

소형자동궤도차량 시스템의 그래프 모델 기반 수송능력 추정

Traffic Capacity Estimate of Personal Rapid Transit System based on Digraph Model

원진명*
(Jin-Myung Won)

Abstract : This study proposes a new methodology to estimate the traffic capacity of a personal rapid transit (PRT) system. The proposed method comprises three steps. The first step models the guideway network (GN) of PRT as a digraph, where its node and link represent a station and a one-way guideway link between two stations, respectively. Given local vehicle control strategies, the second step formulates the local traffic capacities through the nodes and links of the GN model. The third step estimates the worst-case local traffic demands based on a shortest-path routing algorithm and an empty vehicle allocation algorithm. By comparing the traffic estimates to the local traffic capacities, we can determine the feasibility of the given GN in traffic capacity.

Keywords : intelligent transportation system, personal rapid transit, traffic capacity

I. 서론

소형자동궤도차량(Personal Rapid Transit : PRT) 시스템은 컴퓨터가 전용 선로네트워크 상의 다수의 소형 차량들을 운전하는 미래형 대중교통수단이다[1-4]. 초기의 PRT 관련 연구는 주로 차간거리 제어[5], 합류 제어[6], 역 제어[7], 선형유도모터를 이용한 구동장치 설계 등 시스템 구현에 중점을 두었으며 TAXI2000, PRT2000[2,3], ULTRA의 테스트 트랙 건설 및 런던 공항과 두바이 국제 금융센터에 건설되고 있는 상용 시스템의 출현으로 그 결실을 맺어왔다.

최근에는 가제어성과 관측 가능성을 가지는 네트워크 기반 교통 시스템인 PRT 본연의 장점을 살리기 위한 시스템 최적화에 관한 연구 결과들이 발표되고 있다. [8]은 제한된 예산으로 승객의 역간 이동 시간, 건설 비용 및 시스템 운영 비용을 최소화할 수 있는 선로네트워크 설계 방식을 제안하였다. [9]는 연결성을 만족하면서 건설 비용과 교통량을 최소화하는 선로네트워크를 설계하기 위한 다목적 유전알고리즘을 제안하였다. [10]은 운전 비용을 최소화하면서 빈 차량의 목적지를 결정해주는 몇 가지 빈 차 할당 알고리즘들을 소개하고 시뮬레이션을 통해 그 성능들을 비교하였다.

PRT 최적화에 관한 중요한 이슈는 수송능력이다. PRT는 차량당 승객 수가 적지만 컴퓨터에 의한 극소 차간 간격 제어가 가능함으로 인해, 타 대중교통수단에 맞먹는 수송능력을 가지는 것으로 알려져 있다. [11]은 다양한 역의 구조와 그 수송능력 사이의 관계를 시뮬레이션을 통해 조사하고 수송능력을 최대화 할 수 있는 역의 구조를 제안한 바 있다. 그러나 이 연구는 차량의 가속속 과정을 무시한 채 이동시간이 거리에 정비례한다는 비현실적인 가정을 사용하고 있다. [12]는 네트워크 레벨의 수송능력에 관한 연구 결과를 소개하고 있다. 이 연구는 차량의 시간당 운행회수와 선로네트워크 내

의 차량 수의 곱에 승객이 탑승한 차량 수의 비율을 다시 곱하여 시스템 수송능력을 산출하였다.

선로네트워크 모델에 대한 이론적 고려를 배제한 기존 연구 결과들과는 달리, 본 논문에서는 주어진 선로네트워크의 그래프 모델을 기반으로 그 수송능력을 추정하는 새로운 방법을 제안한다. 제안된 방법은 세 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 주어진 선로네트워크를 단 방향 링크를 갖는 그래프로 모델링 한다. 두 번째 단계에서는 역과 링크에서의 차량 제어 알고리즘을 바탕으로 국부 수송능력(local traffic capacity)을 이론적으로 산출한다. 세 번째 단계에서는 차량 경로 설정 및 빈 차 할당 알고리즘을 바탕으로 각 노드와 링크를 통과하게 될 피크 시간대의 교통량 수요를 예측한다. 이 교통량 수요를 노드와 링크의 국부 수송능력과 비교함으로써 PRT 시스템이 주어진 교통량 수요를 소화할 수 있는지 판단할 수 있다. 본 논문에서 제안된 방법은 수학적 모델에 바탕을 두고 있어 임의의 시스템에 대해서도 적용될 수 있다. 또한, 선로네트워크의 그래프 모델은 수송능력 예측뿐만 아니라 선로네트워크 설계, 적정 차량 수 결정 및 시스템 운전 비용 예측 문제들을 해결하는데도 응용될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II절은 PRT 시스템의 운영 시나리오를 소개하고, 선로네트워크를 그래프로 모델링하는 방법을 설명한다. III절은 역과 링크 상의 하위 제어 알고리즘을 바탕으로 해당 국부 수송능력을 산출한다. IV절은 II, III절의 내용을 바탕으로 임의의 선로네트워크가 주어진 교통량 수요를 소화할 수 있는지 판단하는 방법을 기술한다. V절은 본 논문을 마무리하고 결론을 도출한다.

