요약 및 정책건의

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.

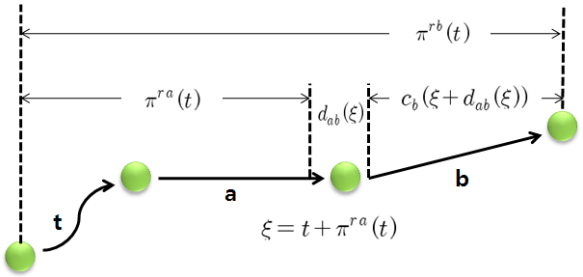
Ⅱ. 주요 연구 결과

1. 응용 이론

○동적 최적경로탐색 알고리즘

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

–기점 r에서 t시간에 출발해 링크 a의 도착링크까지의 최소시간 $\pi^{ra}(t)$와 두 인접링크 a와 b로의 회전시간 $d_{ab}(t+\pi^{ra}(t))$와 링크 b의 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

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

여기서

ξ : $t+\pi^{ra}(t)$

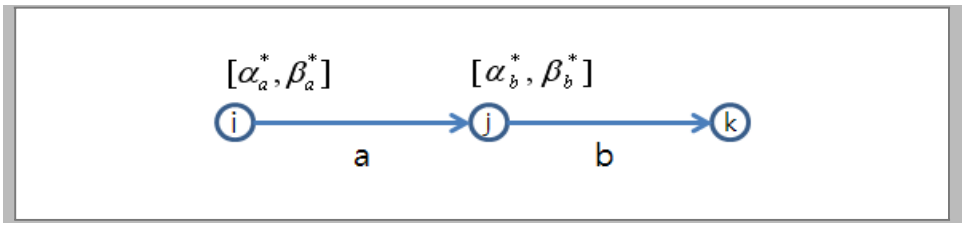
$\pi^{rb}(t)$: 출발지 r에서 t시간에 출발하여 링크 b의 도착노드까지 최소통행시간

$d_{ab}(t)$: 링크 a에서 링크 b로 통행 시 시간 t에서 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)a와 링크(노선)b는 i,j,k 3개의 노드(역)로 순차적으로 연결된 것으로, *번호의 열차가 링크a의 시작노드에서 시간창이 $[\alpha_a^*,\beta_a^*]$이고 다음 역인 링크b의 시작노드는 $[\alpha_b^*,\beta_b^*]$임.



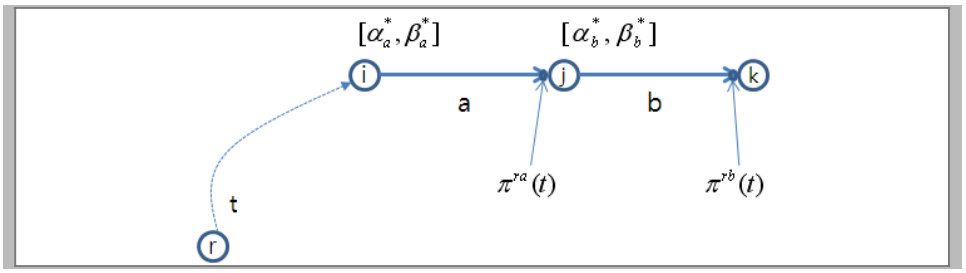
〈그림 2〉 도시철도 네트워크와 시간창

- 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.

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



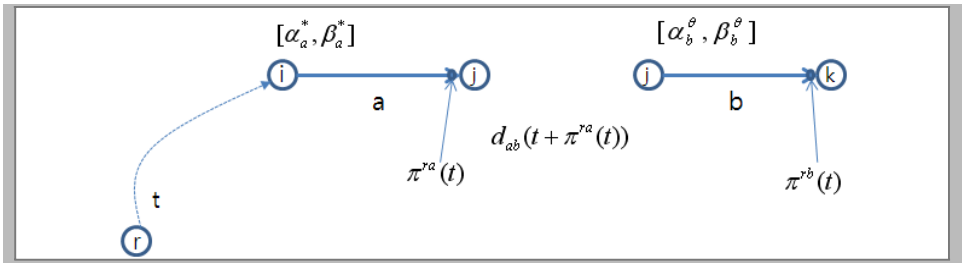
〈그림 3〉 환승이 없는 경우의 열차탑승 진행

–<그림 4>에서 노선a의 *번호열차에서 노선b의 열차θ로 환승이 존재하는 경우까지 고려한 탑승진행의 최적비용식은 다음과 같음.

