

■ 論 文 ■

# 버스의 최적운행시격 및 보유대수 모형 개발

A Development of Optimal Bus Headway and Fleet Size Model

고 승 영

(명지대학교 교통공학과 부교수)

고 종 섭

(명지대학교 대학원 교통공학과 박사과정)

## 목 차

- I. 서론
- II. 교통비용모형
- III. 시간대별 최적운행시격
- IV. 최적버스보유대수
- V. 서울특별시 버스노선 사례연구
- VI. 결론
- 참고문헌

## 요 약

버스운행시격은 주어진 고정된 승객수요와 버스운행시간에 대해 최적의 버스운행시격을 결정하고, 이러한 운행시격을 요일과 시간대에 관계없이 그대로 유지하는 것이 일반적이다. 여기에 첨두시와 비첨두시의 운행시격으로 구분하여 결정하기도 한다. 그러나 실제 버스운행시간과 승객수요는 요일별 시간대별로 변화하고 이에 맞는 운행시격으로 조정하지 못함에 따라 버스운영의 비효율성을 초래하기 쉽다.

본 연구의 목적은 요일별, 시간대별로 변화하는 시내버스의 승객수요 및 버스운행 소요시간을 변수로 하여 운영비용과 이용자비용의 합으로 본 총교통비용 모형을 수립하고, 요일별, 시간대별 최적의 버스운행시격을 구하는데 있다. 또한 최적의 버스보유대수를 구하고, 이에 따른 운행시격 조정 방법을 제안하였다.

또한 서울시에서 운행되고 있는 시내버스 노선 1개에 대한 사례연구를 통해 요일별, 시간대 별로 버스운행시격을 탄력적으로 조정함에 따라, 총교통비용을 상당히 절감할 수 있음을 입증하였고, 버스보유대수의 최적화도 유사한 결과를 나타내었다.

## I. 서론

버스와 같은 대중교통의 운영에 있어서 중요한 요소 중의 하나는 운행시격이다. 버스운행시격은 직접적으로는 승객의 대기시간 및 차내혼잡도 등 이용자의 서비스수준에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 운영자 측면에서는 버스보유대수 및 운영비용에 영향을 미치는 요소이다. 또한 간접적으로는 버스의 수송능력, 이용자의 수단선택 그리고 도시교통체계의 수단 분담 구조에 이르기까지 광범위한 영향을 미치는 중요한 요소이기도 하다.

버스배차계획을 위한 방법으로는 해석적 모형을 사용하는 이론적 방법, 컴퓨터 프로그램을 활용하는 현실적 방법 등 매우 다양한 방법들이 있다.(A. Ceder, 1981) 본 연구는 해석적 모형을 사용하는 이론적 연구의 하나이다.

해석적 방법의 버스배차계획에서 사용되는 간단하고 일반적인 접근방법은 총비용의 최소화와 같은 일정한 목표를 설정하고, 버스왕복운행시간(Round Trip Time), 이용수요, 버스탑승용량(정원), 운행시격, 운행속도, 그리고 승객의 대기 및 통행 시간비용, 버스 운행비용 등 각종 비용계수 등을 변수로 하며, 비용모형을 수립하여 목표달성을 극대화하는 최적의 운행시격을 결정하는 것이다.

이와 같은 버스배차계획은 1회 버스왕복 운행소요시간이 요일별, 시간대별로 변화하지 않고 일정하다는 가정을 전제로 하고 있다.(A. Ceder 1981) 그러나 대부분 대도시에서 운행하는 버스들은 요일별, 시간대별로 변화하는 노면교통의 혼잡정도에 따라 일정한 운행시간을 유지하기 어려운 것이 현실이다. 따라서 변화하지 않는 운행시간을 가정한 기존의 접근방법 보다는 운행시간의 동적 변화, 이용자의 수요패턴에 따라 운행시격을 조정할 수 있는 동적인 배차계획 모형개발과 이를 실제 적용하기 위한 연구가 필요하다.

또한 시간대별 운행시간 및 이용수요의 변화를 고려하여 배차계획을 수립한다고 해도 버스보유대수는 시간대 별로 바꿀 수 없고, 첨두시의 운행에 필요한 버스대수를 보유하여야 하며 비첨두시에는 일부의 차량이 운행되지 않고 낭비되는 비효율을 초래하는 결

과를 초래하고 있다.