II. 소형자동궤도차량 시스템

1. 운영 시나리오

PRT 선로네트워크는 역과 역 사이를 연결하는 선로링크의 집합으로 표현될 수 있다. 역은 본선(through line)과 측선(sidings)의 병렬 배치로 이루어진다. 본선은 차량이 속도 변화 없이 역 구간을 통과하는 부분이며, 측선은 차량이 정차하여 승객을 승하차시킨 후 다른 역을 향해 다시 출발하는 부분이

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 5. 3., 채택확정 : 2006. 12. 12.

원진명 : Univ. of Waterloo, Dept. of Electrical and Computer Engineering
(jinmyung@pami.uwaterloo.ca)

※ 이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구지원에 의하여 연구되었음.

다. 본 논문에서는 본선과 측선이 분기되는 지점을 역의 입구로, 본선과 측선이 합류되는 지점을 역의 출구로 정의한다. 선로네트워크는 한 역의 출구와 다른 역의 입구를 연결하는 선로링크들을 배치함으로써 완성된다. 선로네트워크는 차량을 저장, 관리, 보수하는 차고를 가지고 있다. 차고는 교통량 수요에 맞춰 운전중인 차량 수를 조절하는 버퍼 역할을 수행할 수 있다. 그림 1은 다섯 개의 역과 하나의 차고를 포함하는 선로네트워크의 예를 보여주어 주고 있다.

선로네트워크에서 측선을 제외한 나머지 부분을 주선로라 정의하자. PRT 차량 제어의 중요한 원칙은 주선로 상에서 차량이 일정한 속도 v_M 으로 운행된다는 것이다. 이 원칙은 비상상황으로 인해 차량이 급제동하는 경우와 합류점에서 차량간의 충돌을 회피하기 위해 차량의 속력을 조정해 줘야 하는 경우를 제외하고는 유효하다. 차량 제어는 주선로의 일정 부분을 관할하는 지역 제어기와 차량 내에 설치되는 차량 제어기로 구현된다. 지역 제어기는 차량 별로 길이 l_M 을 갖는 가상의 슬롯을 할당하고 상위 차량 제어를 수행한다. 차량 제어기는 슬롯의 궤적에 대한 정보를 얻은 후, 차량이 그 슬롯의 중심점을 추적하도록 하위 제어를 수행한다.

2. 시스템 모델링

본 논문에서는 선로네트워크를 단 방향 링크를 갖는 완전 방향성 그래프(complete digraph) $G=\{N, L\}$ 의 서브 그래프로 모델링 한다. 노드 집합 $N=\{1, \dots, n, \dots, n+m\}$ 은 역을 나타내는 n 개의 노드와 합류점 또는 분기점을 나타내는 m 개의 노드를 포함한다. 어떤 역의 출구에서 단선으로 이어진 분기점과 역의 입구에 단선으로 이어진 합류점은 역 노드에 포함될 수 있다. 차고는 수송능력과 관계없는 요소이므로 노드에 포함시키지 않는다. 링크 집합 $L=\{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ 은 노드 i 로부터 j 로의 단 방향 차량 경로를 제공하는 $(m+n)(m+n-1)$ 개의 선로링크를 포함한다. 따라서 노드들을 연결하는 임의의 선로네트워크는 이진 벡터 $x \in \{0, 1\}^{(m+n)(m+n-1)}$ 로 표현될 수 있다. 즉, x 의 첫 번째 성분은 링크 (1, 2), 두 번째 성분은 링크 (1, 3), $(m+n)$ 번째 성분은 링크 (2, 1)의 존재 여부를 나타낸다. 예를 들어, 그림 1의 선로네트워크는 그림 2와 같은 그래프로 모델링 되며 다음과 같은 이진 벡터로 표현된다.