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

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

–라인b까지 환승을 포함한 도착시간 $t + \pi^{ra}(t) + d_{ab}(t + \pi^{ra}(t))$에서 열차 θ의 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 방해를 주는 다른 요인이 없으며, 수도권 전체를 통행하는 광역교통의 성향을 띠고 있어 승객들이 장거리 이동을 하는데 주로 이용하고 있음.

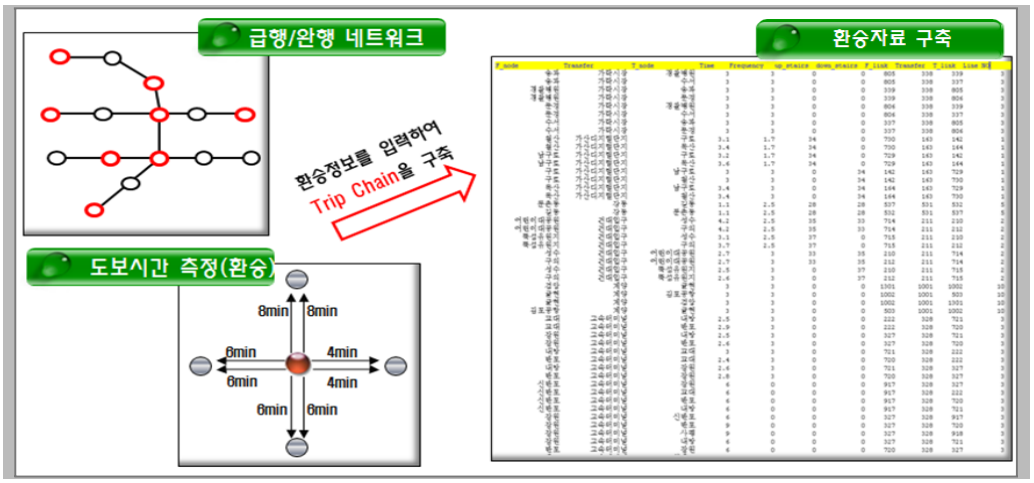
–지하철은 일반 노선 외에 급행노선이 존재하므로 완행, 급행의 노선을 별개로 보고 링크를 새로이 연결하여야 함. 지하철 노선은 각기 다른 열차를 이용하나 동일한 역을 통과하기 때문에 링크 표지 기반(Link-Mode Label) 이론을 응용하여 동일노드에 노선별 링크를 연결함.

○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.

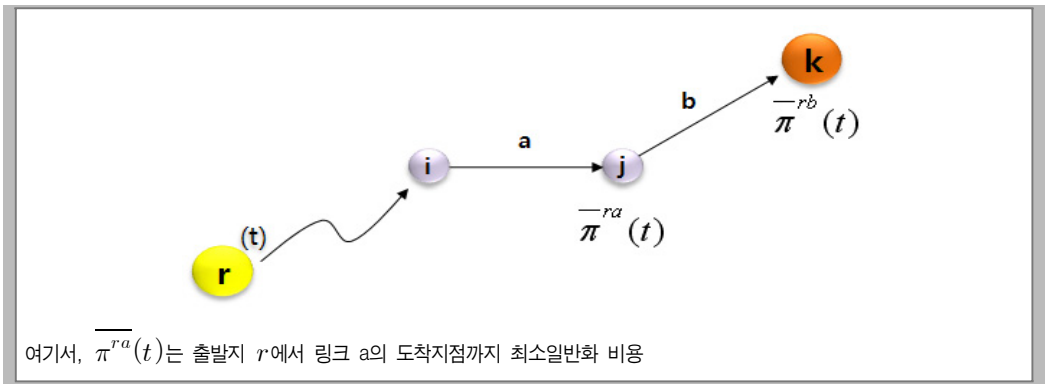


〈그림 5〉 급행・완행을 고려한 환승네트워크 구축

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

−r에서 b의 도착지점(k)까지의 경로탐색 시 최소시간을 고려한 경로는 다음의 식과 같이 표현이 가능하고, 출발지 r에서 링크 a의 도착지점(j)까지 소요시간 π^{ra}와 환승이동시간 M_{ab}, 그리고 링크 b의 주행시간 c_b를 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,