본 연구는 시간대별 버스운행시간과 버스이용수요를 고려한 시간대별 최적운행시격을 결정하는 모형을 수립하고, 이를 기초로 비첨두시에 운행되지 않는 버스의 비효율성을 고려하여 1 주일(혹은 일정 기간)의 총교통비용을 목적함수로 하는 모형을 개발하여 최적의 버스보유대수를 결정하는 해를 구하도록 하였다. 또한 서울시에서 운행되고 있는 한개 버스노선의 운행자료를 이용하여 최적배차계획을 수립하는 사례연구를 수행하도록 하였다.

## II. 교통비용 모형

본 논문은 버스의 배차계획 수립을 위한 목표로서 운영자비용과 이용자비용의 합으로 정의되는 총교통비용의 최소화를 설정하였다.(Jansson, 1980) 버스는 공공교통수단의 하나로서 버스회사의 수입, 이익 등 하나의 이해 당사자의 이해관계를 평가기준으로 삼기 보다는 이용자를 포함한 관련된 모든 이해 당사자의 총량적인 이해관계를 평가기준으로 사용하는 것이 가장 일반적인 접근방법의 하나이다. 이 경우 버스의 이용수요를 고정된 것으로 가정하고, 산정하기 어려운 외부경제 효과를 무시한다고 가정하면 앞서 정의된 총교통비용의 최소화는 배차계획 수립에 있어서 합리적인 목표라고 볼 수 있다.

운영자비용으로는 버스운행비용을 들 수 있으며, 이용자비용으로는 승객의 접근비용, 대기시간비용, 통행 시간비용 등이 있다. 본 연구는 정해진 노선을 운행하는 버스의 운행시격을 결정하는 문제로서, 식 (1)에서와 같이 버스운행비용, 승객의 대기시간비용 및 통행 시간비용의 합으로 총교통비용으로 설정하였다.

$$TC = C_o + C_w + C_i \quad (1)$$

여기서,

$TC$  : 총 교통비용

$C_o$  : 버스운행비용

$C_w$  : 승객 대기시간 비용

$C_i$  : 승객 통행시간 비용

### 1. 버스운행비용

버스를 운행하는데 소요되는 비용은 상당히 많은 항목으로 구성되어 있으며, 버스운행비용을 모형화 하는 것도 상당히 많은 변수로서 복잡하게 표현할 수 있다. 그러나 본 논문은 버스운행시격에 초점을 둔 것으로 간단하게 운행대수에 비례하는 것으로 가정하여, 버스운행대수와 대당 버스운행비용의 곱으로 다음과 같이 시간당 버스운행비용을 표현하였다. 여기서 버스 운행대수는 식 (2)에서 보는 것처럼 1회 왕복운행소요시간을 운행시격으로 나누어 구할 수 있다.

$$C_0 = N \times \alpha_0 = \frac{t}{h} \times \alpha_0 \quad (2)$$

여기서,

- $N$  : 버스운행대수(대)
- $\alpha_0$  : 대당 버스운행 비용(원/시-대)
- $t$  : 왕복운행시간(시)
- $h$  : 버스운행시격(시/대)

### 2. 승객 대기시간비용

승객의 대기시간 비용은 승객의 시간당 대기시간 가치에 노선 당 총탑승객수와 승객의 평균대기시간을 곱한 것으로 표현할 수 있다. 여기서 승객의 평균대기시간은 승객 및 버스의 도착분포에 따라 달라지고 분포의 분산이 커질수록 증가하게 되며, 일반적으로 평균운행시격의 1/2 이상이 된다.

여기서 승객들은 개개 차량의 정류장 도착시간을 알지 못하고 승객의 정류장 도착분포가 균일분포(Uniform Distribution)를 따르고, 버스의 도착이 정시성을 지닌다고 가정하면, 승객의 평균대기시간은 버스운행시격의 1/2로 나타낼 수 있다. 이러한 가정 하에 승객의 시간당 대기시간비용은 식 (3)과 같이 단순하게 표현할 수 있다.

$$C_w = \alpha_w Q \frac{h}{2} \quad (3)$$

여기서,

- $\alpha_w$  : 승객의 대기시간 가치(원/시-인)

$Q$  : 노선 총 탑승객수(인/시)

$h$  : 운행시격(시)