$$x=[10000101001010001000]^T.$$

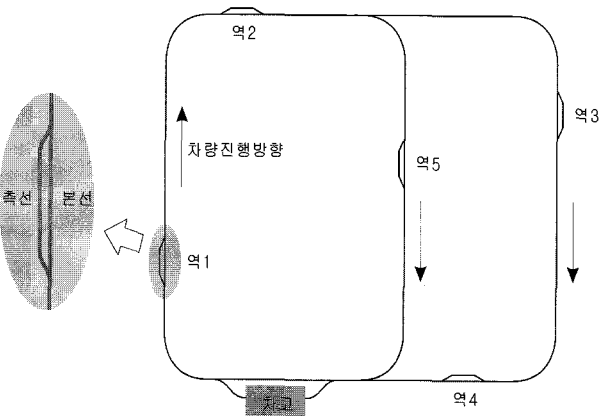


그림 1. 선로네트워크의 예.
Fig. 1. Example of guideway network.

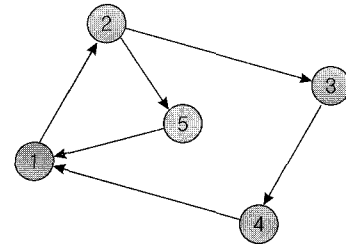


그림 2. 그림 1 선로네트워크의 그래프 모델.
Fig. 2. Graph model of guideway network in Fig. 1.

III. 국부 수송능력

PRT의 교통량 수요는 역간을 이동하고자 하는 단위 시간당 차량 수로 정의되며 출퇴근 시간대에 최대값을 가진다. $t_{i,j} \in R$ 을 역 i 로부터 j 로의 피크 시간대 시간당 교통량 수요라 하자. $t_{i,j}$ 의 단위는 초당 차량 수(vehicles per second - vps)이다.

1. 역 수송능력

역 수송능력은 역의 측선을 통과할 수 있는 시간당 최대 차량 수로 정의되며 그 단위는 vps이다. 역 측선은 감속구간, 입력큐, 플랫폼, 출력큐, 가속구간의 다섯 부분으로 나뉜다 [4,11]. 입력큐와 플랫폼, 출력큐는 각각 n_b, n_p, n_o 개의 차량 슬롯이 일렬로 배치된 구간이다. 측선 상의 차량 속도는 느리므로 측선의 슬롯 길이 l_s 는 l_M 보다 훨씬 짧다. 차간 간격이 짧을수록 슬롯이 짧아져 역의 건설비용이 절약되고 수송능력은 커지게 되나, 차량 충돌 없이 플랫폼 제어[13,14]를 수행하기 어려워진다. 그림 3은 입력큐와 플랫폼 상에 각각 6개와 3개씩 배치된 차량 슬롯의 예를 보여주고 있다.

측선에서의 차량 운전은 다음과 같은 시나리오에 따라 이뤄진다. 우선, 차량이 종착역의 입구에 접근하면, 입력큐에 차량이 진입할 수 있는지 역 제어기에 문의한다. 만약 입력큐에 빈 슬롯이 있으면 역 제어기는 차량에 진입 허가 메시지를 전달하고 그렇지 않으면 진입 거부 메시지를 전달한다. 진입 거부 메시지를 받은 차량은 본선을 따라 역을 지나칠 수밖에 없으며, 주선로 상의 최단거리 루프 경로를 거쳐 역으로의 재진입을 시도하게 된다[4,11]. 감속구간에 진입한 차량은 입력큐의 빈 슬롯에 정지할 준비를 한다. 만약 차량이 그 슬롯에 도착하기 전에 앞 차량들이 이동함에 따라 전방에 다른 빈 슬롯이 생기면 정지할 슬롯이 변경된다. 예를 들어, 그림 3의 차량 A는 슬롯 S2에 정지할 예정이었다. 그러나 A가 S2에 도착하기 전에 차량 플랫폼 <B-C-D-E>가 동시에 슬롯 S6-S9로 이동하게 되면, A의 도착 슬롯은 S5로 변경된다.

입력큐에 도착한 차량 가운데 후반부에 위치한 n_p 개의 차량은 플랫폼을 구성하여 플랫폼에 동시에 진입할 준비를 한다. 플랫폼의 첫 번째 차량이 출력큐로 움직이면 입력큐에

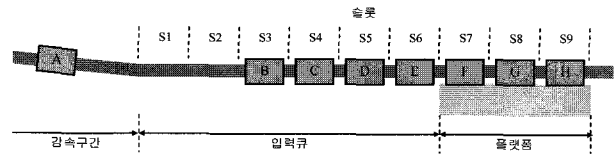


그림 3. 입력큐와 플랫폼 상의 차량 슬롯.
Fig. 3. Vehicle slots on input queue and platform.

