

■ 論 文 ■

최적 정류장 간격의 해석적 연구

Analytical Determination of Optimal Transit Stop Spacing

박 준 식

(서울대학교 박사수료)

고 승 영

(서울대학교 교수)

이 청 원

(서울시립대학교 교수)

김 점 산

(경기개발연구원 책임연구원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구배경 및 목적
 - 2. 연구범위 및 방법
 - II. 기존연구검토
 - 1. 해석적 접근법
 - 2. 입지 선정문제
 - III. 최적 정류장 간격 및 위치
 - 1. 비용함수
 - 2. 최적 정류장 간격 산정
 - 3. 최적 정류장 위치 결정
 - IV. 결과해석 및 논의사항
 - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 대중교통, 정류장 간격, 정류장 위치, 수요분포, 확률밀도함수
Transit, Stop spacing, Stop location, Passenger distribution, Probability density function

요 약

대중교통 시스템의 운행계획 수립과정에서 정류장의 간격과 위치설정은 매우 중요한 문제이다. 본 연구에서는 해석적인 방법을 통해 정류장의 간격과 위치를 결정하는 방법론을 제시하였다. 정류장의 간격은 접근통행속도, 정류장 정차로 인한 손실시간, 승객의 통행거리가 증가함에 따라 길어지고, 통행수요와 배차간격이 늘어남에 따라 짧아진다. 본 연구에서는 수요의 분포가 균일하지 않을 경우 이용자비용과 운영자비용을 합한 총 비용을 최소화시키는 최적 정류장 간격을 도출하는 방법론을 제시하였다. 본 연구의 결과를 보다 일반적으로 확장하기 위해서는 재차 승객의 통행비용을 고려해야 하는데 이에 대해 개념적 예시를 통해 결과의 변화를 논의하였다. 이때의 정류장 위치변화를 살펴본 결과 재차 승객이 많은 구간의 정류장 간격이 다소 넓어지고, 재차 승객이 적은 구간의 정류장 간격이 다소 좁아지는 것을 확인할 수 있었고, 재차 승객이 증가하는 구간보다 재차 승객이 감소하는 구간에 정류장이 보다 많이 배치되는 것을 확인하였다. 본 연구는 동적 프로그래밍을 통해 정류장 위치를 결정하는 복잡한 방법 대신 수요분포의 면적을 균등하게 분할하여 각 정류장의 위치를 결정하는 간단한 방법론을 제시하여 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 일반적으로 해석할 경우 모든 간격 설정 문제에 적용될 수 있다. 도로의 간격, 노선의 간격 등의 모든 시설물의 간격을 결정하는 문제에서 적용될 수 있으며, 간격변수를 공간에서 시간으로 변경하게 되면 배차간격을 결정하는 문제에도 바로 적용될 수 있는 확장성을 갖는다.

Determining stop spacing is a very important process in transit system planning. This study is involved in an analytical approach to decide the transit stop spacing. Transit stop spacing should be longer as 1) user access speed, 2) user travel time, and 3) dwell time increase, and shorter as 1) passengers (boardings and alightings) and 2) headway increase. In this study, a methodology is proposed to determine transit stop spacing to minimize total cost (user cost plus operator cost) with irregular passenger distribution (boardings and alightings). Without considering in-vehicle passengers, the transit stop spacing should be shorter in the concentrated sections of the passenger distribution than in others to minimize total cost. Through the conceptual analysis, it is verified that the transit stop spacing could be longer as the in-vehicle passengers increase in certain sections. This study proposes a simple practical method to determine transit stop spacing and locations instead of a dynamic programming method which generally includes a complex and difficult calculation. If the space axis is changed to a time axis, the methodology of this study could be expanded to analyze a solution for the transit service (or headway) schedule problem.

본 연구의 오류를 지적하여 바로잡을 수 있도록 도와주시고 좋은 의견 주신 심사위원께 감사드립니다. 본 연구는 서울대학교 BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단)과 공학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

대중교통 시스템의 시설은 크게 차량과 정류장으로 구분되며 대중교통 시스템의 운행계획 수립과정에서 차량의 용량과 정류장의 간격은 주요 결정변수에 해당한다. 대중교통 시스템의 운행계획 수립과정은 크게 노선 결정, 배차계획표 작성, 차량배정, 운전자배정의 4단계로 구성된다.(Ceder, 2002)

정류장의 간격을 결정하는 문제는 평균적인 최적 간격을 산출하는 해석적 접근과 최적 정류장 집합을 선정하는 입지 선정문제로 구분된다. 해석적 접근은 평균적인 정류장의 간격을 비교적 간단한 계산을 통해 산출할 수 있는 장점이 있는 반면 개별 정류장의 정확한 위치를 구하는데는 한계가 있어 기존의 연구에서는 평균 간격을 균등하게 분할하는 것으로 개별 정류장의 위치를 제시하였다. 이에 반해 입지 선정문제는 평균적인 정류장의 간격을 산출하는 대신 노선 상의 가능한 정류장 후보지점을 선정한 후 각 후보지점을 조합한 대안별 비용을 비교하여 최적 정류장 지점들의 조합으로 구성된 최적 대안을 제시하는 방법을 적용한다. 이 방법은 최적의 정류장 지점을 정확하게 결정해주는 하지만 많은 계산이 요구되며 정류장 후보지점의 개수가 증가함에 따라 그 계산량은 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 후보지점의 수가 많을 경우 결과를 구하는데 상당한 어려움을 겪는다.