### 3. 승객 통행시간비용

승객의 총 통행시간은 노선상의 총탑승객수에 승객의 평균통행시간을 곱하여 구할 수 있고, 따라서 승객의 통행시간 비용은 여기에 승객의 통행시간 가치를 곱하여 나타낼 수 있다. 승객의 평균통행시간은 식 (4)에서 제시된 것처럼 승객 1인당 평균 탑승거리를 버스의 평균운행속도로 나누어서 구할 수 있다.

$$C_t = \alpha_t Q \frac{d}{v} = \alpha_t Q d \frac{t}{D} \quad (4)$$

여기서,

- $\alpha_t$  : 승객의 통행시간가치(원/시-인)
- $Q$  : 노선당 총 탑승객수(인/시)
- $d$  : 승객의 평균 탑승거리(km)
- $D$  : 왕복운행거리(km)
- $v$  : 버스 운행속도(km/시)
- $t$  : 왕복 운행시간(시)

### 4. 총교통비용

버스운행비용, 승객의 대기시간비용 및 통행시간비용의 합으로 구성된 총교통비용은 식 (5)와 같이 정리될 수 있다.

$$TC = \frac{\alpha_0 t}{h} + \frac{\alpha_w Q h}{2} + \frac{\alpha_t Q d t}{D} \quad (5)$$

위의 총교통비용식은 버스의 보유대수를 고려하지 않고 단순히 대당 운행비용 만을 고려한 시간당 총교통비용 수식이다. 그러나 실제 버스를 운영하는데 있어서는 버스 보유대수의 제약이 있고, 단기적으로는 보유대수보다 많은 버스를 운행할 수 없으며, 보유대수보다 적은 대수의 버스를 운행하는 경우, 운행하지 않은 차량들로 인한 고정비용의 낭비를 초래하게 된다.

이러한 제한적인 조건에서 버스운행시격은 버스운행비용과 승객의 대기시간비용에 영향을 주게 되며

승객통행시간 비용에는 영향을 미치지 않는다. 최적의 운행시격  $h^*$ 는 식 (5)를  $h$ 에 대해 미분해서 이를 0으로 놓고 풀면 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$h^* = \sqrt{\frac{2\alpha_o t}{\alpha_w Q}} \tag{6}$$

즉, 최적운행시격은 버스의 왕복운행시간  $t$ , 대당 버스운행비용  $\alpha_o$ 의 1/2승에 비례하고, 승객대기시간 가치  $\alpha_w$  및 승객탑승수  $Q$ 의 1/2승에 반비례한다. 그러나 위의 기본 모형은 버스보유대수를 고려하지 않고 주어진 시간대에 고정된 버스운행시간 및 승객수요에 대한 그 시간대의 최적운행시격을 구한 것에 불과하다. 즉, 최대 부하를 처리하기 위한 운행시격 설정의 개념이라 할 수 있다.(Furth and Wilson, 1981) 현실적으로 운행시간  $t$ 는 도시의 교통혼잡에 따라 달라지고 교통혼잡은 시간대별로 변화하게 되며 승객수요도 시간대별로 변화하게 된다. 이에 따라 최적운행시격  $h^*$ 도 시간대에 따라 달라지고, 결국 버스 운행대수도 시간대별로 달라지게 된다.

### III. 시간대별 최적운행시격

본 절에서는 요일별, 시간대 별로 변화하는 버스운행시간 및 승객수요에 따라 요일별, 시간대별 최적운행시격을 구하고, 이에 따른 시간대별 버스운행대수를 산출하도록 하였다.

#### 1. 요일별 · 시간대별 최적운행시격

요일  $i$ 와 시간대  $j$ 에서의 총교통비용  $TC_{ij}$ 는 앞서 기본 모형에서 요일과 시간대만을 구분한 것으로 식 (7)과 같다.

$$TC_{ij} = \frac{\alpha_o t_{ij}}{h_{ij}} + \frac{\alpha_w Q_{ij} h_{ij}}{2} + \frac{\alpha_i Q_{ij} dt_{ij}}{D} \tag{7}$$

여기서,

$t_{ij}$  : 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의 버스운행시간(시)

$h_{ij}$  : 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의 버스운행시격(시)

$Q_{ij}$  : 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의 버스탑승객수(인/시)

여기서 앞서와 동일한 방법으로 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의 최적 버스운행시격을 구하면 다음과 같다.

$$h^*_{ij} = \sqrt{\frac{2t_{ij}\alpha_o}{\alpha_w Q_{ij}}} \tag{8}$$

따라서 만약 요일별, 시간대별로 버스왕복운행시간과 승객수요를 미리 알 수 있다면, 위 식에 의해 구한 최적운행시격으로 버스를 배차할 수 있고 총교통비용은 최소화될 수 있다. 요일별, 시간대별 버스왕복운행시간과 승객수요는 요일을 주기로 교통패턴이 반복된다고 가정할 때 과거의 운행시간과 탑승객수 자료로부터 쉽게 예측할 수 있을 것이다.

