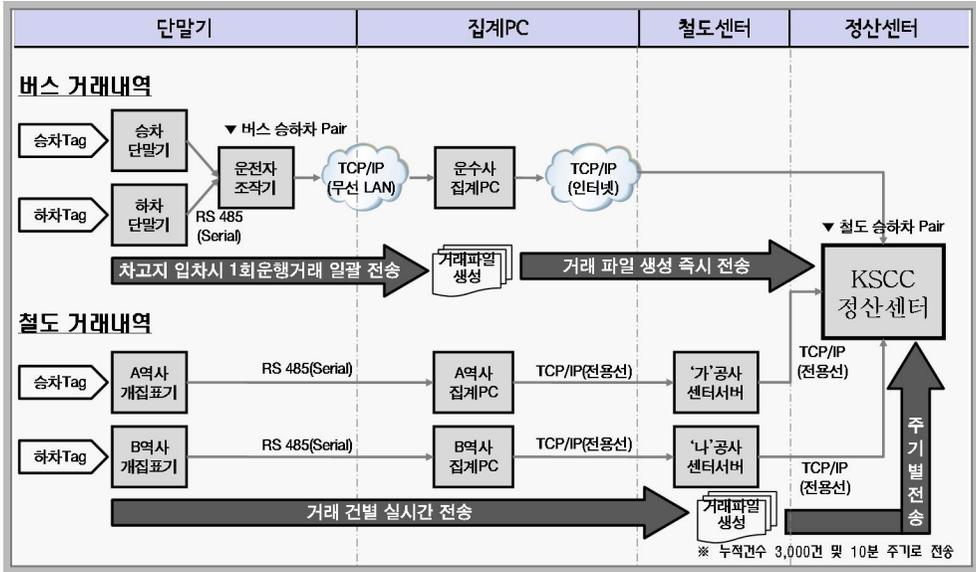
### 제1절 대중교통카드를 활용한 네트워크 구축방안

#### 1. 대중교통카드자료의 특성

- 대중교통 개편과 함께 도입된 대중교통카드는 그 이용에 대한 정보가 시스템을 통해 관리됨으로써 사람이 직접 조사하는 방식에 비해 정확성이 높다고 할 수 있음.
- 대중교통카드자료는 개별 교통시설 이용자가 현장 단말기에서 체크하는 교통시설 이용정보를 이미 구축된 요금지불시스템을 통해 한국 스마트카드 정산센터(KSCC Transaction Data Center)로 수집되고 있음.
- <그림 4-1>은 수도권에서 이루어지고 있는 대중교통카드자료의 수집체계를 나타내고 있음.



〈그림 4-1〉 대중교통카드자료 수집체계



〈그림 4-2〉 KSCC 교통카드 거래내역 수집 프로세스

- 대중교통카드는 1년 365일 24시간 수도권 어느 지역에서나 이용할 수 있기 때문에 시간별, 요일별, 일별, 계절별 등의 전 시간대 및 전 지역에 걸친 자료습득이 가능하며 이미 시스템이 구축되어 있어 비용면에서도 저렴함.
- 현재 교통카드 이용비율이 점차 높아지는 추세로 향후 전수조사에 가까운 자료의 습득이 가능할 것으로 판단되며, 지역·기관 간 교통카드 정보의 통일화 작업을 통해 전국 단위 대중교통 이용패턴 분석이 가능할 것으로 판단됨.
- 대중교통카드 자료를 활용하면 수집자료의 정확성 및 신뢰성이 커지고 조사비용 및 조사시간이 절감되며, 모든 시간대 및 광범위한 지역에 걸쳐 방대한 자료 취득이 가능하다는 장점이 있음.

〈표 4-1〉 교통카드이용자료 활용방안의 장점

장 점	내 용
정확성	수집자료의 정확성 및 신뢰성 증대
경제성	조사비용의 획기적 절감
지역성	모든 시간대 및 광범위한 지역에 걸친 자료 취득 가능
단축성	실시간 자료구축 또는 자료취득 시간의 단축
활용성	통행목적 파악을 위한 자료의 활용 가능성 증대
확장성	방대한 자료 수집 가능 및 향후 정보 확장 가능
안전성	안전사고 및 돌발 상황 예방
범용성	다양한 목적으로의 교통카드 사용 가능

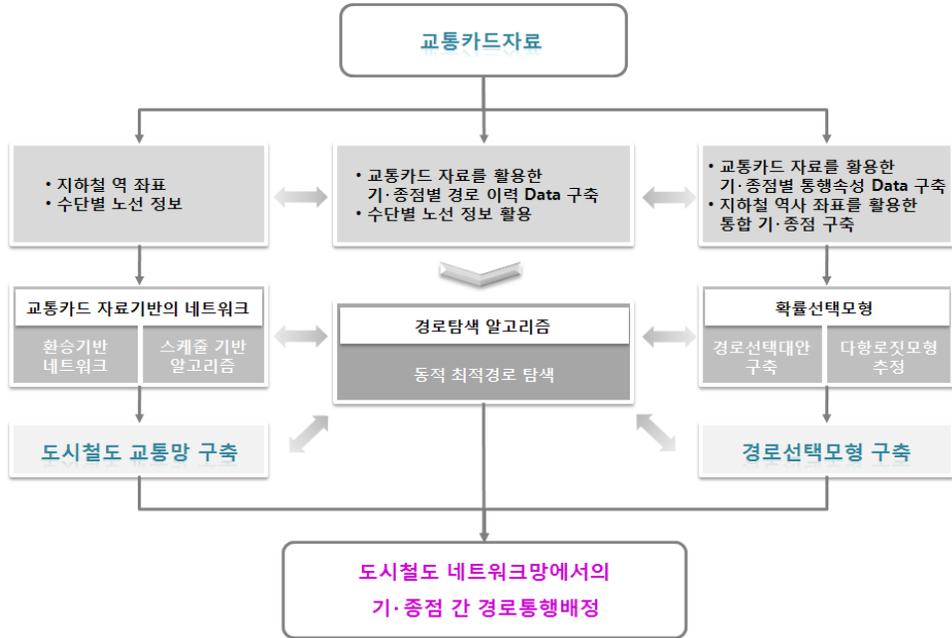
자료 : 한국교통연구원, 2006, 「대중교통정책수립을 위한 교통카드자료 활용방안」

〈표 4-2〉 교통카드 수록 정보 및 정보 내용

	수록정보	내용	실제 Data
1	일일카드번호	일별 최초 사용 시 해당카드에 부여되는 번호	11
2	승차일시	사용자가 승차 시 단말기에 카드를 접촉한 시각	20090512113708
3	수단	지하철과 버스유형별로 부여된 ID	120
4	트랜잭션ID	환승을 구분하기 위한 ID	005
5	환승횟수	하차태그 후 30분 이내에 다시 승차한 횟수	0
6	버스노선ID	버스노선별로 부여되는 ID [지하철 없음]	41110078
7	교통사업자ID	사업자별로 부여 ID, 지하철은 호선정보 수록	111002200
8	버스차량ID	버스 차량별로 부여되는 ID [지하철 없음]	11100783
9	사용자구분코드	초등학생, 청소년, 일반인을 구분하는 코드	01
10	이용거리	수단별 이동거리(m)	25010
11	운행출발일시	버스가 종점에서 운행을 시작한 시각	20090512062705
12	승차정류장ID	승차한 정류장에 부여된 ID	0013514
13	도착일시	하차 시 단말기에 카드를 접촉한 시각	20090512073635
14	하차정류장ID	하차한 정류장에 부여된 ID	0014713
15	이용객수	하나의 카드로 지불한 이용객 수	1
16	승차금액	승차 시 지불된 금액	900
17	하차금액	하차 시 지불된 추가요금	0
18	패널티금액	하차 미태그 시 추정금액	0

## 2. 대중교통 통행배정예의 활용

- 대중교통카드자료를 이용하면 기본적으로 승객들의 통행패턴과 통행수요를 알 수 있는데, 이 통행패턴은 지하철역과 운행노선 정보를 바탕으로 움직이고 있음.
- 지하철역은 통과노선과 위치에 대한 좌표값을 가지고 노선은 이 역들의 정보를 바탕으로 이루어져 있음. 또한 수단별 노선정보를 활용하면 기·종점별 경로에 대한 이력데이터의 구축이 가능하며 이를 이용하면 대중교통 경로선택 패턴을 모형화할 수 있음.
- 지하철역의 위치 좌표값과 운행노선정보를 이용해 기본 철도망을 만들 수 있으며, 승객들의 환승통행정보를 활용하면 환승망의 구축도 가능함.
- 위에서 언급한 환승을 포함한 도시철도망과 경로선택모형은 모두 대중교통카드자료를 기반으로 구축이 가능하기 때문에 도시철도 네트워크망에서의 기·종점 간 경로통행배정이 가능해짐.



(그림 4-3) 대중교통카드자료를 활용한 통행배정 과정

## 제2절 도시철도망 구축

### 1. 도시철도 네트워크의 구조

#### 1) 도시철도 네트워크

- 지하철은 지하·지상에서 지하철 전용 레일(Right of way)을 이용하므로 이동에 방해를 주는 다른 요인이 없으며, 수도권 전체를 통행하는 광역교통의 성향을 띠고 있어 승객들이 장거리 이동을 하는데 주로 이용하고 있음.
- 호선(Line) 간 환승시스템이 구축되어 있어 환승역을 통하여 자유로운 이동이 가능하기 때문에 어디에서나 특정 지역을 가기 위하여 지하철을 이용하는데 편리하며, 특히 장거리 출·퇴근 시 주 이용대상이기도 함.
- 수도권의 지하철 환승역은 역명이 하나이지만 적게는 2개 노선에서 많게는 5개의 노선이 포함되어 있으며, 이들 노선별로 역이 따로 존재하지만 한 공간에 밀집되어 있으며, 환승 통로가 별도로 구축되어 있기 때문에 환승이동이 편리함.
- 지하철은 지자체와 별개로 7개의 철도 운영기관들(서울메트로, 코레일, 서울 도시철도공

사, 인천메트로, 메트로 9호선, 공항철도, 신분당선)이 수도권 전체를 대상으로 운영하고 있으며, 총 22개의 노선이 운행하고 있음.

