

□ 論 文 □

구역분할 버스운영에 관한 연구

- 2-구역분할 운영의 경우 -

A Study on Zonal Operation of Buses

- 2-Zonal Operation Case -

高 承 永

(명지대학교 교통공학과 조교수)

李 亮 鎬

(명지대학교 대학원 석사과정)

목 차

- I. 서 론
- II. 선행연구 고찰
- III. 2-구역분할 버스운영의 모형
 - III-1. 모형의 정립
 - III-2. 목적함수
 - III-3. 교통비용 모형
- IV. 구역분할 버스운영기법의 분석
 - IV-1. 버스운영비용 및 승객대기시간비용
 - IV-2. 승객통행시간비용
 - IV-3. 총교통비용
- V. 사례 연구

ABSTRACT

In most cities, travel demand is distributed along long corridors and its destinations tend to concentrate in a central business district. For this kind of many-to-one or one-to-many travel demand pattern, a zonal operation of buses can be an efficient bus operation technique in which a long bus-demand corridor is divided into several service zones and each service zone is provided with its own bus route connecting the service zone and single destination separately.

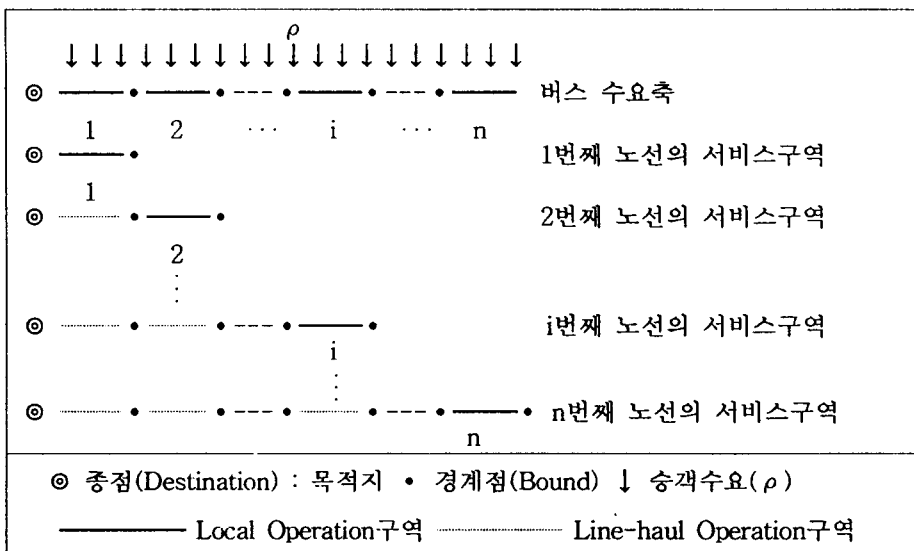
This paper develops models of the total transportation costs for a single-zone operation and 2-zonal operation of buses for a long demand corridor with single destination in terms of various cost parameters, demand density, bus operation speeds, and location of the boundary between two service zones. In this study the total transportation cost is assumed to consist of the bus operation cost, passenger waiting cost and passenger travel time cost. It was proved that a zonal operation of buses can be more efficient than a single-zone operation for certain circumstances of the system and a boundary condition between two operation techniques was obtained. Also, several case studies were performed for various values of the cost parameters.

I. 서론

교통축을 따라 길게 분포된 통행수요에 대해 대중교통, 특히 버스서비스를 제공하는데 있어서 일반적으로 많이 사용되는 운영기법은 하나의 노선을 전체 축 상에 운영(단일구역 운영기법)하는 것이다. 이러한 운영기법은 교통축이 짧은 경우에는 별 다른 문제점이 없이 가장 효율적인 기법이 될 수 있으나, 교통축이 길어지는 경우에는 여러 가지 문제점이 발생하게 된다. 이러한 문제점들로서는 첫째, 노선의 길이가 길어짐에 따른 장거리노선의 정시성 미비, 운전자 근로여건 열악 등의 사항이다. 둘째, 긴 노선구간의 많은 정류장에서 정차하여 승 하차 서비스를 제공하게 되어 운행시간이 길어지게 되고, 장거리를 통행하는 승객의 경우 중간의 불필요한 정차시간으로 인해 버스서비스수준이 저하되고 결국 다른 교통수단으로 전환하게 만드는 요인으로까지 작용할 수 있다. 특히 많은 도시에서 관찰되는 도심을 목적지로 하는 오전

의 many-to-one의 형태에 가까운 통행수요분포의 경우에는 이러한 비효율성이 더욱 크게 나타나게 된다.

이러한 경우에 고려할 수 있는 효율적인 버스운영기법의 하나로써 “구역분할 버스운영(Zonal operation of buses)”을 들 수 있다. 구역분할 버스운영기법은 길다란 수요축을 2 개 이상 여러 개의 서비스구역으로 분할하여 각 서비스구역마다 도심과 직행으로 연결하는 버스노선을 제공하는 개념이다. 여기서 한 서비스구역을 담당하는 버스노선은 그 서비스구역에서만 정차하여 승 하차서비스(완행서비스 : Local Service)를 제공하고, 이 서비스구역의 경계점부터 목적지가 집중된 도심까지는 정차하지 않고 직행으로 운행(비정차서비스 : Line-haul Service)하는 것이다. 이러한 구역분할 버스운영의 개념을 그림으로 나타내면 < 그림 1 > 과 같다. 여기서는 전체수요축을 n 개로 분할하여 n 개의 노선으로 버스서비스를 제공하는 것을 보여주고 있다.



