

■ 論 文 ■

다중제약을 고려한 최적 버스운행계획 알고리즘 개발

Development of Optimal Bus Scheduling Algorithm with Multi-constraints

이 호 상

(서울특별시 교통국 교통전문직)

박 종 현

(영산대학교 교통시스템학과 교수)

조 성 훈

(서울특별시 교통국 교통전문직)

윤 병 조

(대한측량 도로교통 소장)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구배경 및 목적
 - 2. 관련문헌 고찰
 - 3. 연구방법
- II. 서울시 버스운영 현황
 - 1. 운영특성
 - 2. 운영기준
- III. 알고리즘 개발
 - 1. 개발방향
- 2. 목표승객수 설정
- 3. 대당회수 산정
- 4. 시간대별 운행회수 산정
- 5. 소요대수 산정
- IV. 적용 및 효과분석
 - 1. 사례적용
 - 2. 효과분석
- V. 결론 및 향후연구
참고문헌

Key Words : 버스운행 계획, 배차간격, 대당회수, 서비스수준, 준공영제
 Optimal Bus Scheduling, Headway, Service Frequency, Maximum Load Point, Semi-Public System

요 약

서울시는 지난 2004년 7월부터 버스에 준공영제(공공관리, 민영운영)개념을 도입한 후 노선별로 불필요한 운영을 최소화하고 승객편익 및 이용수요 증대를 위해 배차 최적화 모형을 연구, 개발하였다. 본 연구는 이러한 노력의 결과물로서 서울시 버스 운영체계에 맞는 노선별 운행대수, 근로조건, 최대 재차인원, 최대/최소 배차간격 등을 제약 조건으로 하고 승객의 대기시간을 최소화하는 Heuristic 배차최적화 모형을 개발하였다. 모형의 적용성을 검증하기 위해 운행 중인 노선에 적용한 결과, 같은 운행대수라도 침두시 배차간격이 좁혀져 승객편익이 증대되었다. 따라서 개발모형은 여러 제약조건을 고려한 최적 배차계획 수립 및 적용을 가능케 하여 버스운영 효율화에 기여할 것으로 판단된다.

After Seoul has introduced semi-public bus management system(public management-private operation), the Seoul Metro Government needs a scientific management tool for optimal scheduling for bus routes, to reduce unnecessary operations and provide demand responsive service. As a product of this effort, this paper proposes a heuristic model that could minimize total passenger waiting time under the constraints, such as number of vehicles, working conditions, max load point, min/max headway, etc. For verifying the validity of the proposed model, it is applied to an existing bus route. It results that headways in rush hours become decreased and the passenger waiting time could be decreased.. In conclusion, it is thought that the proposed model contributes to efficiency of bus operation.

1. 서론

1. 연구배경 및 목적

경제발전과 국민소득 증대로 신속한 이동성, 편리한 접근성 등 양질의 교통서비스를 원하는 수요 증가로 승용차 보유대수가 날로 증가하고 있어, 사회적 손실비용인 교통혼잡비용¹⁾도 크게 증가하고 있다. 더욱이 최근 지속적인 유가 급등은 교통혼잡비용을 더욱 증가시키고 있다.

수송효율을 증대하고 교통혼잡비용을 줄이기 위해서는 대중교통 수단분담률을 증대시켜야 한다. 하지만, 지하철은 막대한 건설비용과 운영적자가 발생할 뿐 아니라 공사 중에도 극심한 도로정체를 유발하여 추가적인 공급이 쉽지 않으며, 버스 또한 접근성 불량, 불규칙한 배차간격, 난폭운행 등으로 이용승객이 점점 줄어드는 추세에 있다. 이에 따라 대부분 노선은 승객감소, 경영악화, 서비스 질 저하의 악순환으로 많은 회사가 도산하고 있으며, 그로 인한 피해는 결국 이용시민에게 돌아가고 있다.

이에 서울, 대전, 대구, 부산, 광주 등에서 준공영제(공공 관리, 민간 운영)를 도입하였거나 도입을 준비하고 있다. 준공영제 도입은 실질적인 노선권을 공공으로 환수한 것으로 교통약자에 대한 공익서비스 의무(Public Service Obligation, PSO)를 가능케 한다. 하지만, 이로 인해 공공부분의 행정 부담이 크게 늘어난 반면, 운수회사는 자발적인 관리의지가 약해져 도덕적 해이 문제도 발생하고 있다. 따라서 효율성 측면에서 공공부분의 버스 배차관리가 매우 중요한 요소가 되었다.

따라서 본 연구는 서울시 시내버스를 중심으로 Heuristic 방식을 이용한 최적 버스운행계획 수립 알고리즘을 다음과 같이 개발하고자 한다. 첫째, 설정 서비스수준 및 노선별 수요자료를 기반으로 최적운행회수를 산정하는 알고리즘(수익중심)과 둘째, 버스공급량(보유대수 등) 등 다양하고 현실적인 제약조건을 고려하여 대기시간 감소 및 이용승객 편익증대가 가능한 알고리즘(편익중심), 셋째, 합리적인 운행계획수립이 가능한 개발알고리즘의 현장적용 프로세스 개발까지를 본 연구의 목적으로 한다.

