

■ 論 文 ■

# 최적 배차시각 설정에 관한 해석적 연구

## Determining Transit Vehicle Dispatching Time

**박 준 식**

(서울대학교 박사수료)

**고 승 영**

(서울대학교 교수)

**김 점 산**

(경기개발연구원 책임연구원)

**권 용 석**

(전주대학교 교수)

### 목 차

- |  |   |
|--|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구배경</p> <p>2. 연구목적 및 범위</p> <p>II. 기존연구검토</p> <p>1. 최적 배차간격</p> <p>2. 비균등 배차간격</p> <p>III. 최적 배차간격</p> | <p>1. 비용함수</p> <p>2. 최적 배차간격 산정</p> <p>3. 최적 배차시각 결정</p> <p>IV. 결과해석</p> <p>V. 결론 및 향후 연구과제</p> <p>참고문헌</p> |
|--|---|

Key Words : 대중교통, 배차간격, 배차계획표, 수요분포, 확률밀도함수  
 Transit, Headway, Schedule table, Passenger distribution, Probability density function

### 요 약

대중교통 시스템의 운행계획 수립과정에서 배차간격은 중요한 결정 파라미터이다. 일반적으로 통행수요가 많은 첨두시간대에는 배차간격이 짧고 통행수요가 적은 비첨두시간대에는 배차간격이 길다. 이는 시간대에 따라 변화하는 통행수요를 충족시키기 위해 요구되는 적정한 운행서비스를 공급하기 위함인데 수요의 탄력성이 없을 경우 이용자의 대기시간을 최소화하는 것과 일맥상통한다. 본 연구에서는 최적 배차계획표를 작성하는 문제를 해석적으로 풀이하였다. 배차간격은 단위 거리당 운행비용에 비례하고 통행수요와 대기시간계수에 반비례한다. 최적 배차간격은 통행수요의 양에 의해 결정되고, 각 배차시각은 수요의 분포함수에 의해 결정되는 것을 확인하였다. 따라서 통행수요가 많은 첨두시간대에는 배차간격이 짧고 수요가 많지 않은 비첨두시간대에는 배차간격이 길어지게 되어 일반적인 상식을 뒷받침해주는 이론적 근거가 된다. 기존의 해석적 연구에서는 전체 서비스시간 또는 분할된 서비스시간대의 길이를 균등하게 분할한 각 시각에 차량을 배차할 것을 제시하였는데, 본 연구의 결과를 통해 해석할 경우 이는 분석 시간대 동안의 통행수요가 균일할 경우, 즉 수요가 균일분포를 따를 경우에 국한된 것이라 하겠다. 따라서 본 연구는 기존의 해석적 연구를 확장시킨 일반화된 연구라 하겠다. 본 연구에서는 어렵지 않은 계산을 통해 간단하게 배차계획표를 작성하는 방법을 제공한 것에 큰 의미를 갖는다. 또한 본 연구를 일반적으로 해석할 경우 모든 간격 설정 문제에 적용될 수 있고 간격변수를 시간에서 공간으로 변경할 경우 정류장의 간격, 도로의 간격, 노선의 간격 등의 모든 시설물의 간격을 결정하는 문제에서도 적용될 수 있는 확장성을 갖는다.

This study involves an analytical approach to determine transit dispatching schedules (headways). Determining a time schedule is an important process in transit system planning. In general, the transit headway should be shorter during the peak hour than at non-peak hours for demand-responsive service. It allows passengers to minimize their waiting time under inelastic, fixed demand conditions. The transit headway should be longer as operating costs increase, and shorter as demand and waiting time increase. Optimal headway depends on the amount of ridership, and each individual vehicle dispatching time depends on the distribution of the ridership. This study provides a theoretical foundation for the dispatching scheme consistent with common sense. Previous research suggested a dispatching scheme with even headway. However, according to this research, that is valid for a specific case when the demand pattern is uniform. This study is a general analysis expanding that previous research. This study suggests an easy method to set a time table without a complex and difficult calculation. Further, if the time axis is changed to the space axis instead, this study could be expanded to address the spacing problems of some facilities such as roads, stations, routes and others.