< 그림 1 > 구역분할 버스운영기법의 개념

본 논문은 도심을 목적지로 하는 버스수요가 길다란 교통축을 따라 분포되어 있는 경우에 대하여 구역분할 버스운영의 서비스를 제공하는 기법의 개념을 정의하고, 버스운행비용, 승객 대기비용, 승객통행시간비용의 합인 총교통비용을 목적함수로 하여 단일구역 운영기법과 2-구역분할 운영기법의 비용모형을 수립하여, 두 운영기법을 비교 분석하였다. 여기에서 각 운영기법의 효율적인 조건을 구하고, 어떠한 요인들이 최적의 운영기법에 대해 영향을 미치는지를 파악하며, 가상적인 사례분석을 수행하였다.

II. 선행연구 고찰

버스를 포함한 대중교통노선(Network)에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 구역분할 버스운영기법도 크게 대중교통노선의 연구분야에 해당하는 것으로서, 주어진 수요분포에 대해 효율적인 버스서비스를 제공하고자 하는 목적을 지니고 있다. 구역분할 버스운영에 대한 지금까지의 연구를 간략히 고찰해 보면 다음과 같다.

Eisele, Morlok, Vandersypen^{[4][8]}을 포함한 몇몇의 학자들은 대부분의 수요가 중심업무지구(CBD)를 목적지로 하는 통근철도의 운영에 대해 구역분할 운영기법의 개념을 소개하고, 비정차서비스(Line-haul Service)와 완행서비스(Local Service)의 효율적인 스케줄링에 대해 연구하였다. Pollan^[10]은 버스에 대한 구역분할 운영에 대해 연구하였는데 여기서는 모형을 수립하고 최적의 구역분할 경계점을 도출하였다. 한편 Powell^[11]은 이러한 구역분할 운영의 개념을 고층건물의 승강기의 설계에 대해 적용하고, 동적수리계획법(Dynamic Mathematical Programming)을 사용하여 해를 구하는 방법을 제시하였다.

이 밖에 Furth^[9]는 버스운영자의 측면에서 분

할된 구역의 수, 구역분할 경계점, 버스대수를 변수로 하는 구역분할 버스운영이 모형을 개발하고, 최적의 구역을 분할하는 동적수리계획모형을 제안하였다. 또한 Turnquist^{[6][13]}와 Jordan^[6]은 오전첨두시 버스서비스의 구역분할 모형을 개발하고, 서비스의 신뢰성과 평균통행시간을 목적함수로 하는 최적의 구역분할해를 구하였다. Kocur^[7]는 수익, 비용, 사용자편익을 목적함수로 하여 버스의 구역분할 운영기법의 개념을 2 차원의 면으로 확대하고 최적노선간격 및 구역분할 길이, 배차시간(Headway)을 구하는 모형을 개발하였다.

이와 유사한 구역분할 운영기법에 대해 최적해(구역분할, 배차시간 등)를 구하는데 있어서 Tsao와 Schonfeld^[12]는 뉴턴 알고리즘(Newton Algorithm)과 미적분학을 이용하는 방법을 제시하였고, Ghoneim과 Wirashinghe^[5]는 연속체 방정식을 이용하는 방법을 제시하였다.

그러나 구역분할 버스운영에 대한 지금까지의 많은 연구는 일반적인 모형의 개발과 복잡한 최적해를 구하는 방법에 대해 집중되어 왔을 뿐, 구체적으로 어떠한 요인들이 이러한 구역분할 운영의 타당성을 제공하고 그 영향의 크기가 어느 정도인지에 대해서는 연구가 소홀하였다. 또한 구역을 분할하는데 있어서 3개 이상의 구역분할은 현실적으로 타당성이 낮음을 감안할 때 복잡한 모형의 최적해를 구하는 데에만 비효율적인 노력을 집중한 바 있다. 본 연구는 현실적으로 타당한 2-구역분할에 대해서만 연구의 범위를 제한하고, 가능한 한 모형을 단순화하여 단일구역 운영에 비해 구역분할 운영이 우수한 조건들을 명확히 파악하며, 최적의 구역분할 경계점에 대한 분석을 집중하였다. 또한 현실에 가까운 사례연구를 통하여, 각 변수에 따른 최적해의 변화를 면밀히 분석하도록 하였다.

Ⅲ. 2-구역분할 버스운영의 모형

Ⅲ. 1 모형의 정립

본 연구에서 고려하는 2-구역분할 버스운영과 단일구역 버스운영의 개념을 그림으로 살펴보면 < 그림 2 >와 같다.