ξ : $t + \pi^{ra}(t)$

$\overline{\pi^{rb}}$: 출발지 r에서 수단-링크 b의 도착역까지 최소일반화비용

π^{rb} : 출발지 r에서 수단-링크 a의 도착지점까지의 통행시간

M_{ab} : 수단 a에서 수단 b로 환승을 위한 이동시간

w_{ab} : 수단 a에서 수단 b로 환승 이동 후 대기시간

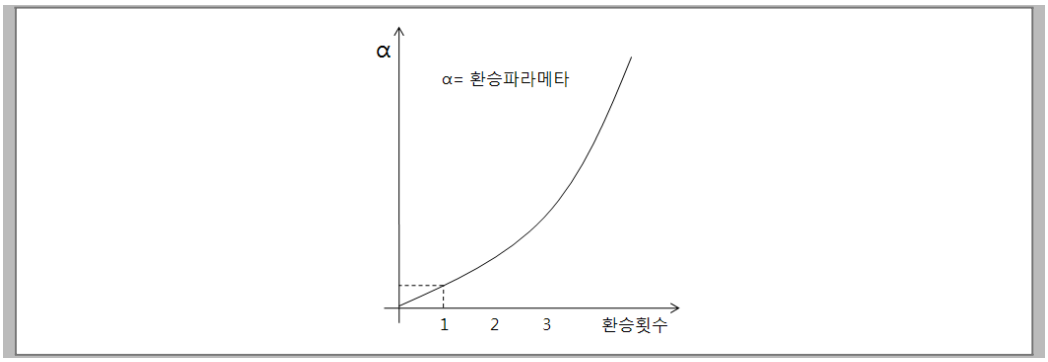
c_b : 수단-링크 b의 주행시간

−이 식은 출발지 r에서 도착지 k까지 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(α)를 도입하며, α는 환승횟수가 비선형적인 증가를 나타내는 함수로 표시됨.