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. 연구배경

대중교통 시스템의 운행계획 수립과정은 크게 노선결정, 배차계획표 작성, 차량배정, 운전자배정의 4단계로 구성된다. 이 중 배차계획표 작성과정은 운행시간 결정, 통행수요 검토, 최적 배차간격 결정, 각 운행의 배차시각 결정과정으로 구성된다.<sup>8~10)</sup>

일반적으로 통행수요가 많은 첨두시간대에는 배차간격이 짧고 통행수요가 적은 비첨두시간대에는 배차간격이 길다. 이는 시간대에 따라 변화하는 통행수요를 충족시키기 위해 요구되는 적절한 운행서비스를 공급하기 위함인데 수요의 탄력성이 없을 경우 이용자의 대기시간을 최소화하는 것과 일맥상통한다.

배차간격에는 최소한의 통행수요를 만족시키기 위해 요구되는 최소 배차회수에 따른 최대 배차간격, 차량 보유대수 또는 차량의 성능에 의해 결정되는 더 이상 짧은 간격으로 배차할 수 없는 한계에 해당하는 최소 배차간격, 그리고 이용자 비용과 운영자 비용을 합한 총 비용을 최소화시키는 최적 배차간격이 있다.

총 비용을 최소화시키는 최적 배차간격의 결정은 대중교통 시스템을 구성하는 각 요소의 비용을 모형화하여 총 비용함수를 구축하고 이를 해석적으로 풀이하여 얻게 된다. 비용을 모형화하는 과정에서 목적에 따라 연구마다 다소 차이가 나타나지만 일반적인 모형의 구조는 유사하다.<sup>1,4~7,11,12,15,16,18,24,26,28)</sup>

배차계획표 작성 과정에서는 수요에 따라 시간대를 몇 개로 구분하고 각 시간대의 수요에 맞는 최적 배차간격을 결정한 후 이에 따라 해당 시간대를 균등하게 분할하여 각 운행의 배차시각을 결정하는 것이 일반적이다.<sup>1,22)</sup> 그러나 여기서 수요에 따라 구분된 각 시간대는 보통 두 시간 이상으로 통행수요가 그 시간동안 균일하다고 가정하는 것에는 무리가 있는 것으로 볼 수 있다. 또한 각 시간대의 경계 시점에서는 순간적으로 배차간격에 차이가 발생하여 이용자에게 불편을 초래하기도 한다. 따라서 이를 보다 일반화시켜 통행수요 변화에 대응한 연속적인 배차간격의 변화가 나타날 수 있도록 배차계획표를 작성하는 것이 보다 바람직할 것이다.

### 2. 연구목적 및 범위

본 연구는 통행수요 변화에 대응하여 연속적인 배차

간격의 변화가 나타날 수 있도록 배차계획표를 작성하는 방법론을 제시하는데 그 목적이 있다.

본 연구는 다음의 내용으로 구성되어 있다.

- 배차간격 결정에 관한 선행 연구 검토
- 대중교통 시스템을 구성하는 요소들의 비용함수
- 최적 배차간격 산정
- 최적 배차계획표 작성
- 연구의 의의 및 활용방안 제시

## II. 기존연구 검토

### 1. 최적 배차간격

Osuna와 Newell<sup>16)</sup>은 균일하게 도착하는 승객들의 평균 대기시간을 배차간격의 1/2로서 승객의 대기시간을 최소화할 수 있음을 수학적으로 증명하였다.