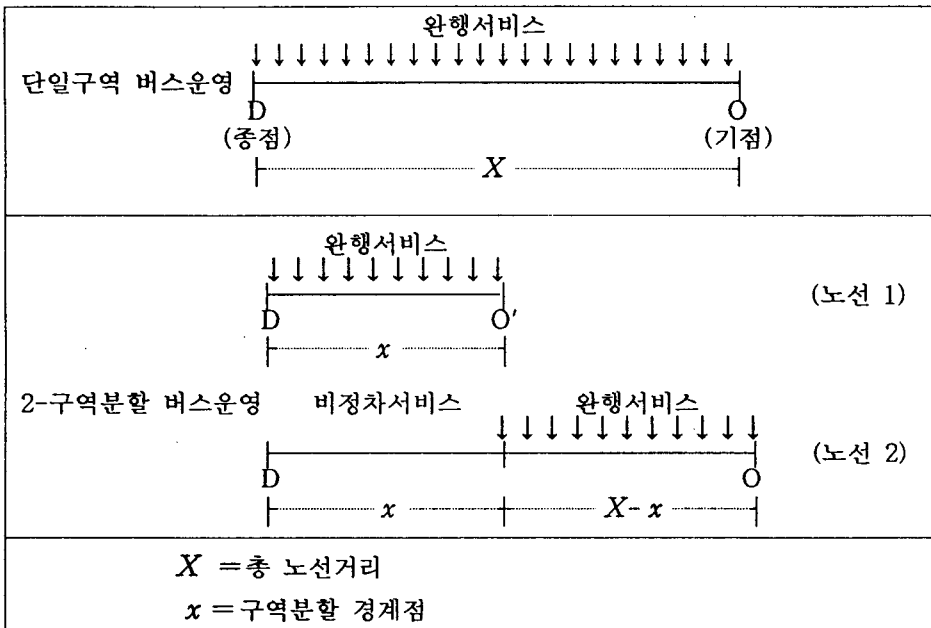
버스서비스를 제공하는 전체축의 길이는 X 로 하고 이 수요축 상에서의 수요분포는 ρ 로 균일하고 모두 도심과 같은 하나의 목적지를 지나는 many-to-one 형태로 가정하였다. 여기서 단일구역 버스운영의 경우 전체수요축 X 에 대해 하나의 버스노선을 운영하고 전구간에서 완행서비스를 제공하는 것이며, 2-구역분할운영의 경우 목적지 D 에서 거리 x ($0 \leq x \leq X$)까지의 구역(구역 1)과 x 에서부터 X 까지의 구역(구역 2)의 2개 구역에 대해 별도의 버스노선을 운영하여 구역 1의 버스노선은 목적지를 포함하

는 구역 내에서 완행서비스를 제공하고, 구역 2의 버스노선은 서비스구역 내에서는 완행서비스로 운행하되, 목적지 D 에서 x 의 구간에서는 정차하지 않고 운행하는 비정차운행(Line-haul) 서비스를 제공하는 것이다.

Ⅲ. 2 목적함수

도시지역에서 버스노선망의 설계에 있어서의 목표는 도시 및 도시의 교통여건에 따라 여러 가지가 있을 수 있다. 일반적으로 많이 사용되는 목표들로서는 서비스개선, 승객수의 극대화, 이윤의 극대화, 총교통비용의 최소화 등이 있다.

본 연구에서는 사회 전체적인 측면에서 총교통비용의 최소화를 목적함수로 하였다. 일반적으로 총교통비용은 운영자비용, 사용자비용, 사회적비용의 합으로 정의될 수 있다. 그러나 이 비용항목들 중 사회적비용은 구하기도 매우 복

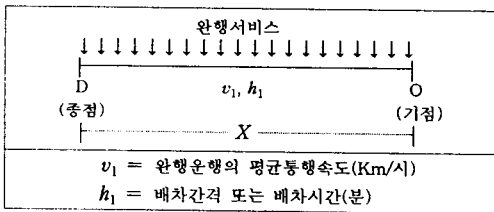


< 그림 2 > 단일구역 및 2-구역분할 버스운영기법의 개념

잡하고 어려울 뿐 만 아니라, 본 연구목적과는 직접적인 관련이 없으므로 비교에서 제외하고, 본 연구에서는 운영자비용과 사용자비용의 합만을 총교통비용으로 가정하고 모형을 개발하였다. 운영자비용은 버스노선의 운영에 필요한 비용으로서 본 연구에서는 버스구입비와 같은 자본비용과 운영비용을 하나의 항목으로 보아 버스운행시간에 비례하는 함수로 설정하였다. 사용자비용은 일반적으로 승객접근비용, 대기시간비용, 통행시간비용의 합으로 볼 수 있다. 여기서 접근비용은 접근수단 및 정류장 위치와 관련된 것으로서 본 연구에서 분석하는 구역분할 운영기법과는 무관한 것으로 보고 분석에서 제외하고, 단지 대기시간비용과 통행시간비용이 합을 사용자 비용으로 보았다. 결국 목적함수인 총교통비용은 운영비용, 승객대기시간비용, 승객통행시간비용의 합으로 설정하였다.