구성된 플랫폼이 함께 진진한다. 예를 들어, 그림 3에서 차량 F가 출력큐로 진진할 때에는 <B-C-D-E-F>가 일정한 간격을 두고 동시에 움직여 <C-D-E>가 플랫폼을 채우게 된다. 플랫폼에 도착한 차량은 승객을 승하차시킨다. 승객의 승하차 시간이 차량 별로 다르기 때문에, 문을 닫고 출발 준비를 끝낸 차량은 앞 차량이 출력큐로 빠져나가기 위해 움직일 때 앞 차량과 함께 이동한다.

n_p 개의 플랫폼 슬롯을 갖는 역이 위 시나리오를 따르고, 충분한 길이를 갖는 입력큐가 때 플랫폼 운영 주기마다 n_p 개의 차량을 플랫폼에 공급해 준다고 가정하자. 역의 플랫폼 운영 주기를 나타내는 확률 변수를 $t(n_p)$ 라 하면 역 수송능력을 나타내는 확률 변수 $C_S(n_p)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$C_S(n_p) = \frac{n_p}{t(n_p)} \tag{1}$$

$t(n_p)$ 는 다음과 같이 세 가지 시간 변수의 합으로 구성된다.

$$t(n_p) = t_A(n_p) + t_D + t_E(n_p) \tag{2}$$

$t_A(n_p)$ 는 플랫폼이 입력큐에서 움직이기 시작하여 플랫폼에 완전히 정지하기까지 걸리는 시간이다. t_D 는 차량 문을 여닫는 시간이다. $t_E(n_p)$ 는 플랫폼에 속한 n_p 개의 차량들 가운데 승하차가 가장 느린 차량의 승하차 시간이다.

$t_A(n_p)$ 는 플랫폼의 길이가 길어지면 증가하는 값이다. [11]에서는 $t_A(n_p)$ 가 플랫폼 길이에 정비례한다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 하지만 이것은 차량 가속 과정을 고려하지 않은 비현실적인 가정이다. 본 논문에서는 차량의 이동을 위한 속력 변화 프로파일인 사다리꼴 형태라고 가정한다. 즉, 정지된 차량이 가속도 a_p 로 속력 v_p 에 도달한 후, 등속으로 일정 거리를 이동한 후, 다시 감속도 a_p 로 속력을 줄여 목표 슬롯에 정지한다. 플랫폼 이동거리 $n_p l_S$ 가 너무 짧거나 a_p 가 너무 작으면 차량이 v_p 에 도달하지 못할 수도 있다. 따라서 $t_A(n_p)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$t_A(n_p) = \begin{cases} \frac{n_p l_S}{v_p} + \frac{v_p}{a_p} & \text{if } n_p l_S \geq \frac{v_p^2}{a_p}, \\ 2\sqrt{\frac{n_p l_S}{a_p}} & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{3}$$

예를 들어, $l_S=3m$, $a_p=2.5m/s^2$, $v_p=2.5m/s$ 라 두면 (3)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$t_A(n_p) = 1.2 n_p + 1. \tag{4}$$

t_D 는 n_p 와 상관없는 값으로 본 논문에서는 t_D 를 6초로 둔다.

플랫폼 승하차 시간 $t_E(n_p)$ 의 확률분포함수(probability density function-pdf)를 구하기 위해서는, 차량 한 대의 승하차 시간에 해당하는 확률 변수 $t_E(1)$ 의 pdf인 $p_E(t;1)$ 이 주어져야 한다. $p_E(t;1)$ 를 위해서는 다음과 같이 두 개의 디자인 변수 m 과 σ 를 갖는 lognormal 함수가 주로 사용된다[4].

$$p_E(t;1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left(-\frac{(\ln t - m)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{5}$$

$t_E(1)$ 의 평균 $E[t_E(1)]$ 과 분산 $\text{var}(t_E(1))$ 이 주어지면 m 과 σ 의

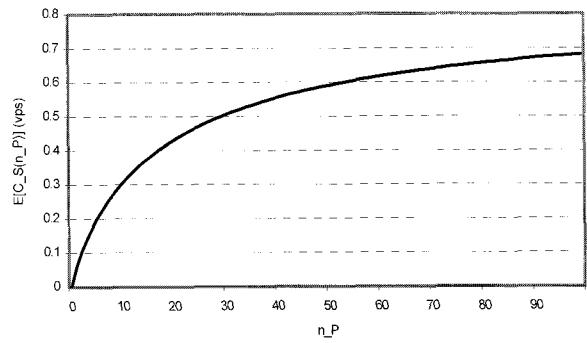


그림 4. n_p 와 $E[C_S(n_p)]$ 의 관계.