#### 2. 버스운행대수 및 보유대수

요일별 · 시간대별 버스운행대수는 왕복운행소요시간을 버스운행시격으로 나누어 구할 수 있다. 따라서 요일  $i$ , 시간대  $j$ 에 필요한 버스운행대수  $N_{ij}$ 는 식 (9)와 같다.

$$N_{ij} = \frac{t_{ij}}{h^*_{ij}} \tag{9}$$

그러나 이 버스운행대수는 요일 및 시간대에 따라 변화하게 되고 버스보유대수(Fleet Size)는 이러한 요일별, 시간대별 버스운행대수 중 최대의 버스운행대수가 될 것이다<sup>1)</sup>. 이 최대운행대수  $N_{max}$ 는 식 (10)과 같이 정의 될 수 있다.

$$N_{max} = \text{Max} \{N_{ij}\} = \text{Max} \left\{ \frac{t_{ij}}{h_{ij}} \right\} = \text{Max} \left\{ \sqrt{\frac{\alpha_w Q_{ij} t_{ij}}{2\alpha_o}} \right\} \tag{10}$$

즉, 최대운행대수는  $Q_{ij}$ 와  $t_{ij}$ 의 곱이 최대가 되는 시간대의 버스운행대수가 된다. 따라서  $N_{ij} = N_{max}$ 가 되는 시간대를 제외한 나머지 시간대에는 일부의 버스가 유힬하는 상태가 될 것이다. 이 유힬하고 있는 버

1) 일반적으로 버스 보유대수는 최대 운행대수에 일정 비율의 예비차를 두게 되나, 본 연구에서는 최대 운행대수를 버스 보유대수로 가하였다.

스대수는  $N_{max} - N_{ij}$ 이다.

#### IV. 최적버스보유대수

최적버스 운행대수 만큼의 버스를 보유하고,  $N_{ij} = N_{max}$ 가 되는 시간대를 제외한 나머지 시간대에는 일부 버스가 유휴 상태로 남아 있게 됨에 따라, 자원의 낭비를 초래하고 비효율적 운영이 되게 된다.

여기서는 버스 운행 및 유휴 상태의 비용을 구분하기 위해 버스 운행비용을 버스의 보유에 따른 고정비와 운행시 추가로 소요되는 변동비로 구분하였다. 즉, 운행되고 있는 버스는 고정비와 변동비 모두가 소요되는 반면, 유휴 중인 버스는 고정비만을 소요하는 것으로 가정할 것이다.

이렇게 보유하고 있는 버스의 운행여부를 반영한 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의 총교통비용은 식 (11)과 같다.

$$TC_{ij} = \frac{t_{ij}(\alpha_{of} + \alpha_{ov})}{h_{ij}} + \frac{\alpha_w Q_{ij} h_{ij}}{2} + \frac{\alpha_r Q_{ij} dt_{ij}}{D} + (N_{max} - N_{ij}) \alpha_{of} \quad (11)$$

여기서,

$\alpha_{of}$  : 버스 보유에 따른 고정비(원/시·대)

$\alpha_{ov}$  : 버스 운행에 따른 변동비(원/시·대)

위 식에  $N_{ij} = \frac{t_{ij}}{h_{ij}}$ 를 대입하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$TC_{ij} = \frac{\alpha_{ov} t_{ij}}{h_{ij}} + \frac{\alpha_w Q_{ij} h_{ij}}{2} + \frac{\alpha_r Q_{ij} dt_{ij}}{D} + N_{max} \alpha_{of} \quad (12)$$

이 식에서 버스의 보유에 따른 고정비는  $N_{max} \alpha_{of}$ 로 불변임을 알 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 바대로 일부 버스는 침두시간대에만 운행되어 자원의 낭비를 초래함에 따라 버스보유대수를 앞서의 최대버스 운행대수  $N_{max}$ 보다 적게 보유하는 것이 총비용을 절감할 수 있을 것이다. 즉, 최적버스보유대수  $N^*$ 는 서비스를 제공하는 한 1대 이상에서부터 최대버스 운행대수인  $N_{max}$ 보다 작은 범위에 있게 될 것이다. 만약 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의  $N_{ij}$ 가  $N^*$ 보다 같거나 작은 경우는 최적 운행시격으로 운영을 계속할 수 있으나,  $N_{ij}$ 가  $N^*$ 보다