2. 관련문헌 고찰

1) 서비스 수준

버스의 재차인원은 좌석수 대비 탑승객수를 나타내는 탑승계수(LF, Load Factor)로 표현되는 데, 용량 상태를 나타내는 LOS E를 도로용량편람(KHCM 2001)에서는 LF 200%로, TCQSM(Transit Capacity and Quality of Service Manual, 1998)에서는 150%를 적용하나, 고속도로 운영 노선이나 장거리 노선 등에는 100%를 적용하고 있어 같은 서비스 수준이라 하더라도 우리나라 버스가 더욱 과밀한 기준 하에 관리되고 있다.

배차간격은 운행가능대수와 정책적 기준에 따라 변하게 되는 데, 서울시 시내버스의 경우 90% 이상이 일평균 배차간격 15분 이하로 운행되고 있어 도로용량편람(2001)기준으로 LOS D 이상이나, TCRP 기준으로는 LOS B 수준으로 버스 운행빈도 즉, 공급량에 대한 LOS의 차이가 있다.

2) 운행계획 수립

(1) TCRP Report 30(1998) (참고문헌 10)

미국 연방대중교통부(Federal Transit Administration)와 대중교통개발공사(Transit Development Corporation)가 TRB(Transportation Research Board)에 의뢰하여 작성된 보고서로, 운행계획 수립에 대한 전반적인 내용 및 절차는 잘 정리되어 있으나 서울의 버스환경과 시스템이 미국과 달라 동일한 방법론을 적용하기에는 무리가 있다.

<표 1>은 뉴욕과 서울의 버스여건에 대해 비교·정리한 것으로, 서울은 뉴욕에 비해 이용수요 및 차량이 많고, 노선연장 및 버스 운영시간이 길다. 또한, 시스템 측면에서 서울은 수요의 시·공간적 통행패턴(T-money교통카드), 운행이력(BMS) 등 기초자료를 활용하여 세부 배차계획 수립에 활용이 가능한 반면, 미국 뉴욕은 MetroCard 시스템을 설치하여 무료환승, 다양한 운임체계 운영 등에 활용하고는 있으나, 정류소별 하차/재차 인원, 구간별 운행시간 등의 세부적인 자료가 없어 상세 운행계획 수립 등에 제약이 따른다.

1) 서울시 연평균 교통혼잡비용 증가율 7.47%, 2004년 혼잡비용 5조 7천억 원 (2004년 전국교통혼잡비용 산출과 추이분석, 한국교통연구원)

〈표 1〉 버스여건 비교

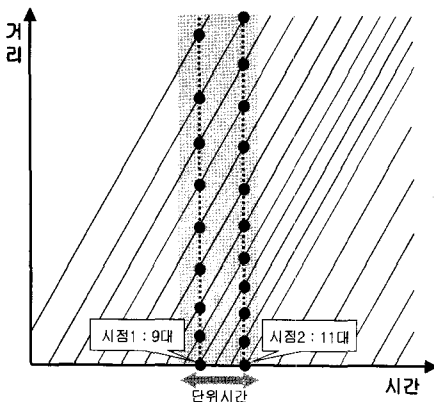
구분	미국(New York)	한국(Seoul)
자료수집	인력조사 + 카드자료 - 탑승조사 - 지점조사	은행이력자료 - 교통카드자료 - BMS자료
운행규모	노 선 수 243개 차량대수 4,524대 노선연장 2,017km	노 선 수 405개 차량대수 7,766대 노선연장 14,046km
승객수	24만/일	544만/일
도시규모	인구 800만명 면적 787km ²	인구 1,030만명 면적 605km ²
관리주체	MTA(Metropolitan Transportation Authority)	서울시청(SMG) 서울시서비스운송사업조합

주 : 대중교통체계개편 성과분석 및 버스관리기구 설립·운영 방안(서울시)
서울시자료는 2006년 기준

(2) 고승영, 고종섭(1998) (참고문헌 1)

수학적 이론을 바탕으로 요일별, 시간대별 최적화식을 도출하여, Heuristic 방법으로 사례분석 및 적용효과를 분석하였다. 하지만 비용 최소화 측면으로 모형이 개발되어 차량용량, 정책적 배차간격, 운전자 근로여건 등이 고려되어 있지 않다. 따라서 운행회수, 운행대수, 배차간격, 최대 재차인원 등의 제약을 고려한 최적 배차계획 수립에는 한계가 있다.

모든 시간대의 운행시간 및 배차간격이 일정할 경우에는 소요대수를 평균 운행시간과 배차간격을 이용하여 단순히 산정할 수 있다. 하지만 실제로는 운행시간 및 배차간격이 시간대별로 다르기 때문에 단순히 계산할 경우 오류가 발생한다. 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 소요대수는 같은 시간대라 하더라도 관찰시점에 따라 동일하지 않으며 이전시간 출발차량 및 도착차량에 의해서 결정되기 때문이다.



〈그림 1〉 소요대수 산정

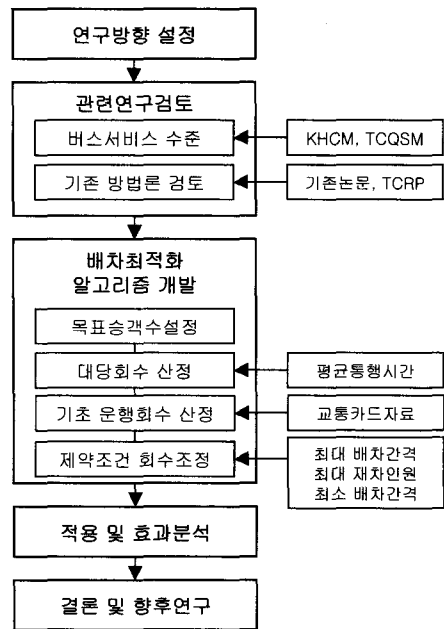
3. 연구방법

본 연구에서는 운전자 근무조건, 비용지급, 인가운행계통 특성, 수집가능 자료 등 서울시 준공영제에 맞는 최적 운행계획 수립 알고리즘을 개발하고자 하며, 전체적인 연구절차는 〈그림 2〉와 같다.