〈표 4-3〉 수도권 지하철 노선별 운영기관

운영기관	운영노선
서울메트로	1, 2, 3, 4호선
서울특별시 도시철도공사	5, 6, 7, 8호선
한국철도공사(코레일)	경부선, 경인선, 경원선, 중앙선, 안산선, 과천선, 일산선, 분당선, 경의선, 경춘선, 공항철도
서울시 메트로 9호선	9호선
인천교통공사(인천메트로)	인천 1호선
DX Line	신분당선

- 지하철에 대한 노선망을 구축할 경우 지하철역들을 연결하는 노선운행정보가 필요함. 이 연구에서는 BMS의 지하철 데이터를 활용하였음.
- BMS와 대중교통카드에서 사용하는 지하철역 ID는 각기 사용체계가 다르므로 대중교통카드 역정보에 맞추어 BMS의 역정보를 변환하였으며, 구축한 결과는 아래와 같음.

호선	역명	ID	point_X	point_Y
1호선	서울역	150	126.972	37.555
1호선	시정	151	126.977	37.565
1호선	종각	152	126.983	37.570
1호선	종로3가	153	126.992	37.570
1호선	종로5가	154	127.002	37.571
1호선	동대문	155	127.012	37.572
1호선	신설동	156	127.024	37.576
1호선	제기동	157	127.035	37.578
1호선	청량리(지하)	158	127.045	37.580
1호선	동묘알	159	127.016	37.573
2호선	시정	201	126.976	37.564
2호선	동지르입구	202	126.982	37.566
2호선	동지르3가	203	126.991	37.566
2호선	동지르4가	204	126.998	37.567
2호선	동대문역사문화공원	205	127.009	37.566
2호선	신랑	206	127.020	37.566
2호선	상왕신리	207	127.029	37.564
2호선	왕십리	208	127.038	37.561
2호선	환양대	209	127.044	37.556
2호선	독실	210	127.047	37.547
2호선	성수	211	127.056	37.545
2호선	경대입구	212	127.070	37.540
2호선	구의	213	127.086	37.537
2호선	강변	214	127.095	37.535
2호선	장실나루	215	127.104	37.520
2호선	장실	216	127.101	37.514
2호선	신정	217	127.087	37.512
2호선	중합운동장	218	127.073	37.511
2호선	삼성	219	127.063	37.509
2호선	선릉	220	127.048	37.504
2호선	역삼	221	127.036	37.501
2호선	랑남	222	127.028	37.498
2호선	교대	223	127.014	37.484

〈그림 4-4〉 지하철역 데이터 구조

index	노선번호	호선	호선	순번
1	1호선	서울역	시정	1
2	1호선	시정	종각	2
3	1호선	종각	종로3가	3
4	1호선	종로3가	종로5가	4
5	1호선	종로5가	동대문	5
6	1호선	동대문	동묘알	6
7	1호선	동묘알	신설동	7
8	1호선	신설동	제기동	8
9	1호선	제기동	청량리(지하)	9
10	1호선	청량리(지하)	회기	10
11	1호선	회기	외대알	11
12	1호선	외대알	신이문	12
13	1호선	신이문	석계	13
14	1호선	석계	성북	14
15	1호선	성북	월계	15
16	1호선	월계	녹천	16
17	1호선	녹천	창동	17
18	1호선	창동	발라	18
19	1호선	발라	도봉	19
20	1호선	도봉	도봉산	20
21	1호선	도봉산	망월사	21
22	1호선	망월사	회릉	22
23	1호선	회릉	의정부	23
24	1호선	의정부	가봉	24
25	1호선	가봉	녹양	25
26	1호선	녹양	양주	26
27	1호선	양주	덕계	27
28	1호선	덕계	덕정	28
29	1호선	덕정	지행	29
30	1호선	지행	동두천중앙	30
31	1호선	동두천중앙	보산	31
32	1호선	보산	동두천	32
33	1호선	동두천	소요산	33

〈그림 4-5〉 지하철 노선 데이터 구조

## 2) 급행 네트워크

- 지하철은 일반 완행노선 이외에 급행노선이 따로 존재함. 장거리를 이동하는 승객들에게 보다 빠른 서비스를 주기 위함인데 노선별 특징에 따라 24시간 운행하는 노선이 있는가 하면, 출·퇴근 시간에만 운영하는 노선도 있음.

〈표 4-4〉 급행 노선별 운행시간

운행 시간	운행 노선
24시간 운행	천안급행(용산), 9호선 급행, 인천 급행
출·퇴근 시간 운행	천안급행(서울역)
출근시간 운행	경의선 급행, 경의선 특급, 중앙선 급행, 경춘선 급행, 4호선 급행

- 급행노선은 특정 역만 정차하고 나머지 역은 무정차 통과와 개념으로 운행되고 있으며, 완행노선 위에 별도의 급행링크를 추가하였음.
- 이를 표현하기 위해 완행노선 중 무정차 통과역은 하나로 묶어 운행역, 급행역 간 거리 등을 구축하였음.

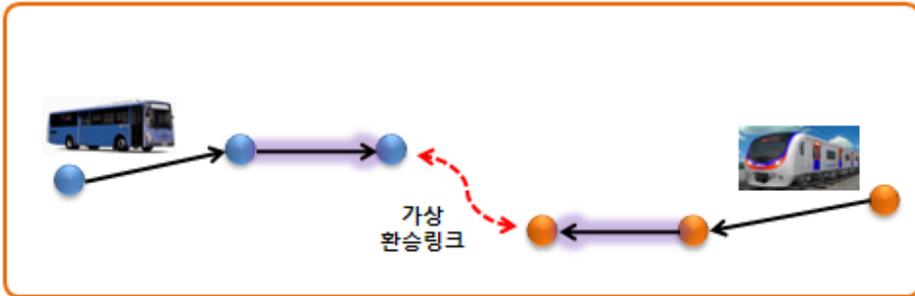
1	용산 -> 노량진 :: 용산-(2.6)->노량진 2.6 (Km) : 인천급행
2	노량진 -> 대방 :: 노량진-(1.5)->대방 1.5 (Km) : 인천급행
3	대방 -> 신길 :: 대방-(0.8)->신길 0.8 (Km) : 인천급행
4	신길 -> 영등포 :: 신길-(1.0)->영등포 1.0 (Km) : 인천급행
5	영등포 -> 신도림 :: 영등포-(1.5)->신도림 1.5 (Km) : 인천급행
6	신도림 -> 구로 :: 신도림-(1.1)->구로 1.1 (Km) : 인천급행
7	구로 -> 역곡 :: 구로-(1.4)->구일(1.0)->개봉(1.3)->오류동(1.9)->온수(1.3)->역곡 6.9 (Km) : 인천급행
8	역곡 -> 부천 :: 역곡-(1.5)->소사(1.1)->부천 2.6 (Km) : 인천급행
9	부천 -> 송내 :: 부천-(1.7)->중동(1.0)->송내 2.7 (Km) : 인천급행
10	송내 -> 부평 :: 송내-(1.2)->부개(1.5)->부평 2.7 (Km) : 인천급행
11	부평 -> 동암 :: 부평-(1.7)->백운(1.5)->동암 3.2 (Km) : 인천급행
12	동암 -> 우안 :: 동암-(1.2)->간석(1.2)->우안 2.4 (Km) : 인천급행
13	우안 -> 동인천 :: 우안-(1.0)->도화(1.0)->계월포(1.4)->도원(1.2)->동인천 4.6 (Km) : 인천급행
14	노량진 -> 용산 :: 노량진-(2.6)->용산 2.6 (Km) : 인천급행
15	대방 -> 노량진 :: 대방-(1.5)->노량진 1.5 (Km) : 인천급행
16	신길 -> 대방 :: 신길-(0.8)->대방 0.8 (Km) : 인천급행
17	영등포 -> 신길 :: 영등포-(1.0)->신길 1.0 (Km) : 인천급행



〈그림 4-6〉 급행Network 구축(인천급행 중 구로~역곡 구간)

### 3) 환승 네트워크

- 열차 간 환승, 완행↔급행 간 환승은 각 환승역에서 열차별로 이동이 가능하도록 가상의 링크를 연결함.
- 가상의 환승링크에는 환승거리와 여타 변수들을 고려하여 환승 이동시간과 환승 대기시간, 이동과라메타를 링크 속성으로 부여함.