대중교통 시스템을 구성하는 비용요소 중 배차간격에 관계된 비용은 승객의 대기비용과 운영자의 운행비용이다. 승객의 대기비용은 배차간격에 비례하고, 운영자의 운행비용은 배차간격에 반비례하기 때문에 총 비용을 배차간격에 대해서 미분할 경우 총 비용을 최소화시키는 최적 배차간격이 도출될 수 있다.<sup>1,4~7,11,12,15,16,18,24,26,28)</sup>

Byrne<sup>5,6)</sup>, Chang과 Schonfeld<sup>11)</sup>, 그리고 Wirashinghe<sup>26)</sup>은 장거리의 지역간 통행을 서비스하는 간선 노선을 연결하는 지선 노선들의 노선간격과 배차간격에 대한 모형을 구축하여 최적 노선간격과 배차간격을 산출하였다.

Wirashinghe, Hurdle 그리고 Newell<sup>28)</sup>은 방사형 도시구조에서 도심과 외곽을 연결하는 철도 노선들의 서비스권역을 설정하고 각 철도 노선들을 연계하는 버스 노선의 최적 간격 및 배차간격을 산출하는 모형을 구축하였다.

Newell<sup>16)</sup>은 격자형 가로망에서 최적 노선간격과 배차간격을 산정하는 모형을 구축하여 가로망을 따라 분산된 노선망 형태보다 중심지에 집중된 노선망 형태가 보다 효율적임을 해석적으로 증명하였다.

### 2. 비균등 배차간격

Newell<sup>15)</sup>은 승객의 대기시간을 최소화시키기 위한 배차간격 결정 문제를 승객의 누적 도착분포를 이용하여 수학적으로 풀이하였다. 수요의 변화가 크지 않을 경우

즉, 승객의 도착율이 급격하게 변화하지 않을 경우 배차간격은 근사적으로 균등하지만, 수요의 변화에 따라 분명히 배차간격을 달리하는 것이 승객의 대기시간을 최소화시키는 방법임을 규명하였다. 이는 배차간격이 수요의 변화에 따라 가변적인 것이 승객의 대기시간을 최소화시킬 수 있음을 이론적으로 규명한 첫 번째 연구로써 상당한 의미가 있으나 이론적인 연구에 그치는 한계를 갖는다.

고승영과 고종섭<sup>1)</sup>은 요일별·시간대별로 변화하는 승객수요에 따른 최적 배차간격과 보유 차량대수를 산출하는 모형을 구축하였고 사례 연구에서는 시간대를 두 시간 단위로 분할하여 각 시간대 내에서는 수요가 일정함을 가정하여 각 시간대의 최적 배차간격과 보유 차량대수를 산정하였다. 이 연구는 시간대 분할을 통해 최적 배차간격이 수요에 따라 가변적임을 보이고 실제 적용 가능성을 제시한 연구로 의미가 있다. 그러나 동일한 시간대 내에서의 배차간격은 균등한 것으로 제시하고 있어, 연구의 배경이 되는 이론적 출발점에서 다소 거리가 있다고 볼 수 있다.

### III. 최적 배차간격

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 배차간격 산정이라는 분석 목적을 충족시킬 수 있도록 비용함수를 구축하였다.

#### 1. 비용함수

##### 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 결정문제는 차의 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.

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

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

##### 2) 대기비용

이용자의 대기비용은 배차간격에 비례하는 비용으로 배차간격이 짧아질수록 승객의 평균적인 대기비용은 감소한다. 그러나 배차간격이 짧아지게 되면 소요 차량수와 운행회수가 증가하게 되어 운행비용이 증가하게 된다. 즉, 배차간격 결정문제는 이용자의 대기비용과 운영자의 운행비용과의 상호 교환관계에 의해 최적치가 결정되는 구조를 갖는다.

$$C_w = qLD\gamma_w h k \quad (2)$$

- 여기서,  $C_w$  : 총 대기비용(원)
- $q$  : 단위시간-거리당 통행수요(인/h-km)
- $L$  : 노선연장(km)
- $D$  : 분석단위시간(h)
- $\gamma_w$  : 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 정차할수