개발에 앞서 관련문헌을 고찰하여 문제점 및 적용기준을 검토하도록 한다. 먼저 버스 서비스수준 기준에 대해 도로용량편람(2001), TCQSM을 검토하여 외국의 기준과 우리나라 기준을 비교하였으며, 운행계획수립방법에 대해 국·내외 기존 논문의 방법론을 검토하여 적용시 문제점을 파악하였다.

기존 서울시 인가현황 및 운행실적을 분석하여 알고리즘에 필요한 파라메타 기준설정 및 기초자료를 수집하고, 수요기반의 시간대별 최적 운행 회수/간격 및 최적 운행대수를 산정하기 위한 알고리즘을 개발한다. 이를 기반으로 현재 운행여건(대수, 회수 등), 근로조건, 비용 산출방식 등의 다양한 제약조건을 반영할 수 있는 최적 운행계획 수립 알고리즘을 개발한다.

개발 알고리즘의 적용성을 검증하기 위해 다양한 분석 시나리오를 구성하고 효과분석을 위한 성능지표(Performance Index, PI)를 선정한 후, 실제 운영 중인 노선에 알고리즘을 적용하여 그 효과를 분석하였다.



〈그림 2〉 연구 흐름도

II. 서울시 버스운영 현황

1. 운영특성

1) 공급현황

서울시내버스는 운수회사 68개, 노선 405개, 차량 7,766대로, 이중 정상차량²⁾은 6,246대(83.7%), 단축차량³⁾은 1,220대(16.3%), 예비차량⁴⁾은 300대(4% 수준)가 운행되고 있다. 평균노선연장은 34.7km이고 광역, 간선, 지선, 순환 순으로 노선의 연장이 길다.

〈표 2〉 서울시 시내버스 운행현황 (단위 : 대, km)

유형	노선수	인가 대수	운행 대수	예비 대수	정상 대수	단축 대수	평균 노선연장
합계	405	7,766	7,466	300	6,246	1,220	34.7
간선	106	3,257	3,134	123	2,635	499	49.4
지선	270	3,976	3,819	157	3,186	633	25.9
광역	25	512	492	20	408	84	71.2
순환	4	21	21	0	17	4	6.1

주 : 2006년 5월말 기준

2) 수요현황

일평균 이용 건수는 평일 5,399천건, 토요일 4,204천건, 공휴일 3,743천건으로 평일대비 토요일 및 공휴일 이용건수 비율이 각각 77.9%, 69.3% 수준으로 운행차량도 이에 맞춰 차등으로 운영되고 있으며, 현금 이용율은 전체이용건수의 8.5%수준이다. 광역노선의 대당 이용건수가 적은 것은 비싼요금, 환승불가, 첨두시 집중이용, 좌석형 등의 원인 때문이다.⁵⁾

〈표 3〉 서울시 시내버스 이용현황

유형	일일 대당이용건수			일일 운행대수 ⁶⁾		
	평일	토요일	공휴일	평일	토요일	공휴일
합계	718	631	638	7,518	6,659	5,869
간선	773	678	688	3,151	2,796	2,473
지선	726	638	640	3,864	3,418	3,002
광역	304	274	286	492	427	376
순환	722	676	782	21	18	18

주 : 2006년 5월 평균 기준

2. 운영기준

1) 운영목표

서울시는 준공영제 도입과 동시에 운송수입금공동관리위원회를 구성하여 시내버스의 총수입금을 수거하여 표준정산지침에 따라 업체별로 비용을 지급하며, 부족분은 서울시에서 보조하고 있다. 하지만, 운영관리 소홀, 운영적자 증대 등 부작용이 발생하고 있어 적정 서비스 수준의 범위를 설정한 후 적정수준의 보조금예산 내에서 운영되도록 관리하고 있다.

회사별 차량대수 제약이 없는 경우, 적정 서비스 수준은 KHCM에서 용량수준으로 제시한 재차인원 62인으로 하고, 최소/최대 배차간격은 민원, 버스전문(행정)가 경험 등에 의해 결정되며 〈표 4〉와 같다.

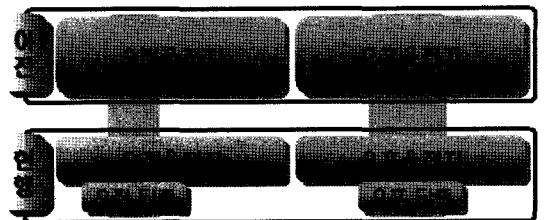
〈표 4〉 정책적 배차간격 (단위 : 분)

구분	새벽	오전첨두	낮	오후첨두	저녁	심야
최소	3	3	3	3	3	3
최대	15	10	12	10	12	15

2) 근로조건

일반적으로 운전자는 오전 또는 오후에 9시간(정상 8, 초과1)씩 근무하며, 주단위로 5일 정상근무, 1일 단축근무, 1일 휴무를 반복한다. 단축근무는 정상근무의 50% 수준인 5시간(오전 또는 오후)을 근무한다.