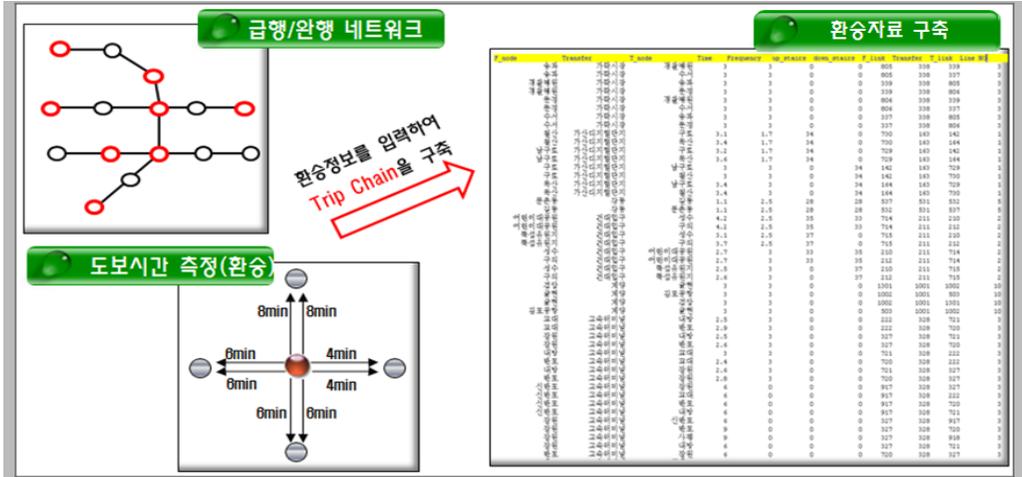


〈그림 4-7〉 가상 환승링크 연결(ex. 버스↔철도)

- 환승링크는 실제로 존재하지 않지만 수단 간 환승연결을 위해 필요한 가상의 링크로 환승노드에 다음 경로의 정보를 사전에 저장해놓은 상태에서 경로선택과정을 시작하게 됨.
- 진행 중 환승노드에 도착하게 되면 <표 4-5>와 같이 저장된 경로가 활성화되며, 이 중 최적경로를 선택하여 진행함.
- 이 방법은 환승노드마다 다음 경로의 정보가 저장되어 있기 때문에 많은 메모리를 차지하나 계산방법이 단순하고 빠르며, 모든 환승링크를 직접 연결하는 방식이 아니기 때문에 환승링크의 급격한 증가를 방지할 수 있다는 장점을 가지고 있음.

〈표 4-5〉 환승노드에서 다음 경로 데이터 저장

링크	경로의 마지막 노드에 저장된 링크	환승노드
① → ②	④ → ⑥	
	④ → ⑦	
	⑤ → ⑧	



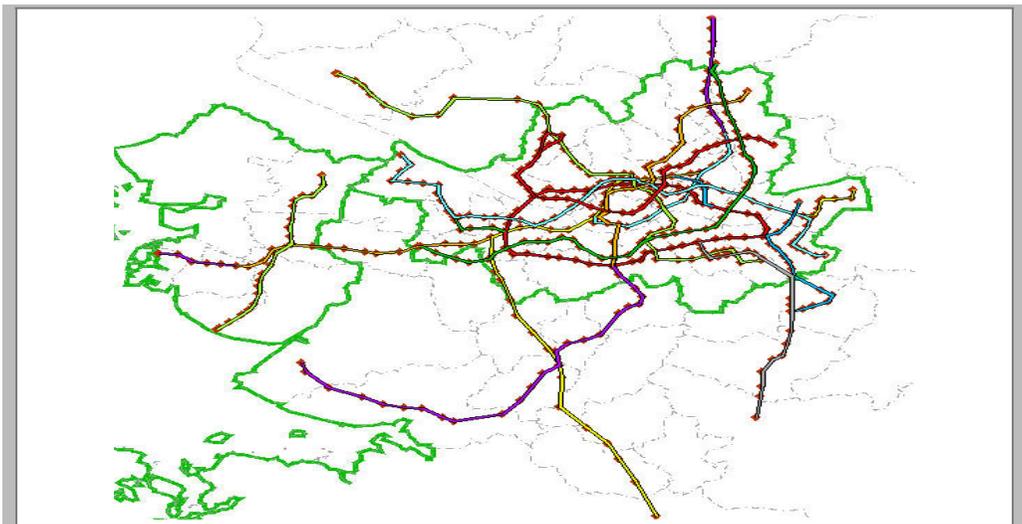
〈그림 4-8〉 급행·완행을 고려한 환승네트워크 구축

## 2. 네트워크 구축

○ 대중교통카드자료를 바탕으로 도시철도 네트워크를 완행·급행·환승으로 각기 구분하여 구축하였음.

### 1) 수도권 네트워크의 공간정보 표현

○ 서울시, 경기도, 인천시의 지하철·전철역을 대상으로 하였으며, 구축된 네트워크는 다음과 같음.



〈그림 4-9〉 수도권 도시철도 네트워크

- 도시철도망을 프로그램상에서 네트워크로 표현하기 위해 공간정보들을 데이터화함.
- 지하철 역은 노드(node)로 설정하여 위치 및 세부정보(단일·환승역, 노선구분 등)를 저장하고 승객의 승·하차 정보를 가짐.
- 지하철 노선은 링크(link)로 설정하여 각 역을 연결하였으며, 노선정보(운행노선, 연장 등)를 가지게 됨.

## 2) 노드와 링크

- 노드자료는 데이터에서 입력되는 역number와 일치하는 역명 정보로 구성되며, 정보 형식은 역number, 역명, 위치(XY)좌표로 구분됨.

역number	역명	X	Y
1907	가능	204038.42000000000	469867.95000000000
2818	가락시장	210429.95000000000	443380.44000000000
2748	가리봉	189609.84000000000	442051.59000000000
1702	가산디지털단지	189609.84000000000	442051.59000000000
1816	간석	172220.18000000000	440229.88000000000
3123	간석오거리	173743.10000000000	440447.34000000000
3117	갈산	175091.97000000000	446166.70000000000

(그림 4-10) 노드자료 : 역number에 해당 역명 매칭

- 노드자료에서 역명과 node번호를 부여하기 위해, 한글 역명과 분석을 위한 node 정보, 그리고 노선 정보로 구성하며, 정보형식은 node list, 역명, 노선으로 구분됨.

node list	역명	노선
1	가능	91
2	의정부	91
3	회룡	91
4	망월사	91
5	도봉산	91
6	도봉	91
7	방학	91
8	창동	91
9	녹천	91

(그림 4-11) 노드자료 : 역명에 node번호 부여

- 각각의 노드는 링크로 연결되며, 링크는 from node- to node로 구성됨.
- 링크의 속성정보로 링크의 길이 및 노선이 표시되며, 링크는 양방향으로 연결됨.
- 정보 구성은 link list, from node, to node, 길이, 노선으로 구분됨.

link list	from	to	dis	노선
1	1	2	1.2	91
2	2	3	1.6	91
3	2	1	1.2	91
4	3	4	1.4	91
5	3	2	1.6	91
6	4	5	2.3	91
7	4	3	1.4	91
8	5	6	1.2	91
9	5	4	2.3	91
10	5	282	1.6	7
11	5	281	1.4	7

〈그림 4-12〉 링크자료

### 3. 도시철도 이용객의 환승행태 분석

#### 1) 환승행태 반영

- 개인 통행자는 대중교통을 이용하여 특정 경로로 통행하기 위해서 여러 가지 조건을 고려하게 됨.
- 이러한 여러 가지 조건이 환승행태에 미치는 영향은 다양하게 나타남.

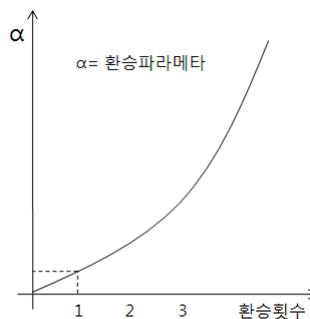
〈표 4-6〉 교통카드 수록 정보 및 정보 내용

경로 선택 이유	비율(%)	특성
총통행시간	49.20	통행시간, 환승(정량)
환승횟수	49.20	통행시간, 환승(정량)
환승시간	10.16	통행시간, 환승(정량)
환승역 환경	11.23	통행시간, 환승(정량)
열차배차간격	3.83	통행시간, 환승(정량)
한 구간 오래탑승	1.09	통행시간, 환승(정성)
익숙한 경로	1.64	통행시간, 환승(정성)
이용객이 적은 노선	2.19	혼잡(정량)

자료 : 이경재, 2004, "환승역사동선체계를 고려한 환승패널티 추정", 석사학위논문, 서울대학교.

- 경로선택의 기준은 크게 정성적 요인과 정량적 요인으로 구분됨.
- 정량적 요인은 통행시간, 환승횟수 등 어떤 특정한 값으로 나타낼 수 있는 경우이고, 정성적 요인은 편안함, 깨끗함 등 개인마다 기준이 달라 특정한 값으로 제시하기 어려운 경우임.
- 위 표에서 보는 바와 같이 통행선택기준인 총통행시간, 환승횟수, 환승시간, 환승역 환경, 열차의 배차간격이 전체 경로선택비율의 95% 정도에 해당함.
- 이 연구에서는 차내통행시간, 환승횟수, 환승시간, 배차간격, 환승역 환경을 환승요소로 반영함.
- 환승역 환경은 환승역의 계단수, 에스컬레이터 설치여부, 엘리베이터 설치여부로서, 환승역의 편의성을 나타냄.
- 환승역 환경은 환승 시 편의시설의 설치유무에 따라 대중교통 승객이 체감하는 환승통행시간으로 제시할 수 있으나, 이에 대한 결과를 얻기 위해서는 많은 조사가 필요함.
- 경로선택은 총통행시간으로 결정하지만, 이는 차내통행시간, 환승시간, 배차간격을 모두 포함하여 나타낼 수 있음. 따라서 이 연구에서는 총통행시간을 차내통행시간, 환승시간, 배차간격, 환승역 환경으로 고려함.
- 환승 시마다 승객이 느끼는 통행에 대한 불편함은 일반적으로 그 횟수에 비례하여 증가하는 것보다 더 큼.
- 이와 같이 환승횟수가 증가할수록 승객이 전보다 더 큰 불편함을 느끼므로, 불편도는 아래 그림과 같이 환승횟수에 대하여 비선형 단조증가형태로 가정할 수 있음.
- 매 환승 시, 승객이 느끼는 불편도를 환승계수로 칭함.
- 환승계수는 환승 시 발생하는 환승시간과 대기시간(배차간격)에 가중치로 적용함., 즉 불편도는 환승시간과 대기시간을 동반함. 이를 다음 식과 같이 개념화할 수 있음.

