

■ 論 文 ■

급행버스 노선의 정류장 위치 및 배차간격 결정에 관한 연구 (노선별 정류장간 O-D 자료를 활용하여)

Determination of the Optimal Bus-stop Location and Headway
of Bus Rapid Transit Using Bus-stop-based O-D Data

조 혜 진

(한국건설기술연구원
첨단도시시스템연구센터 연구원)

이 영 인

(서울대학교 환경대학원 교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 필요성
 - 2. 연구의 목적
 - II. 관련 이론 및 선행연구 고찰
 - 1. 급행버스의 정의 및 유형
 - 2. 버스의 급행화에 따른 효과
 - 3. 선행연구 고찰
 - III. 방법론 정립
 - 1. 기본가정
 - 2. 완급행 O-D 배분 및 배차간격 결정
 - 3. 목적함수의 구성
 - 4. 최적해 도출과정
 - IV. 모형의 적용
 - 1. 사례노선 선정
 - 2. 자료구축
 - 3. 결과분석 및 시사점
 - V. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : 급행버스, 정류장위치, 배차간격, 전수열거법, 정류장간OD

요 약

급행버스시스템을 도입함에 있어서 정류장의 위치나 배차간격이 적절하지 않으면 버스 운영자 및 이용자의 불필요한 비용을 유발하여 결과적으로 사회 전체적인 비용을 증가시키는 요인이 된다. 따라서, 승객의 기·종점에 기반하여 정류장 위치 및 배차계획을 수립하는 노력이 필요하다. 한편, 서울시 대중교통체계 개편 이후 새로운 버스카드 시스템의 도입되었다. 이로 인해 버스운행이력 및 이용자 이동경로의 자료 구축이 가능해짐에 따라 대중교통 통행수요의 정류장 기반 O-D자료를 획득할 수 있는 환경이 마련되었다. 이에 본 연구에서는 승객의 기·종점을 고려한 급행버스의 최적 정차위치 및 완·급행버스 배차간격 결정방법론을 수립하고자 하였다. 전체 과정을 초기조건 입력, 정류장 위치 대안 생성, 완·급행 O-D배분 및 배차간격 설정, 총교통비용 산출 및 최적해 도출의 4단계로 구성하고, 이러한 일련의 과정을 프로그래밍어로 구현한 후, 승객의 통행패턴이 현저히 다른 두개의 노선을 선정하여 사례분석을 수행하였다. 분석결과를 바탕으로, 급행버스의 노선 계획에 있어서 승객의 이동거리분포를 검토하여 불 필요성이 있음을 정책적인 시사점으로 제시하였다.

When we introduce the BRT systems, it is very important to decide the operating factors, such as bus-stop locations or headway. If the factors are inappropriate, unessential expenses for the operator and users of the bus line may be caused, and it leads increase of social total cost. So, it is necessary that we consider users' origin and destination of each bus line when we set location of bus-stops and the optimal headway. Meanwhile, Smart Card System was introduced of fare collection for the Public Transportation Reform in Seoul last year. This new card system makes it possible to store up the information about bus operating and passenger's trip link. With these substantial information, we can estimate bus-stop-based O-D table. So, in this thesis, it was studied a systematic methodology to find the optimal location and headway for skip-stop bus system (as a type of first step for BRT). The proposed methodology in this thesis is expected to be useful to effect analysis or setting operating factors for skip-stop bus system in each bus line.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

최근 지하철·경전철 보다 낮은 비용으로 버스통행 속도 향상과 정시성 제고의 효과를 기대할 수 있는 급행버스시스템(BRT, Bus Rapid Transit)에 대한 관심이 높아지고 있다. 급행버스시스템은 단계적으로 시설 및 운영수준을 높여갈 수 있는 장점도 있어서 이미 정부와 지방자치단체에서 급행버스시스템의 도입을 추진하기 위한 구체적인 논의가 이루어지고 있는 상황이다. 급행버스 도입 계획에 있어서 어느 위치에 급행버스 환승센터를 세우고 몇 대의 차량을 배차할 것인지를 결정하는 것은 이용자와 운영자 모두의 입장에서 상당히 중요한 문제이다. 그럼에도 불구하고 이에 대한 연구가 미흡한 실정이며 아직까지는 전문가의 경험이나 관행에 의존하는 것이 현실이다.

한편, 단거리 통행자보다 중장거리 통행자가 급행버스를 더 많이 이용하기 때문에 노선별 이용자의 통행패턴에 따라 급행버스 도입의 효과가 달라질 수 있을 것이다. 노선연장이 길고 정류장 수가 많은 노선이라고 하여 필연적으로 중장거리 통행자가 많이 이용하는 것은 아니므로, 급행버스 노선 선택시 이용자의 통행패턴을 파악하는 것은 필수적인 요소이다.

이러한 관점에서 볼 때, 서울대중교통체계개편의 일환으로 새로운 버스카드시스템을 도입한 것은 버스운행 이력 및 승객이동경로의 자료 구축이 가능해졌다는 점에서 대중교통분야의 큰 소득이 아닐 수 없다. 아직 도입초기단계이기 때문에 이를 이용한 신뢰성 있는 정류장 기반 O-D 구축 자체가 중요한 이슈가 되고 있으나, 향후 교통분야에서 다양한 분석에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 예상되고 있다.

2. 연구의 목적

본 연구에서는 버스카드의 일일 이력자료를 이용하여 노선별 정류장간 O-D를 활용하여 노선별 급행버스 도입효과를 분석하였다. 이를 위해 승객 통행패턴을 기

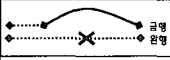
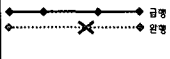
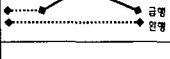
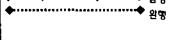
반으로 한 급행버스 정차위치와 배차간격 결정방법론을 제안하고, 제안방법론을 통행패턴이 다른 두 개의 사례 노선에 적용하였다. 마지막으로 분석을 통하여 얻은 결론과 정책적인 시사점을 제시하였다.

II. 관련 이론 및 선행 연구 고찰

1. 급행버스의 정의 및 유형

본 연구에서 다루는 '급행버스'는 모든 차량이 매 정류장마다 정차하는 '완행버스'에 반대되는 개념으로, 승객이 적거나 중요도가 낮은 지점은 무정차로 통과하여서 표정속도 증가를 꾀하는 운행방식의 버스를 의미한다¹⁾. 한편, 급행화 방식에는 고속도로나 간선도로 등을 이용한 신선노선을 개발하는 방식과, 기존의 완행노선을 그대로 유지하되 버스전용차로를 설치하거나 정차지점수를 줄여 버스의 속도를 향상시키는 방식이 있다. <표 1>은 기존 완행노선의 존치여부 및 노선의 변경여부에 따라 급행화 유형을 정리한 것이다. 본 연구에서 다루는 급행화 방식은 유형IV에 해당한다.