큰 경우는 버스가 부족하여 최적 운행시격을 지킬 수 없게 되고, 운행시격은 최적 버스보유대수  $N^*$ 에 의해 다음과 같이 조정되어 결정되게 된다.

$$h_{ij} = \frac{t_{ij}}{N^*}$$

즉, 이는 앞에서 설정한 최대부하 수송개념에 버스 운영의 생산성 개념을 도입하여 운행시격을 결정하고자 하는 노력이다.(Furth and Wilson, 1981) 이렇게 구분한 요일  $i$ , 시간대  $j$ 의 총비용  $TC_{ij}$ 는  $N_{ij}$ 가  $N^*$ 보다 큰가 작은가에 따라 아래와 같이 구분 정리될 수 있다.

①  $N_{ij} \leq N^*$ 인 경우, 운행시격은  $h_{ij}^* = \sqrt{\frac{2t_{ij} \alpha_{ov}}{\alpha_w Q_{ij}}}$ 가 되며,

$$TC_{ij} = \frac{\alpha_{ov} t_{ij}}{h_{ij}} + \frac{\alpha_w Q_{ij} h_{ij}}{2} + \frac{\alpha_r Q_{ij} dt_{ij}}{D} + N^* \alpha_{of}$$

$$= \sqrt{2\alpha_w \alpha_{ov} Q_{ij} t_{ij}} + \frac{\alpha_r Q_{ij} dt_{ij}}{D} + N^* \alpha_{of} \quad (13)$$

②  $N_{ij} > N^*$ 인 경우, 운행시격은 보유대수의 제한으로  $h_{ij} = \frac{t_{ij}}{N^*}$ 가 되며,

$$TC_{ij} = N^* \alpha_{ov} + \frac{\alpha_w Q_{ij} t_{ij}}{2N^*} + \frac{\alpha_r Q_{ij} dt_{ij}}{D} + N^* \alpha_{of}$$

$$= N^* (\alpha_{ov} + \alpha_{of}) + Q_{ij} t_{ij} \left( \frac{\alpha_w}{2N^*} + \frac{\alpha_r d}{D} \right) \quad (14)$$

정해진 버스수요에 대해 버스를 운행하여 서비스를 공급하고자 할 때, 최적 버스보유대수를 구하는 문제는 버스보유대수  $N$ 을 결정변수로 하는 1주일의 총 교통비용을 최소화하는 문제가 된다. 이러한 최적화 문제를 정리하면 다음과 같다.

$$Min \sum_i \sum_j TC_{ij}$$

$$= Min \sum_i \sum_j \begin{cases} \sqrt{2\alpha_w \alpha_{ov} Q_{ij} t_{ij}} + \frac{\alpha_r Q_{ij} dt_{ij}}{D} + N \alpha_{of}, & N_{ij} \leq N \\ N(\alpha_{ov} + \alpha_{of}) + Q_{ij} t_{ij} \left( \frac{\alpha_w}{2N} + \frac{\alpha_r d}{D} \right), & N_{ij} > N \end{cases} \quad (15)$$

위의 최적화 문제는 주어진 다른 값들에 대해  $N$ 을

결정변수로 하는 비선형계획(Non-Linear Programing) 문제로서 현재까지 이론적으로 수학적인 해를 구하는 방법은 알려져 있지 않다. 그러나 위 식은  $N$ 에 비례하는 식과 반비례하는 항의 합으로써, 이는 오목(Convex)함수임을 쉽게 알 수 있으며, 다음에 의해 증명될 수 있다.

$$\frac{\delta^2 \sum \sum TC_{ij}}{\delta N^2} = \sum_i \sum_j \alpha_w Q_{ij} t_{ij} N^{-3} \geq 0, \quad N = \text{양의 정수}$$

따라서 위의 식 (15)의 해는  $N_{max}$ 보다 작은 정수  $N$ 을 차례로 대입하여 최소의 비용을 얻는  $N_{값}$ , 즉  $N^*$ 를 구하는 경험적(Heuristic)인 방법으로 쉽게 해를 구할 수 있다. 이러한 경험적인 방법은 다음 절 사례 연구의 예제를 통하여 잘 보여지고 있다.