일반적으로 통행수요가 많은 도심은 정류장 간격이 짧고 통행수요가 적은 외곽지역은 정류장 간격이 길게 배치되어 있다. 이는 이용자의 접근비용을 최소화시키기 위한데 통행수요는 지점마다 다르기 때문에 균등 간격으로 정류장을 배치하는 것은 이용자의 접근비용을 최소화시키지 못한다. 본 연구는 대중교통 시스템에서 정류장의 간격과 위치를 결정하는데 있어서 해석적 접근법을 통해 보다 효율적인 해법을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 해석적 접근을 통해 대중교통의 정류장 간격과 위치를 결정하는 방법론을 제시하는데 목적이 있다. 본 연구에서 적용하는 방법론은 최적 정류장 간격을 결정하고 이를 통해 결정된 정류장 개수와 통행수요의

분포를 기반으로 각 정류장의 위치를 결정하는 단계적 접근법을 사용한다. 정류장의 위치 결정은 다른 간격 결정 문제와 다르게 차내 승객과 차외 승객의 효율을 종합적으로 고려해야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 차외 승객의 접근비용 감소에 초점을 맞추고 있으며 차내 승객의 통행비용에 따른 변화는 모형을 통해 제시하지 않고 개념적 사례를 통해 제시한다. 본 연구에서는 우선 정류장의 간격과 위치를 결정하는 문제에 대한 선행연구를 검토하고 정류장 간격 결정문제의 비용함수를 모형화하여 이를 통해 최적 정류장 간격을 산정한 후, 통행수요의 분포를 활용하여 각 정류장의 최적 위치배정 방법을 제시한다. 그리고 본 연구의 의의 및 활용방안을 제시하도록 한다.

II. 기존연구 검토

1. 해석적 접근법

대중교통 시스템을 구성하는 비용요소 중 정류장 간격에 관계된 비용은 승객의 접근시간, 통행시간과 운영자의 운행비용이다. 승객의 접근시간은 정류장 간격에 비례하고 승객의 통행시간과 운영자의 운행비용은 정류장 간격에 반비례하기 때문에 이들 비용의 상호 교환관계에 의해 총 비용을 최소화시키는 최적 정류장 간격이 산출될 수 있다.

Byrne(1976), Chang과 Schonfeld(1991), Hurdle(1973), 그리고 Wirashinghe(1980)은 장거리 지역 간 통행을 서비스하는 간선노선을 연결하는 지선노선들의 노선간격과 배차간격에 대한 모형을 구축하여 최적 노선간격과 배차간격을 산출하였다.

Wirashinghe, Hurdle 그리고 Newell(1977)은 방사형 도시구조에서 도심과 외곽을 연결하는 철도 노선들의 서비스권역을 설정하고 각 철도 노선들을 연계하는 버스 노선의 최적 간격, 정류장 간격 및 배차간격을 산출하는 모형을 구축하였다.

Kikuchi(1985)와 Kikuchi와 Vuchic(1982)은 대중교통 운행방식을 정류장 정차방식에 따라 All-stop, On-call stopping, 그리고 Demand stopping의 세 가지로 구분하고 수요, 배차간격 및 차량용량에 따른 비용변화를 분석하여 총 비용을 최소화시키는 정류장 간격을 제시하였다.

Vuchic과 Newell(1968)은 도심의 한 지점으로 통행하는 장거리 고속 대중교통 시스템의 정류장 간격을 산정하는 모형을 구축하고 동적 프로그래밍 방법을 적용하여 해를 산출하였다. 이 연구에서 정류장 간격은 차내에 탑승하고 있는 승객과 정류장에서 차량을 기다리는 승객의 비율에 의해 결정되는 것으로 제시하였는데, 모든 승객이 도심의 한 지점으로 통행(Many-to-One)하기 때문에 도심에 근접할수록 차내 승객의 비율이 정류장에서 대기하고 있는 승객보다 많기 때문에 정류장 간격이 길어지는 결과를 도출하였다.

정류장 간격 산정 문제에 대한 기존의 해석적 접근법은 단순히 최적의 정류장 간격만을 제시하여 간격을 균등하게 분할하여 각 정류장의 위치를 결정하거나, 복잡한 모형식을 구축하고 이를 동적 프로그래밍을 통해 풀이하여 각 정류장의 위치를 제시하였다. 단순히 최적 정류장 간격만을 제시하는 것은 이론적으로 각 변수들의 관계성을 해석하는데에는 중요한 역할을 하지만 실제 현장에서 적용하기에는 추가되어야 할 작업이 많이 요구되는 한계가 있다. 또한 모형식을 다소 복잡하게 구성하여 동적 프로그래밍을 통해 풀이할 경우에는 현장에서 직접 적용 가능한 해를 제시해주는 것이지만 모형에 대한 이해가 부족하거나 컴퓨터의 활용 및 동적 프로그래밍에 대한 지식과 기술이 뒷받침되지 못할 경우에는 실무자들이 쉽게 접근하기 어려운 한계가 따른다.

2. 입지 선정문제

입지 선정문제는 일정 구간 또는 경로 상에 p개의 시설 입지를 결정하는 것으로 일반적으로 p-median problem¹⁾으로 잘 알려져 있다. 이 문제는 주로 정수 계획 모형으로 구축되고 이는 NP-complete이기 때문에 휴리스틱 해법을 적용하여 풀이한다.(김동규, 2006)

박경철(2006)은 대중교통 네트워크 설계 모형을 개발하여 유전알고리즘을 통해 풀이하였다.²⁾

Ghoneim과 Wirashinghe(1986)는 철도의 급행 운행방식³⁾ 중 존별 운영을 위한 존 설정 및 배차간격 설정을 위한 모형을 구축하고 이를 dynamic programming 기법을 적용하여 해를 도출하였다.