Fig. 4. Relationship between n_p and $E[C_S(n_p)]$.

값이 결정된다. 본 논문에서는 $E[t_E(1)]=8s$, $\text{var}(t_E(1))=10s^2$ 으로 가정하여 $m=2.007s$, $\sigma=0.337s$ 를 사용한다. n_p 대의 차량이 속한 플랫폼 승하차 시간의 pdf는 다음과 같이 구해진다.

$$p_E(t; n_p) = n_p p_E(t; 1) \left(\int_0^t p_E(\tau; 1) d\tau \right)^{n_p - 1} \tag{6}$$

$t(n_p)$ 와 $C_S(n_p)$ 의 pdf인 $p_T(t; n_p)$ 와 $p_C(c; n_p)$ 는 (1), (2)로부터 각각 다음과 같이 주어진다[15].

$$p_T(t; n_p) = p_E(t - t_A(n_p) - t_D; n_p) \tag{7}$$

$$p_C(c; n_p) = \frac{n_p}{c^2} p_T\left(\frac{n_p}{c}; n_p\right) \tag{8}$$

역의 수송능력은 반복되는 운영 주기 상의 평균값이므로 다음을 역의 수송능력으로 간주할 수 있다.

$$E[C_S(n_p)] = \int_0^\infty \frac{n_p}{c} p_T\left(\frac{n_p}{c}; n_p\right) dc \tag{9}$$

(3), (4), (5), (6), (7), (8)을 (9)에 대입하고 n_p 와 $E[C_S(n_p)]$ 의 관계를 그림 4의 그래프에 나타내었다. 역의 수송능력은 n_p 에 대해 증가하는 관계가 있으나 그 증가율을 n_p 가 커짐에 따라 둔화된다. 현실적으로 플랫폼에 30개 이상의 슬롯을 배치하기는 어려우므로, 큰 규모의 역이라 하더라도 대략 0.5vph이 내의 수송능력을 갖는다는 결론을 내릴 수 있다.

역 수송능력을 개선하기 위해서는 보다 많은 슬롯을 확보해야 한다. 하지만 역 축선의 길이와 플랫폼의 길이에 제약이 따르므로 배치할 수 있는 슬롯의 수에는 한계가 있다. l_S 의 값을 최소화하는 것도 일정한 길이를 갖는 플랫폼 상의 슬롯 수를 최대화할 수 있는 방법이다. 일단 l_S 와 n_p 가 결정되면 $t(n_p)$ 를 최소화 함으로써 수송능력을 개선할 수 있다. 예를 들어, 승객의 승차감을 해치지 않는 범위 내에서 a_p 와 v_p 를 최대화하고 효과적인 차량문 개폐 방식을 사용할 수 있다. 한 역에 둘 이상의 축선을 배치하는 것도 가능한 방법이다[11].

2. 주선로 수송능력

주선로 수송능력 C_M 은 주선로 상의 한 지점을 통과할 수 있는 시간당 최대 차량 수로 정의된다. 따라서 C_M 은 주선로 상의 차량 운행 속도 v_M 을 슬롯 길이 l_M 으로 나눔으로써 구해진다. l_M 을 결정하는 기준은 여러 가지가 있을 수 있는데, 그 가운데 가장 높은 수준의 안전성을 보장하는 것은 정지

장벽(brick wall) 기준이다[12]. 정지 장벽 기준 하에서는 전방 차량이 갑자기 정지하더라도 후방 차량이 제동을 통해 충돌을 회피할 수 있는 만큼의 슬롯 길이를 확보하게 된다. 차량의 제동 감속도를 a_M , 차량의 길이와 최소 차간 거리의 합을 l_V , 최대 통신 지연시간을 t_S 라 하면 l_M 은 $\frac{v_M^2}{2a_M} + v_M t_S + l_V$ 이

상으로 확보해야 한다.