III. 3 교통비용 모형

▣ 단일구역 버스운영기법



< 그림 3 > 단일구역 버스운영기법

· 운행비용 $C_{ol} = (\text{단위시간당 운행비용}) \times (\text{운행시간}) \times (\text{단위시간당 운행대수})$

$$= (\alpha_o) \cdot \left(\frac{X}{v_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{h_1}\right) = \frac{\alpha_o}{v_1 h_1} \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

· 승객대기비용 $C_{wl} = (\text{단위시간당 승객대기비용}) \times (\text{평균 대기시간}) \times (\text{승객수})$

$$= (\alpha_w) \cdot \frac{h_1}{2} \cdot (\rho \cdot X) = \frac{\alpha_w h_1 \rho X}{2} \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

· 승객통행시간비용 $C_{tl} = (\text{단위시간당 승객통행시간비용}) \times (\text{평균 승객통행시간}) \times (\text{승객수})$

$$= (\alpha_t) \cdot \frac{X}{2v_1} \cdot (\rho \cdot X) = \frac{\alpha_t \rho X^2}{2v_1} \quad \langle \text{식 3} \rangle$$

여기서, $h_1 = \text{배차간격(시간)}$,

$v_1 = \text{평균통행속도(Km/시)}$

$\rho = \text{승객수요(명/Km-시)}$,

$\alpha_o = \text{운행비용계수(원/시)}$

$\alpha_w = \text{승객대기비용계수(원/명-시)}$,

$\alpha_t = \text{승객통행시간비용계수(원/명-시)}$

$X = \text{전체 노선구간 길이(Km)}$

버스운행비용의 경우 일반적으로 인건비, 연료비, 차량감가상각비, 유지관리비 등 다양한 항목으로 구성되어 있으나, 여기서는 분석의 단순화를 위하여 단지 운행시간에 비례하는 함수로 가정하였다. 물론 버스운행비용의 정확한 비용모형을 설정할 수는 있으나, 여러 변수를 포함한 복잡한 비용모형을 설정할 경우 분석이 복잡해지고 중요한 요인을 파악하기 어려워지게 되며, 또한 본 분석의 결과와는 무관한 여러 변수들을 모형에 넣는 것은 비효율적인 것으로 판단하여 <식 1>과 같은 단순한 모형을 사용하였다.

승객대기비용의 경우 평균대기시간에 비례하는 단순한 모형을 사용하였다. 여기서 평균대기시간은 정확하게는 실제 배차간격의 분포에 따라 달라지게 되나, 버스들이 정확하게 계획된 배차간격 h_1 에 따라 도착하는 것으로 가정하여 $h_1/2$ 로 보았다. 승객통행시간비용의 경우도 평균통행시간에 비례하는 것으로 가정하고, 여기서 평균통행시간은 노선길이의 1/2을 통행하는 시간으로 가정하여 <식 3>과 같이 설정하였다. 실제 승객평균통행시간은 수요분포와 구간내

운행속도의 변화에 따라 복잡한 모형을 요구하나, 본 논문의 목적이 해석적인 해를 구하는데 있으므로 가능한 한 단순한 비용모형을 사용하도록 하였다.

위의 세 가지 비용을 합한 단일구역 버스운영기법의 총교통비용 TC_1 은 다음과 같다.

$$TC_1 = \frac{a_0 X}{v_1 h_1} + \frac{a_w h_1 \rho X}{2} + \frac{a_1 \rho X^2}{2v_1} \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

여기서 배차간격 h_1 은 운행기법에 관계없이 항상 최적의 상태로 결정되는 것으로 볼 때, 버스용량에 제한이 없다고 가정하면 총교통비용을 최소화하도록 아래와 같이 최적화될 수 있다.

$$\frac{\partial TC_1}{\partial h_1} = 0, \therefore h_1 = \sqrt{\frac{2a_0}{a_w \rho v_1}} \quad \langle \text{식 5} \rangle$$

이 최적 배차간격 h_1 을 <식 4>에 대입하면, 배차간격의 변수가 소거된 총교통비용이 수식을 <식 6>과 같이 구할 수 있다.

$$TC_1 = \sqrt{\frac{a_w a_0 \rho}{2v_1}} X + \sqrt{\frac{a_w a_0 \rho}{2v_1}} X +$$

(운영비용) (승객대기비용)

$$\frac{a_1}{2v_1} \rho X^2 \quad \langle \text{식 6} \rangle$$

(승객통행시간비용)

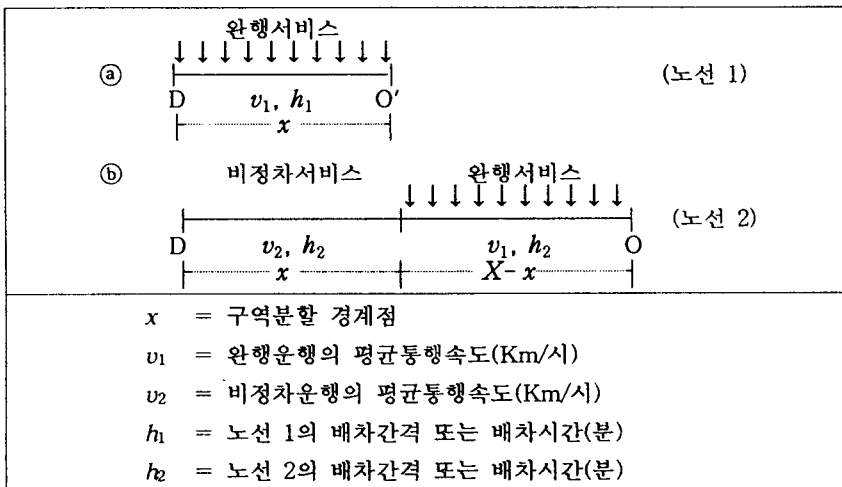
여기서 중요한 결과는 배차간격을 최적화할 때 운행비용과 승객대기비용이 같아지게 된다는 점이며, 이러한 사항은 일반적으로 잘 알려져 있는 결과이기도 하다.