환승계수  $\alpha_i$  (환승시간  $t_i$  + 대기시간  $d_i$ ) :  $i$  : 환승횟수



## 2) 환승통행 분석결과

- 환승은 두 개 이상의 노선이 만나는 경우 이루어지며, 각 환승역에서의 환승정보는 from node, transfer node, to node, 환승시간으로 구성됨.
- 즉, 환승정보는 link 1(from node-transfer node)에서 link 2(transfer node-to node)로 환승하는 형태로 표시됨.
- 이 연구에서는 KOTRAS가 제시하고 있는 기존 환승정보에 대한 비합리적인 부분을 개선하였음.
  - KOTRAS는 분석에 필요한 일반화 비용이 역 수로 표시되기 때문에 환승시간을 역 수로 나타내고 있으며, 이로 인해 정확한 환승시간을 알 수 없음.
  - KOTRAS는 환승정보를 노드정보에 포함시키고 있어, 해당 node를 통과하여 환승하는 이용자가 동일한 시간을 소비하는 것으로 나타남. 이로 인해 현실적인 환승시간을 적용하지 못하고 있음.

### ⑥ 환승시간(Time) 자료

- 서울시정개발연구원의 환승통행실태 자료를 기반
- 환승통행시간은 환승 시작역 플랫폼의 중간에서 환승 도착역의 플랫폼의 중간까지 통행시간임.
- 실제조사는 누락된 자료 및 시계 외 자료에 대하여 적용함.

### ⑥ 대기시간(frequency) 자료

- (환승노드→환승도착노드)에 해당하는 호선에 대하여 각 공사 평균배차간격( $f$ )의 1/2로 평균대기시간개념을 적용하여 구성함.

- 예를 들어, 아래 표에서 나타난 도봉역에서 접근해서 장암으로 환승을 하는 경우 도봉산역에서 노선을 갈아타며, 환승을 위해 1.12분의 환승접근시간을 소요하는 것을 의미함.

F_node	Transfer	T_node	Time
도봉	도봉산	장암	1.12
도봉	도봉산	수락산	1.00
망월사	도봉산	장암	1.43
망월사	도봉산	수락산	1.18
장암	도봉산	도봉	1.32
수락산	도봉산	도봉	0.97
장암	도봉산	망월사	1.42
수락산	도봉산	망월사	1.03
노원	창동	녹천	1.97
쌍문	창동	녹천	1.57
노원	창동	방학	1.77
쌍문	창동	방학	1.78
녹천	창동	노원	2.02
녹천	창동	쌍문	2.23

〈그림 4-13〉 환승통행자료

### 제3절 도시철도 스케줄 기반 네트워크 구축

#### 1. 도시철도 운행 스케줄

- 지하철 운영기관은 지하철역 변화에 따른 노선변화, 시간대별 승객수요 변화에 따라 정기 또는 비정기적으로 열차 운행 스케줄을 구축함.
- 열차 운행 스케줄은 각 노선의 운행차량별로 운행역의 출발·도착 시간으로 구성되어 있으며, 동일한 노선일지라도 시간과 역별 특징에 따라 운행량의 차이가 있음.

열차번호	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022
출발역	을지로입	홍대입구	신도림	신도림	서울대입	신도림	신도림	삼성	신도림	신도림	성수
도착역	성수	성수	성수	성수	성수	성수	성수	성수	성수	성수	성수
교대								5:37:30			5:54:00
서초								5:38:30			5:55:30
								5:39:00			5:56:00
방배								5:41:00			5:58:00
								5:41:30			5:58:30
사당								5:44:00			6:01:00
								5:44:30			6:01:30
낙성대								5:46:30			6:03:30
								5:47:00			6:04:00
서울대입구								5:48:30			6:05:30
					5:30:00			5:49:00			6:06:00
봉천					5:31:30			5:50:00			6:07:30
					5:32:00			5:50:30			6:08:00
신림					5:33:30			5:52:00			6:09:30
					5:34:00			5:52:30			6:10:00
신대방					5:36:00			5:54:30			6:12:00
					5:36:30			5:55:00			6:12:30
구로디지털					5:38:00			5:56:30			6:14:00
					5:38:30			5:57:00			6:14:30
대림					5:40:00			5:58:30			6:16:00
					5:40:30			5:59:00			6:16:30
신도림					5:43:00			6:01:00			6:19:00
			5:30:00	5:38:00	5:43:30	5:50:00	5:55:30	6:01:30	6:07:00	6:14:00	6:19:30
문래			5:32:00	5:40:00	5:45:00	5:52:00	5:57:30	6:03:30	6:08:30	6:15:30	6:22:00
			5:32:30	5:40:30	5:45:30	5:52:30	5:58:00	6:04:00	6:09:00	6:16:00	6:22:30
영등포구청			5:33:30	5:41:30	5:46:30	5:53:30	5:59:00	6:05:00	6:10:00	6:17:00	6:23:30
			5:34:00	5:42:00	5:47:00	5:54:00	5:59:30	6:05:30	6:10:30	6:17:30	6:24:00
당산			5:35:00	5:43:30	5:48:30	5:55:30	6:01:00	6:07:00	6:12:00	6:19:00	6:25:30
			5:35:30	5:44:00	5:49:00	5:56:00	6:01:30	6:07:30	6:12:30	6:19:30	6:26:00
합정			5:37:30	5:46:30	5:51:30	5:58:30	6:03:30	6:09:30	6:14:30	6:22:00	6:28:30
			5:38:00	5:47:00	5:52:00	5:59:00	6:04:00	6:10:00	6:15:00	6:22:30	6:29:00
홍대입구			5:39:30	5:48:30	5:53:30	6:00:30	6:05:30	6:11:30	6:16:30	6:24:00	6:30:30
	5:30:00		5:40:00	5:49:00	5:54:00	6:01:00	6:06:00	6:12:00	6:17:00	6:24:30	6:31:00
신촌			5:32:00	5:41:30	5:51:00	5:56:00	6:03:00	6:08:00	6:13:30	6:18:30	6:26:30
			5:32:30	5:42:00	5:51:30	5:56:30	6:03:30	6:08:30	6:14:00	6:19:00	6:27:00
이대			5:33:30	5:43:00	5:52:30	5:58:00	6:04:30	6:09:30	6:15:00	6:20:00	6:28:30
			5:34:00	5:43:30	5:53:00	5:58:30	6:05:00	6:10:00	6:15:30	6:20:30	6:29:00
아현			5:35:00	5:44:30	5:54:00	5:59:30	6:06:00	6:11:00	6:16:30	6:21:30	6:29:30
			5:35:30	5:45:00	5:54:30	6:00:00	6:06:30	6:11:30	6:17:00	6:22:00	6:30:00
충정로			5:37:00	5:46:00	5:56:00	6:01:30	6:08:00	6:13:00	6:18:30	6:23:30	6:31:30
			5:37:30	5:46:30	5:56:30	6:02:00	6:08:30	6:13:30	6:19:00	6:24:00	6:32:00
시청			5:39:00	5:48:00	5:58:00	6:03:30	6:10:00	6:15:00	6:20:30	6:25:30	6:33:30
			5:39:30	5:48:30	5:58:30	6:04:00	6:10:30	6:15:30	6:21:00	6:26:00	6:34:00
을지로입구			5:41:00	5:50:00	5:59:30	6:05:30	6:12:00	6:17:00	6:22:30	6:27:30	6:35:30
	5:30:00		5:41:30	5:50:30	6:00:00	6:06:00	6:12:30	6:17:30	6:23:00	6:28:00	6:36:00
을지로3가			5:31:30	5:42:30	5:52:00	6:01:00	6:07:00	6:13:30	6:19:00	6:24:00	6:32:00
			5:32:00	5:43:00	5:52:30	6:01:30	6:07:30	6:14:00	6:19:30	6:24:30	6:32:30
을지로4가			5:33:00	5:44:00	5:53:30	6:02:30	6:08:30	6:15:00	6:20:30	6:25:30	6:33:30
			5:33:30	5:44:30	5:54:00	6:03:00	6:09:00	6:15:30	6:21:00	6:26:00	6:34:00

(그림 4-14) 열차 운행 스케줄

○ 열차 차량별 운행 스케줄은 운영기관별로 각기 운행 중인 노선들에 대한 시간창(Time Window)으로 구성되어 있으며, 노선별 운행 스케줄 수는 다음과 같음.