정지 장벽 기준의 실효성에 대해서는 많은 논란이 있어왔다[4]. 선로가 장애물로 막히는 대형 사고가 아니라면 차량이 갑자기 정지할 수는 없으며, 이런 특수한 상황까지 고려함에 따라 수송능력이 크게 줄어든다. 따라서 적절한 안전마진 상수 $k \in (0,1)$ 를 차량 제동거리에 곱함으로써 다음 식과 같이 l_M 을 결정하는 것이 현실적인 대안이다[12].

$$k \left(\frac{v_M^2}{2a_M} + v_M t_S \right) + l_V. \tag{10}$$

(10)에 의한 C_M 식은 다음과 같이 주어진다.

$$C_M = \frac{v_M}{k(v_M^2/2a_M + v_M t_S) + l_V}. \tag{11}$$

(11)은 l_V , t_S 에 대해 단조감소 관계를 갖는 반면, a_M 에 대해서는 단조증가의 관계를 갖는다. C_M 은 $v_M = \sqrt{2a_M l_V / k}$ 일 때 최대이며 그보다 크거나 작은 v_M 에 대해서는 C_M 이 감소한다. 예를 들어, (11)에 $a_M=7m/s^2$, $t_S=0.5s$, $l_V=3m$, $k=0.5$ 를 대입하면 $v_M=9.17m/s$ 일 때, $C_M=1.11vps$ 로 주선로 수송능력이 최대화된다. 수송능력과 더불어 차량 이동 시간도 시스템의 중요한 성능척도이고 v_M 의 증가에 대한 C_M 의 감소율이 크지 않으므로, C_M 을 최대화하는 v_M 을 굳이 고집할 필요는 없다.

IV. 네트워크 수송능력

x 상에서 구현 가능한 $t_{i,j}$ 의 조합은 무수히 많으므로 x 의 수송능력을 하나의 값으로 표현할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 x 가 임의의 $t_{i,j}$ 조합을 소화할 수 있는지 보임으로써, x 의 수송능력을 간접적으로 정량화하고자 한다. 이를 위해 $t_{i,j}$ 가 어떤 경로를 따라 이동할 것인지, 빈 차량들의 목적지를 어떻게 결정할 것인지를 우선 결정해야 한다.

1. 차량 경로 설정

어떤 선로네트워크 상에서 한 역으로부터 다른 역으로 도달할 수 있는 경로는 하나 이상 존재하며, 그 가운데 최적의 경로를 따라 차량이 이동해야 한다. 여기서 최적의 경로란 최단거리의 경로를 의미한다. 주선로 상의 차량 속력은 일정하므로 최단거리 경로가 최단시간 경로이자 차량 운전 비용을 최소화할 수 있는 경로이다.

x 상의 노드간 최단경로를 찾기 위해서는 역 노드의 길이를 노드 내의 주선로 길이로, 링크의 길이를 선로 링크의 길이로 두고, Floyd의 전 노드간 최단경로 탐색 알고리즘[16]을 적용하면 된다. 역간 최단경로는 $n(n-1)$ 개의 이진 경로 벡터 $r_{i,j}(x) \in \{0, 1\}^{m \times m}$ 으로 표현할 수 있다. 만약 역 i 에서 j 로의 최단경로가 k 번째 노드를 통과하면 $r_{i,j}(x)$ 의 k 번째 성분인 $r_{i,j,k}(x)$ 값을 1로 두고 그렇지 않으면 0으로 둔다. 또한, x 상에서

역 i 로부터 j 로의 차량당 운전 비용을 $c_{i,j}(x)$ 로 정의하자.

2. 빈 차 할당

t_i 를 역 i 의 피크 시간대 진입 교통량 수요라 하고 o_i 를 피크 시간대 진출 교통량 수요라 하자. t_i 와 o_i 는 $t_{i,j}$ 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$t_i := \sum_{j=1}^n t_{j,i}, \quad o_i := \sum_{j=1}^n t_{i,j}.$$

t_i 와 o_i 는 일반적으로 다르므로 빈 차 교통량이 그 차이를 보상한다. 즉, $t_i > o_i$ 이면 역 i 는 시간당 $t_i - o_i$ 의 빈 차량을 공급하게 된다. 반대로 $t_i < o_i$ 이면 i 는 시간당 $o_i - t_i$ 의 빈 차량을 소비하게 된다. 어떤 선로네트워크 x 상에 s 개의 빈 차 공급역과 u 개의 빈 차 소비역이 존재한다고 하고 각각 $S=\{i_1, \dots, i_s\}$, $U=\{i_1, \dots, i_u\}$ 로 나타내자. 역 i 에서 j 로의 시간당 빈 차 교통량을 $e_{i,j}(x)$ 라 정의하자. 그러면 $e_{i,j}(x)$ 는 다음 두 조건을 만족한다.

$$\sum_{j \in U} e_{i,j}(x) = t_i - o_i, \quad \sum_{j \in S} e_{i,j}(x) = o_i - t_i.$$

빈 차 할당 문제는 위의 두 식을 만족하면서 다음 식과 같이 표현되는 빈 차 운전 비용을 최소화하는 $e_{i,j}(x)$ 를 결정하는 문제이다[10].