<표 1> 급행화 방식의 유형

유형	기존 노선	노선 경로	유형
I	폐지	변경	새로운 급행 route 개발, 기존 완행노선 폐지 
II		고정	기존과 동일한 route에서 완행을 급행 (skip-stop)으로 전환 
III	존치	변경	새로운 급행 route 개발, 기존 완행노선 병행운행 
IV		고정	기존과 동일한 route에서 완행 및 급행(skip-stop) 병행운행 

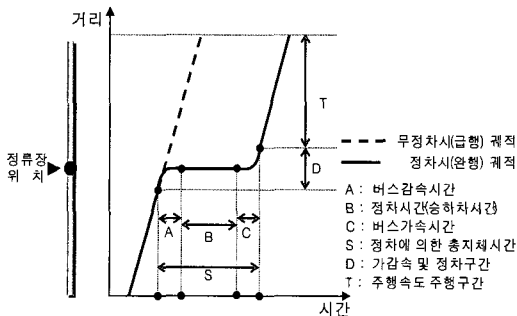
2. 버스의 급행화에 따른 효과

완행으로 운행되어 모든 정류장에서 정차하던 버스가 정차지점을 줄여 급행으로 변경되어 일부구간을 무정차로 운행하게 되면, 버스를 운영하는 회사의 입장에서나 이를 이용하는 승객의 입장에서 비용의 변화가 생기게 된다.

1) 서비스 형태에 의한 대중교통의 분류에서 정차 및 운영특성에 따라 완행, 준급행, 급행으로 분류할 수 있다. 여기서 준급행은 차량별로 정차하는 정류장이 달라지는 방식을 말한다. 급행은 모든 차량의 정류장 간격이 완행에 비해 장거리이며 경우에 따라 똑같은 노선에 완행과 급행이 같이 운행된다. (원제무, 『도시교통론』, 박영사, 1998, p.273.)

노선길이에 변화가 없다고 가정할 때, 정차지점수를 줄이면 전체 구간에 대한 평균속도가 증가함에 따라 운행에 소요되는 차량대수가 줄어들게 된다. 버스운영회사는 차량의보유대수를 줄여 필요이상의 차량에 대한 고정비 및 운영비를 줄일 수 있으므로 버스회사의 경영개선 효과를 기대할 수 있다. 한편, 차량대수가 불변이라면, 운휴중인 차량수가 늘어나게 되므로 계속된 운전으로 인한 운전자의 피로도를 낮추는 요인이 된다. 이는 승객의 안전도 향상에도 영향을 미친다고 볼 수 있다.

버스를 이용하는 승객의 입장에서는, 버스가 서는 곳까지 접근하기 위하여 이전보다 긴 도보접근시간을 소요하게 될 것이고, 급행버스를 타기 위해 타 수단으로 접근을 한다면 추가적인 환승시간 및 비용이 발생한다. 그러나 잦은 정차로 인해 발생하는 정류소 인접구간에서의 감·가속지체시간, 정차시간 등을 절약할 수 있어 차내통행시간을 단축할 수 있기 때문에 오히려 승객의 총통행시간비용은 절감될 수도 있다. <그림 1>은 정류소에서 버스가 정차하지 않고 무정차로 운행되는 경우에 절약할 수 있는 지체시간을 개념적으로 표현한 것이다. 정류장에서 정차하기 위해 평균주행속도로 주행하던 버스가 정류소 인접구간(D)에서 감속, 정차, 가속을 한 후 다시 평균주행속도로 운행하기까지 지체되는 시간($S=A+B+C$)이 도식화되어 있다. 바꿔말하면, 정류소 한 곳을 정차하지 않고 무정차로 지날 때마다 S 만큼의 시간이 절약될 수 있다는 것을 보여주는 그림이고, 이때 버스에 타고 있는 승객 각자는 그만큼의 통행시간비용을 절감할 수 있음을 의미한다.



<그림 1> 정류장 정차로 인한 지체시간 개념도

3. 선행연구 고찰

해외에서는 70년대부터, 국내에서는 90년대부터 많

은 연구자들이 버스 운영요소의 최적화문제를 다룬 연구를 수행하여 왔는데, 의사결정변수의 종류, 목적함수의 유형, 수요패턴 및 대상 노선의 성격 등에 따라 조금씩 차이가 있다.

의사결정변수의 경우에는 노선의 길이, 노선의 간격 (혹은 노선의 밀도), 정류장 간격, 버스의 배차간격(혹은 운행빈도), 버스요금수준, 차량의 크기, 차량의 보유대수 등이 있는데 대부분의 연구에서 둘 이상의 변수를 최적화하고자 하였다. 목적함수의 유형은 크게 사회적 편익 최대화, 총 시스템 비용의 최소화로 나누어 볼 수 있다. 수요패턴은 고정적인 것으로 가정한 경우와 서비스 탄력적으로 본 경우로 구분된다(<표 2>).

선행연구에서는 목적함수를 구성하는 이론적 접근방식이나 비용요소의 구성항목 등을 참고할 수 있으나, 분석결과에 중요한 영향을 미치는 승객의 통행거리, 버스의 구간속도 등을 평균값으로 동일하게 적용하여 현실과는 다소 거리감이 있다. 또한 일반적인 도시내 시내버스를 연구의 대상으로 수요의 균일분포를 가정하고 있기 때문에 본 연구에서와 같이

<표 2> 국내·외 선행연구

결정변수	목적함수	여객수요	저자
시간대별 배차간격	운영비용 및 사용자비용 최소화	Uniform, inelastic many-to-many.	고승영 외 (1998)
배차간격 정류장간격 차량보유대수	"	Uniform, inelastic many-to-many.	이승현 (1998)
노선길이, 정류장간격, 배차간격	"	Uniform and Linear decreasing, inelastic, many-to-one	Spasovic and Schonfeld (1993)
노선간격, 존의 길이, 배차간격	"	Uniform, inelastic many-to-one	Chang and Schinfeld (1992)
노선간격, 노선길이, 배차간격	"	Uniform, inelastic many-to-one	Byrne (1976)
노선밀도, 운행횟수	"	General linear, inelastic many-to-one	Hurdle (1973)
노선간격, 배차간격, 요금	운영수입 및 사용자 편익 최대화 등	Uniform, inelastic many-to-one	Kicur and Hendrickson (1982)
노선간격, 배차간격, 요금	수익·사회적 편익 최대화 비용 최소화	Irregular, elastic, many-to-many, time dependent	Chang and Schonfeld (1989)
노선간격, 배차간격	수익 최대화	Uniform, inelastic many-to-one	Morlok and Viton (1984)

지역거점간의 수송을 위주로 하는 급행버스의 운행계획시에는 추가적인 고려사항이 필요할 것으로 생각된다.