〈표 4-7〉 운행노선별 스케줄 수

호선	운행노선	완행	급행
1호선 라인	경부선	296	31
	경인선	296	233
	경원선	612	
2호선 라인	본선	560	-
	성수지선	237	
	신정지선	224	
3호선 라인	3호선	440	
	일산선	438	
4호선 라인	4호선	510	3
	안산과천선	512	
5호선 라인	상일방면	220	-
	마천방면	241	
	6호선	338	
	7호선	408	
	8호선	312	
	9호선	254	112
	인천 1호선		-
	중앙선	174	2
	경의선*	150	1 (1)
	경춘선	97	41
	공항철도	422	-
	분당선	336	
	신분당선**	159	

주 : 스케줄 수는 주중 상·하행을 합친 값

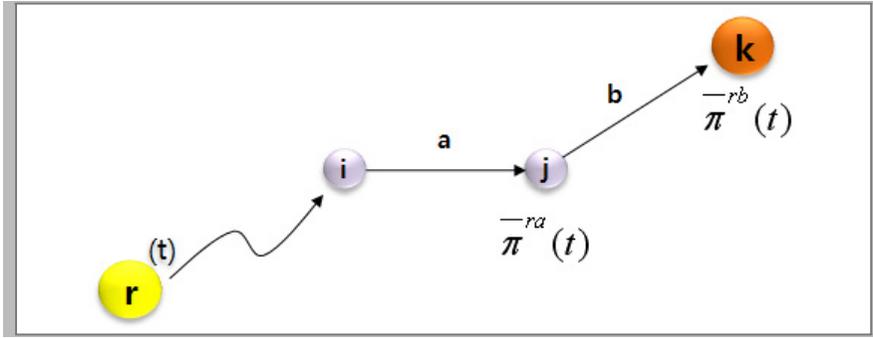
주\* : 경의선 급행노선은 '경의선급행'과 광호안의 '경의선특급'으로 구분

주\*\* : 2011년 1~5월 기준

신분당선은 2011년 10월 28일 개통

## 2. 일반화 비용 모형식

○ <그림 4-15>는 출발지 r을 출발하여 링크 a에서 b로 환승 후 도착지인 k에 도착하는 경로를 링크로 표현한 것임.



〈그림 4-15〉 최소시간경로 표현

- $r$ 에서  $b$ 의 도착지점( $k$ )까지의 경로탐색 시 최소시간을 고려한 경로는 다음의 식과 같이 표현이 가능하고, 출발지  $r$ 에서 링크  $a$ 의 도착지점( $j$ )까지 소요시간  $\pi^{ra}$ 와 환승이동시간  $M_{ab}$ , 그리고 링크  $b$ 의 주행시간  $c_b$ 를 더한 값이 최소가 되는 경로를 선택하게 되며 수식은 아래와 같음.

$$\overline{\pi}^{rb}(t) = \overline{\pi}^{ra}(t) + M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi)) + c_b(\xi + M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi)))$$

여기서,

$\xi$  :  $t + \pi^{ra}(t)$

$\overline{\pi}^{rb}$  : 출발지  $r$ 에서 수단-링크  $b$ 의 도착역까지 최소일반화비용

$\pi^{rb}$  : 출발지  $r$ 에서 수단-링크  $a$ 의 도착지점까지의 통행시간

$M_{ab}$  : 수단  $a$ 에서 수단  $b$ 로 환승을 위한 이동시간

$w_{ab}$  : 수단  $a$ 에서 수단  $b$ 로 환승 이동 후 대기시간

$c_b$  : 수단-링크  $b$ 의 주행시간

- 이 식은 출발지  $r$ 에서 도착지  $k$ 까지 경로 중 통행시간을 나타낸 것으로, 실제 대중교통을 이용하는 승객은 통행시간 외에 이동 목적이나 환승횟수, 통행비용 등 이동에 필요한 모든 정보를 고려하여 경로를 선택하게 됨.
- 〈그림 4-16〉과 같이 환승횟수에 대한 저항으로 환승이 많아질수록 승객이 부담감을 느끼는 식으로 전환하는 일반화비용계수( $\alpha$ )를 도입하며,  $\alpha$ 는 환승횟수가 비선형적인 증가를 나타내는 함수로 표시됨.

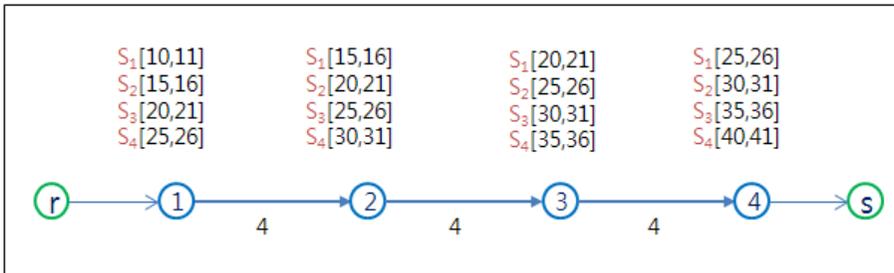
$$\overline{\pi}^{rb}(t) = \overline{\pi}^{ra}(t) + \alpha(M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi))) + c_b(\xi + M_{ab}(\xi) + w_{ab}(\xi + M_{ab}(\xi)))$$

여기서,  $\alpha$ 는 일반화비용 계수 추가

## 1) 스케줄링 기반 철도네트워크 구축

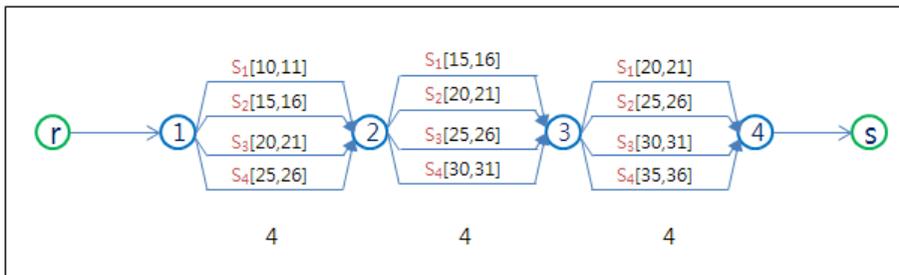
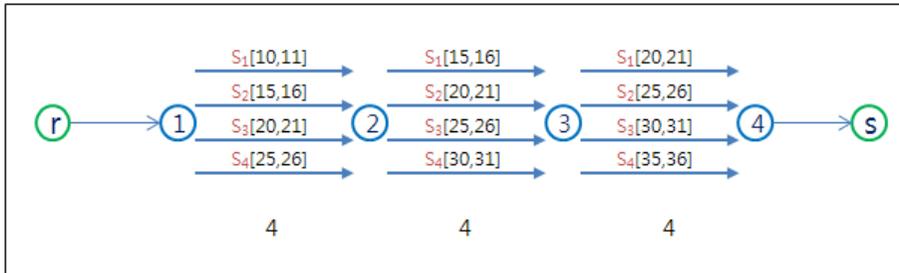
### (1) 스케줄링 네트워크

- 도시철도 네트워크의 열차 스케줄 도착·출발 시간을 연결하는 과정이 우선되어야 함. 이 때 해당 노드에는 각 열차 차량에 따른 스케줄 정보를 입력함(<그림 4-17> 참조).



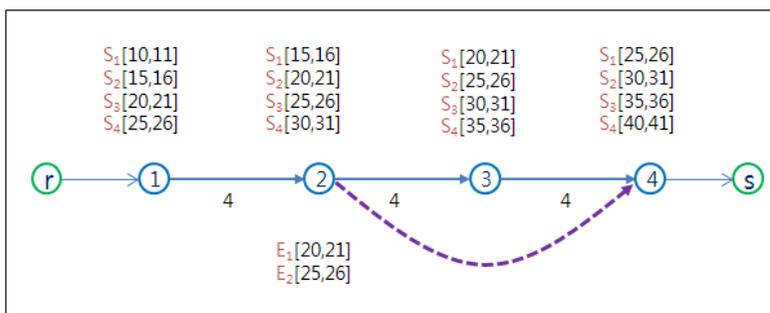
(그림 4-16) 네트워크와 운행 스케줄

- 각 노드에 있는 스케줄 정보를 아래와 같이 링크로 변환하여 연결하는 과정을 거침. 스케줄 정보는 도착·출발 시간으로 구성되어 있으므로 (당역 도착노드)-(다음역 출발노드) 형식의 링크로 구성이 가능함(<그림 4-17> 참조).
- 스케줄링의 연결 방식은 수단-링크라벨 개념을 적용하여 열차 차량들을 별개 수단으로 보고 각 역을 연결함(<그림 4-17> 참조).



(그림 4-17) 스케줄링기반의 네트워크

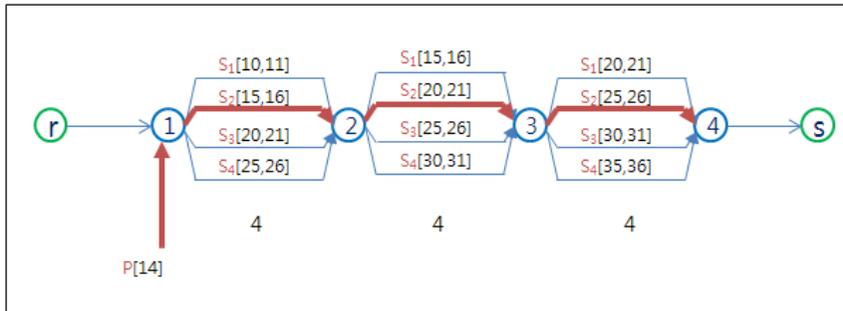
- 일반 완행노선의 스케줄은 역의 도착시간과 출발시간 사이에 일정한 시간 간격이 있음. 이는 해당역의 승·하차를 위한 열차 대기시간이며 이 간격은 노선마다 차이는 있지만 평균 30초 정도의 시간을 가짐.
- 급행노선의 경우 위의 일반 스케줄링 네트워크의 방법을 사용하는데 정차역을 제외하고 그냥 지나치는 역은 스케줄의 도착시간과 출발시간을 동일하게 설정하여 입력함(<그림 4-18> 참조).