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in U} c_{i,j}(x) \cdot e_{i,j}(x).$$

빈 차 할당 문제는 선형계획법 문제의 한 종류로 단체법(simplex method)등을 통해 해결할 수 있다[17,18].

3. 네트워크 수송능력

어떤 선로네트워크 x 상의 $t_{i,j}$ 가 주어지면 차량 경로 설정과 빈 차 할당을 통해 x 의 각 노드를 통과하게 될 피크 시간대 교통량 수요를 예측할 수 있다. 즉, 역 i 의 축선을 통과하는 교통량은

$$\sum_{j=1}^n (t_{i,j} + e_{i,j}(x)) \tag{12}$$

로, 본선을 통과하는 교통량은

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n r_{j,k,i}(t_{j,k} + e_{j,k}(x)) \tag{13}$$

로 주어진다. 따라서 역 i 출구의 피크 시간대 교통량은 (12)와 (13)의 합이다. (13)은 합류점 또는 분기점 노드를 통과하는 피크 시간대 시간당 교통량을 표현하는데도 사용될 수 있다.

선로네트워크 그래프 모델을 통해 각 노드와 링크 상의 피크 시간대 교통량 수요와 수송능력을 비교함으로써 네트워크 수송능력을 산출할 수 있다. 먼저, 역 i 가 피크 시간대의 교통량 수요를 소화할 수 있는지 판단하기 위해 (12)와 역 수송능력을 비교한다. x 가 주선로 상의 교통량 수요를 소화할 수 있는지 판단하기 위해서는 모든 선로 링크와 노드를 통과하게 될 피크 시간대 교통량 수요를 예측하여 주선로 수송능력과 비교해야 한다. 선로네트워크의 그래프 모델에 의

하면 선로 링크를 통과하게 될 교통량은 항상 그 링크가 연결하는 노드를 통과할 교통량 수요보다 작거나 같다. 따라서 (12)와 (13)을 사용하여 피크 시간대에 가장 혼잡할 것으로 예상되는 노드 교통량을 추정하고 이를 주선로 수송능력을 비교함으로써 $t_{i,j}$ 가 x 상에서 실현 가능한 교통량 수요인지 최종적으로 판단할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 주어진 선로네트워크로부터 단 방향 링크를 갖는 네트워크 그래프 모델을 생성한 후, 각 노드와 링크 상의 차량 제어 알고리즘으로부터 국부 수송능력을 산출하는 방식을 제안하였다. 최적화된 차량 경로 설정 및 빈 차량당 알고리즘은 역간 교통량 수요로부터 각 노드와 링크를 통과하게 될 피크 시간대의 교통량 수요를 예측할 수 있게 한다. 각 노드와 링크 상의 교통량 수요를 국부 수송능력과 비교함으로써, PRT 시스템이 주어진 피크 시간대의 교통량 수요를 소화할 수 있는지 판단할 수 있다.

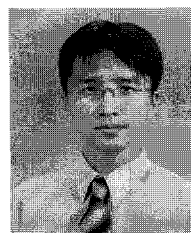
제안된 방법은 시뮬레이션에 의존하는 이전 방법들과는 달리, 선로네트워크의 그래프 모델을 사용한다. 그래프 모델은 어떠한 선로네트워크에 대해서도 생성되며, 시스템 최적화를 위한 수학적 접근이 가능하게 한다. 이는 시스템 수송능력 예측뿐만 아니라 선로네트워크 설계, 적정 차량 수 결정 및 시스템 운전 비용 예측 문제 등에 응용될 수 있다. 예를 들어, 주어진 교통량 수요와 후보 네트워크 상의 역간 최단 경로 및 빈 차 교통량을 통해 각 역 사이를 운행해야 하는 차량 수를 추정할 수 있고, 이를 통해 그 후보 네트워크 상에 필요한 전체 차량 수를 예측할 수 있다. 여기에 역간 차량당 운전 비용까지 고려하면 차량 제작 비용과 전체 운전 비용을 예측할 수 있다.