## V. 서울특별시 버스노선 사례 연구

### 1. 자료 수집

사례 연구를 위한 자료는 1997년 현재 서울시 시내 버스의 운행자료를 사용하였다. 필요한 자료 항목들은 모형 상에 나타난 변수와 계수들의 값들로서 비용계수  $\alpha_{of}$ ,  $\alpha_{on}$ ,  $\alpha_w$ ,  $\alpha_f$  시간대별 승객수요  $Q_{ij}$ , 시간대별 운행시간  $t_{ij}$ , 왕복운행 거리  $D$ , 평균탑승거리  $d$ 가 있다.

여기서 버스 운영비 비용계수인  $\alpha_{of}$ ,  $\alpha_{on}$ 는 1997년 '서울시 버스개선기획단'에서 버스개혁 종합대책의 일환으로 조사한 버스회사의 항목별 운영비 자료에서 인용하였고, 통행시간 비용계수  $\alpha_f$ 는 기존의 여러 연구에서 제시된 전산업 근로자의 평균임금율의 33.3%를 통행시간가치로 적용하였다. 대기시간 비용계수인  $\alpha_w$ 는 노상에 서서 불편하게 버스를 기다림에 따라 통행시간가치 보다 높은 것으로 알려져 있으나, 정확한 값은 잘 알려져 있지 않은 상태로 본 논문에서는 통행시간가치의 1.5배(평균임금율의 50%)를 가정하여 적용하였다.

분석대상 버스노선으로는 서울시 평균적인 시내버스 노선 중 하나인 300번 도시형 버스를 선택하였고, 1997년 '서울시정개발연구원'에서 수행한 '서울시 교통센서스' 중 '대중교통부문조사'에서 얻은 자료를 활

용하였다. 이러한 입력 자료들은 <표 1>, <표 2>, <표 3>과 같이 정리될 수 있다.

<표 1> 비용계수 및 노선운행 자료

구 분	계 수 값
승객의 대기시간가치( $\alpha_w$ ) <sup>1)</sup>	2734 (원/시)
승객의 통행시간가치( $\alpha_f$ ) <sup>1)</sup>	1823 (원/시)
고정비( $\alpha_{of}$ ) <sup>2)</sup>	12811 (원/시-대)
변동비( $\alpha_{on}$ ) <sup>2)</sup>	3676 (원/시-대)
노선 길이(D: 300번 노선) <sup>3)</sup>	79 Km
승객 평균 탑승거리(d) <sup>1)</sup>	4.15 Km

자료 : 1) 시내버스 개혁 종합 대책(1997. 7. 서울특별시)

2) 서울시 교통센서스 및 데이터베이스 구축(1997, SDI)

<표 2> 요일별/시간대별 버스운행시간 ( $t_{ij}$ )

(단위 : 분/회(왕복))

구 분	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토/일요일
7- 8시	154.9	151.3	154.8	153.9	154.0	154.8
9-10시	162.4	158.8	162.3	161.4	161.6	162.3
11-12시	161.3	157.7	161.2	160.3	160.4	161.2
13-14시	165.2	161.7	165.2	164.3	164.4	165.2
15-16시	172.8	169.2	172.7	171.8	171.9	172.7
17-18시	175.8	172.2	175.7	174.8	175.0	175.7
19-20시	180.5	176.9	180.4	179.5	179.6	180.4
21-22시	165.0	161.4	164.9	164.0	164.1	164.9
23-24시	168.5	164.9	168.4	167.5	167.7	168.4

<표 3> 요일별/시간대별 버스탑승객수 ( $Q_{ij}$ )

(단위 : 인/시)

구 분	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토/일요일
7 -8시	882	773	784	723	827	653
9-10시	578	506	514	474	542	428
11-12시	532	466	472	436	499	493
13-14시	739	647	656	605	693	547
15-16시	902	790	802	739	846	668
17-18시	932	816	829	764	874	690
19-20시	602	527	535	493	564	445
21-22시	471	413	419	386	442	439
23-24시	465	407	413	381	436	344

자료 : 서울시 교통센서스 및 데이터베이스 구축(1997, SDI)

### 2. 요일별/시간대별 최적운행시격

위와 같은 자료를 앞서의 모형에 대입하여 식 (8) 및 식 (9)에 의한 요일별, 시간대별 최적버스운행시격 및 이 운행시격을 유지하기 위한 필요 버스운행대수는 <표 4> 및 <표 5>와 같다.