입지 선정문제는 현실적인 여건을 보다 충실하게 반영

할 수 있는 장점이 있지만 변수들의 관계에 대한 이론적 해석이 어렵고 계산이 복잡한 단점을 갖는다. 또한 대안이 되는 후보 정류장 수가 증가할수록 계산량이 기하급수적으로 증가하여 대규모 노선망에 적용하기 위해서는 현실적으로 적용 가능한 휴리스틱 해법이 요구되는 한계를 갖는다.

III. 최적 정류장 간격 및 위치

1. 비용함수

대중교통 시스템의 비용은 크게 이용자 비용과 운영자 비용으로 구분되며, 이용자 비용은 접근비용, 대기비용 및 차내 통행비용으로 구성된다. 각 비용에 대한 수학적 표현은 각 연구마다 분석의 목적에 따라 다소 차이가 있기는 하지만 근본적인 모형의 틀은 거의 정형화되어 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 기존의 연구들에서 사용되었던 모형의 기본 틀을 유지하면서 최적 정류장 간격 산정이라는 분석 목적을 충족시킬 수 있도록 비용함수를 구축하였다.

1) 접근비용

접근비용은 정류장 간격에 비례하는 비용으로 정류장 간격이 짧아질수록 승객의 평균적인 접근비용은 감소한다. 그러나 정류장 간격이 짧아지게 되면 차량이 정류장에 정차함에 따른 손실비용이 증가하게 되어 1회 운행시간이 증가하고 이에 따라 운행비용이 증가하고 차내 승객의 통행비용이 증가하게 된다. 즉, 정류장 간격 결정 문제는 차외 이용자의 접근비용과 차내 승객의 통행비용, 운영자의 운행비용과의 상호 교환관계에 의해 최적치가 결정되는 구조를 갖는다.

승객의 수요분포가 지점에 따라 균일하다고 가정하면 승객의 정류장 접근거리는 평균적으로 정류장 간격의 1/4에 해당한다. 따라서 승객 1인당 정류장 접근비용은 평균 접근거리를 접근 통행속도로 나누고 여기에 접근시간에 대한 비용환산계수를 곱하여 계산된다. 승차와 하차를 모두 고려한 총 접근비용은 식(1)과 같이 모형화된다.

$$C_a = 2 \frac{qLD\gamma_a S}{4v_a} \quad (1)$$

1) p-median problem은 공간 축을 시간 축으로 변경하게 되면 시간 간격 결정문제가 되기 때문에 배차계획표 작성에도 활용된다.

2) 대중교통 노선 설계에 관한 기타 참고자료는 박경철(2006)을 참고하기 바란다.

3) 철도의 급행 운행방식은 격역정차(skip-stop), 존별 운영(zonal), 급행/완행(express/local)의 세가지로 구분된다. (Vuchic, 2005)

여기서, C_a : 총 접근비용(원)
 q : 단위시간-거리당 통행수요(인/h-km)
 L : 노선연장(km)
 D : 분석단위시간(h)
 γ_a : 접근시간에 대한 비용환산계수(원/h)
 S : 정류장간 거리(km)
 v_a : 접근 통행속도(km/h)

2) 대기비용

배차 가능 차량수가 고정되어 있을 경우 노선의 1회 운행시간 변화에 따라 1일 배차회수가 변화된다. 이 경우 정류장 간격의 변화에 따라 노선의 1회 운행시간이 변화하면 1일 배차회수가 변경되어 이용자의 대기비용에 영향을 미치게 된다. 그러나 현실적으로는 정류장 간격 변화에 따른 노선의 1회 운행시간 변화는 매우 미미하기 때문에 1일 배차회수를 정류장 간격 변화에 대해 비탄력적인 것으로 가정하는데 무리가 없다. 이 경우 이용자의 대기비용은 정류장 간격에 무관하고, 배차간격에 의한 함수로 구성할 수 있다. 즉, 배차간격이 짧아질수록 승객의 평균적인 대기비용은 감소한다.

$$C_w = qLD\gamma_w h k \tag{2}$$

여기서, C_w : 총 대기비용(원)
 q : 단위시간-거리당 통행수요(인/h-km)
 L : 노선연장(km)
 D : 분석단위시간(h)
 γ_w : 대기시간에 대한 비용환산계수(원/h)
 h : 평균 배차간격(h)
 k : 대기시간 계수(승객의 도착분포가 균일할 경우 0.5)

3) 차내 통행비용

이용자의 차내 통행비용은 승객의 평균 통행거리에 비례하고 정류장 간격에 반비례하는 구조를 갖는다. 이는 정류장 간격이 짧아 차량이 정류장에 자주 정차할수록 차내에 있는 승객의 통행시간이 길어지기 때문이다.