단축근로(Shift)제는 첨두시간에만 차량을 추가운행하고 나머지시간은 운휴시켜 인건비와 유틸비 등을 절약하기 위해 도입된 제도이며, 〈그림 3〉은 단축근로제의 개념도를 나타낸 것이다.



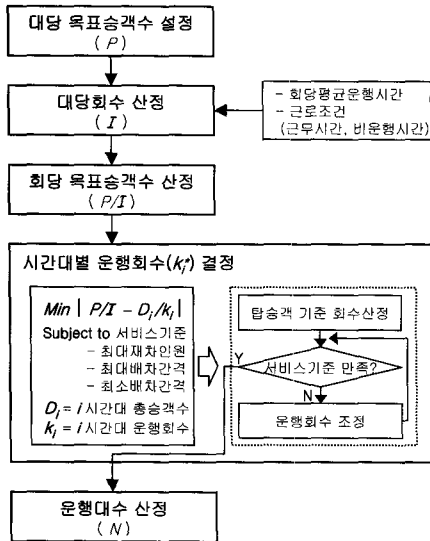
〈그림 3〉 단축근로제 개념도

2) 하루종일(보통 18시간/일) 운행토록 인가된 차량
 3) 첨두시간대 등 특정시간대(보통 10시간/일, 오전/오후 각 5시간)에만 운행토록 인가된 차량
 4) 차량고장 및 사고 등으로 인해 정해진 인가사항(운행횟수, 배차간격 등)을 유지할 수 없을 경우에 투입하기 위해 대기시켜 놓는 차량
 5) 광역노선 형간전환(광역→간선) 사례분석결과 전환전 대비 이용객이 200~300%증가하였음에도, 이용패턴은 유사하게 나타남.(서울시 내부자료)
 6) 배차간격 유지 등을 위해 투입 운영중인 예비차량 포함

III. 알고리즘 개발

1. 개발방향

본 연구에서는 수요를 기반으로 하면서 여러 제약조건(대수, 회수, 휴식시간 등)을 만족시키는 시간대별 최적 운행회수(배차계획)와 운행대수 산정하며, 처리 절차는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 운행회수 산정 흐름도

2. 목표승객수 설정

적정규모 이상의 적자를 발생시키지 않기 위해서는 대당비용 대비 승객(수입) 수준을 정하여 관리해야 한다. <표 5>는 노선 유형별 손익분기점 승객수이다.

예를 들어, 지출비용의 10% 수준의 적자를 감수한다고 하면 목표 승객수는 손익분기점 승객수 평균 857명 $\times 90\% = 771$ 명/대로 산정된다. 하지만 이는 다른 조건을 고려하지 않은 것으로 정책적 배차간격 및 최대 재차인원을 고려할 경우 더 큰 값을 적용해야 한다.

<표 5> 손익분기 대당 승객수 (단위 : 명/대/일)

구분	평균	간선	지선	광역	순환
승객수	857	870	896	403	1,338

주 : 서울시내부자료 (2006. 2 기준)

3. 대당회수 산정

서울시에서는 노선별 운행대수(정상+단축), 총운행회수를 인가하고 식(1)과 같이 산정된 적용운행대수를 기준으로 운행실적에 따라 비용을 지급한다. 적용운행대수는 대당회수에 의해 결정되기 때문에 노선별 적정 대당회수의 산정이 매우 중요하다.

$$TC = N_{adj} \times c_n = \frac{NT}{I_f} \times c_n \quad (1)$$

여기서, TC : 총지급비용

N_{adj} : 적용대수

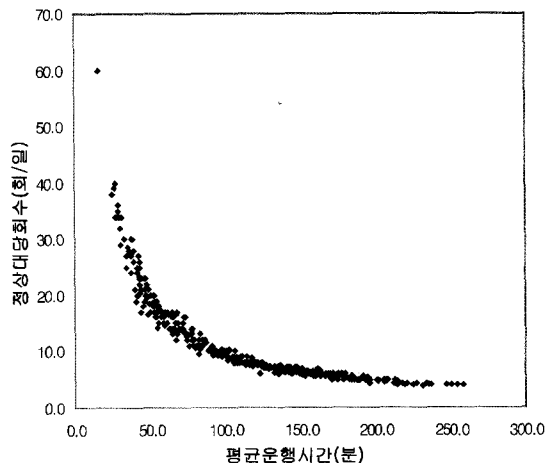
c_n : 대당비용

NT : 총운행회수

I_f : 정상대당회수

대당회수는 다른 여러 요소가 영향을 줄 수는 있으나, 회당 평균 운행시간(t)에 절대적인 영향을 받는다. 회당 평균 운행시간과 인가된 대당회수 관계를 알아보기 위해 노선별 자료를 <그림 5>와 같이 도식화한 결과, 명확한 관계(음지수 형태)로 나타나 평균운행시간을 기준으로 대당회수(I_f)를 산정한다.