분석 결과를 보면 첨두시간은 월요일 17~18시대로 나타났고, 이때의 최적운행시격은 5.5분, 최대버스운행대수는 월요일 15~16시 및 17~18시대의 32

〈표 4〉 최적버스운행시격 ( $h_{ij}$ )

(단위 : 분)

구분	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토/일요일
7-8시	5.3	5.6	5.6	5.9	5.5	6.2
9-10시	6.7	7.1	7.1	7.4	6.9	7.8
11-12시	7.0	7.4	7.4	7.7	7.2	7.3
13-14시	6.0	6.3	6.4	6.6	6.2	7.0
15-16시	5.6	5.9	5.9	6.1	5.7	6.5
17-18시	5.5	5.8	5.8	6.1	5.7	6.4
19-20시	7.0	7.4	7.4	7.7	7.2	8.1
21-22시	7.5	7.9	8.0	8.3	7.8	7.8
23-24시	7.6	8.1	8.1	8.4	7.9	8.9

〈표 5〉 버스운행대수 ( $N_{ij}$ )

(단위 : 대/회)

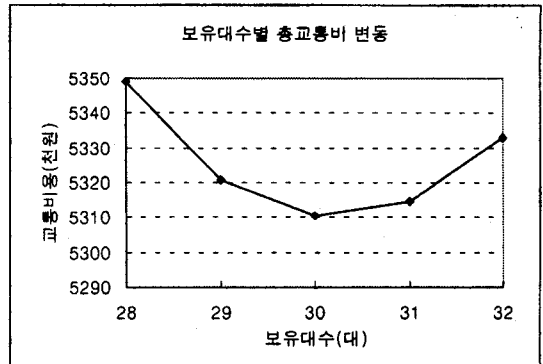
구분	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토/일요일
7-8시	30	27	28	27	29	26
9-10시	25	23	23	22	24	21
11-12시	24	22	22	21	23	20
13-14시	28	26	26	25	27	24
15-16시	22	29	30	29	31	27
17-18시	22	30	31	29	31	28
19-20시	26	25	25	24	26	23
21-22시	22	21	21	20	22	22
23-24시	23	21	21	20	22	19

대로 산출되었다. 그러나 토요일, 일요일 23~24시대에는 19대의 버스만으로도 운행이 가능함을 알 수 있다.

### 3. 최적버스보유대수

예제에서 모든 시간대에 최적버스운행시격을 유지하기 위해 필요한 최대버스대수는  $N_{max} = 32$ 대로 나타났다. 앞에서 언급한 바와 같이 월요일 15~16시 및 17~18시대를 제외한 나머지 시간대에는 이 보다 적은 버스대수로도 운행이 가능하다. 〈표 5〉에서 보는 것처럼 토요일 21~24시대에는 19대가 필요하여, 32대를 보유할 경우 최대 13대의 버스차량이 유휴상태가 되어, 운영에 비효율을 초래하고 있음을 알 수 있다.

따라서 이를 고려하여 추가로 버스운행시격을 조정한다면 이러한 비효율성을 저감할 수 있다. 즉, 앞에서 언급한 것처럼 최대버스보유대수  $N_{max} = 32$ 대에서 1대씩 줄여 가면서 이에 해당하는 버스운행시격을 재 산출하고, 이에 따른 총교통비용을 (15)에 따라 산출한 결과는 〈그림 1〉과 같다.



〈그림 1〉 버스보유대수별 총교통비용의 변화

그림에서 나타난 바와 같이 32대부터 버스보유대수가 감소할수록 총교통비용도 감소하다가 30대에서 최소가 되고, 29대 이하에서는 총교통비용이 다시 증가하는 형태를 보임으로써, 최적버스보유대수는  $N^* = 30$ 대임을 알 수 있다.

최적버스보유대수를 30대로 할 경우 조정된 버스운행시격은 〈표 6〉과 같고, 시간대별, 요일별로 운행에 투입되어야 할 버스대수는 〈표 7〉과 같다.