(그림 4-18) 급행 스케줄링과 네트워크 표현

## (2) 경로탐색과정

- 승객이 지하철을 이용할 때 일반적으로 열차 스케줄을 고려하여 정확한 시간에 역에 진입하는 경우는 드물며 일반적으로 역에 차량이 진입하는 시간까지 대기하게 됨.
- 아래의 그림처럼 승객을  $P[14]$ 라고 가정하고 승객은 역에 진입한 시간 이후에 이용하려는 열차 중 최초로 도착하는 열차  $S_2$ 에 탑승하여 목적지인 4번 역까지 이동하게 됨.
- 이를 경로탐색 모형으로 표현하려 하면 목적지까지의 이동시간과 1번 역의 대기시간을 모두 고려하여 최적경로를 선택하게 됨(<그림 4-19> 참조).



<그림 4-19> 승객도착과 최적경로 탐색

## 제5장 혼잡도 추정방안 구축사례

제1절 대중교통카드자료를 활용한 지하철 통행배정

제2절 지하철 혼잡특성 분석

# 제 5 장

## 혼잡도 추정방안 구축사례

### 제1절 대중교통카드자료를 활용한 지하철 통행배정

#### 1. 분석 데이터

- 대중교통카드자료에서 추출할 수 있는 통행정보로는 역 위치, 운행노선, 그리고 승객별 승·하차역, 통행량 등이 있음.
- 2011년 10월 하루 기준 대중교통카드 개인별 통행정보는 평균 2천만여건이 발생하며, 이들을 역 기준 유·출입 O/D로 가공한 결과는 <그림 5-1>과 같음.

##### (1) 지하철 네트워크 정보

- 역 : 469개(환승역 : 72개)
- 노선 : 31개(완행 22 + 급행 9)
- 역 간 링크 : 1,336개

##### (2) 지하철 대중교통카드 통행 정보

- 추출 범위 : 수도권 대중교통 전체(지하철+버스)
- 통행 건수 : 20,828,297건

- 통행 O/D를 도시철도 네트워크에 배정한 결과는 <그림 5-2>와 같이 링크별로 나타낼 수 있음. 통행배정은 하루단위와 오전 첨두(7:00~9:00)를 기준으로 수행함.

## 2. 지하철 통행배정

○ 통행배정을 수행하기에 앞서 <그림 5-1>과 같이 지하철역 간 O/D를 하루단위와 오전첨두시(AM 7:00~AM 9:00)를 기준으로 구축하였음.

– 일일 총 수요 (O/D) : 7,672,782

– 첨두시 수요 (O/D) : 1,180,066

출발역 ID	역명	도착역 ID	역명	일단위	첨두
1002	남영	1002	남영	70	9
1002	남영	1003	영산천	451	31
1002	남영	1004	노량진	812	101
1002	남영	1005	대방	180	15
1002	남영	1006	영등포	498	46
1002	남영	1010	한남	16	9
1002	남영	1014	청량리 (지상)	53	2
1002	남영	1015	회기	141	15
1002	남영	1016	외대앞	70	8
1002	남영	1017	신대문	76	8
1002	남영	1018	석계	100	5
1002	남영	1019	성북	50	2
1002	남영	1020	월계	18	3
1002	남영	1032	신길	132	17
1002	남영	1204	양원	6	1
1002	남영	1205	구리	36	4
1002	남영	1206	도동	30	2
1002	남영	1207	양정	5	1
1002	남영	1208	당소	18	1
1002	남영	1210	풀당	1	1
1002	남영	1214	수문	2	1
1002	남영	1219	용문	5	4
1002	남영	1317	내호평	10	1
1002	남영	1319	마석	7	1
1002	남영	1326	강촌	1	1
1002	남영	1328	남촌	11	1
1002	남영	1403	아산	1	1
1002	남영	1407	양은	7	5

<그림 5-1> 지하철역 간 수요

○ 통행배정 결과는 <그림 5-2>와 같이 추출할 수 있음.

– 배정링크 수 : 1,058건

출발역	도착역	호선	일단위	첨두	첨두비율
가봉	의정부	경원선	48958	7884	( 16.10 )
경원	회룡	경원선	63292	9576	( 15.13 )
의정부	가봉	경원선	43353	3084	( 7.11 )
의정부	가봉	경원선	78350	13647	( 17.42 )
의정부	의정부	경원선	59451	4115	( 6.92 )
망월사	도동	경원선	83724	14375	( 17.17 )
망월사	회룡	경원선	71224	4168	( 5.85 )
도동	도동	경원선	76243	12903	( 16.92 )
도동	산수	경원선	77032	4580	( 5.95 )
도동	산수	경원선	30784	6627	( 21.53 )
도동	장암	7호선	747	56	( 7.50 )
도동	방화	경원선	79356	13653	( 17.20 )
도동	방화	경원선	66851	4077	( 6.10 )
도동	장동	경원선	84208	14853	( 17.64 )
방화	장동	경원선	69800	4133	( 5.92 )
장동	장동	경원선	77130	13954	( 18.09 )
장동	장동	경원선	74170	4150	( 5.60 )
장동	장동	4호선	96985	21431	( 22.10 )
장동	장동	4호선	70215	5546	( 7.90 )
장동	장동	경원선	80216	14902	( 18.58 )
장동	장동	경원선	72483	3923	( 5.41 )
장동	장동	경원선	82449	15212	( 18.45 )
장동	장동	경원선	74407	3792	( 5.10 )
장동	장동	경원선	88742	17173	( 19.35 )
장동	장동	경원선	76296	3755	( 4.92 )
장동	장동	경원선	98106	19613	( 19.99 )
장동	장동	경원선	81247	3827	( 4.71 )

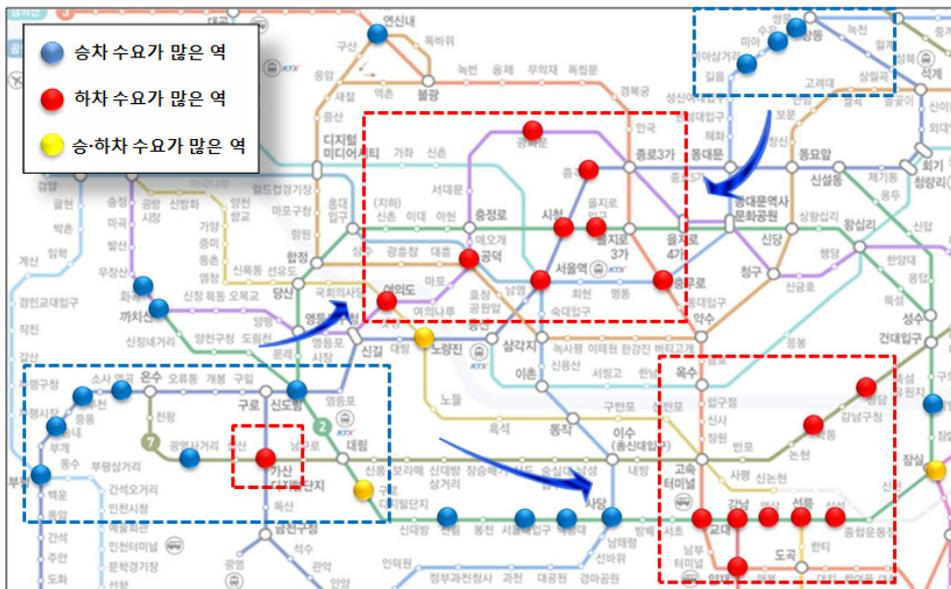
<그림 5-2> 지하철 통행배정 결과

## 제2절 지하철 혼잡특성 분석

### 1. 지하철 혼잡 패턴

#### 1) 침두시 수도권 도시철도 수요 이동패턴

- 대중교통카드를 기반으로 진·출입 수요가 많은 역사와 지하철 네트워크상의 혼잡구간 및 이용자행태 분석을 통해 환승수요를 분석함으로써, 노선별 환승에 따른 전환수요가 미치는 영향을 파악함.
- 아래의 그림은 철도 스케줄링크를 기반으로 수도권 지하철의 출근 침두시 통행수요를 분석한 결과임. 주로 강남과 서울역 인근에 업무지구가 형성되어 있고, 인천에서 서울로 출근하는 인구나 신도림 및 강북 인근에 주거지구가 형성되어 있는 수도권의 특성상 출근 침두시 통행수요의 이동패턴이 명확하게 드러남.
- 주거지구에서 업무지구로 이동하는 경로는 침두시에 한꺼번에 수요가 밀집되므로 혼잡을 야기하는 원인이 됨.