승객의 차내 통행시간은 승객이 차량을 타고 이동하는 거리에 비례하는데 이는 노선의 1회 왕복 통행시간에 전체 노선연장에 대한 평균 통행거리의 비율을 곱하여 계산되고, 여기에 통행시간에 대한 비용환산계수와 통행

수요를 곱하면 총 통행비용을 계산할 수 있다.

$$C_t = qLD\gamma_t \frac{l}{L} T_R = qLD\gamma_t \frac{l}{L} \left(\frac{L}{V} + \frac{L}{S} t_l \right) \tag{3}$$

여기서, C_t : 총 통행비용(원)
 q : 단위시간-거리당 통행수요(인/h-km)
 L : 노선연장(km)
 D : 분석단위시간(h)
 γ_t : 통행시간에 대한 비용환산계수(원/h)
 T_R : 1회 운행시간(h)
 l : 승객의 평균 통행거리(km)

4) 운행비용

운행비용은 분석의 목적에 따라 다르게 표현될 수 있는데 일반적으로 운행회수에 비례하는 것으로 나타낼 수 있다. 운행회수는 분석단위시간을 평균 배차간격으로 나누어 계산되며 여기에 운행비용계수를 곱하면 총 운행비용이 계산된다.

$$C_o = \frac{\gamma_o D T_R}{h} = \frac{\gamma_o D}{h} \left(\frac{L}{V} + \frac{L}{S} t_l \right) \tag{4}$$

여기서, C_o : 총 운행비용(원)
 γ_o : 단위 시간당 운행비용(원/시)
 D : 분석단위시간(h)
 L : 노선연장(km)
 h : 평균 배차간격(h)

5) 총 비용

대중교통 시스템의 총 비용은 이용자비용과 운영자비용을 합한 비용으로 식(5)와 같다.

$$C_T = \{C_a + C_w + C_t\} + C_o \tag{5}$$

$$= 2 \frac{qLD\gamma_a S}{4v_a} + qLD\gamma_w h k + qLD\gamma_t \frac{l}{L} \left(\frac{L}{V} + \frac{L}{S} t_l \right) + \frac{\gamma_o D}{h} \left(\frac{L}{V} + \frac{L}{S} t_l \right)$$

총비용 C_T 는 정류장 간격 S 에 대해서 오목(convex)

한 함수이고 정류장 간격 S 에 대한 이차 미분값이 양이므로 모든 S 에 대해 완전 오목(strictly convex)이므로 전역 최소값을 갖는다. 따라서 총 비용을 최소화시키는 최적 정류장 간격 S^* 가 존재한다.

2. 최적 정류장 간격 산정

이용자 비용과 운영자 비용을 합한 총 비용 C_T 를 정류장 간격 S 에 대해서 미분하면 식(6)과 같다.

$$\frac{\partial C_T}{\partial S} = \frac{qLD\gamma_a}{2v_a} - \frac{qLD\gamma_t t_i}{S^2} - \frac{\gamma_o D L t_i}{h S^2} \quad (6)$$

총 비용을 S 에 대해서 두 번 미분한 값이 모든 S 에 대해서 양수이기 때문에 식(6)을 0으로 만드는 S 가 모든 S 에 대해서 목적함수인 총 비용을 최소로 만드는 최적값이 된다.

$$S^* = \sqrt{\frac{2v_a t_i (\gamma_t l + \gamma_o / h)}{\gamma_a}} \quad (7)$$

최적 정류장 간격 S^* 는 접근통행속도, 정류장 정차로 인한 손실시간, 승객의 통행거리, 그리고 단위 운행비용에 비례하고, 통행수요와 배차간격에 반비례하는 관계를 갖는다.

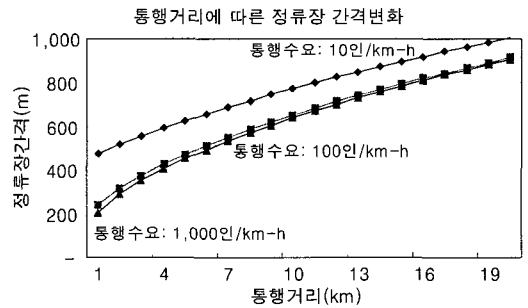
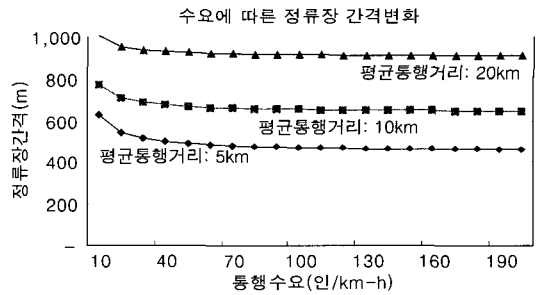
<그림 1>에서 통행수요에 따른 최적 정류장간격의 변화를 살펴보면 통행수요가 증가함에 따라 최적 정류장간격이 짧아지는 형태를 나타내는데 통행수요가 일정정도 이상이 되면 최적 정류장간격의 감소폭이 매우 작아져 일정한 값에 수렴해가는 형태를 보인다.

승객들의 평균 통행거리에 따른 최적 정류장 간격 변화를 살펴보면 통행거리가 증가함에 따라 최적 정류장 간격이 증가하는데 그 증가량이 다소 감소하는 형태를 나타낸다.

평균적인 통행거리가 긴 지역 간 노선의 경우 정류장 간격을 길게하고 단거리 통행이 많은 작은 지역 내에서 운행되는 노선의 경우 정류장 간격을 짧게 하는 것이 바람직함을 확인할 수 있다.

3. 최적 정류장 위치 결정

이용자의 접근비용은 접근시간에 비례하기 때문에 접근시간 최소화가 접근비용 최소화가 된다.



여기서, $v_a=4\text{km/h}$, $V=25\text{km/h}$
 $a=0.9\%$, $b=1.2\%$, $t_s=30\text{초}$, $h=6\text{분}$
 $\gamma_a=4.320$, $\gamma_t=2.160\text{원/인-시}$, $\gamma_o=10,000\text{원/시}$

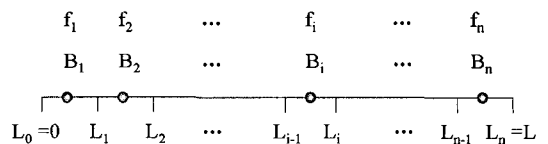
<그림 1> 정류장 간격 변화

연장 L 의 구간에 n 개의 정류장을 배치시키는 경우를 가정할 때 각 정류장이 서비스하는 서비스권역은 <그림 2>와 같이 설정할 수 있다.