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

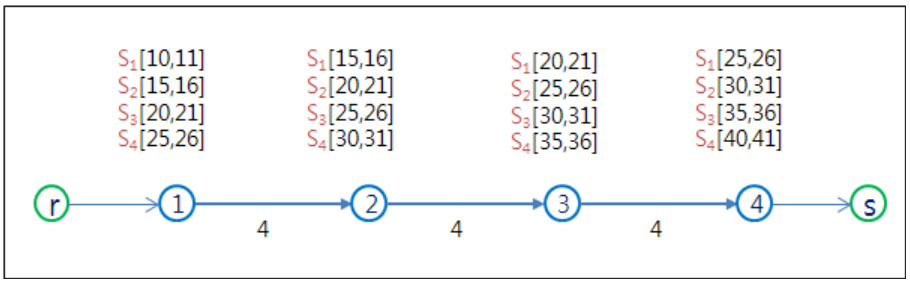
여기서, α는 일반화비용 계수 추가



〈그림 7〉 환승횟수에 대한 일반화비용 계수

○스케줄링크 기반 네트워크

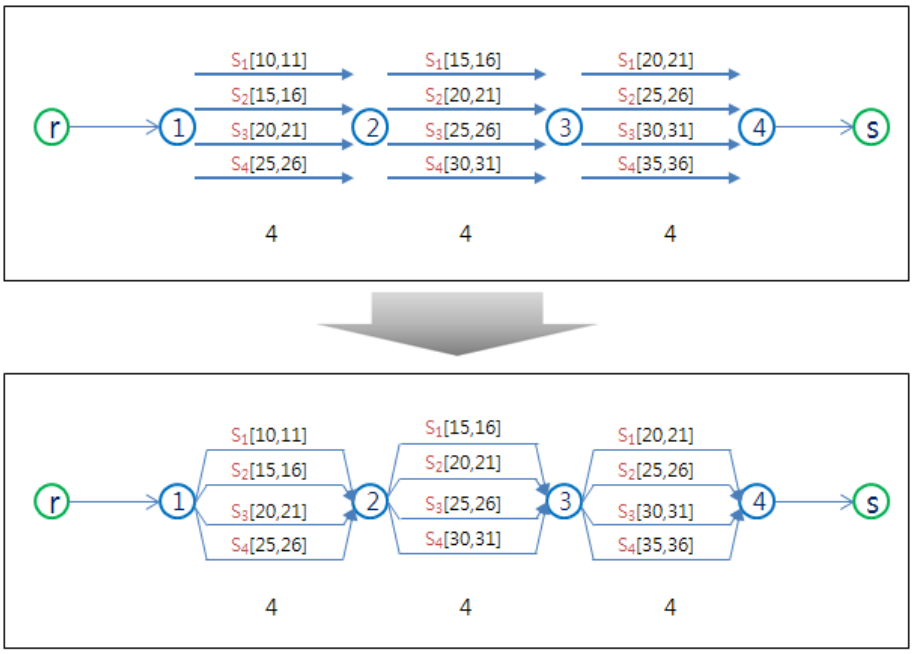
–도시철도 네트워크의 열차 스케줄 도착·출발 시간을 연결하는 과정이 우선되어야 함. 이때 해당 노드에는 각 열차 차량에 따른 스케줄 정보(Time Window)를 입력함(<그림 8> 참조).



〈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).

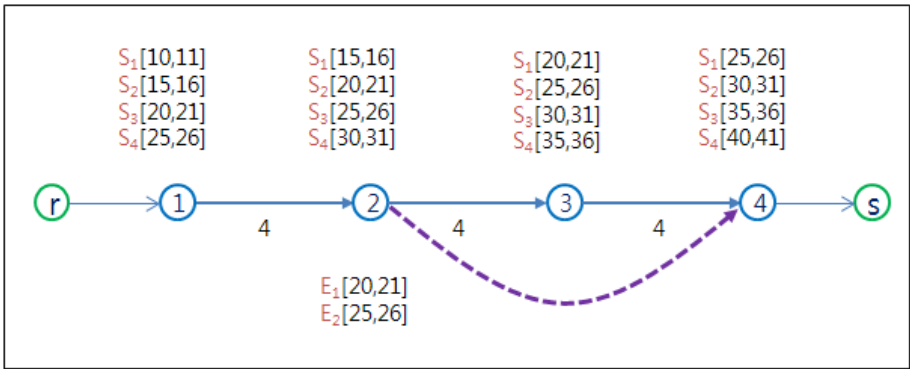
–스케줄링크의 연결 방식은 수단-링크라벨 개념을 적용하여 열차 차량들을 별개 수단으로 보고 각 역을 연결함(<그림 9> 참조).



〈그림 9〉 스케줄링크기반의 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 스케줄링크 네트워크의 방법을 사용하는데 정차역을 제외하고 그냥 지나치는 역은 스케줄의 도착시간과 출발시간을 동일하게 설정하여 입력함 (<그림 10> 참조).

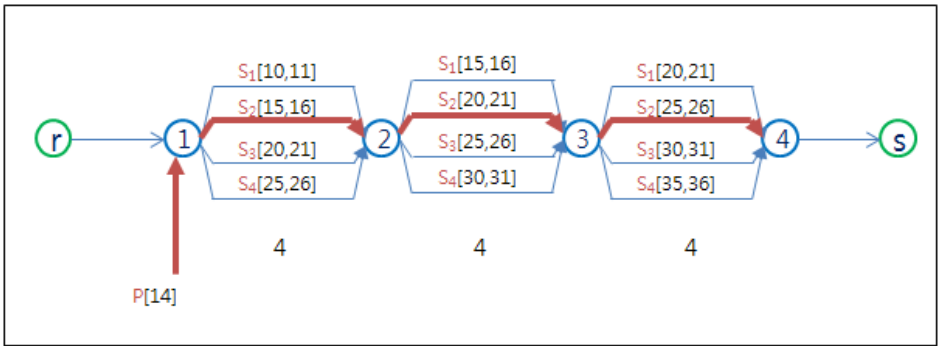


〈그림 10〉 급행 스케줄링크와 네트워크 표현

–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_2에 탑승하여 목적지인 4번 역까지 이동하게 됨.