〈그림 5-3〉 침두시 지하철 혼잡 패턴(상위 20위)

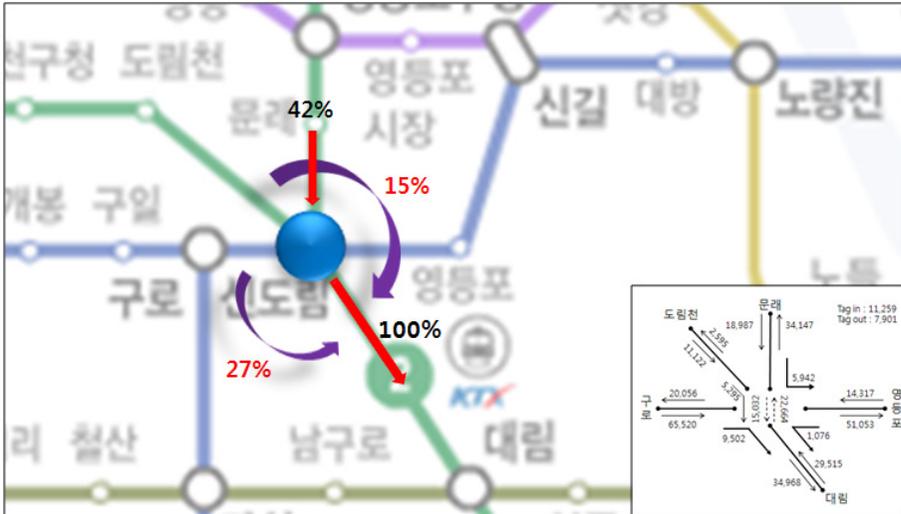
〈표 5-1〉 침두시 역별 이용수요

순위	역별 승차 수요			역별 하차 수요		
	역 명	승차인원 (명)	일일대비 침두비율(%)	역 명	하차인원 (명)	일일대비 침두비율(%)
1	신림	21,283	26.6	가산디지털단지	26,119	40.2
2	사당	14,487	16.4	선릉	25,297	31
3	잠실	14,220	14.1	서울역	23,828	20.2
4	송내	12,978	20.8	강남	22,946	19.5
5	부천	12,533	20.1	시청	21,816	37.5
6	구로디지털단지	12,521	18.2	역삼	21,243	33.2
7	서울대입구	12,262	20.6	삼성	20,866	26
8	노량진	11,301	16.1	을지로입구	18,568	32.2
9	신도림	11,259	17	여의도	16,642	42.1
10	수유	11,163	22.4	양재	15,976	28.4
11	연신내	10,732	25	구로디지털단지	13,928	20.2
12	쌍문	10,434	26.9	잠실	13,637	14.3
13	미아삼거리	10,386	25.8	교대	13,567	20.5
14	강변	10,134	16.8	종각	12,589	24.5
15	까치산	9,511	31.3	광화문	12,507	31.8
16	역곡	9,461	24.1	충무로	12,346	29.1
17	부평	9,273	17.2	청담	11,857	33.8
18	화곡	9,142	28.2	노량진	11,562	16.4
19	낙성대	8,460	25	학동	11,134	35.1
20	광명사거리	8,458	27.9	공덕	10,810	30.9

주: 침두시(AM 7:00~ AM 9:00) 이용수요가 상위 20개 역

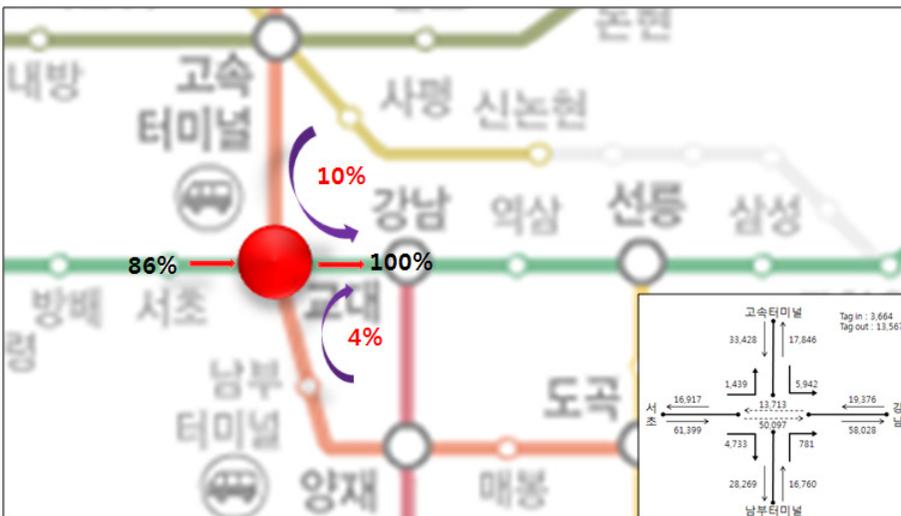
## 2) 침두시 주 혼잡 환승역 분석

- 다음의 그림은 환승역의 수요이동 패턴을 분석한 결과임. 출근 침두시에 1호선과 3호선에서 강남 업무지구로 진행되는 2호선에 수요가 집중되고 있으며, 환승수요가 많은 신도림역(1호선→2호선)과 교대역(3호선→2호선)의 방향별 환승비율을 표현하였음.
- 오전 침두시 인천·경기 서부지역에서 서울로 진입하는 도시철도 이용자들은 신도림역을 통해 2호선으로 진입함. 이때 <그림 5-4>와 같이 신도림역에서 2호선을 통해 강남 업무지구 쪽으로 진행되는 수요 중 전체의 42%가 2호선 문래역에서 대림역 방향으로 환승 없이 진입하며, 1호선에서 27%, 2호선 지선에서 15%가 환승하여 이동하는 것으로 분석됨.



〈그림 5-4〉 침두시 신도림역 방향별 환승수요 패턴

○강남 업무지구로 진입하기 위한 마지막 환승역인 교대역은 <그림 5-5>와 같이 2호선을 통해 86%의 수요가 진입하고, 3호선 고속터미널 방향에서 10%, 남부터미널 방향에서 4%의 수요가 환승하는 것으로 분석됨.



〈그림 5-5〉 침두시 교대역 방향별 환승수요 패턴

## 2. 지하철 혼잡 분석

- 수도권 지하철역의 혼잡으로 인한 문제가 빈번하게 발생하고 있는데 이는 단순히 지하철 역만의 문제가 아니라 지하철 네트워크의 통행패턴이 원인일 수 있음.
  - 혼잡구간은 해당구간에서의 수요가 일시적으로 집중됨에 따라 발생하는 것이 아니라 철도 네트워크의 특성에 의한 영향이 큼. 즉, 전역에서 유발된 수요가 전위됨에 따라 혼잡구간이 발생함.
  - 대안경로(또는 경쟁구간)가 최단시간경로보다 통행비용(일반화 비용)이 큼.
    - ↳ 대안노선의 역할이 미흡
  - 네트워크상 외부링크(역구간)들이 특정노드(환승역)에 편중되어 수요가 집중되는 실정임.
    - ↳ 신도립, 사당, 잠실 등 혼잡한 환승역은 외부링크(경기도, 인천 등)가 집중됨에 따라 혼잡 증가
- 이러한 문제가 발생하는 네트워크의 개선을 위한 방안마련이 필요함.
  - 혼잡이 발생하는 구간의 시점을 분석하여 철도스케줄의 운영개선방안(운행간격 조절) 및 이용객의 환승시간을 고려한 스케줄관리 운영방안을 도출함.
  - 철도 네트워크 개선운영방안으로 혼잡구간의 수요를 감축시킬 수 있는 대안경로를 설정하여 운영하는 방안 또는 타 대중교통수단(시내버스 등)과 연계하여 수요를 분산할 수 있는 방안을 제시함.