III. 방법론 정립

1. 기본 가정

1) 버스노선 및 운행특성

- n 개의 정류장으로 구성되어 있는 단일축 상의 도로에 완행버스와 급행버스가 병행하여 운행됨
- 노선의 기종점은 고정이며, 버스는 정해진 스케줄에 따라 운행되고 정시성을 지님
- 급행버스와 완행버스의 용량(최대탑승가능인원)은 서로 다름

2) 통행자 특성

- 통행자수는 분석 노선의 정류장 기반 기종점 통행량으로 주어지며 통행자의 정류장 도착패턴은 균일분포(Uniform distribution)를 따름
- 통행자가 이용하는 정류장은 고정적임. 따라서 통행자의 출발정류장(혹은 도착정류장)에서 급행버스가 정차하지 않는 경우에 통행자는 가장 가까운 급행버스 정류장까지 완행버스를 이용하여 접근하되 기점에서 종점방향으로만 이동함
- 버스서비스의 변화에 의한 타 수단과의 전환수요나 유발수요는 없으며, 다만 동일한 축에서 운행되는 급행버스와 완행버스간 수요 전이만 일어나는 것으로 가정함
- 통행자는 목적지까지 소요되는 차내시간, 차외시간, 요금, 환승횟수에 따라 출발전에 자신의 효율을 판단하여 급행버스 이용여부를 결정함

3) 기타

- 버스의 운임 수입은 고려하지 않음²⁾
- 일방향의 O-D에 대하여 분석함. 피크시의 운행계획은 양방향에 달라야하지만, 분석의 편의상 버스의 기점에서 출발한 버스는 종점에서 회차하여 기점을 향해 운행된다고 가정함

2. 완·급행 O-D 배분 및 배차간격 결정

1) 완·급행 O-D 배분

완·급행버스의 운행계획을 수립하기 위해서는 완행버스의 O-D와 급행버스의 O-D가 각각 도출되어야 한다. 그러나 완행버스만 운행되던 노선에 급행버스가 도입되었을 때 얼마나 많은 사람이 급행을 이용하게 될 것인가는 급행버스 정류장의 위치 및 개수에 따라 크게 달라질 수 있으며, 그 값을 추정하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 다만 단거리 통행자보다 중장거리 통행자가 급행버스를 더 많이 이용할 것이라는 것은 추측할 수 있으며, 그렇기 때문에 단순히 정류장 승하차인원만을 고려하지 않고 이용자들의 기종점을 고려한 급행정류장을 선정해야 하는 것이다.

이용자의 출발정류장과 도착정류장에 급행버스가 정차하는지 유무에 따라 <표 3>과 같이 급행버스 이용형태를 유형화 할 수 있다.

급행버스를 이용할 수 있다 하더라도 모든 이용자들이 급행버스를 이용하지는 않을 것이므로, 유형 II~V에 해당하는 경우에는 다음식과 같은 로짓모형을 이용하여 수단선택확률에 따라 급행버스 이용자를 추정하도록 하였다.

$$P_{xy} = \frac{e^{V_{xy}}}{\sum_{i=1}^z e^{V_{xy}}}$$

P_{xy} : y번째 통행자가 x번째 대안을 선택할 확률

<표 3> 급행버스 정차유무에 따른 이용자의 유형

유형	급행버스 이용가능 여부	이용자의 출발·도착 정류장 및 급행버스 정류장 위치	환승 횟수
I	불가능 ($S_{ij} < 2$)	출발·도착 정류장 사이에 급행버스 이용가능 구간이 없음	0
II	가능 ($S_{ij} \geq 2$)	급행버스가 출발정류장 및 도착정류장에서 모두 정차	0
III		급행버스가 출발정류장에서만 정차	1
IV		급행버스가 도착정류장에서만 정차	1
V		급행버스가 출발정류장 및 도착정류장에서 모두 무정차	2

주 : S_{ij} 는 i와 j 사이에 있는 급행정류장 수를 의미함

2) 버스운임은 이용자로부터 운영자에게로 비용이 전이되는 것이므로 총교통비용을 최소화하고자하는 본 연구의 목적함수에는 영향을 주지 않는다고 볼 수 있기 때문이다.

〈표 4〉 급행버스 이용자의 유형별 이용패턴 사례

예제노선 설정현황		노선도										
		급행 완행										
		정류장 번호 (k): 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11										
		급행정류장 (N _k): 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0										
유형	i (e _k)	j (e _k)	S _{ij}	선택대안	급행버스 이용자 이동경로							
II	3 (1)	9 (1)	0	① 완행 ② 급행	○-----○							
III	3 (1)	10 (0)	1	① 완행 ② 급행→완행	○-----●							
IV	2 (0)	9 (1)	1	① 완행 ② 완행→급행	●-----○							
V	2 (0)	11 (0)	2	① 완행 ② 완행→급행→완행	●-----●							

주: ○ 급행버스정류장 ● 완행버스정류장
 ⊙ 환승지점 — 급행이용구간 ---완행이용구간
 e_k k 정류장에 급행버스가 정차하면 1, 그렇지 않으면 0

V_{xy} : y번째 통행자가 x번째 대안에 대해 갖는 효용
 z : 선택가능한 대안의 수

효용함수의 형태는 선형으로 가정하고 효용함수식을 다음과 같이 구성한다.

$$V_{xy} = \beta_1 + \beta_2 \cdot FARE_{xy} + \beta_3 \cdot IVT_{xy} + \beta_4 \cdot OVT_{xy}$$

- x : 수단 (1:완행버스만 2:급행버스+완행버스)
- $FARE_{xy}$: y번째 통행자가 x수단 이용시 지불요금
- IVT_{xy} : y번째 통행자가 x수단 이용시 차내시간
- OVT_{xy} : y번째 통행자가 x수단 이용시 차외시간
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: 각 변수에 대한 계수 (parameter)

차내시간은 이용자의 기종집단 거리를 완행버스구간과 급행버스구간으로 구분하여 각 수단별 속도로 나누어 계산하도록 하였다. 차외시간은 접근시간과 대기시간, 환승시간으로 이루어지는데, 모든 승객은 이용하는 정류장이 고정이라고 가정했으므로 접근시간은 어느 수단을 이용하든지 동일한 것으로 보았다. 따라서 차외시간은 대기시간, 환승시간으로 구성하였다. 그런데 버스의 경우 지하철과는 달리 환승에 따른 추가적인 이동이 거의 없다고 볼 수 있기 때문에 환승시와 미환승시의

차이는 다음 수단을 위한 추가적인 대기시간 발생과 환승에 따른 불편(환승 penalty)이 될 수 있다. 여기서 환승에 따른 불편은, 환승 1회가 10~15분의 차내시간과 같은 가치인 것으로 조사된 선행연구³⁾의 값을 이용하여 환승시간을 산정하고 이 값을 차외시간에 포함시켰다. 환승횟수는 이용자의 유형별 이용패턴에 따라 0, 1, 2중 하나의 값을 가지므로 수단별 효용계산시 포함하도록 하였다.