정류장 B_i 의 서비스권역 내에 있는 승객수가 f_i 일때 승객이 정류장 B_i 를 이용할 확률 $P\{B_i\}$ 는 식(8)과 같다.

$$P\{B_i\} = \frac{f_i \times S_i}{\sum_{i=1}^n (f_i \times S_i)} \quad (8)$$

정류장 B_i 가 서비스권역 $S_i = L_i - L_{i-1}$ 의 중앙에 위치하는 것으로 가정할 경우 서비스권역 S_i 내에 있는 승객의 총 접근시간은 $T\{a_i\} = f_i \times S_i / 4$ 와 같다. 따라서 승



<그림 2> 정류장과 서비스권역의 개념도

차와 하차를 모두 고려한 노선 전체 승객들의 총 접근시간 $T(a)$ 는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 T(a) &= \sum_{i=1}^n \left\{ 2 \times f_i \times \frac{S_i}{4} \times P\{B_i\} \right\} \\
 &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{f_i \times S_i}{2} \times \frac{f_i \times S_i}{\sum_{i=1}^n f_i \times S_i} \right\} \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n \{f_i S_i\}^2}{\sum_{i=1}^n f_i S_i} = \frac{1}{2} \frac{\overline{S_f^2}}{\overline{S_f}}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서, $\overline{S_f} = S$ 의 수요 가중평균
 식(9)에서 $\overline{S_f^2}$ 은 식(10)과 같이 변형될 수 있다.

$$\overline{S_f^2} = \overline{S_f^2} + \sigma_{S_f}^2 \tag{10}$$

여기서, $\sigma_{S_f}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{f_i} - \overline{S_f})^2$
 $S_{f_i} = S_i$ 의 수요 가중치

식(10)을 식(11)에 대입하여 정리하게 되면 노선 전체 승객들의 총 접근시간은 식(11)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 T(a) &= \frac{1}{2} \frac{\overline{S_f^2}}{\overline{S_f}} \\
 &= \frac{1}{2} \frac{\overline{S_f^2} + \sigma_{S_f}^2}{\overline{S_f}} \\
 &= \frac{\overline{S_f}}{2} \left(1 + \frac{\sigma_{S_f}^2}{\overline{S_f^2}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

식(11)에 의하면 전체 승객들의 총 접근시간은 수요에 대한 가중 평균 간격의 1/2이 최소값이고 그 분산값이 커짐에 따라 다소 증가하게 된다. 즉, 수요에 대한 가중 평균 간격이 모두 균일할 경우 최소 접근시간을 갖게 된다.

IV. 결과 해석 및 논의사항

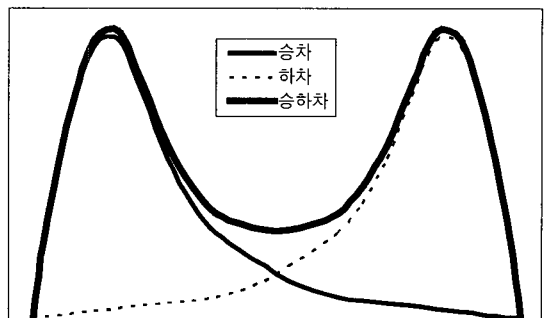
본 연구에서는 대중교통 시스템을 구성하는 각 비용 요소들의 수리적 풀이를 통해 최적 정류장 간격을 산정한 후, 노선 상의 승하차 수요분포를 균등하게 분할하는

방법을 통해 각 정류장의 위치를 결정하는 2단계 방법론을 제시하였다. 이에 따르면 노선의 정류장 개수는 노선 상의 총 통행수요의 양에 의해 결정되고 각 정류장의 위치는 이용객이 노선 상에 분포되어 있는 형태, 즉 수요의 분포함수에 의해 결정된다. 이러한 방법론은 이론적인 근거를 유지하면서 기존의 방법보다 쉽고 간단하게 적용될 수 있기 때문에 매우 효과적이라 하겠다.

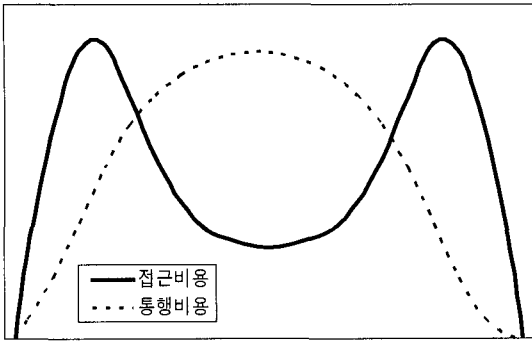
그러나 본 연구에서 제시한 모형식과 방법론은 통행 수요를 하나의 변수로 간주하여 접근비용을 최소화시키는 각 정류장의 위치를 설정하는 것으로, 재차인원에 대한 고려가 배제되었다. 보다 일반적으로 생각할 때 차내 승객이 정류장에서 승하차하는 승객에 비해 많을 경우 정류장 간격이 길어지고, 정류장에서 승하차하는 승객이 차내 승객에 비해 많을 경우에는 정류장 간격이 짧아지는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 보면 앞에서 분석한 바와 같은 정류장에서 승하차하는 승객의 접근시간을 최소화시키는 정류장 위치는 차내 통행시간을 증가시켜 총 비용을 증가시킬 우려가 있다.