## 제 6 장    결    론

제1절 연구의 결론

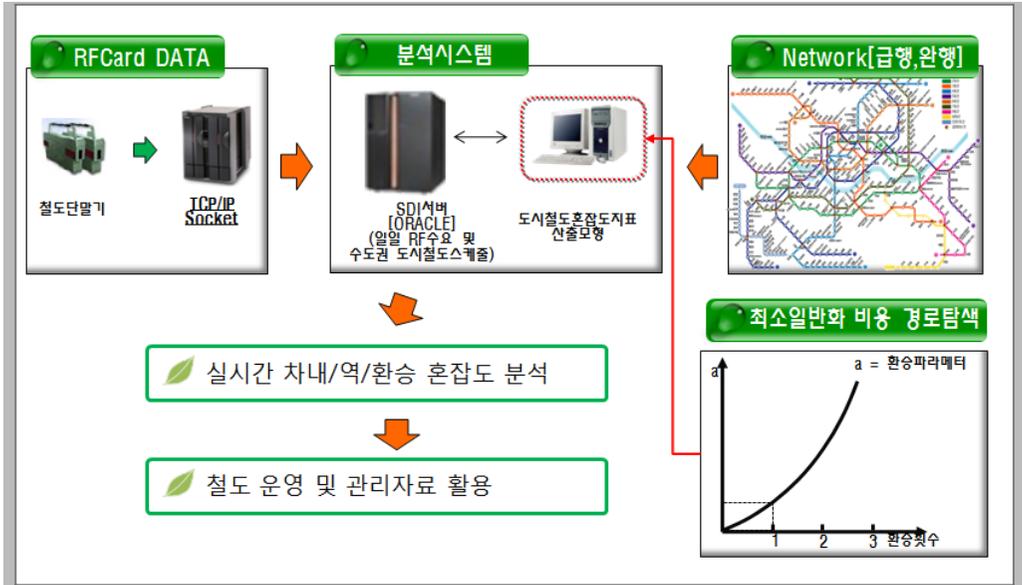
제2절 향후 활용방안

제3절 정책 건의

### 제1절 연구의 결론

- 도시철도의 혼잡도는 운영상태 파악을 위한 중요한 지표로 분류되고 있으며, 차량 및 역사의 혼잡도를 파악하여 운행 횟수, 정시성, 통행속도, 시설 용량 등의 서비스 제공 측면에서 기초자료로 활용되고 있음.
- 혼잡도 지표 측정 부문에서 대중교통카드자료의 활용은 버스의 혼잡도에만 집중되어 있었음. 버스는 차내에 단말기가 위치해 있어 차내 혼잡도를 계산하는 것이 쉬웠으나, 도시철도는 차량 내부가 아닌 역사 내부에 위치하여 승객의 Tag in, Tag out 시간이 열차차량의 승·하차 시간과 일치하지 않아 혼잡도의 계산이 용이하지 않았음.
- 이러한 문제로 인해 그동안 각 운영기관이 도시철도 혼잡도를 측정할 때는 대중교통카드자료와 실측조사를 이용해 시간대별 통행O/D를 만들고, 최소환승·최소시간경로를 설정하여 배정한 후 차내 인원당 혼잡도의 기준을 통해 결과를 도출하거나 열차정원과 재차인원을 적용하여 혼잡도를 산정하는 방식을 사용해 왔음.
- 이 연구에서는 이와 같은 문제가 없는 도시철도 혼잡도의 측정을 위해 대중교통카드자료에 도시철도 운행스케줄을 활용하는 방안을 제안하였음.
- 도시철도 운행스케줄은 각 차량의 운행노선과 역별 출발, 도착시간이 지정되어 있음. 이 스케줄을 하나의 링크로 가정하고 수단-링크 표지기반 네트워크 이론을 응용하여 철도 네트워크를 철도 스케줄 네트워크로 변환하였음.
- 호선별 환승, 완행·급행 간 환승의 표현은 환승거리, 이동시간, 대기시간 등을 일반화 비용으로 환산하여 적용하였으며, 동적 최소시간경로탐색 알고리즘으로 시간대별 교통혼잡현상 등의 행태를 반영하였음.

- 구축된 네트워크에 대중교통카드 O/D를 지정하면 운행 차량별 수요를 측정할 수 있으며, 이 외에 역별·역 간 수요, 환승역에서의 환승 경로별 수요의 측정이 가능함. 이를 활용하여 도시철도의 시간·지역별 혼잡도와 역사 혼잡, 차내 혼잡도를 산정할 수 있음.



〈그림 6-1〉 대중교통자료를 활용한 도시철도 네트워크의 표현과 활용

## 제2절 향후 활용방안

- 각 운영기관의 도시철도 운행 서비스 개선 방향을 제시할 수 있으며, 이를 활용할 경우 보다 실질적인 서비스의 제공이 가능해질 것으로 기대됨.
- 이 연구에서는 승객의 이동 행태를 대중교통카드자료에 기반한 환승 이동시간, 환승 대기 시간의 변수를 적용하였음. 시간대별, 특히 첨두시 승객의 행태는 비첨두시에 비해 수요의 집중이 높고, 승객 행태의 변수가 많아 다양한 통행특성을 반영할 수 있으면, 더 명확한 결과의 파악이 가능할 것으로 판단됨.
- 현재 버스의 혼잡도 산정에서는 대중교통카드를 활용하고 있으며, 이 연구의 철도 혼잡도 산정과정에서도 대중교통카드를 적용하였기 때문에, 버스와 도시철도 간 환승에 대한 추가적인 연구로 수도권 전체에 대한 대중교통 혼잡도 분석이 가능할 것으로 기대됨.

### 제3절 정책 건의

- 대중교통카드자료를 활용하여 도시철도 혼잡도 추정방법 개선
  - 도시철도 차량의 혼잡도
  - 도시철도 환승역의 혼잡도
  
- 도시철도 운영정책에 대한 주요 판단기준으로 활용
  - 최적 배차간격 조정
  - 최적 열차 운행횟수 조정
  - 열차 정시성 확보 판단을 위한 근거
  - 열차 통행속도 결정
  - 역사·환승역 시설용량 판단을 위한 근거
  
- 도시철도 최적 운행스케줄 시뮬레이션 모형으로 활용
  - 승객의 이동패턴 파악
  - 적정 서비스수준 유지를 위한 도시철도 시뮬레이션 모형체계 구축

# 참 고 문 헌



## 참고문헌

---

- 서울시정개발연구원, 2011, 「교통카드 운송수입금 정산·배분의 검증 및 평가」.
- 서울시정개발연구원, 2008, 「대중교통 서비스지표 산출연구(1단계) - 버스 서비스를 중심으로」.
- 서울시정개발연구원, 2009, 「대중교통 서비스지표 산출연구(2단계)」.
- 한국교통연구원, 2006, 「대중교통정책수립을 위한 교통카드자료 활용방안」.
- 천승훈, 2010, “교통카드 자료 기반 통합대중교통망의 확률적 동행배정모형 개발”, 서울대학교 박사 학위논문, 서울대학교.
- 임강원·임용택, 2008, 「교통망 분석론」, 서울대학교 출판부.
- 서울메트로, 2011, 「서울메트로 수송계획」.
- 서울도시철도, 2010, 「도시철도 수송계획」.
- Azevedo J.A., Costa M.E.O.S., Madeira J.J.E.R.S., Martins E.Q.V, 1993, *An Algorithm from the Ranking of Shortest Paths*, European Journal of Operational Research.
- Bellman R, Kalaba R, 1968, *On Kth Best Policies*, J. SIAM.
- Hong K.Lo.C.W.Yip, 2003, *Modeling transfer and non-linear fare structure in multi-modal network*, Transportation Research.
- <http://transport.seoul.go.kr>(서울특별시 도시교통본부)
- <http://gbus.gg.go.kr>(경기도청 대중교통과)

# 영문 요약

(Abstract)



# Congestion Index of Urban Rail Transit Using Public Transportation Card Data

Seongil Shin · Changhun Lee · Hyeonjin Cheong

The Urban Railroad Congestion Index is an important index in that it allows for a firm grasp of the operating status of railroad networks. Further, the vehicle and station congestion data that it provides are used as the underlying base for the selection of various related components including frequency of operations, travel speed, and facility quantity.

The public transportation card reader device of the bus locates inside the bus which leads to accurate recording of passenger boarding and exiting times and thereby facilitates analysis of internal congestion. However, card reader devices for railroads are not located within the vehicles, but rather, within the stations, which leads to disparities between passengers' Tag in, Tag out times with actual boarding and exiting times. This results in greater difficulty in the congestion calculations process.

This research proposes a method of using public transportation card data and railroad operating schedules (Time Window) to measure internal congestion of railroad vehicles.

In a time window, each vehicle's operating route as well as station departure and arrival times are fixed. This schedule will be assumed to be a link and the Link-Mode Label network theory will be applied to convert the railroad network into a railroad schedule network.

Cost components including, but not limited to, transfer distance, transfer times, and waiting times for transfer between lines and relatively slow and rapid transfers were first generalized and then applied. Dynamic shortest time path algorithm was used to reflect behaviors in association with phenomena such as time-related transport congestion.

Time windows are divided into Hard Time Window (HTW) in which waiting and boarding activities are limited to only within the time window, and Soft Time Window (STW) in which waiting activities can occur before the time window and boarding activities may take place

until time of departure. optimum path search uses STW as a condition and minimization of passenger's generalized cost is chosen as the focal direction.

Transfer links are given properties regarding transfer-related moving and waiting times and movement parameters, both of which take into consideration transfer distance and other variables. Also, transfer links necessitate representation of transfer connections between modes, which is achieved via transfer nodes, where each transfer node functions to save succeeding route information beforehand, to be used during the process of route selection. While the saving of information per node requires a comparatively large memory input, this drawback is countered in the simplicity and rapidity of the calculation method, and fact that all transfer links do not have to be connected directly, thereby preventing potential increases in the number of links.

The urban railroad network must prioritize the process of connecting train arrival and departure time schedules. The associated nodes for each train vehicle will be inputted with the appropriate schedule information. The information in each node will undergo conversion to link and subsequently be connected. Since the schedule information is composed of arrival and departure times, they will be organized in the following linked manner(Current station arrival node)->(Next station departure node).

The schedule for relatively slow route has fixed time intervals between station arrival and departure times. This interval is the vehicle waiting time which provides for boarding and exiting at the corresponding station, and the time will vary depending on the route with an average time of about 30 seconds.

An example of the railroad schedule network developed in this paper applied to a peak at a demand in urban railroad and interchange station demand is presented.

In this research, passenger movement behaviors were represented using transfer movement time, and transfer waiting time from public transportation card data and applied to the proposed railroad operating schedule based network.

Currently, bus congestion assessments are based on public transportation cards, and as well in this paper's railroad congestion assessment process, therefore it is believed that additional research on transfers between bus and urban railroads reflecting the extent of public transportation congestion for entire metropolitan districts will be possible.

# **Table of Contents**

## ***Chapter 1 Introduction***

## ***Chapter 2 Measure Internal Congestion of Urban Railroad***

1. Existing Congestion Estimation Method
2. Congestion Estimation in Related Research

## ***Chapter 3 Theoretical Background***

1. Dynamic Optimum Path Algorithm
2. Network Theory

## ***Chapter 4 Construct Integrated Urban Railroad Network***

1. Construction Utilizing Public Transit Cards
2. Urban Railroad Network Construction

## ***Chapter 5 Analysis on Application Cases for Measure Internal Congestion***

1. Traffic Assignment Utilizing Public Transportation Card Data
2. Urban Railroad Characteristic Congestion Analysis

## ***Chapter 6 Conclusion***

## ***References***

## ***Appendices***

Working Paper  
2011-BR-04

**대중교통카드를 활용한 도시철도 혼잡도  
지표개발연구**

---

발행인 김 상 범

발행일 2011년 10월 24일

발행처 서울시정개발연구원

137-071 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

전화 (02)2149-1234 팩스 (02)2149-1025

---

비매품 ISBN 978-89-8052-887-5 93530

본 출판물의 판권은 서울시정개발연구원에 속합니다.