2) 완·급행 배차간격 결정

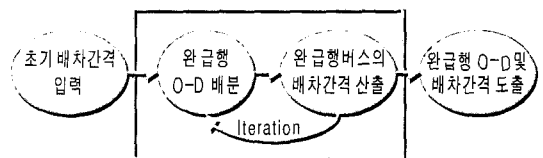
급행노선과 완행노선의 시간당 최대 제차인원을 각각 T_e^{max} , T_s^{max} 라 하면, 이를 충족하기 위한 버스의 최소 운행횟수 및 그에 따른 배차간격은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$N_e \cdot CP_e \geq T_e^{max}, \quad h_e = 60/N_e$$

$$N_s \cdot CP_s \geq T_s^{max}, \quad h_s = 60/N_s$$

- CP_e : 급행버스의 1대당 최대 탑승가능인원 (인/대)
- CP_s : 완행버스의 1대당 최대 탑승가능인원 (인/대)
- N_e : 급행버스의 시간당 운행횟수 (대/시)
- N_s : 완행버스의 시간당 운행횟수 (대/시)
- h_e : 급행버스의 배차간격 (분)
- h_s : 완행버스의 배차간격 (분)

한편, 배차간격은 완·급행버스의 O-D에 따라 최대 제차인원에 의해 결정되고, 배차간격이 바뀌면 차외시간이 변하므로 다시 완·급행버스의 O-D가 재산출되게 된다. 따라서 초기 배차간격을 입력한 후 O-D 배분 과정과 배차간격 산출과정이 수렴될 때까지 반복하여 수행하였다.



〈그림 2〉 완·급행 O-D배분 및 배차간격 결정과정

3) 양창화·손의영, "서울시 지하철 이용자의 환승 관련 변수의 가치 추정(선호의식 및 현시선호 분석을 이용)", 대한교통학회지 제 18권 제4호, 2000

3. 목적함수의 설정

목적함수는 운영자 비용과 이용자 비용의 합으로 정의되는 총교통비용의 최소화로 설정하였다. 버스는 공공교통 수단이므로 버스회사의 수입, 이익 등 하나의 이해당사자의 이해관계를 평가기준으로 삼기 보다는 이용자를 포함한 관련 이해당사자의 총량적인 이해관계를 평가기준으로 사용하는 것이 합리적인 접근방법이 될 것이기 때문이다.

목적함수는 다음 식과 같이 총교통비용(TC)의 최소화이며, 총교통비용은 운영자 비용(C_m)과 이용자 비용(C_u)으로 구성하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } TC \\ & TC = C_m + C_u = (C_e + C_s) + (C_i + C_o) \end{aligned}$$

- C_e : 급행버스 운영비용
- C_s : 완행버스 운영비용
- C_i : 전체 이용자의 차내시간비용
- C_o : 전체 이용자의 차외시간비용

1) 운영자 비용 (C_m)

버스의 운영에 관계되는 비용항목과 변수들을 세밀하게 고려하여 버스운영자의 비용을 구체적으로 모형화하는 것은 그 자체만으로도 하나의 연구가 될 수 있을 정도로 복잡하고 방대한 문제이다. 그러나 정차위치 및 배차계획에 주안점을 둔 본 논문의 목적에 비추어 볼 때 원단위를 이용한 단순한 방식으로 표현하여도 무방할 것으로 판단되어 급행버스 및 완행버스의 보유차량수에 비례한 자본비용과, 버스의 운행시간에 따른 운영비용을 합하여 간단히 운영자 비용을 표현하였다.

$$\begin{aligned} C_m &= C_e + C_s \\ &= (N_e \times OT_e \times OC_e + N_s \times CC_e) \\ &\quad + (N_s \times OT_s \times OC_s + N_s \times CC_s) \end{aligned}$$

C_e : 급행버스 비용 (원/시)

- C_s : 완행버스 비용 (원/시)
- N_e : 급행버스의 시간당 운행횟수 (대/시)
- N_s : 완행버스의 시간당 운행횟수 (대/시)
- N'_e : 급행버스 추가소요대수 (대/시)
- N'_s : 완행버스 추가소요대수 (대/시)
- OT_e : 급행버스 운행시간 (대 · 시)
- OT_s : 완행버스 운행시간 (대 · 시)
- OC_e : 대당 급행버스 운영비용 단가 (원/대 · 시)
- OC_s : 대당 완행버스 운영비용 단가 (원/대 · 시)
- CC_e : 대당 급행버스 자본비용 단가 (원/대 · 시)
- CC_s : 대당 완행버스 자본비용 단가 (원/대 · 시)

2) 이용자 비용 (C_u)

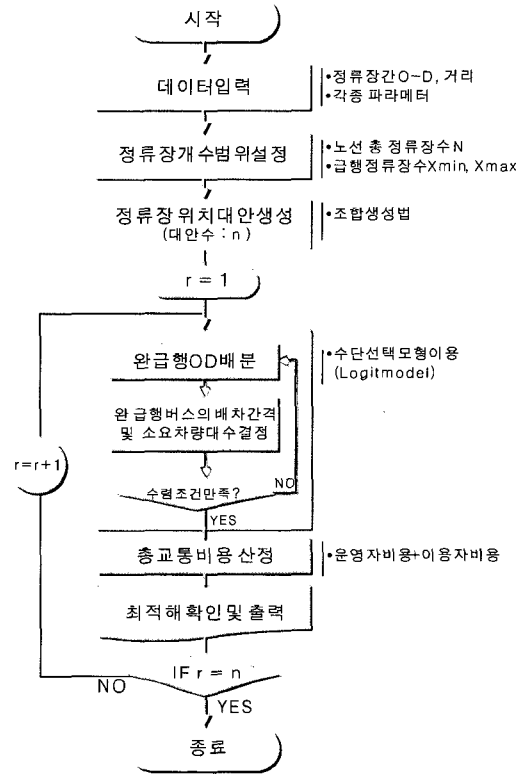
이용자 비용은 차내시간비용, 차외시간비용의 합으로 구성하였다. 차내시간비용은 차내시간의 합에 차내시간가치를 곱하고 차외시간비용은 차외시간의 합에 차외시간가치를 곱하여 구하는 형태로 구성하였다.

$$\begin{aligned} C_u &= C_i + C_o \\ &= (T_b + T_d + T) \times V_a + (T_w + T_f) \times V_o \\ T_b &= \left(\sum_{i=1}^n B_{i-1}^e \times (t_b \times R_i^e) + \sum_{i=1}^n B_{i-1}^s \times (t_b \times R_i^s) \right) \\ T_d &= \left(\sum_{i=1}^n B_{i-1}^e \times B_i^e \right) \times t_d + \left(\sum_{i=1}^n B_{i-1}^s \times B_i^s \right) \times t_d \\ T_t &= \left(\sum_{i=1}^n B_i^e \times (D_{i,i+1}^e - d_{i,i+1}) / v_e \right) \\ &\quad + \left(\sum_{i=1}^n B_i^s \times (D_{i,i+1}^s - d_{i,i+1}) / v_s \right) \\ T_w &= \left(\sum_{i=1}^n Q_i^e \times \frac{h^e}{2} \right) + \left(\sum_{i=1}^n Q_i^s \times \frac{h^s}{2} \right) \\ T_f &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n trf_{ij} \times 0.1194 \end{aligned}$$

- T_b : 승하차시간(버스정차시간) (인 · 시)
- T_d : 버스 가감속시간 (인 · 시)
- T_d : 평균속도주행시간 (인 · 시)
- T_w : 대기시간 (인 · 시)