차내 통행비용이 반영된 총 비용을 최소화시키기 위해서는 통행수요를 승차와 하차수요로 구분하고 이를 통해 재차수요를 산정하여 각 구간별 비용을 더한 총 비용을 계산할 수 있는 모형을 구축해야 한다. Wirasinghe, Hurdle, 그리고 Newell(1977)은 many-to-one의 수요형태에 대해서, 그리고 Wirasinghe와 Ghoneim (1981)은 many-to-many의 수요형태에 대해서 재차승객과 정류장의 승하차 승객에 따른 최적 정류장 간격 산정모형을 제시하였다. 이 연구의 결과를 보면 최적 정류장 간격은 정류장의 승하차 승객에 대한 재차승객의 비율(재차승객/승하차 승객)에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

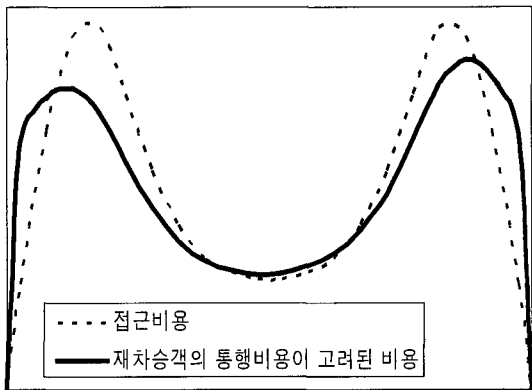
이 경우에도 앞에서와 유사하게 거리에 따른 분포함수(여기서의 분포는 실제의 수요분포가 아닌 정류장 간



<그림 3> 승하차 수요분포



〈그림 4〉 접근비용과 통행비용의 분포



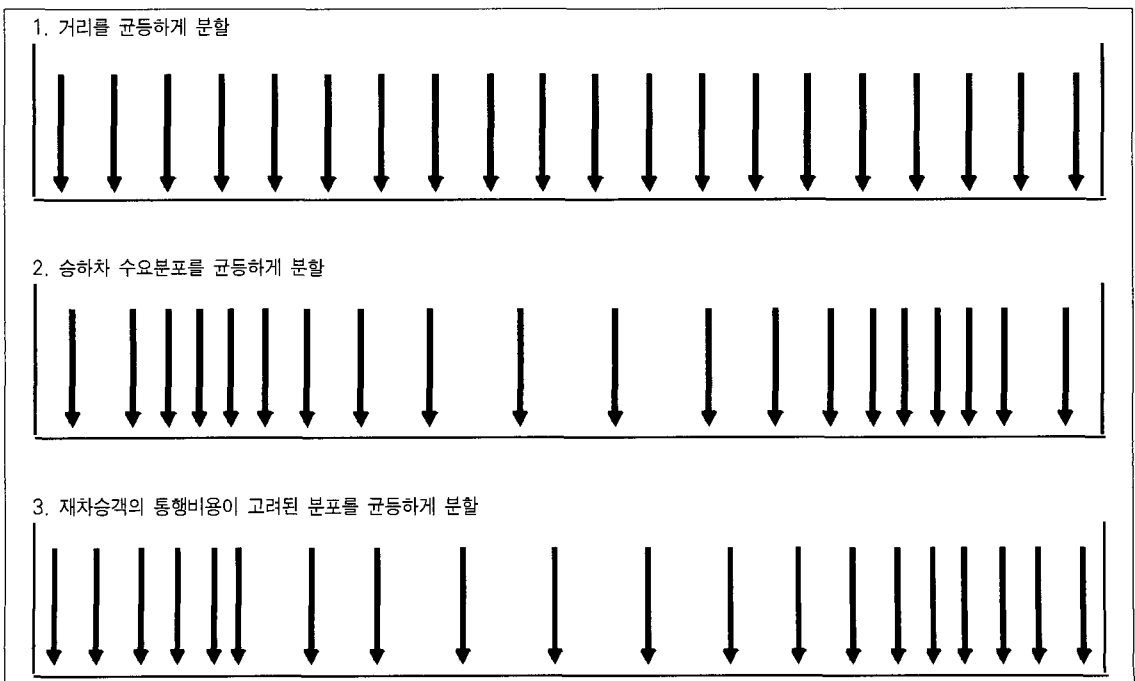
〈그림 5〉 확률밀도함수

격에 관계되는 접근비용, 통행비용, 그리고 운행비용이 동일한 단위비용 또는 효용으로 환산되어 복합적으로 계산된 가상의 분포가 됨)를 구할 수 있을 것이고 이 분포의 면적을 균등하게 분할하여 각 정류장의 위치를 결정할 수 있을 것이다. 그러나 이 분포는 접근비용, 통행비용, 그리고 운행비용에 대한 계수의 값에 따라 상당히 달라질 수 있는 가상의 분포이고 이를 도출하는 것은 본 연구의 목적에서 상당히 벗어난 것이기 때문에 본 연구에서는 이에 대한 개념적 예시만을 소개하기로 한다.

〈그림 3〉과 같이 노선의 기점 근처에서 승차가 많고 종점 근처에서 하차가 많은 승하차 수요분포를 가정할 경우 접근비용과 통행비용은 〈그림 4〉와 같은 분포형태를 갖게 될 것이다.

〈그림 4〉에서 재차 승객이 정류장의 승하차 승객에 비해 많은 노선의 중간부분에서는 정류장 간격이 수요분포를 균등화해서 산정한 정류장 간격보다 다소 넓어져야 하고, 승하차 승객이 재차 승객에 비해 많은 노선의 기·종점 부근에서는 정류장 간격이 다소 좁아져야 한다.