■ 2-구역분할 버스운영기법

앞서 단일구역 버스운영기법의 항목별 비용모형을 수립하는 개념 및 과정과 동일한 개념 및 과정을 사용하여 2-구역분할 버스운영기법 상 두 노선의 비용을 구하고 이를 항목별로 구분하여 더한 결과는 다음과 같다.

$$\text{버스운영비용 } C_{02} = \frac{a_0 x}{v_1 h_1} + \frac{a_0}{h_2} \left[\frac{(X-x)}{v_1} + \frac{x}{v_2} \right]$$

<식 7>



< 그림 4 > 2-구역분할 버스운영기법

$$\begin{aligned}
 \text{승객대기시간비용 } C_{w2} &= \frac{a_w \rho x}{2} h_1 + \\
 &\quad \frac{a_w \rho (X-x)}{2} h_2
 \end{aligned}$$

〈식 8〉

승객통행시간비용

$$C_{t2} = \frac{a_t \rho}{2v_1} x^2 + a_t \rho (X-x) \left[\frac{(X-x)}{2v_1} + \frac{x}{v_2} \right]$$

〈식 9〉

2-구역분할 버스운영기법의 총교통비용은 위의 세 가지 비용항목을 더한 것으로서, 앞서와 같이 각 구역 버스노선의 배차간격 h_1, h_2 를 최적화하여 구한 결과는 〈식 10〉과 같다.

$$\begin{aligned}
 TC_1 &= \sqrt{\frac{2a_0 a_w \rho}{v_1}} x + \\
 &\quad \sqrt{2a_0 a_w \rho (X-x) \left[\frac{(X-x)}{v_1} + \frac{x}{v_2} \right]} + \\
 &\quad \frac{a_t \rho}{2v_1} x^2 + a_t \rho (X-x) \left[\frac{(X-x)}{2v_1} + \frac{x}{v_2} \right]
 \end{aligned}$$

〈식 10〉

IV. 구역분할 버스운영기법의 분석

앞서 설정한 2 가지 버스운영기법의 항목별로 그리고 총교통비용에 대한 비용모형을 사용하여 본 절에서는 여러 변수들이 두 기법의 비용에 대해 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고, 최적해를 구하는 시도를 하였다. 먼저 구역분할 버스운영기법에서 구역분할의 경계점 x 가 $x=0$ 인 경우와 $x=X$ 인 경우를 보면 모든 항목별 비용이 같아지고, 결국 두 기법이 동일한 것을 알 수 있다.

IV.1 버스운행비용 및 승객대기시간비용

〈표 1〉에 나타난 바와 같이 두 기법 모두에 대해 배차간격을 최적화했을 경우 버스운행비용과 승객대기시간비용이 같아지는 것을 언급한 바 있다. 따라서 이 두 비용항목은 항상 같아지게 되며, 비교 분석에서도 하나의 항으로 볼 수 있다. 이 비용항목은 단일구역 버스운영기법의 경우 운행비용계수(α_0), 승객대기시간비용계수(α_w), 승객수 ρ 의 1/2 승에 비례하고 버스운행속도 v_1 의 1/2 승에 반비례함을 알 수

〈 표 1 〉 두 버스운영기법의 항목별 비용

노선 비용	단일구역 버스운영 (Local)	구역분할 버스운영 (Local & Line-haul Service)
운행 비용 (C_0)	$\sqrt{\frac{a_w \alpha_0 \rho}{2v_1}} X$ [C_{01}]	$\sqrt{\frac{a_0 \alpha_w \rho x^2}{2v_1}} + \sqrt{\frac{a_0 \alpha_w \rho (X-x)}{2} \left[\frac{(X-x)}{v_1} + \frac{x}{v_2} \right]}$ [C_{02}]
승객 대기 비용 (C_w)	$\sqrt{\frac{a_w \alpha_0 \rho}{2v_1}} X$ [C_{w1}]	$\sqrt{\frac{a_0 \alpha_w \rho x^2}{2v_1}} + \sqrt{\frac{a_0 \alpha_w \rho (X-x)}{2} \left[\frac{(X-x)}{v_1} + \frac{x}{v_2} \right]}$ [C_{w2}]
승객 통행 시간 비용 (C_t)	$\frac{a_t \rho}{2v_1} X^2$ [C_{t1}]	$\frac{a_t \rho}{2v_1} x^2 + a_t \rho (X-x) \left[\frac{X-x}{2v_1} + \frac{x}{v_2} \right]$ [C_{t2}]

있다. 2-구역분할 버스운영기법의 경우 단일구역 버스운영기법과 모두 동일하나 추가로 비정차운행속도 v_2 의 1/2 승에 반비례하고, 경계점의 위치 x 에 따라 비용이 변화함을 알 수 있다.