4) 환승시간은 환승 1회가 차내시간 10~15분의 가치에 해당한다고 제시한 선행연구(양창화 · 손의영, "서울시 지하철 이용자의 환승 관련 변수의 가치 추정", 대한교통학회지 제 18권 제4호, 2000)의 결과와 차외시간가치는 차내시간가치의 약 1.5~2.0배에 해당한다고 제시한 연구결과(교통개발연구원, 『수도권 여객동행태의 조사: 개별행태모형의 정립을 중심으로』, 1997)를 인용하여 결정하였다. 여기서는 각각의 중앙값인 12.5분, 1.75를 사용하여 다음과 같은 계산에 의해 환승시간을 반영하였다.
 환승1회 = 차내 12.5분, 차외 1분 = 차내 1.75분.
 ∴ 환승1회 = 차외 7.14분 = 차외 0.119 시간

- T_w : 환승시간 (인·시)
- V_{to} : 차외시간가치 (원/인·시)
- V_{ti} : 차내시간가치 (원/인·시)
- B_{i-1} : 급행버스의 (i-1)번째 정류장 출발시 재차 인원 (인)
- B_{i-1} : 완행버스의 (i-1)번째 정류장 출발시 재차 인원 (인)
- R_i^c : i번째 정류장의 급행버스 승차인원(q)과 하차인원(p_i^c) 중 큰 값 ($\max(Q_i^c, P_i^c)$) (인)
- R_i^c : i번째 정류장의 완행버스 승차인원(q_i^c)과 하차인원(p_i^c) 중 큰 값 ($\max(Q_i^c, P_i^c)$) (인)
- t_b : 승객1인당 평균 승·하차시간 (시/인)
- v_c : 급행버스 평균주행속도 (km/h)
- v_s : 완행버스 평균주행속도 (km/h)
- B_i^c : 급행버스의 i번째 정류장 출발시 재차인원 (인)
- B_i^s : 완행버스의 i번째 정류장 출발시 재차인원 (인)
- D_{i+1}^c : 급행버스 i번째 정류장에서 i+1번째까지의 거리 (km)
- D_{i+1}^s : 완행버스 i번째 정류장에서 i+1번째까지의 거리 (km)
- d_{i+1} : 정류장과 인접한 버스의 감·가속구간거리 (km)
- Q_i^c : i 정류장의 급행버스 승차인원 (인)
- Q_i^s : i 정류장의 완행버스 승차인원 (인)
- h^c : 급행버스 배차간격 (시)
- h^s : 완행버스 배차간격 (시)
- tr_{fj} : i 정류장에서 j정류장까지 이동시 환승횟수 (회)



〈그림 3〉 최적해 도출과정

4. 최적해 도출과정

본 연구에서 다루고 있는 목적함수의 성격은 평균적인 교통비용이 소요되는 것이 아니라 급행버스의 정차지 점수 및 그 위치에 따라 완·급행 이용자수와 운영자비용, 이용자비용이 달라지게 되어있다. 이 경우의 함수는 일반적으로 구간내에서 부분해(Local solution)를 가질 수 있기 때문에 전수열거법(All Enumeration)을 이용하여 모든 경우를 비교하도록 하였다. 전수열거법은 컴퓨터 처리시간상의 장애만 없다면 최적해를 찾는 가장

확실한 방법이다⁵⁾. 컴퓨터 처리의 시간상의 문제는 본 연구의 성격상 논외로 한다.

최적해 도출 과정은 〈그림 3〉과 같으며, 전체 과정을 Microsoft사의 Visual Basic(6.0)으로 구현하였다. 이 프로그램 언어는 시각적인 구성으로 되어있고 쉬운 문법을 사용할 수 있어 모형 구현 및 수정이 용이하다.

1) 정류장 수 및 위치 대안 생성

정류장의 수는 최소값과 최대값으로 범위를 지정한다. 주어진 범위 안에서 급행버스 정류장의 최소 간격⁶⁾ 조건에 부합하는 정류장 위치 조합을 모든 경우에 대하여 생성하였다. 급행버스 정차지점에는 1, 그렇지 않으면 0으로 표시하였다.

2) 대안별 완·급행 O-D 배분 및 배차간격 도출

급행버스를 이용하는 수요는 기본적으로 통행자의

5) 원재무·박창호·이성모, "수익성을 감안한 경전철의 최적노선 결정방법에 관한 연구", 대한교통학회지 제12권 제3호, 1994
 6) 조합수를 줄여 분석의 효율성을 도모하기 위하여 급행정류장은 특정 거리 이상 떨어져 있어야 한다는 조건을 두었다. 이 값은 사용자가 입력하여 부여하도록 하였다.

기종점 사이에 2개 이상의 급행버스 정류장이 존재할 때 발생한다. 그리고, 통행자가 최초 이용하는 정류장이 항상 고정이라고 전제하였으므로 출발지(*i*)나 도착지(*j*)에 급행정류장이 없을 경우는 완행버스를 이용하여 급행정류장까지의 접근이 필요하다. 따라서 출발정류장과 도착정류장의 급행버스 정류장 유무에 따라 통행자 이동경로를 다음과 같은 4가지 case로 구분하여 완·급행 O-D를 배분할 수 있다. 각각의 경우에 급행버스와 완행버스 수요 계산과정을 제시하였다.

여기서 $Q_{i,j}$ 는 완행만 운행했을 때 *i* 정류장에서 *j* 정류장까지 총 버스통행량이고 $Q_{i,j}^*$, $Q_{i,j}^s$ 는 각각 완행과 급행이 같이 운행될 때의 완행, 급행 버스통행량이다. P_e , P_s 는 앞에서 제시한 로짓모형에 의해 산출된 수단 선택확률이다. 한편, 급행버스 이용으로 인해 발생하는 환승횟수도 이 과정에서 구할 수 있으므로 trf_{ij} 에 환승 횟수를 계산할 수 있게 하였다.

정류장 *k*에 급행버스가 정차할 경우 $I(k) = 1$, 그렇지 않으면 $I(k) = 0$ 일 때,

IF 정류장 *i*와 정류장 *j* 사이에 급행정차지점이 2개 이상 존재 THEN

case 1 : $I(i) = 1, I(j) = 1$

(기종점 모두에서 급행버스 정차)

$$Q_{i,j} = Q_{i,j}^* \cdot P_e, Q_{i,j}^s = Q_{i,j}^* \cdot P_s, trf_{ij} = 0$$

case 2 : $I(i) = 1, I(j) = 0$

(기점에서만 급행버스 정차, 종점은 무정차)

*j*와 가장 가까운 상류부의 급행정류장 *jj* 탐색

$$Q_{i,jj}^* = Q_{i,j}^* \cdot P_e, Q_{i,jj}^s = Q_{i,j}^* \cdot P_s$$

$$Q_{i,j}^* = Q_{i,j}^* \cdot P_s, trf_{ij} = Q_{i,jj}^s$$

case 3 : $I(i) = 0, I(j) = 1$

(종점에서만 급행버스 정차, 기점은 무정차)