록 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 통행수요를 곱하면 총 통행비용을 계산할 수 있다.

$$C_i = qLD\gamma_t \frac{l}{L} T_R \quad (3)$$

- 여기서,  $C_i$  : 총 통행비용(원)
- $q$  : 단위시간-거리당 통행수요(인/h-km)
- $L$  : 노선연장(km)
- $D$  : 분석단위시간(h)
- $\gamma_t$  : 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.

$$C_o = \frac{\gamma_o DL}{h} \quad (4)$$

- 여기서,  $C_o$  : 총 운행비용(원)
- $\gamma_o$  : 단위거리당 운행비용(원/km)
- $D$  : 분석단위시간(h)
- $h$  : 평균 배차간격(h)

5) 총비용

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

$$C_T = \{C_a + C_w + C_i\} + C_o \quad (5)$$

$$= 2 \frac{qLD\gamma_a S}{4v_a} + qLD\gamma_w h k + qLD\gamma_t \frac{l}{L} T_R + \frac{\gamma_o DL}{h}$$

총비용  $C_T$ 는 배차간격  $h$ 에 대해서 오목(convex)한 함수이고 배차간격  $h$ 에 대한 이차 미분값이 양이므로 모든  $h$ 에 대해 완전 오목(strictly convex)이므로 전역 최소값을 갖는다. 따라서 총 비용을 최소화시키는 최적 배차간격  $h^*$ 가 존재한다.

2. 최적 배차간격 산정

이용자 비용과 운영자 비용을 합한 총 비용  $C_T$ 를 배차간격  $h$ 에 대해서 미분하면 식(6)과 같이 된다.

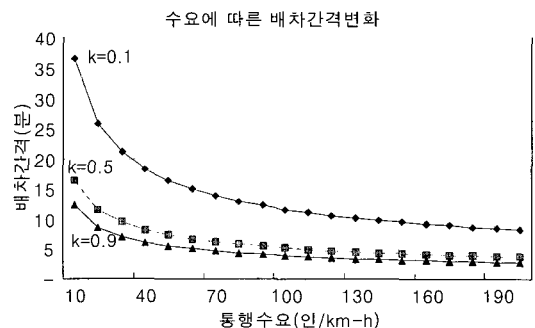
$$\frac{\partial C_T}{\partial h} = -\frac{\gamma_o DL}{h^2} + qLD\gamma_w k \quad (6)$$

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

$$h^* = \sqrt{\frac{\gamma_o}{q\gamma_w k}} \quad (7)$$

최적 배차 간격  $h^*$ 는 노선의 1회 운행시간과 단위 거리당 운행비용에 비례하고, 통행수요, 대기시간에 대한 비용 환산계수, 대기시간계수에 반비례하는 관계를 갖는다.

통행수요에 따른 배차간격의 변화를 살펴보면 통행수요가 증가함에 따라 최적 배차간격이 짧아지는 형태를 나타내는데 통행수요가 일정정도 이상이 되면 최적 배차간격의 감소폭이 매우 작아져 일정한 값에 수렴해가는



여기서,  $\gamma_o=1,000$ 원/km,  $\gamma_w=2,160$ 원/인-시  
 <그림 1> 정류장 간격 변화

형태를 보인다.

통행수요가 많은 시간에 배차간격을 짧게하고 통행수요가 적은 시간에 배차간격을 길게하는 것이 바람직함을 확인할 수 있다.

대기시간 계수  $k$ 에 대한 배차간격 변화를 살펴보면, 대기시간 계수가 작을수록 배차간격이 길어지게 되는데 이는 배차간격이 길 경우 승객들이 배차시각을 참조하여 정류장에 도착하는 것을 설명해주고, 승객들이 배차시각을 참조하여 정류장에 도착하게 되면 적은 비용으로 많은 승객을 서비스할 수 있다는 것을 의미한다.