두 기법의 이 비용항목을 비교해 보면 경계점 x 의 값에 따라 달라지는 것을 알 수 있는데, $x = 0, X$ 의 경우에 두 기법의 비용이 같아지게 되고, $0 < x < X$ 의 경우에는 2-구역분할 버스운영기법의 비용이 항상 단일구역 버스운영기법의 비용보다 크다는 것을 입증할 수 있다. 즉, 구역분할을 하여 버스서비스를 제공하는 경우 버스운행비용과 승객대기시간비용이 항상 더 커지게 됨을 알 수 있다. 이를 상세히 분석해 보면, 구역분할을 함으로써 버스운행시간이 더 커지게 되고, 또한 구역을 분할하여 2 개의 노선을 운행하게 됨에 따라 노선당 승객수요가 감소하고 최적 배차간격이 길어지게 되어 승객대기시간도 길어지게 됨을 나타내고 있다. 2-구역분할에 따른 이러한 버스운행비용과 승객대기시간비용의 증가는 이러한 측면에서 2-구역분할 버스운영기법이 항상 비효율적임을 말하는데, 이러한 비효율성은 다음의 승객통행시간비용의 감소로 상쇄될 수 있다.

IV. 2 승객통행시간비용

승객통행시간비용은 <표 1>에 나타난 바와 같이 승객통행시간비용 계수(α)와 승객수요 ρ 에 비례하고, 운행속도 v_1, v_2 에 반비례함을 알 수 있다. 두 기법의 승객통행시간 비용을 동일한 항을 상쇄하고 비교해 보면, 단일구역 운영기법의 경우 $\frac{\alpha \rho}{v_1} x(X-x)$ 가 남게 되고, 2-구역분할 운영기법의 경우 $\frac{\alpha \rho}{v_2} x(X-x)$ 가 남게 됨을 알 수 있다.

즉, 승객통행시간비용의 경우 비정차운행의 속도 v_2 가 완행운행의 속도 v_1 보다 크므로 항

상 2-구역분할 버스운영기법이 저렴한 비용으로 효율적인 것을 알 수 있다. 이를 상세히 분석해 보면 2-구역분할 버스운영기법의 경우 구역 1의 승객통행시간비용은 단일구역과 동일하나, 구역 2의 승객통행시간은 종점에서 거리 x 까지 비정차운행을 함에 따라 그 만큼 비용이 절감됨을 의미한다.

IV. 3 총교통비용

앞서 버스운행비용/승객대기비용과 승객통행시간비용의 비교 분석에서 나타난 바와 같이, 버스운행비용/승객대기시간비용은 항상 단일구역 버스운영기법이 효율적이고, 승객통행시간비용은 2-구역분할 버스운영기법이 효율적인 것을 보았다. 총교통비용의 경우에는 이 두 가지 비용항목의 차이 중 어느 것이 더 큰가에 따라 두 기법의 총교통비용의 크기가 결정되게 되는데, 2-구역분할 버스운영에 의한 버스운행비용/승객대기비용의 증가가 승객통행시간비용의 절감보다 크면 단일구역 버스운영이 효율적이 되며, 반대로 작으면 2-구역분할 버스운영이 효율적이 된다. 이 비용항목들의 크기는 $\alpha_0, \alpha_w, \alpha, \rho, v_1, v_2$ 및 x 에 따라 결정되게 된다. α_0, α_w 가 커지면, 즉 시간당 버스운행단가와 대기비용계수가 커지면 단일구역 버스운영에 유리하게 작용하고, α 와 v_2/v_1 의 값이 커지면, 즉 통행시간비용계수와 완행운행과 비정차운행의 속도차가 커지게 되면 2-구역분할 버스운영에 유리하게 작용함을 알 수 있다. 즉, 단일구역 버스운영기법은 x 와 무관하게 일정한 반면, 2-구역분할 버스운영기법의 버스운행비용과 승객대기시간비용은 x 의 함수로서 전체적으로 위로 볼록한(Convex) 함수형태로 나타나고, 승객통행시간비용은 아래로 오목한(Concave) 함수형태로 나타남을 의미하는 것이다.

두 운영기법에 의한 비용의 차이는 <식 11>과 같이 산출될 수 있으며, 이 차이가 양(+)인 가 또는 음(-)인가에 따라 두 기법 중의 우수성이 판단될 수 있다.

$$\Delta TC_{2-1} = \sqrt{2a_o a_w \rho} \left(\frac{x}{\sqrt{v_1}} + \sqrt{(X-x) \left[\frac{X-x}{v_1} + \frac{x}{v_2} \right]} - \frac{X}{\sqrt{v_1}} \right) + a_i \rho \left(\frac{x^2}{2v_1} + (X-x) \left[\frac{Xv_2 - xv_2 + 2v_1x}{2v_1v_2} \right] - \frac{X^2}{2v_1} \right) \geq 0$$

< 식 11 >

위의 < 식 11 >의 해를 변수 $\lambda = x/X$ 에 대해 정리해 보면 < 식 12 >와 같다.

$$\frac{\sqrt{v_1 v_2}}{\lambda(v_1 - 1)} \cdot \left(\sqrt{v_1 + \frac{\lambda}{1-\lambda}} - \sqrt{v_1} \right) \geq \sqrt{\frac{a_i^2 \rho X^2}{2 a_o a_w}}$$

< 식 12 >

윗 식은 좌변이 우변에 비해 크게 되면 단일구역 버스운영이 우수하고, 반대의 경우 2-구역 분할 버스운영이 우수하게 되는 경계조건을 나타낸 것이다.