–이를 경로탐색 모형으로 표현하려 하면 목적지까지의 이동시간과 1번 역의 대기시간을 모두 고려하여 최적경로를 선택하게 됨(<그림 11> 참조).

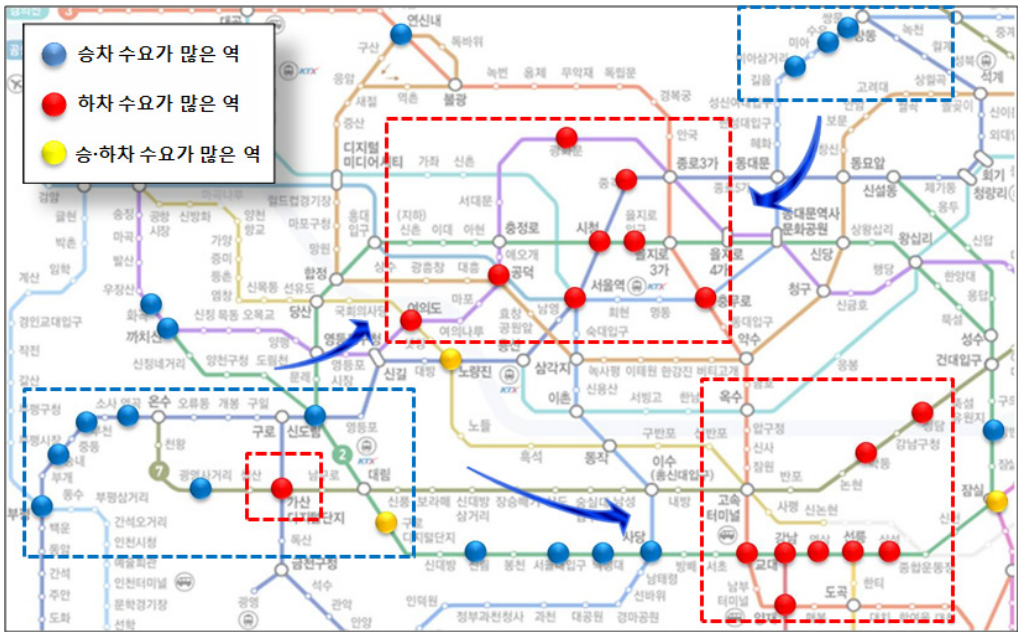


〈그림 11〉 승객도착과 최적경로 탐색

4. 혼잡도 추정사례

1) 첨두시 혼잡역의 구분

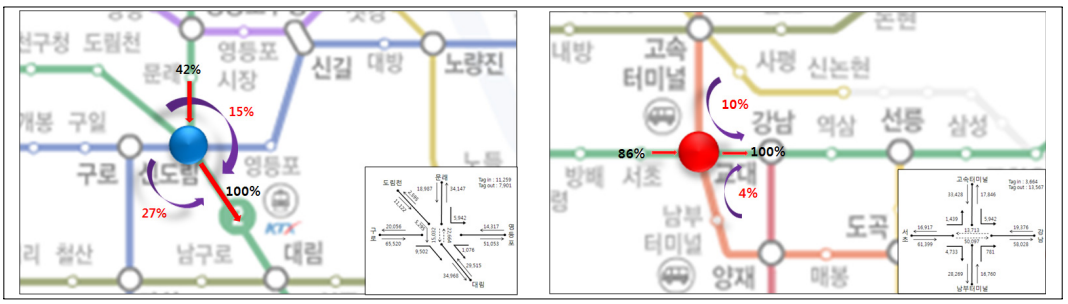
○아래의 <그림 12>는 수도권 지하철의 출근 첨두시 통행수요를 분석한 결과임. 주로 강남과 서울역 인근에 업무지구가 형성되어 있고, 인천에서 서울로 출근하는 인구와 신도림 및 강북 인근에 주거지구가 형성되어 있는 수도권의 특성상 출근 첨두시 통행수요의 이동패턴이 명확하게 드러남.



〈그림 12〉 첨두시 지하철 혼잡 패턴(상위 20위)

2) 첨두시 주 혼잡 환승역 분석

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



〈그림 13〉 첨두시 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