*i*와 가장 가까운 하류부의 급행정류장 *ii* 탐색

$$Q_{ii}^* = Q_{i,j}^* \cdot P_e, Q_{ii}^s = Q_{i,j}^* \cdot P_s$$

$$Q_{i,j}^* = Q_{i,j}^* \cdot P_s, trf_{ij} = Q_{ii}^s$$

case 4 : $I(i) = 0, I(j) = 0$

(기종점 모두에서 급행버스 무정차)

*i*와 가장 가까운 하류부의 급행정류장 *ii* 탐색

*j*와 가장 가까운 상류부의 급행정류장 *jj* 탐색

$$Q_{ii}^* = Q_{i,j}^* \cdot P_e, Q_{ii}^s = Q_{i,j}^* \cdot P_s,$$

$$Q_{jj}^* = Q_{i,j}^* \cdot P_e, Q_{jj}^s = Q_{i,j}^* \cdot P_s,$$

$$trf_{ij} = 2 \times Q_{ii}^s$$

ELSE

$$Q_{i,j}^* = Q_{i,j}^*, trf_{ij} = 0$$

END IF

IV. 모형의 적용

1. 사례노선 선정

사례분석을 위한 버스노선으로 9504번(군포~강남)과 370번(강동~수색)을 선정하였다. 이 노선들은 각각 현재 수도권 BRT 노선망 계획에 포함된 도로를 통과하고 있으며 노선연장이 비교적 길어 향후 급행버스 도입에 유리한 노선으로 판단된다. 또한 두 노선의 승객 통행패턴이 서로 다른 양상을 띠고 있어서 노선 특성에 따라 도출되는 결과를 서로 비교해 볼 수 있다.

사례분석 대상 노선의 통행패턴을 노선별 정류장기반 O-D를 통하여 개략적으로 분석해 보았다. 본 연구

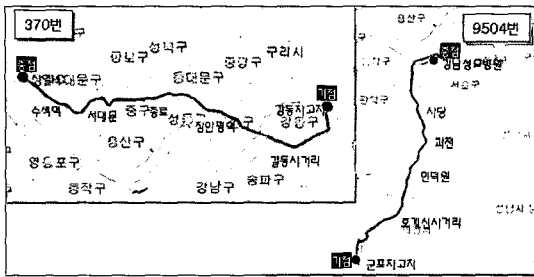
〈표 5〉 사례분석 노선 개요

버스번호	370번	9504번
버스유형	간선버스	광역버스
배차간격	5-8 분	7-8 분
운행차량수	33 대	26 대
노선연장	31.3 km	25.8 km
경유 정류장수	53 개	49 개
정류장 평균간격	591 m	527 m
업체명	메트로버스(서울시)	우신버스(서울시)
첫차시각	04:00	05:10
막차시각	22:30	00:30
기점	강동차고지	군포차고지
종점	상일IC	강남성모병원
요금	거리비례제 ⁷⁾	1,400원
일평균이용객	13,636명/일 1,462명/대	5,352 명/일 205 명/대

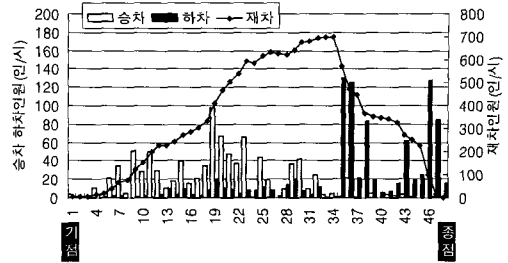
주 : 일평균 이용객은 2004년 10월 4주 기준
자료 : 서울시 대중교통체계 개편 정보(<http://bus.seoul.go.kr>)

7) 교통카드 사용시를 기준으로 하여 다음과 같은 요금산식에 의해 산정하였다.

$$800(\text{원}) + 100(\text{원}) \times \frac{(\text{탑승거리} - 10)(\text{km})}{5(\text{km})}$$



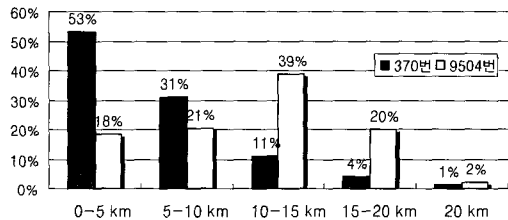
〈그림 4〉 사례노선의 기종점 및 주요 경유지



〈그림 6〉 9504번 노선의 승하차인원과 재차인원

에서 사용한 O-D자료는 서울시 대중교통체계 개편의 일환으로 도입한 Smart card의 일일 이력자료⁸⁾를 이용하여 서울시에서 구축한 것을 일부 보정한 것이다⁹⁾. 사용된 자료의 시점을 고려할 때 버스카드시스템의 안정화 및 정착단계에 구축된 것으로 볼 수 없고 현금승차인원에 대해서는 파악할 수 없는 문제점이 제기될 수 있다. 그러나 본 연구에서 요구하는 자료형태와 부합하는, 현재 상황에서 사용할 수 있는 가장 신뢰할만한 정류장 기반 O-D이기 때문에 사례분석에 활용하는데 크게 무리가 없을 것으로 판단되며, 신뢰도 높은 정류장 기반 O-D자료의 부재는 본 연구의 한계점이다.

〈그림 5〉, 〈그림 6〉은 분석 대상 노선의 정류장별 승하차인원(기점→종점방향)이다. 370번 노선은 승차인원 및 하차인원이 노선 대부분의 구간에 비교적 고르게 분포되어 있는 반면, 9504 노선의 경우 기점에서



〈그림 7〉 승객 이동거리 분포

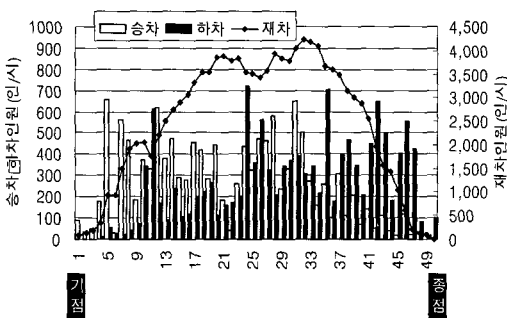
종점방향으로의 통행패턴이 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다.

〈그림 7〉은 두 사례노선의 승객들의 통행거리 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 광역버스인 9504번 노선을 이용하는 승객의 60% 이상이 10km 이상을 이동하는 것을 알 수 있다. 한편, 도심통과구간이 대부분인 370번 노선은 승객의 절반 이상이 5km 이내 통행으로 나타나 주로 단거리 이동시에 이 노선버스를 이용하는 것으로 나타났다.