접근비용과 통행비용을 동시에 고려하여 산출된 분포함수는 〈그림 5〉의 실선으로 그려진 분포와 같이 접근비용만을 고려한 수요분포보다 기·종점 부근, 즉 정류장의 승하차 승객이 재차승객에 비해 많은 구간으로 다소



〈그림 6〉 분포에 따른 정류장 위치

치우친 분포형태를 갖게 된다.

〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 재차 승객의 통행비용이 고려된 분포를 균등하게 분할할 경우 승하차 수요분포를 균등하게 분할하는 경우와 유사한 결과를 나타내는데 다만 이에 비해 일정정도 재차 승객이 많은 구간의 정류장 간격이 넓어지고, 재차 승객이 적은 구간의 정류장 간격이 다소 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 승하차 수요분포를 균등 분할한 경우의 정류장 위치는 수요분포와 같이 대칭적이지만, 재차 승객의 통행비용이 고려된 분포를 균등하게 분할한 경우에는 재차 승객이 증가하는 기점부근보다 재차 승객이 감소하는 종점 부근에 정류장이 더 많이 분포되어 종점 방향으로 다소 치우쳐져 있는 것을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 정류장의 간격과 위치를 결정하는 문제를 해석적으로 풀이하였다. 정류장의 간격은 접근통행속도, 정류장 정차로 인한 손실시간, 승객의 통행거리가 증가함에 따라 길어지고, 통행수요와 배차간격이 늘어남에 따라 짧아진다. 정류장에서 승하차 승객의 접근비용을 최소화하는 각 정류장의 위치를 결정하는 방법론을 제시하였다. 접근비용 최소화 관점에서는 정류장의 위치가 수요의 분포함수에 의해 결정되기 때문에, 수요가 밀집된 구간은 정류장 간격이 짧고 수요가 넓게 퍼져있는 구간은 정류장 간격이 길어지게 되는 결과를 도출한다. 재차 승객의 통행비용을 함께 고려할 경우에 대해 개념적 예시를 통해 정류장 위치변화를 살펴본 결과 재차 승객이 많은 구간의 정류장 간격이 다소 넓어지고, 재차 승객이 적은 구간의 정류장 간격이 다소 좁아지는 것을 확인할 수 있었고, 재차 승객이 증가하는 구간보다 재차 승객이 감소하는 구간에 정류장이 보다 많이 배치되는 것을 확인하였다.

기존의 해석적 연구에서는 모형식의 풀이를 통해 산출된 최적 정류장 간격에 기반하여 노선의 총 거리를 균등하게 분할한 각 지점에 정류장을 위치시킬 것을 제시하였는데, 본 연구의 결과를 통해 해석할 경우 이는 노선 전체의 모든 지점에 대해 수요가 균일할 경우, 즉 수요가 균일분포를 따를 경우에 국한된 것이라 하겠다. 따라서 본 연구는 기존의 해석적 연구를 확장시킨 일반화된 연구라 하겠다. 또한 본 연구는 동적 프로그래밍을 통해 얻을 수 있었던 결과를 어렵지 않은 계산을 통해 간단하게 얻을 수 있는 방법론을 제시한 것에 큰 의미가 있으며 그

간편성으로 실무적용도 가능하리라고 판단된다. 즉, 계산의 복잡성으로 실무적용에 한계를 갖는 동적 프로그래밍의 한계를 극복하는 단초를 제공했다고 볼 수 있겠다. 물론 실무상황에서 대중교통 노선의 정류장을 계획하고 설계할 경우에 본 연구의 방법론을 따라 정류장의 개수와 각 위치를 결정할 수 있는데 본 연구 방법론을 적용한 정류장 개수와 위치는 현장 도로여건에 따라서는 조정이 필요할 수 있을 것이다. 실제 현장에서는 계산된 위치에 정류장을 설치하지 못할 경우도 있고 일련의 여러 정류장의 위치가 적절하지 못할 경우에는 노선 전체의 정류장 개수가 변화될 수도 있기 때문이다. 따라서 본 연구의 결과는 대중교통 노선의 정류장 계획 및 실제 작업에서 잠정대안으로 선정하고 현장 도로여건에 따라 조정을 거쳐서 최종대안을 설정하는 것이 바람직하겠다. 이러한 과정을 따르게 될 경우 이론적인 계산이나 컴퓨터를 사용한 프로그래밍에 익숙하지 않은 공무원이나 행정 요원들도 몇 번의 시행착오를 거쳐 경험을 쌓게 되면 충분히 대중교통 노선의 정류장 계획을 수립할 수 있을 것이다.

본 연구를 일반적으로 해석할 경우 모든 간격 설정 문제에 적용될 수 있다. 도로의 간격, 노선의 간격 등의 모든 시설물의 간격을 결정하는 문제에서 적용될 수 있으며, 간격변수를 공간에서 시간으로 변경하게 되면 배차간격을 결정하는 문제에도 바로 적용될 수 있는 확장성을 갖는다. 본 연구를 활용할 경우 도시의 공간구조에 따른 가로망의 최적형태를 근사적으로 설계할 수 있는데, 이에 대한 연구는 향후 과제로 남기도록 한다. 추가적으로 노선의 1회 운행시간이 정류장 간격에 따라 변화하는 경우 노선의 1일 배차회수가 변경되어 이용자의 대기비용이 변화하는 경우를 생각할 수 있는데, 이러한 경우 이용자의 대기비용은 배차간격과 정류장 간격에 의한 함수로 구성되고 이와 같은 모형식을 풀이하기 위해서는 순환적인 해법이 요구된다. 정류장 간격 변화에 따른 1일 배차회수 변화 정도가 미미하기 때문에 결과의 변화는 그다지 크지 않을 것으로 예상되나 정확한 결과 변화의 분석은 나름의 의미를 갖기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강주란(2006), 버스 승객의 승하차 패턴을 고려한 최적 정류장 수 산정 모형 개발, 서울대학교 공학석

사학위논문.