V. 사례 연구

앞서와 같은 연구결과를 활용하여 실제 우리나라의 도시지역에서 운행되는 시내버스의 자료를 활용하여 가상적인 사례연구를 수행하였다. 여기서 운행속도, 승객수요, 버스운행비용당가에 대한 자료는 도시마다 다르고, 또한 한 도시에서도 노선마다 다르게 나타나고 있어서 이

들을 가장 잘 대표하는 근사치로 < 표 2 >와 같은 자료를 사용하도록 하였다.^{[1][2][3]} 또한 버스서비스를 제공하고자 하는 버스수요측의 길이는 $X = 10 \text{ Km}$ 로 가정하였다. 그러나 본 사례연구에서 가정한 이 버스수요측의 길이는 실제 상황에서는 달라질 수도 있을 것이다.

< 표 2 > 사례연구의 사용자료

계수(Parameter)	값
v_1	20 Km/시
v_2	40 Km/시
ρ	100 명/Km-시
a_o	20,000 원/시
a_w	2,000 원/명-시
a_i	1,000 원/명-시

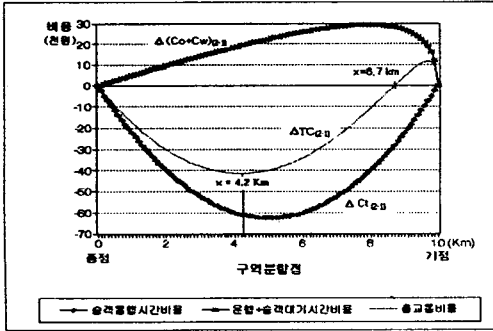
앞서 개발된 비용모형에 위와 같은 사례의 자료를 적용하여 산출된 총교통비용 결과는 아래와 같고, 항목별 비용과 총교통비용을 그래프로 그려보면 < 그림 5 >와 같다.

$$TC_1 = 450,000 \text{ 원/시}$$

$$TC_2 = 2500x^2 - 5000x + \sqrt{2 \cdot 10^8 x^2 - 6 \cdot 10^8 x + 4 \cdot 10^{10}} + 250,000 \text{ 원/시}$$

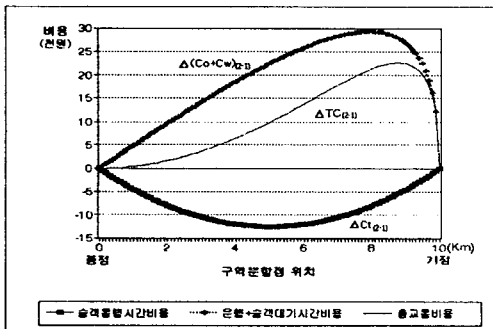
즉, 두 운영기법의 총교통비용이 같아지는 점은 $x = 0, 8.7, 10$ (즉, $\lambda = 0, 0.87, 1$) 의 세 값이 되며, 이 중 $x = 8.7$ 은 이 사례연구의 경우 $x = 8.7 \text{ Km}$ 에서 구역분할을 하게 되면, 두 기법의 총교통비용이 동일하게 되며, 이 점의 왼쪽에서 구역분할이 단일구역 버스운행보다 유리하고, 이 점의 우측에서의 구역분할은 비효율적임을 의미한다. 구역분할을 하는 경우 최적의 분할점은 두 비용차가 가장 커지게 되는 $x = 4.2 \text{ Km}$ 이며, 이러한 경우 구역분할이

효율적인 버스운영방법이 될 뿐 아니라, 최적의 운영방법이 됨을 의미한다.



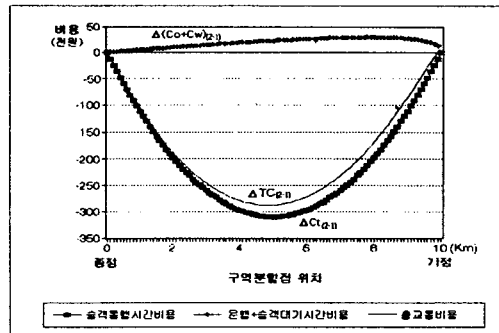
〈그림 5〉 사례연구의 교통비용

또한 앞서의 분석에서 제시된 바와 같이 구역분할 버스운영방법의 효과가 승객통행시간비용의 절감에 기인한다는 결과를 기초로 하여, 〈표 2〉에서 사용된 자료 값들 중 다른 값들은 변하지 않고, 단지 승객통행시간비용계수 값만이 큰 경우와 작은 경우의 사례연구를 수행하였다. 먼저 앞서의 사례연구와는 달리 승객통행시간비용계수 α 값을 200 원/명-시 로 낮게 볼 때는, 그 결과가 〈그림 6〉과 같이 나타나게 된다. 이 경우는 구역분할에 의한 승객통행시간비용의 절감이 매우 작아서, 어떠한 위치에서도 구역분할이 바람직하지 않은 경우가 된다.