2. 자료 구축

1) O-D 입력

분석에 사용되는 시간단위는 첨두1시간인 반면, 구축되어있는 자료는 일일통행량이므로 이것을 첨두1시간 기준의 통행량으로 환산할 필요가 있다. 이를 위하여 선행연구¹⁰⁾에 제시된 첨두시간집중률을 이용하였



〈그림 5〉 370번 노선의 승하차인원과 재차인원

8) 2004년 10월 28일 기준 일일 통행량. 정류장간 통행량이 버스노선별로 각각 구축되어있다.
 9) 정류장을 하나의 존으로 봤을 때 내부존의 값이 0이 아닌 경우가 발견되는데, 이는 승객이 승차단말기에 카드 접촉 직후 하차단말기에 접촉한 경우로 버스요금의 거리비례제 도입 초기에 나타난 부정행위에 해당한다. 메터의 가공단계에서 발생한 문제가 아닌 원시자료상의 문제이므로 이에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 내부존의 통행량을 정류장별 하차인원에 비율에 따라 다른 존에 배분하는 방식으로 보정하였다. 즉, 정류장 개수가 n, 보정하기전의 정류장 i에서 j로 이동하는 통행량이 Q_{ij}일 때, 보정된 통행량 Q'_{ij}는 다음과 같다.

$$Q'_{ij} = Q_{ij} + Q_{ij} \times \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}, \forall i \in n$$

10) 서울시의 도시형버스 승객의 24.7%와 좌석버스 승객의 23.5%가 오전 첨두시인 07시~09시에 집중되어 있는 것으로 조사된 바 있다. 하루중 가장 높은 이용자비율을 차지하는 시간대는 08시~09로, 도시형버스 및 좌석버스 각각 13.1%, 12.5%로 나타났다. (서울특별시·

다. 370번 버스는 도시형버스로, 9504번 버스는 좌석 버스로 보고 침투1시간집중량을 좌석버스 13%, 도시형버스 12%로 설정하여 일일통행량을 침투1시간 통행량으로 환산하였다.

2) 초기 설정 값

〈표 6〉 파라미터 입력값

항목	단위	입력값
완/급행버스 좌석용량	인/대	60 / 45
대당 버스 운영단가1)	원/대-시	16,487
차내시간가치2)	원/인-시	13,257
차외시간가치2)	원/인-시	19,885
평균승하차시간	분/인	0.3
가감속구간거리	km	0.5
완행평균 주행속도3)	km/h	17.5
급행평균 주행속도3)	km/h	22.4
차내시간계수 (β_1) 4)	서울	-0.052280
	수도권	-0.039520
차외시간계수 (β_2) 4)	서울	-0.062736
	수도권	-0.047424
버스요금계수 (β_3) 4)	서울	-0.006095
	수도권	-0.006807
급행버스요금	원	1,400
완행버스요금	원	거리비례제에 적용
급행정류장 최소간격	km	2

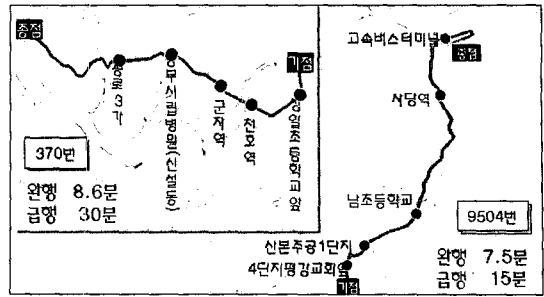
- 1) 김은경 외 3인, "비용최소화를 통한 최적구역분할 버스서비스 모형산정에 관한 연구"(2004 대한국토도시계획학회 추계 정기 학술대회 논문집)의 값을 재인용함
- 2) 차내시간가치는 침투1시간 기준의 분석이므로 버스의 업무목적 통행 시간가치(원/인-시)를 적용함(한국개발연구원, 도로부문사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제4판)). 차외시간가치는 이에 1.5를 곱함
- 3) 급행버스 평균주행속도는 중앙버스전용차로 평균속도를, 완행버스 평균주행속도는 가로변 평균속도를 적용함(서울시정개발연구원, "서울시 버스체계개편효과 및 평가방안에 관한 정책토론회", 2005.4.)
- 4) 교통개발연구원, "대중교통환승요금 할인제도의 도입방안 연구", 2000

3. 결과 분석 및 시사점

1) 최적해 도출 결과

급행버스의 정류장 위치 및 배차간격, 완행버스의 새로운 배차간격을 위의 방법론에 의해 도출한 후, 완행버스만 운영하는 경우를 기준으로 항목별 변화를 비교하였다(〈그림 8〉, 〈표 7〉~〈표 8〉).

먼저, 노선별 최적 정류장의 위치를 살펴보면, 370번



〈그림 8〉 최적 정류장 위치 도출 결과

〈표 7〉 370번 노선의 분석 결과

구분	370번 (간선버스)	
	완행만운영	완급행병행운영
총이용자수 (인/시)	1,314	
소요차량대수 (대)	26	완행 26 / 급행 8
시간당 운행횟수 (대/시)	7	완행 7 / 급행 2
배차간격(분)	8.6	완행 8.6 / 급행 30
총통행시간 (인-시)	737	660 (▼ 10.4%)
총차내시간 (인-시)	643	590 (▼ 8.2%)
총차외시간 (인-시)	94	140 (△ 48.9%)
총교통비용 (천원/시)	10,507	10,762 (△ 2.4%)
운영자비용 (천원/시)	115	148 (△ 28.7%)
차내시간비용 (천원/시)	8,526	7,828 (▼ 8.2%)
차외시간비용 (천원/시)	1,866	2,786 (△ 49.3%)

〈표 8〉 9504번 노선의 분석 결과

구분	9504번 (광역버스)	
	완행만운영	완급행병행운영
총이용자수 (인/시)	585	
소요차량대수 (대)	완행 24	완행 24 / 급행 12
시간당 운행횟수 (대/시)	완행 8	완행 8 / 급행 4
배차간격(분)	완행 7.5	완행 7.5 / 급행 15
총통행시간 (인-시)	565	532 (▼ 5.8%)
총차내시간 (인-시)	528	483 (▼ 8.5%)
총차외시간 (인-시)	37	49 (△ 32.4%)
총교통비용 (천원/시)	7,864	7,858 (▼ 0.1%)
운영자비용 (천원/시)	132	198 (△ 50.0%)
차내시간비용 (천원/시)	7,005	6,662 (▼ 4.9%)
차외시간비용 (천원/시)	727	998 (△ 37.3%)

간선버스 노선의 경우에는 상대적으로 정류장 간격이 균 일하며 지하철과 연계되는 주요 결절지가 최적 정류장 위치로 도출되었다. 이는 장거리통행량 보다 단거리 시내통행이 많은 노선의 특성을 잘 반영한 결과로 볼 수 있다. 이에 반해 9504번 광역버스는 산본, 군포지역에서

서울로 통행하는 승객이 많으므로 최적 정류장 위치도 버스노선의 기·종점에 인접하여 도출되었다.

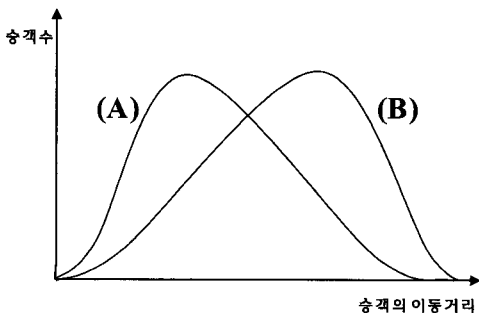
최적배차간격은, 370번 노선은 시간당 2대의 차량을 더 투입하여 8.6분의 배차간격을 유지해야 하는 것으로 분석되었고, 9504번 광역버스의 경우에는 시간당 4대의 차량을 더 투입하여 7.5분의 배차간격을 유지해야 하는 것으로 분석되었다.