### 3. 최적 배차시각 결정

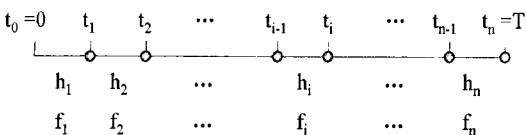
Osuna와 Newell<sup>11)</sup>은 균일하게 도착하는 승객들의 평균 대기시간을 배차간격의 1/2로서 승객의 대기시간을 최소화할 수 있음을 수학적으로 증명하였다. 그러나 이 연구에서는 수요의 분포가 균일한 것으로 가정하였기 때문에 수요에 대한 고려가 없이 단지 시간격을 균등하게 분할하는 것이 최적이라는 결론을 도출하였다. 본 연구에서는 수요분포의 가변성을 가정하여 수요분포가 시간에 따라 가변적일 경우에 승객의 대기시간을 최소화시킬 수 있는 방법이 무엇인지 증명하고자 한다.

운행시간  $T$  동안  $n$ 회의 차량을 배차시킬 경우를 가정할 때 각 배차차량이 서비스하는 서비스시간은 <그림 2>와 같이 설정할 수 있다.

$i$ 번째 배차시각  $t_i$ 에 차량을 이용하는 서비스시간 내에 있는 승객수가  $f_i$ 일때 승객이  $i$ 번째 배차시각  $t_i$ 에 차량을 이용할 확률  $P\{t_i\}$ 는 식(8)과 같다.

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

여기서,  $h_i = t_i - t_{i-1}$



<그림 2> 배차시각과 서비스시간의 개념도

$i$ 번째 배차시각  $t_i$ 에 차량을 이용하는 승객의 총 대기시간은  $W(t_i) = f_i \times h_i / 2$ 와 같다.

따라서 전체 서비스시간 동안 승객들의 총 대기시간  $W(T)$ 는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} W(T) &= \sum_{i=1}^n \left\{ f_i \times \frac{h_i}{2} \times P\{t_i\} \right\} \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{f_i \times h_i}{2} \times \frac{f_i \times h_i}{\sum_{i=1}^n (f_i \times h_i)} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n \{f_i h_i\}^2}{\sum_{i=1}^n f_i h_i} = \frac{1}{2} \frac{\overline{h_f^2}}{\overline{h_f}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $\overline{h_f} = h$ 의 수요 가중평균

식(9)에서  $\overline{h_f^2}$ 은 식(10)과 같이 변형될 수 있다.

$$\overline{h_f^2} = \overline{h_f^2} + \sigma_{h_f}^2 \quad (10)$$

여기서,  $\sigma_{h_f}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{fi} - \overline{h_f})^2$

$h_{fi} = h_i$ 의 수요 가중치

식(10)을 식(11)에 대입하여 정리하게 되면 노선 전체 승객들의 총 대기시간은 식(11)과 같이 된다.

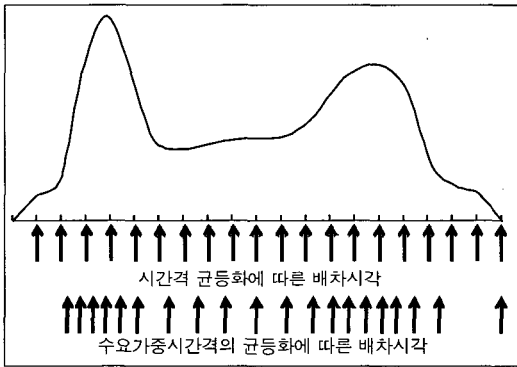
$$\begin{aligned} W(T) &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\overline{h_f^2}}{\overline{h_f}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\overline{h_f^2} + \sigma_{h_f}^2}{\overline{h_f}} \\ &= \frac{\overline{h_f}}{2} \left( 1 + \frac{\sigma_{h_f}^2}{\overline{h_f^2}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

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

앞에서 살펴본 바에 따르면 승객의 대기시간을 최소화시키는 방법은 수요를 가중한 각 배차간격을 균등화시키

의 면적을 균등하게 분할하는 것이다. 즉, 수요의 분포함수 면적을 균등 분할하는 각 시각이 배차시각이 되는 것이다.