근무시간(T_r)은 회사 출근부터 퇴근시간까지의 시간으로 실제로 차량을 운행한 운행시간(T_w), 휴식과 식



<그림 5> 평균운행시간 vs 대당회수

7) 회당평균운행시간은 교통카드(운행출발 및 운행종료 시각) 및 BMS 자료 활용

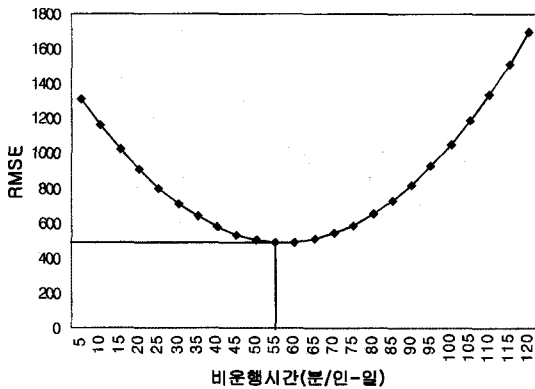
사 등 실제로 차량을 운행하지 않은 비운행시간(T_{nw})으로 나눌 수 있다. 대당회수는 식(2)와 같이 운행시간을 회당평균운행시간으로 나누어 산정한다.

$$I_f = \frac{T_w}{t} = \frac{T_t - T_{nw}}{t} \quad (2)$$

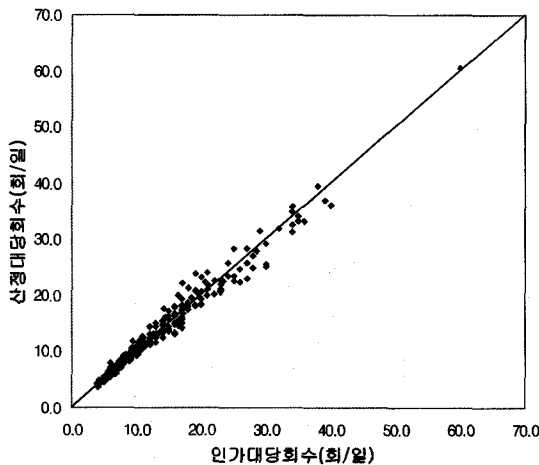
- 여기서, I_f : 산정대당회수
- T_t : 일일 근무시간(시/인)
- T_w : 일일 운행시간(시/인)
- T_{nw} : 일일 비운행시간(시/인)
- t : 평균 회당운행시간(시)

서울시 인가노선(5월말 기준)을 대상으로 비운행시간에 따른 인가대당회수와 산정대당회수(I_f)의 RMSE

비운행시간에 따른 RMSE



<그림 6> 비운행시간에 따른 민감도분석



<그림 7> 인가 vs 산정 대당회수 산포도

<표 6> 운행시간별 적정대당회수

회당평균시간	60분	120분	180분	240분
정상대당회수	16.2	8.1	5.4	4.0

민감도 분석결과, <그림 6>과 같이 1일 1인당 평균 비운행시간이 55분일 경우 오차가 가장 작다.

1일 1인당 평균 비운행시간을 55분으로 적용하여 인가대당회수와 산정대당회수의 일치정도를 알아보기 위한 산포도(Scatter Diagram)는 <그림 7>과 같으며, 상관도(Correlation)는 0.989로 높게 나타나, 비운행시간을 55분으로 정하였다.

산정된 비운행시간을 식(2)에 대입하면, 평균회당운행시간에 따른 정상대수의 적정 대당회수는 <표 6>와 같다. 이는 노선신설 및 변경 시에 평균운행시간 자료만 얻을 수 있다면 대당회수를 산정하는데 기준으로 활용 가능하다. 하지만 노선별 추가 운행시간(공차 운행시간 등)은 별도로 고려해야 한다.

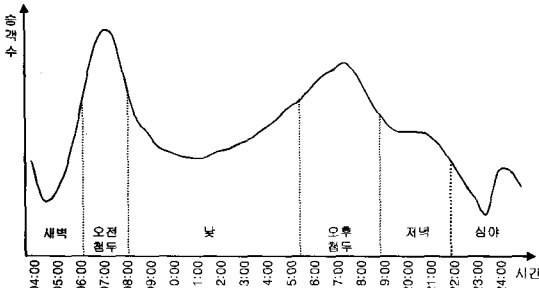
4. 시간대별 운행회수 산정

일반적으로 운행회수는 시간대별 수요와 배차간격에 의해 결정되는 데, 이용 수요는 승차인원 또는 재차인원을 기준으로 한다. 본 연구에서는 시간대별 수요는 변하지 않으며, 평균운행시간은 과거패턴을 따른다고 가정하여, 승차인원을 기준으로 시간대별 운행회수(운행시격)를 결정한 후 제약조건(최대재차인원, 정책적 기준)을 만족하는 범위에서 운행회수를 조정하여 승객 대기시간을 최소화 한다.

1) 시간대 구분

수요특성분석을 통해 운행특성이 동일한 시간대를 구분하고, 각기 다른 파라메타를 적용하기 위해 시간대를 구분하였다. 시간대 구분 단위는 시간단위가 너무 짧은 경우, 특정 시간대 자료수집이 불가능 할 수 있고 수집 자료에 오류(운행지연에 따른 대기승객 증가 등)가 포함될 수도 있다. 반대로 시간단위가 너무 크면 누락 없는 자료수집이 가능하나 시간대별 수요변화 특성을 반영하기 어렵기 때문에 분석단위를 30분으로 정하였다.

시간대는 차고지 출발시간을 기준으로 <그림 8>과 같이 오전과 오후 각각 최대승객 비율(default:80%)을 기준으로 오전첨두와 오후첨두를 설정하고 첫차 시간부터 오전첨두 이전까지를 새벽, 오전첨두에서 오후첨



〈그림 8〉 수요패턴에 따른 시간대구분

두 사이를 낮, 오후침두에서 22시까지를 저녁, 그 이후를 심야로 총 6개의 시간대로 구분하였다.