〈표 6〉 최적버스보유대수에 의해 조정된 버스운행시격

(단위 : 분)

구분	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토/일요일
7-8시	5.3	5.6	5.6	5.9	5.5	6.2
9-10시	6.7	7.1	7.1	7.4	6.9	7.8
11-12시	7.0	7.4	7.4	7.7	7.2	7.3
13-14시	6.0	6.3	6.4	6.6	6.2	7.0
15-16시	5.6	5.9	5.9	6.1	5.7	6.5
17-18시	5.5	5.8	5.8	6.1	5.7	6.4
19-20시	7.0	7.4	7.4	7.7	7.2	8.1
21-22시	7.5	7.9	8.0	8.3	7.8	7.8
23-24시	7.6	8.1	8.1	8.4	7.9	8.9

〈표 7〉 최적버스보유대수에 의해 조정된 버스운행대수

(단위 : 대/회)

구분	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토/일요일
7-8시	30	27	28	27	29	26
9-10시	25	23	23	22	24	21
11-12시	24	22	22	21	23	20
13-14시	28	26	26	25	27	24
15-16시	22	29	30	29	31	27
17-18시	22	30	31	29	31	28
19-20시	26	25	25	24	26	23
21-22시	22	21	21	20	22	22
23-24시	23	21	21	20	22	19

조정된 결과를 보면 2개의 시간대에서 필요한 운행 버스대수 32대가 30대로 조정되었고, 3개의 시간대에

서 필요한 운행버스대수 31대가 30대로 조정되었다. 이에 따라 이들 시간대에서의 운행시격도 조정되었으나. 조정된 대수가 1~2대에 불과하여 조정된 차이는 그다지 크지 않게 나타났다.

## VI. 결론

본 연구는 요일별, 시간대별로 변화하는 실제 도로 교통상황에 따라 동일한 노선일지라도 버스의 운행시간과 버스 승객수가 달라지는 현실적인 여건을 고려하여 요일별, 시간대별로 동적인 최적버스운행시격을 구하는 모형을 개발하였다. 또한 1주일의 총교통비용을 최소화하는 버스보유대수를 구하고, 이에 따라 최적버스운행시격을 보정하는 과정을 정립하였다. 이러한 모형을 서울시 시내버스 노선에 적용한 사례 연구를 수행한 결과 총교통비용을 상당히 절감하는 효과를 얻을 수 있음을 입증하였다.

본 연구의 결과와 같이 실제 노선버스의 시간대별로 버스운행시격을 조정하고, 최적버스보유대수의 개념을 도입한다면 더욱 효율적인 버스운영을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 본 연구에서는 과거의 운행자료에 의한 요일별, 시간대별 최적버스운행시격을 구했으나, 실제 버스의 운행은 실시간으로 교통여건에 따라 달라질 수 있으며, 이러한 실시간적인 교통여건 변화에 따른 실시간 버스배차계획은 제시하지 못하고 있다. 과거의 평균적인 운행패턴과 달리 실시간적으로 운행시간이 변화하는 경우, 이에 대한 별도의 대응방법이 요구된다.

최근 지능형교통시스템의 일환으로 버스도착안내

시스템과 같은 첨단시스템들이 도입되고, 실시간으로 버스의 위치 등 버스의 운행상황을 파악할 수 있게 됨에 따라, 실시간 버스배차계획 수립의 필요성이 대두되고 있으며, 이와 같은 분야로의 적용을 위한 과제들이 향후에 계속적으로 연구되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 장성진(1996, 12), "버스 크기에 관한 해석적 연구", 명지대학교 석사학위논문
2. 서울시정개발연구원(1997), "서울시 교통센서스 및 데이터베이스 구축"
3. 서울특별시(1997, 7), "시내버스 개혁 종합대책"
4. 윤항목(1995), "최적 버스 크기의 결정을 위한 해석적 연구", 대한교통학회지, 제13권, 제1호, pp.113~123.
5. J. O. Jansson(1980), "A Simple Bus Line Model for Optimization of Service Frequency and Bus Size", Journal of Transport Economics and Policy 14, pp.53~80.
6. P. G. Furth and H. M. Wilson Nigel(1981), "Setting Frequencies on Bus Route : Theory and Practice", TRR 818, pp.1~7.
7. A. Ceder(1981), "Practical Methodology for Determining Dynamic Changes in Bus Travel Times", TRR 798, pp.18~22.
8. Kurt Ker-Tshung Lee, Sharon H. F. Kuo, and Paul M. Schonfeld(1995), "Optimal Mixed Bus Fleet for Urban Operations", TRR1503, pp.39~48.