〈그림 3〉은 운행 서비스시간 동안 승객의 수요분포가 가변적일 경우를 가정하여 분포의 형태를 고려하여 각 배차시각을 설정한 예시를 보여주고 있는데, 수요가 많은 시간대에 배차간격이 좁고 수요가 적은 시간대에 배차간격이 길게 설정되는 것을 확인할 수 있다.

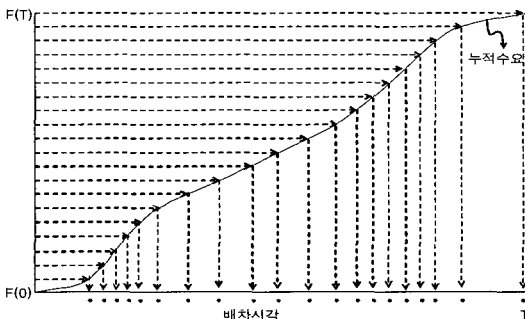


〈그림 3〉 수요를 고려한 배차시각

이상의 분석결과를 통해 각 차량의 배차시각은 통행 수요의 분포함수를 균등하게 분할하는 시각이 됨을 알 수 있다. 전체 운행시간 T 이내의 임의의 시각 t에서의 누적통행수요함수를 F(t)라 하면 각 차량의 배차시각은 식(12)와 같이 결정된다.

$$t_i = t_0 + F^{-1}\left(\frac{F(T)}{n} \times i\right) \quad (12)$$

여기서,  $t_i$  : i 번째 차량의 배차시각  
 $t_0$  : 운행 초기시각  
 $F^{-1}$  : 누적통행수요함수의 역함수



〈그림 4〉 누적통행수요함수를 통한 배차시각 결정

#### IV. 결과해석

본 연구에서는 대중교통 시스템을 구성하는 각 비요소들의 수리적 풀이를 통해 최적 배차간격을 산정한 후, 운행 서비스시간 동안의 승하차 수요분포를 균등하게 분할하는 방법을 통해 각 배차시각을 결정하는 2단계 방법론을 제시하였다. 이에 따르면 배차회수는 운행 서비스시간 동안의 총 통행수요의 양에 의해 결정되고 각 배차시각은 이용객이 운행 서비스시간 동안 분포되어 있는 형태, 즉 수요의 분포함수에 의해 결정된다. 이러한 방법론은 이론적인 근거를 유지하면서 기존의 방법보다 쉽고 간단하게 적용될 수 있기 때문에 매우 효과적이라 하겠다.

우리나라 도시 내 버스업체들의 경우는 대부분 경험이 많은 배차원이 자신의 경험에 비추어 차고지에서 차량들을 배차시키고 있는 실정이다. 이는 도로 상의 교통 조건 변화가 극심하여 1회 운행시간을 적정한 수준으로 예측하기가 매우 어렵기 때문에 배차계획표를 작성하는 것 자체가 큰 의미가 없기 때문이기도 하다.

반면에 지역간 철도의 경우에는 운행시간이 거의 정확하기 때문에 도시 내 버스와 같은 문제는 나타나지 않지만, 동일한 배차계획이 반복되는 주기가 1주일 정도로 매우 길고 고려해야 할 변수가 매우 많아서 컴퓨터 프로그램을 통한 배차계획표 작성보다 경험이 많은 배차원이 배차계획표를 작성하는 것이 보다 효율적이고 정확할 수도 있다.