2) 탑승인원 기준 기초회수

본 연구에서는 서울시내버스에 설치된 교통카드시스템을 통해 수집된 승객자료를 활용하였다. 시간대별 운행회수는 회당목표승객수(대당목표승객수/대당운행회수)를 기준으로 산정한다. 차량용량을 고려한 재차인원이 아닌 승차인원을 기준으로 한 것은 광역버스와 같이 환승이 되지 않거나 환승률이 낮은 노선은 하차태그 비율이 낮아 중점으로 갈수록 재차인원이 과대 계상되는 오류가 발생하기 때문이다.

3) 운행회수보정

승차기반으로 운행회수를 산정하게 되면 특정시간 및 구간에서 차내 과밀이 발생할 수 있으므로 최대재차인원(MLP)을 고려하여 운행회수를 조정한다. 즉, 회당목표승객수를 기준으로 운행회수를 산정하였는데 특정구간에 과밀이 발생한 경우에는 최대재차인원 이하로 떨어질 때까지 증회한다.

또한, 회당목표승객수로만 운행회수(배차간격)를 산정하게 되면 이용수요가 적은 특정 시간대는 배차간격이 길어진다. 특히, 상습 정체구간을 통과할 경우에 차간격이 더욱 벌어져 이용자 불편이 가중되는 것을 막기 위해 최대배차간격을 정하여 적용한다. 예를 들어 최대 배차간격이 15분이면 회당목표승객수에 의해 산정된 배차간격이 25분이더라도 15분이 될 때 까지 증회한다.

5. 소요대수 산정

1) 산정방식

소요시간은 회당 평균운행시간과 회당 최소휴식시간

회차	출발시간	소요시간	도착시간
1	4:00	1:44	5:44
2	4:07	1:44	5:51
3	4:15	1:44	5:59
21	7:05	2:10	9:15
49	9:13	2:15	11:28
50	9:19	2:15	11:34
51	9:25	2:15	11:40

〈그림 9〉 소요대수 산정

의 합으로 정의하며, 평균운행시간은 과거 운행이력자료(BMS, Card)를 활용하여 시간대별로 산정하고, 회당 최소휴식시간은 회당 평균운행시간의 일정 비율(5%)로 정의한다.

동일한 시간대(30분 단위)에 출발한 차량은 동일한 시간이 소요되는 것으로 가정하며, 최종 배차계획을 운행시격(30분/운행회수)에 따라 차례대로 차량을 배차할 경우 필요한 최소 차량을 소요대수로 정의한다.

시간대별 소요대수 중 최대가 되는 대수가 해당 노선의 최소운행대수(N)가 된다. 즉, 결정된 시간대별 운행회수(간격)로 운행하기 위해 필요한 최소 차량대수이다. 〈그림 9〉의 경우 21회차를 기준으로 21회차 도착시간보다 큰 최소 출발시간은 50회차 이므로 운행완료에 필요한 소요대수는 29대다.

2) 대수제약

많은 경우 노선별 운행대수는 현실적으로 기존에 운행하는 보유대수에 의해 정해진다. 따라서 수요에 의한 적정 소요대수 보다는 주어진 대수로 운영 가능한 최적 배차계획을 수립하는 것이 필요하다.

이처럼 운행대수가 제약될 경우에는 대수에 맞는 대당목표승객수를 정한 후 회수보정을 통해 승객대기시간을 최소화하고, 승객편의를 극대화하는 최적 운행계획을 수립한다.

IV. 적용 및 효과분석

1. 사례적용

개발 알고리즘의 적용성을 평가하기 위해 VBA

(Visual Basic Application)를 이용하여 프로그램을 구현하였으며, 적용 대상 노선은 360번으로 선정하고, 승객자료는 2006년 3월 24일(금) 자료를 활용하였다.

1) 자료수집 및 정리

360번의 운행계통은 <표 7>과 같으며, 회차별 정류소별 자료를 30분단위로 정리하면 <표 8>과 같다. 승차인원은 단위시간의 총 승차인원이며, 재차인원은 단위시간의 회당 평균 재차인원이 최대가 되는 정류소에서 재차인원이다.

<표 7> 360번 노선 운행계통

운행대수	대당 회수	총 회수	운행 거리	첫차	막차	사용 연료	
정상 단축	회수	회수	거리	시간	시간	종류	
37	6	4.3	171	55.3km	4:00	23:00	CNG

<표 8> 360번 노선 정리자료 (2006.3.24 기준)

시간대	시간(분)	회수(회)	승차(명)	재차(명)	시간대	시간(분)	회수(회)	승차(명)	재차(명)
4:00~	152	4	538	44	13:30~	201	5	931	51
4:30~	153	4	383	25	14:00~	209	4	804	54
5:00~	162	7	659	41	14:30~	215	4	710	40
5:30~	178	6	993	62	15:00~	211	4	1,056	75
6:00~	181	6	1,213	77	15:30~	222	6	1,326	62
6:30~	184	6	1,163	65	16:00~	230	6	1,059	47
7:00~	184	6	1,357	93	16:30~	227	6	1,062	42
7:30~	192	7	1,390	55	17:00~	211	4	937	57
8:00~	202	6	786	35	17:30~	203	3	827	76
8:30~	200	5	614	34	18:00~	199	6	1,242	53
9:00~	192	2	280	35	18:30~	193	5	856	60
9:30~	260	5	674	38	19:00~	195	3	429	41
10:00~	178	3	385	37	19:30~	341	4	623	45
10:30~	174	4	480	34	20:00~	179	3	424	43
11:00~	176	5	640	40	20:30~	182	4	800	71
11:30~	183	5	639	33	21:00~	170	2	391	67
12:00~	178	4	580	44	21:30~	163	3	431	60
12:30~	188	5	863	51	22:00~	160	2	269	57
13:00~	191	4	730	53	22:30~	145	3	395	38

2) 시나리오 작성

시나리오1(S1)은 정책적 제약조건과 차량용량만 고려하여 수요기반으로 운행계획을 수립하는 것으로 운행비용을 최소화(수익중심)화 하며, 시나리오2(S2)는 가용 차량대수와 인가 총횡수(근로시간 고려) 등 현실적인 제약조건을 고려하여 승객의 대기시간을 최소화(편익중심)화 한다. 시나리오 분석 시 적용한 파라메타는 <표 10>과 같다.