〈그림 6〉 통행시간비용계수가 작은 경우의 사례

반대로 승객통행시간비용계수 α 값을 5,000 원/명-시 로 높게 하는 경우, 〈그림 7〉과 같은 결과가 나타나게 되는데, 이 경우는 구역분할에 의한 승객통행시간비용의 절감효과가 버스운행비용/승객대기시간비용의 증가를 충분히 상쇄하게 되어, 어느 점에서 구역분할을 하여 운영하여도 항상 단일구역운영보다는 유리한 상황임을 보여주고 있다.



〈그림 7〉 통행시간비용계수가 큰 경우의 사례

Ⅶ. 결론

본 연구는 구역분할 버스운영방법의 개념을 소개하고, 버스운행비용, 승객대기시간비용, 승객통행시간비용의 합인 총교통비용을 목적함수로 하는 모형을 개발하여, 2-구역분할 및 단일 구역 운영방법의 효율성에 영향을 주는 요소를 파악하고 분석하였다. 또한 여러 개의 가상적인 사례연구를 통하여 구역분할 버스운영방법의 타당성을 입증하였다. 버스의 시간당 운행비용, 승객의 대기시간비용계수 및 통행시간비용계수, 버스운행속도 등에 따라 구역분할 버스운영방법은 효율적인 운영방법이 될 수 있음을 살펴 보았다. 특히, 승객통행시간비용 계수값 및 비정차운행속도/완행운행속도비가 상대적으로 커지면 구역분할 버스운영방법이 더욱 타당성을

가질 수 있음을 보았다. 사례연구에서는 버스수요축의 길이가 10Km 인 경우에 대해서만 분석을 수행하였으나, 10Km 가 아닌 경우에도 조건은 다소 다르겠으나 구역분할 버스운영이 효율적일 수 있다는 결론을 얻을 것으로 기대할 수 있다.

본 연구는 많은 도시에서 발생하는 도심과 같은 통행목적지의 밀집지역을 향해 교통축을 따라 운행되는 버스서비스를 제공하는 경우 구역분할 버스운영이 효과적으로 활용될 수 있으며, 특히 우리 나라와 같이 신도시의 개발로 서비스구간의 길이가 증가하는 상황에서는 이러한 기법의 도입을 적극적으로 고려해 볼 수 있음을 제시하였다.

그러나 본 연구에서는 비용모형 수립시 최적배차간격을 설정함에 있어서 버스용량과 총 버스보유대수에 제한이 없음을 가정하였다. 비록 본 연구의 결과가 이러한 가정과는 큰 영향 없이 적용될 수 있다고 하더라도, 실제 수요가 높은 경우 용량의 제한을 받을 수 있으며, 총버스대수에 대한 현실적인 제약도 뒤따를 수 있음을 고려해야 할 것이다.

이 밖에 본 연구의 사례연구에서는 승객통행 시간비용계수가 다른 몇 가지 경우에 대해서만 분석을 수행하였는데, 구역분할버스운영의 승객통행시간비용 절감효과를 비정차운행의 상대적인 속도에 따라서도 달라질 수 있음을 알 수 있는 바, 구간별 통행속도의 변화에 따른 분석도 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 현실적으로 2-구역으로만 분할하는 경우에 대해 분석을 수행하였는 바, 아주 긴 교통축이나 장거리 버스의 경우 3 개 이상의 여러 구역으로 분할할 수도 있음을 고려하고 이에 대한 계속적인 연구가 요구되고 있다.

참 고 문 헌

1. 교통개발연구원, 교통투자재원 조달 방안에 관한 연구, 1988
2. 교통개발연구원, 교통혼잡비용 예측 연구, 1992
3. 서울특별시, 교통특별대책본부, 교통관리사업소, 승용차 10부제 및 버스전용차선 시행에 따른 경제성 편익 분석결과, 1995
4. Eisele D. O., "Application of Zone Theory to a Suburban Rail Transit Network", Traffic Quarterly, Vol. 22, No. 1, Jan, 1968, pp. 49-67.
5. Ghoneim N. S. A. and Wirashinghe S. C., "Optimum Zone Configuration for Planned Urban Commuter Rail Lines", Under Review, 1983
6. Jordan W. C. and Turnquist M. A., "Zone Scheduling of Bus Routes to Improve Service Reliability", Transportation Science, Aug, 1979
7. Kocer G., "Optimal Design of Express and Local Bus Services", Ph. d. dissertation, Dartmouth College Hanover, NH 03755
8. Morlok E. K. and Vandersypen H. L., "Schedule Planning and Time table Construction for Commuter Railroad Operations", Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol. 99, No. TE53, Proc. Paper 9922, Aug, 1973, pp. 627-636.
9. Furth P. G., "Zonal Route Design for Transit Corridors", Operations Research Society of America, Northeastern University, 1986
10. Pollan E. B., "Zone Scheduling for Urban Bus Transit", thesis presented to the Transportation Center at Northwestern

University, at Evanston Ill, in 1976, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

11. Powell B. A., "Elevator Banking for High Rise Buildings", Transportation Science, Vol. 9, No. 3, Aug, 1975, pp. 200-210.
12. Tsao S. and Schonfeld P., "Optimization of zonal transit service", J. Transportation Engineering, Vol. 109, No. 2, March, 1983, pp. 257-272.
13. Turnquist M. A., "Zone Scheduling of Urban Bus Routes", Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol. 105, No. TE1, Jan, 1979, pp. 1-13.