제안된 방법은 시스템 내에 존재하는 불확실성을 완전히 반영할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 이런 불확실성은 차량의 역 진입거부, 실제 교통량의 불연속성과 비균일성 등을 포함한다. 특히 진입거부는 PRT시스템의 중대한 결점이므로, 교통량 수요를 정확히 예측하여 역을 설계함으로써 진입거부 확률을 최소화할 필요가 있다. 또한, 본 논문에서는 역간 교통량 수요가 연속적이고 시간의 흐름에 대해 일정하다는 가정을 사용하고 있으나, 실제 차량 교통량은 그렇지 않다. 따라서 피크 시간대의 교통량 평균뿐만 아니라 그 편차까지 고려하여 시스템 수송능력 예측에 반영할 필요가 있다. 또한, 시스템 설계의 최종 단계에서는 예측된 선로네트워크의 수송능력 및 비용을 시뮬레이션을 통해 검증할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] J. E. Anderson, "Fundamentals of personal rapid transit," *Proc. of the 4th International Conference on Automated People Movers*, pp. 516-524, 1993.
- [2] G. Anspach, "PRT 2000 operational characteristics and modeling," *Proc. of the 6th International Conference on Automated People Movers*, pp. 497-507, 1997.
- [3] W. J. Clougher, A. J. Fergione, and R. Tauber, "Personal rapid transit PRT 2000 system characteristics," *Proc. of the 6th International Conference on Automated People Movers*, pp. 488-496, 1997.

- [4] J. H. Irving, *Fundamentals of Personal Rapid Transit*, Toronto: Lexington Books, 1978.
- [5] S. E. Shladover, "Longitudinal control of automated guideway transit vehicles within platoons," *Transactions of the ASME*, vol. 100, pp. 302-310, Dec. 1978.
- [6] S. E. Shladover, "Operation of merge junctions in a dynamically entrained automated guideway transit system," *Transpn Res.*, vol. 14A, pp. 85-112, 1980.
- [7] J. L. Dais and H. L. York, "Platoon-operated stations for quasi-synchronous personal rapid transit networks," *Transpn Res.*, vol. 8, pp. 63-70, 1974.
- [8] J. Ma and J. B. Schneider, "Designing personal rapid transit networks," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 25, no. 3, pp. 247-268, 1991.
- [9] J.-M. Won, F. Karray, K.-M. Lee, and J. S. Lee, "Guideway network design of personal rapid transit system: a multiobjective genetic algorithm approach," *Proc. 2006 IEEE Cong. Evol. Comput.*, Vancouver BC, pp. 7979-7985, Jul. 2006.
- [10] I. Andréasson, "Quasi-optimum redistribution of empty PRT vehicles," *Proc. 6th International Conference on Automated People Movers*, 1997, pp. 541-550.
- [11] R. F. Daly, R. J. Komerska, and G. Anspach, "Station capacity: an issue in PRT system planning," *Proc. of the 6th International Conference on Automated People Movers*, vol. 6, pp. 519-528, 1997.
- [12] S. J. Gluck and G. Anspach, "PRT system capacity," *Proc. of the 6th International Conference on Automated People Movers*, pp. 508-518, 1997.
- [13] G. D. Lee, S. W. Kim, Y. U. Yim, J. H. Jung, S. Y. Oh, and B. S. Kim, "Longitudinal and lateral control system development for a platoon of vehicles," *Proc. of the 1999 IEEE/IEE/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 605-610, 10, 1999.
- [14] 김진변, 최재원, 김영호, "다중 Lyapunov 기반 하이브리드 시스템의 안정화 제어기 설계 및 군집 차량의 종방향 거리 제어시스템에의 응용," 제어·자동화·시스템공학 논문지 제 7권, 제 6호, pp. 477-486, 6, 2001.
- [15] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd ed.*, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [16] R. W. Floyd, "Algorithm 97: shortest path," *Communications of ACM*, vol. 5, no. 6, pp. 345, 1962.
- [17] G. A. Vignaux and Z. Michalewicz, "A genetic algorithm for the linear transportation problem," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 21, no. 2, pp. 445-452, 1991.
- [18] J. P. Ignizio and T. M. Cavalier, *Linear Programming*, Prentice Hall, 1994.



원진명

1972년 11월 13일생. 1995년 포항공과대학교 전자전기공학부(공학사). 1997년 포항공과대학교 전자전기공학부(공학석사). 2002년 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부(공학박사). 2005년~현재 캐나다 워털루대학 방문연구원. 관심분야는 소형자동차량 시스템, 인공지능, 진화연산, 퍼지로지제어.