도시 내 버스와 지역간 철도의 경우 모두 어떠한 이유에서든 배차계획표 작성에 있어서 경험에 의한 판단이 우선시되고 있다고 볼 수 있다. 경험에 의한 판단이 어떠한 경우에는 매우 효율적이고 정확한 장점이 있지만 이는 비반복적인 결과를 도출하고 효과를 정량화할 수 없는 단점이 있다. 또한 경험 많은 배차원의 부재시 이를 대체할 방법이 없는 치명적인 단점을 무시할 수 없다.

본 연구에서 제시하는 방법론은 완전히 새로운 방법론으로 기존에 일부 철도와 항공분야에서 자체적으로 개발하여 사용하고 있는 컴퓨터 프로그램에서 적용하고 있는 방법론(수리적 모형을 구성하여 정수계획법을 활용하여 풀이함)에 비해서 논리적, 계산적으로 큰 장점을 갖는다. 그러나 본 연구에서 제시한 방법론을 실제 현장에서 적용하기 위해서는 보유차량수, 최소 가능 배차간격, 최대 배차간격 등 추가적으로 고려되어야 할 요소들이 많이 있다. 예를 들어, 첨두시간대에 계산된 배차시각에

따라 배차할 경우 보유 차량이 부족할 경우가 발생할 수 있는데, 이 경우 보유 차량에 대한 제약조건이 있기 때문에 배차 가능한 모든 차량을 최대한으로 배차하는 것이 바람직하다. 또한 비첨두시간대에는 계산된 배차시각에 따라 배차할 경우 배차간격이 비상식적으로 길어져 승객의 최대 대기시간을 초과할 경우가 발생할 수도 있는데 이러한 경우 승객이 인내할 수 있는 최대 대기시간을 넘어서지 않도록 배차시각을 조정할 필요가 있을 것이다. 따라서 본 연구의 결과는 배차계획표 작성시 잠정대안으로 선정하고 세부적인 여건에 따라 조정을 거쳐서 최종 배차계획표를 작성하는 것이 바람직하겠다. 이러한 과정을 따르게 될 경우 이론적인 계산이나 컴퓨터를 사용한 프로그래밍에 익숙하지 않거나 경험이 많지 않은 배차원이라도 단지 몇 번의 시행착오를 거치게 되면 충분히 효과적 배차계획표를 작성할 수 있을 것이다.

### V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 최적 배차계획표를 작성하는 문제를 해석적으로 풀이하였다. 최적 배차간격은 단위 시간당 운행비용에 비례하고 통행수요와 대기시간계수에 반비례한다. 최적 배차간격은 통행수요의 양에 의해 결정되고, 각 배차시각은 수요의 분포함수에 의해 결정되는 것을 확인하였다. 따라서 통행수요가 많은 첨두시간대에는 배차간격이 짧고 수요가 많지 않은 비첨두시간대에는 배차간격이 길어지게 되어 일반적인 상식을 뒷받침해주는 이론적 근거가 된다.

기존의 해석적 연구에서는 전체 서비스시간 또는 분할된 서비스시간대의 길이를 균등하게 분할한 각 시각에 차량을 배차할 것을 제시하였는데, 본 연구의 결과를 통해 해석할 경우 이는 분석 시간대 동안의 통행수요가 균일할 경우, 즉 수요가 균일분포를 따를 경우에 국한된 것이라 하겠다. 따라서 본 연구는 기존의 해석적 연구를 확장시킨 일반화된 연구라 하겠다.

본 연구에서는 어렵지 않은 계산을 통해 간단하게 배차계획표를 작성하는 방법을 제공한 것에 큰 의미를 갖고 그 간편성으로 실무적용도 가능하리라고 판단된다. 또한 본 연구를 일반적으로 해석할 경우 모든 간격 설정 문제에 적용될 수 있고 간격변수를 시간에서 공간으로 변경할 경우 정류장의 간격, 도로의 간격, 노선의 간격 등의 모든 시설물의 간격을 결정하는 문제에서도 적용될 수 있는 확장성을 갖는다.