<표 9> 분석시나리오

구분	내용	계획수립 방법
S1	수익중심 (정책기준)	- 정책적 제약조건만 고려 - 승객수요 기준으로 배차계획 수립
S2	편익중심 (계약조건)	- 수요기반 배차계획이 기초 - 대수 및 총횡수 만족토록 계획 조정

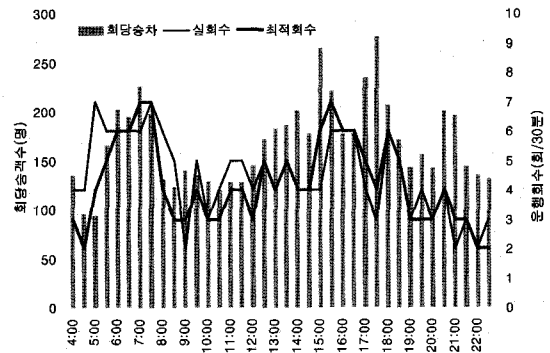
<표 10> 적용 파라메타

• 목표대당승객수	: 900명
• 최대재차인원(MLP)	: 62인
• 1인당 비운행시간	: 55분
• 회당 최소휴식시간 비율	: 5%

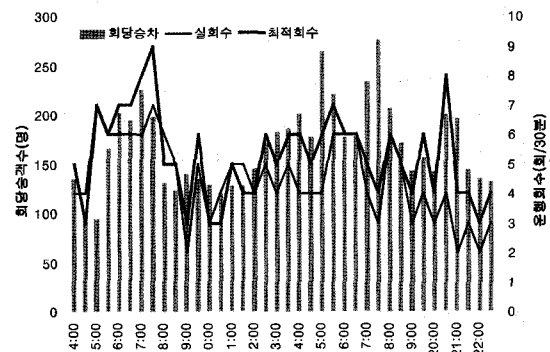
구분	새벽	오전첨두	낮	오후첨두	저녁	심야
배차	최소 3	3	3	3	3	3
간격	최대 15	10	12	10	12	15

3) 적용결과

시나리오1에 대한 배차계획 수립결과, 소요대수는 현재와 동일한 43대, 적정 총 운행회수는 10회가 줄어든 161회로 산출되었다. 세부결과는 <그림 10>과 같이 운행회수가 비첨두시는 16회(111→95) 줄고, 첨두시는 오히려 6회(60→66) 증가하여 수요에 따라 공급



<그림 10> 시나리오1 적용 결과



<그림 11> 시나리오2 적용 결과

이 조정되었음을 볼 수 있다.

시나리오2의 경우, 인가대당회수는 4.3회이나 회당평균운행시간을 기준으로 산정된 대당회수가 5.0회로 대당 0.7회 추가 운행이 가능한 것으로 분석되었기 때문에 총운행회수가 29회 늘어난 200회로 배차계획을 수립하였다. 상세결과는 <그림 11>과 같으며, 침두 운행회수는 11회(60→71), 비침두 운행회수는 18회(111→129) 증가하였다.

2. 효과분석

개발 알고리즘의 성능(Performance)을 알아보기 위해 LOS(배차간격, 재차인원), 승객대기시간, 비용편익 변화를 성능지수(Performance Index, PI)로 설정하였으며 적용 전·후 PI를 비교분석하였다.

1) LOS

시나리오1은 배차간격이 침두시 0.5분(10.0%) 단축, 비침두시는 1.2분(1.64%) 증가하여 재차인원 LOS가 각각 F→E(침두), D→E(비침두)로 변했고, 시나리오2는 배차간격이 침두시 0.9분(16.4%), 비침두시는 1.0분(13.7%) 단축되어 재차인원 LOS가 각각 F→E(침두), D→C(비침두)로 크게 개선되었다.

<표 11> LOS변화

구분	배차간격(분)		최대재차인원(명/대)	
	침두	비침두	침두	비침두
기존	5.5 (B)	7.3 (C)	63 (F)	45 (D)
S1	5.0 (B)	8.5 (C)	57 (E)	53 (E)
S2	4.6 (B)	6.3 (C)	53 (E)	39 (C)

주 : () 안은 KHCM(2001) 기준 서비스 수준임

2) 승객대기시간

대기시간을 계산하기 위해서는 개별 승객 및 차량의 도착시간을 알아야 하나 정류소 도착시간 및 분포를 조사하기 어렵기 때문에 정류소 도착분포가 균일(Uniform Distribution)하다고 가정하여 산정하였다. 승객도착이 균일하고, 단위시간대별 배차간격이 모든 정류소에서 일정하게 유지된다면 승객의 평균대기시간은 배차간격의 1/2이 된다.