특이한 점은, 370번에 급행버스를 투입하여 운행하게 되면 총통행시간은 단축되지만 총교통비용은 오히려 증가하는 결과를 보인 것이다. 이는 시간가치가 더 큰 차외시간이 크게 증가하였기 때문이다. 즉, 차내시간 감소로 인한 비용절감보다 차외시간 증가에 따른 비용 증가의 폭이 더 크기 때문이다. 한편 9504번의 경우에는 차외시간 및 운영자비용이 다소 증가하였으나 차내시간비용의 절감폭이 다른 비용요소의 증가폭보다 크기 때문에 총교통비용은 절감되는 것으로 분석되었다.

2) 시사점

위의 결과를 통해서 장거리 버스노선이라 하여 무조건 급행화 효과가 큰 것은 아님을 알 수 있다. 한가지 확실한 것은 노선의 이용패턴에 따라 교통비용을 최소화 하는 급행버스의 정착위치가 달라지고, 총 이용객의 통행시간 및 버스의 운행횟수가 달라진다는 점이다.

사례노선 분석에서 보듯이 노선을 이용하는 승객의 이동거리가 긴 노선(9504 광역버스)이 급행버스 도입의 효과가 큰 것으로 나타났다. 따라서 노선연장은 짧더라도 승객의 평균이동거리의 분포에 따라 급행버스 도입 효과를 어느 정도 예측할 수 있다고 하겠다. 즉 <그림 9>에서 노선 (A)보다는 노선 (B)의 경우가 급행버스 도입시 더 높은 효과를 볼 수 있을 것으로 예상



<그림 9> 승객의 이동거리분포 개념도
할 수 있다. 따라서 급행버스의 계획시 노선 이용객의

통행 패턴이 반드시 고려되어야 하겠다.

V. 결론 및 향후 과제

연구를 수행하면서 얻은 결과는 다음과 같다.

첫째, 급행버스의 도입은 단거리 통행자보다는 장거리 통행자에게 유리한 정책이다. 따라서 노선 이용자의 패턴을 감안하여 도입여부를 판단할 필요가 있으며, 정류장 위치 및 완·급행 배차간격의 조정도 이를 반영한 것이어야 한다. 더불어, 단순히 이용객수가 많은 곳에 급행버스 정류장을 세운다고 하여 급행버스 도입 효과가 크지 않을 것이라는 것도 확인 할 수 있었다.

둘째, 급행버스 도입으로 인해서 버스의 표정속도가 증가하여 차내시간을 단축할 수 있는 것은 분명하지만, 급행버스 이용을 위해 추가적으로 발생하는 환승 및 대기시간의 증가가 총교통비용을 오히려 증가시킬 수 있다. 따라서, 환승에 따른 불편을 최소화 할 수 있는 지점에 정류장을 위치시키는 것이 중요하다.

본 연구를 수행하는 과정에서 현실모사의 한계로 인해 많은 가정사항이 전제되었다. 그에 따른 향후 연구 과제를 제시하면 다음과 같다.

첫째, 자료의 신뢰도 문제이다. 입력되는 수요에 따라서 운행계획의 변화가 크기 때문에 정확한 수요입력 및 추정이 요구된다. 사례분석에서 활용한 정류장 기반 O-D는 2004년 10월 하루의 데이터로써 노선의 평균 적일 실태를 반영하지 못하며, 서울시 대중교통 요금체계의 변화이후 올바른 버스크드의 이용문화가 정착되지 않아 데이터의 신뢰도가 다소 떨어진다고 볼 수 있다.

둘째, 수단선택에 있어서 본 연구에서는 단순히 차내시간, 차외시간, 요금만 고려하였지만 보다 실제적인 변수들이 고려된 정밀한 수단선택모형이 필요할 것이다. 추가로 고려할 수 있는 변수는 좌석확보율, 쾌적성, 혼잡률 등이 있을 수 있다.

셋째, 분석단위를 1시간으로 하기 때문에 총교통비용을 시간당 비용으로 환산하는 과정에서 발생하는 오차가 클 것으로 예상되며, 실제 적용시에는 분석에는 각종 파라미터들의 객관성 또한 확보되어야 할 것이다.

마지막으로, 본 연구에서 고려한 총교통비용 최소화 전략은 발생가능한 거의 모든 경우에 대하여 고찰하는 형태이므로 분석시간이 오래 걸리는 단점이 있었다. 향

후 최적화 알고리즘을 이용하여 분석시간을 단축하는 노력이 필요하다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), 『제2차 수도권 광역교통5개년계획 및 추진계획(2004~2008)』.
2. 교통개발연구원(2004), 『수도권 광역급행버스시스템 및 환승체계 개선방안』.
3. 교통개발연구원(1997), 『수도권 여객통행행태의 조사 : 개별행태모형의 정립을 중심으로』.
4. 서울시정개발연구원(1999), 『대중교통 요금체계 다양화 방안 연구』.
5. 서울시정개발연구원(1999), 『서울시 종합교통분석체계 정립 및 광역통행분석』.
6. 서울특별시·서울시정개발연구원(2003.5), 『대중교통 요금체계 개선방안』.
7. 원제무(1998), 『도시교통론』, 박영사.
8. 고승영·고종섭(1998), “버스의 최적운행시각 및 보유대수 모형 개발”, 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.169~176.
9. 양창화·손의영(2000), “서울시 지하철 이용객의 환승 관련 변수의 가치 추정 (선호의식(SP) 및 현시선호(RP) 분석을 이용)”, 대한교통학회지, 제18권 제4호, 대한교통학회, pp.19~30.
10. 원제무·박창호·이성모(1994), “수익성을 감안한 경전철의 최적노선 결정방법에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제12권 제3호, 대한교통학회, pp.29~47.
11. 이승헌(1998), “버스 운행특성을 고려한 운영효율 최적화방안에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 토목공학과 공학석사학위논문.
12. 황기연·김익기·이우철(1998), “교통수요관리정책의 효과분석을 위한 다항로짓모형의 적용 -서울시 사례-”, 대한교통학회지, 제16권 제4호, 대한교통학회, pp.53~63.
13. Chang and Schonfeld(1991), “Integration of fixed and flexible route bus system”, Transportation research record 1308.
14. Jansson J. O(1980), “A simple bus line modell for optimisation of service frequency and bus size”, Journal of Transport Economics and Policy, Vol.14.
15. Lee K. K. et al(1995), “Optimal mixed bus fleet for urban operations”, Transportation research record 1503.
16. Mohring H.(1972), “Optimization and scale economies in urban bus transportation”, The American Economic Review.

♣ 주 작 성 자 : 조혜진

♣ 논문투고일 : 2005. 10. 29

논문심사일 : 2005. 11. 30 (1차)

심사판정일 : 2005. 11. 30

♣ 반론접수기한 : 2006. 4. 30