### 참고문헌

1. 고승영, 고종섭(1998), "버스의 최적운행시각 및 보유대수 모형 개발", 「대한교통학회지」, 16(2), 169~176.
2. 고승영, 박준식(2005), "버스 운행 정시성의 서비스수준 기준산정", 「대한교통학회지」, 23(2), 151~160.
3. 고승영, 박준식, 김은호(2005), "버스 운행 신뢰성 평가를 위한 정시성지표의 개발 및 적용", 「대한교통학회지」, 23(2), 131~141.
4. 이승현(1999), 버스운행특성을 고려한 운영효율 최적화 방안에 관한 연구, 서울대학교 공학석사학위논문.
5. 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.
6. Byrne, B.F.(1976), "Cost Minimizing Position, Lengthes and Headways for Parallel Public Transit Lines Having Different Speeds", *Transportation Research*, 10, 209~214.
7. Carey, M.(1998), "Optimizing Scheduled Times, Allowing for Behavioural Response", *Transportation Research*, 32B, 329~342
8. Ceder, A.(1986), "Methods for Creating Bus Timetables", *Transportation Research*, 21A, 59~83.
9. Ceder, A.(2001), "Bus Timetables with Even Passenger Loads as Opposed to Even Headways", *Transportation Research Record*, 1760, 3~9.
10. Ceder, A.(2002), "Urban Transit Scheduling, Framework, Review and Examples", *Journal of Urban Planning and Development*, 225~244.
11. Chang, S.K., Schonfeld, P.M.(1991), "Multiple Period Optimization of Bus Transit Systems", *Transportation Research*, 25B, 453~478.
12. Clarens, G.C., Hurdle, V.F.(1975), "An Operating Strategy for a Commuter Bus System", *Transportation Science*, 9, 1~20.
13. 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.
14. List, G.F.(1990), "Toward Optimal Sketch-

13. 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.
14. List, G.F.(1990), "Toward Optimal Sketch-Level Transit Service Plans", Transportation Research, 24B, 325~344.
15. Newell, G.F.(1971), "Dispatching Policies for a Transportation Route", Transportation Science, 5, 91~105.
16. Newell, G.F.(1979), "Some Issues Relating to the Optimal Design of Bus Routes", Transportation Science, 13, 20~35.
17. Osuna, E.E., Newell, G.F.(1972), "Control Strategies for an Idealized Public Transportation System", Transportation Science, 6, 52~72.
18. Palma, A., Lindsey, R.(2001), "Optimal Timetables for Public Transportation", Transportation Research, 35B, 789~813.
19. 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.
20. Salzbom, F.J.M.(1969), "Timetables for a Suburban Rail Transit System", Transportation Science, 3, 297~316.
21. Salzbom, F.J.M.(1972), "Optimum Bus Scheduling", Transportation Science, 6, 137~148.
22. TCRP Report 30(1998), Transit Scheduling, Basic and Advanced Manuals, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C.
23. Vuchic, V.R.(1981), Urban Public Transportation: Systems and Technology, Prentice-Hall, Inc.
24. Vuchic, V.R.(2005), Urban Transit: Operations, Planning, and Economics, John Wiley & Sons, Inc.
25. Wilson, N.H.M.(1997), Computer-Aided Transit Scheduling, Proceedings of the Seventh International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport held at the MIT, August 5~8, Springer-Verlag.
26. Wirasinghe, S.C.(1980), "Nearly Optimal Parameters for a Rail/Feeder-Bus System on a Rectangular Grid", Transportation Research, 14A, 33~40.
27. Wirasinghe, S.C.(1990), "Re-Examination of Newell's Dispatching Policy and Extension to a Public Bus Route with Many to Many Time-varying Demand", Proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation and Traffic Theory held in Yokohama, Japan, July 18~20, 363~377.
28. 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. 10 (1차)  
2007. 5. 22 (2차)

✉ 심사판정일 : 2007. 5. 22

✉ 반론접수기한 : 2007. 10. 31