2. 강주란, 고승영(2006), "버스승객의 승하차 패턴을 고려한 최적 정류장 수 산정 모형 개발", 「대한교통학회지」, 24(1), 97~108.
3. 고승영, 박준식(2005), "버스 운행 정시성의 서비스수준 기준산정", 「대한교통학회지」, 23(2), 151~160.
4. 고승영, 박준식, 김은호(2005), "버스 운행 신뢰성 평가를 위한 정시성지표의 개발 및 적용", 「대한교통학회지」, 23(2), 131~141.
5. 김동규(2006), 물류 시스템 분석을 고려한 단일 할당 허브 네트워크 설계 모형 개발, 서울대학교 공학박사학위논문.
6. 박경철(2006), 대중교통 네트워크 통합 설계 모형 개발, 서울대학교 공학박사논문.
7. 이승헌(1999), 버스운행특성을 고려한 운영효율 최적화 방안에 관한 연구, 서울대학교 공학석사학위논문.
8. Aldaihani, M.M., Quadrifoglio, L., Dessouky, M.M., Hall, R.(2004). "Network Design for a Grid Hybrid Transit Service", *Transportation Research*, 38A, 511~530.
9. Bruno, G., Gendreau, M., Laporte, G.(2002). "A Heuristic for the Location of a Rapid Transit Line", *Computers & Operations Research*, 29, 1~12.
10. Byrne, B.F.(1975), "Public Transportation Line Positions and Headways for Minimum User and System Cost in a Radial Case", *Transportation Research*, 9, 97~102.
11. Byrne, B.F.(1976), "Cost Minimizing Position, Lengths and Headways for Parallel Public Transit Lines Having Different Speeds", *Transportation Research*, 10, 209~214.
12. Ceder, A.(2002), "Urban Transit Scheduling, Framework, Review and Examples", *Journal of Urban Planning and Development*, 225~244.
13. Chang, S.K., Schonfeld, P.M.(1991), "Multiple Period Optimization of Bus Transit Systems", *Transportation Research*, 25B, 453~478.
14. Clarens, G.C., Hurdle, V.F.(1975), "An Operating Strategy for a Commuter Bus System", *Transportation Science*, 9, 1~20.
15. Ghoneim, N.S.A., Wirashnghe, S.C.(1986), "Optimum Zone Structure During Peak Periods for Existing Urban Rail Lines", *Transportation Research*, 20B, 7~18.
16. Hurdle, V.F.(1973), "Minimum Cost Location for Parallel Public Transit Lines", *Transportation Science*, 7, 340~350.
17. Kho, S.Y., Park, J.S., Kim, Y.H., Kim, E.H.(2005), "A Development of Punctuality Index for Bus Operation", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 492~504.
18. Kikuchi, S.(1985), "Relationship Between the Number of Stops and Headway for a Fixed-Route Transit System", *Transportation Research*, 19A, 65~71.
19. Kikuchi, S., Vichic, V.R.(1982), "Transit Vehicle Stopping Regimes and Spacings", *Transportation Science*, 16, 311~331.
20. List, G.F.(1990), "Toward Optimal Sketch-Level Transit Service Plans", *Transportation Research*, 24B, 325~344.
21. Madsen, O.B.G.(1983), "Methods for Solving Combined Two Level Location-routing Problems of Realistic Dimensions", *European Journal of Operational Research*, 12, 295~301.
22. Osuna, E.E., Newell, G.F.(1972), "Control Strategies for an Idealized Public Transportation System", *Transportation Science*, 6, 52~72.
23. Palma, A., Lindsey, R.(2001), "Optimal Timetables for Public Transportation", *Transportation Research*, 35B, 789~813.
24. Park, J.S., Kho, S.Y.(2006), "A New Method to Determine Level of Service Criteria of Headway Adherence", *Proceedings of the TRB 85th Annual Meeting*.
25. Vuchic, V.R.(2005), *Urban Transit: Operations, Planning, and Economics*, John Wiley & Sons, Inc.
26. Vuchic, V.R., Newell, G.F.(1968), "Rapid Transit Inter-Station Spacing for Minimum Travel Time", *Transportation Science*, 2,

- 303~399.
27. Wirasinghe, S.C.(1980), "Nearly Optimal Parameters for a Rail/Feeder-Bus System on a Rectangular Grid", *Transportation Research*, 14A, 33~40.
28. Wirasinghe, S.C., Ghoneim, N.S.(1981), "Spacing of Bus-Stops for Many to Many Travel Demand", *Transportation Science*, 15, 210~221.
29. Wirasinghe, S.C., Hurdle, V.F., Newell, G.F.(1977), "Optimal Parameters for a Coordinated Rail and Bus Transit System", *Transportation Science*, 11, 359~374.

♣ 주 작 성 자 : 박준식
 ♣ 교 신 저 자 : 박준식
 ♣ 논문투고일 : 2007. 3. 9
 ♣ 논문심사일 : 2007. 4. 13 (1차)
 2007. 5. 22 (2차)
 2007. 5. 28 (3차)
 ♣ 심사판정일 : 2007. 5. 28
 ♣ 반론접수기한 : 2007. 10. 31