침두시 총 대기시간은 기존대비 시나리오1이 67인-시간(11.3%), 시나리오2가 98인-시간(16.5%) 감소되어 인당 평균 대기시간은 각각 19초, 28초 감소하였다.

<표 12> 대기시간 변화

구분	총 대기시간 (인-시간)		인당 평균 대기시간	
	침두	비침두	침두	비침두
기존	594	1,001	2분49초	3분41초
S1	527	1,147	2분30초	4분13초
S2	496	851	2분21초	3분08초

3) 비용편익 분석

일반적으로 비용편익분석(Benefit-Cost Analysis)은 총비용과 총편익의 비율(B/C ratio)로 분석하나 본 연구에서는 기존의 발생총편익 추정이 어렵기 때문에 기존대비 시나리오별 비용과 편익 변화만을 고려하였으며, 비용은 운행회수 변경에 따른 유류비, 편익은 앞서 분석한 대기시간 감소분을 반영하였다.

오전침두는 업무통행시간가치, 나머지 시간대는 비업무통행시간가치를 적용하여 분석한 결과는 <표 13>과 같으며, 시나리오1은 비용감소보다 편익증가가 적어 총효용이 감소하였으나, 시나리오2는 회수증가로 비용은 증가하였으나 편익증가분이 더 커 일일 총효용이 196,187원(연간 71백만원) 증가했다.

<표 13> 비용편익분석 결과

구분	S1	S2
비용(㉑)	-198,527원	575,728원
편익(㉒)	-223,480원	771,915원
총효용(㉒-㉑)	-24,953원	196,187원

주 : 대중교통체계개편 성과분석 및 버스관리기구 설립·운영방안 2004년 전국교통혼잡비용 산출과 추이분석
km당 연료비 : 대형경유 484원, 대형 CNG 359원

V. 결론 및 향후연구

서울시에서는 대중교통 수송분담률 감소, 버스업체 경영여건 불균형 심화 및 업체부도 증가로 인한 시민 불편 증가로 2004년 7월 지하철·버스 통합거리비례제(무료환승)를 근간으로 하는 준공영제를 도입하였다.

준공영제 도입으로 시내버스의 승객증가, 서비스 질 향상, 노선 공공화, 대중교통 네트워크 형성 등의 여러 성과를 거두었지만, 과학적 운영률 부재, 운수업체 도덕적 해이, 운영적자 증가 등의 문제도 발생하였다. 이러한 문제해결의 일환으로 데이터를 기반으로 한 배차 최적화 알고리즘 개발의 필요성이 대두되었다.

서울버스에 설치된 교통카드시스템과 BMS는 각각 요금징수/관리, 운행관리를 위해 구축되었으나 이들을

통해 수집된 데이터는 버스의 체계적이고 과학적인 운영관리에 매우 중요하게 활용되고 있다.

본 연구에서는 교통카드와 BMS로부터 수집한 데이터를 활용하여 운행대수제약, 운행회수제약, 근로조건 제약, 최대재차인원, 최소/최대 배차간격 등 여러 조건을 만족하는 최적 운행시격 및 대수를 결정하는 알고리즘을 개발하였다.

개발 알고리즘의 적용성 검증을 위해 360번(43대)에 적용한 결과, 동일한 운행대수로 철두시에 더 많은 회차 투입이 가능한 배차계획을 수립하였으며, 근로시간 제약 내에서 운행회수를 최대로 늘려 이용자의 대기 시간을 감소시킴으로써 연간 편익이 71백만원 증가하였다. 따라서 개발 알고리즘을 전 노선에 확대 적용할 경우 승객편익이 크게 증가할 것으로 기대된다.

하지만, 개발 알고리즘은 회당 평균운행시간을 기준으로 차고지 출발 배차간격이 전 구간에서 동일하게 유지된다고 가정하였으나, 혼잡구간에서는 기준 배차간격 이상으로 벌여 질 가능성이 있으며, 배차간격에 조정에 따른 이용승객 변화를 고려하지 않아 분석결과의 현실성이 떨어질 수 있다. 따라서 구간단위의 세부자료의 고려와 배차간격 변화에 따른 수요예측모형 개발이 필요하다. 또한 주요 파라미터를 시간대별로 차등하여 세부적인 적용이 가능한, 돌발 발생 시 실시간으로 주변여건을 고려하여 배차계획을 수립·적용 가능한 알고리즘과 다중제약이 가능한 최적인력배치 모형 개발도 필요하다.

참고문헌

1. 고승영·고종섭(1998), "버스의 최적운행시격 및 보유대수 모형 개발", 대한교통학회지, 제16권 제2호, 대한교통학회, pp.169~176.
2. 고종섭·고승영(1999), "다시간대에 대한 버스 스케줄링 모형 개발", 대한교통학회지, 제17권 제4호, 대한교통학회, pp.47~58.
3. 건설교통부(2001), 도로용량편람.
4. 서울시정개발연구원(2003), "서울교통시스템개편 실행방안".
5. 서울시정개발연구원(2004), "서울시 버스체계개편에 따른 모니터링 연구".
6. 서울시정개발연구원(2006), "대중교통체계개편 성과분석 및 버스관리기구 설립·운영방안".
7. 한국교통연구원(2005), "2004년 전국교통혼잡비용 산출과 추이분석".
8. Ali Ganghani(2001), "A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models", Transportation Research Part A.
9. 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.
10. Kurt Ker-Tshung Lee, Sharon H. F. Kuo, and Paul M. Schonfeld(1995), "Optimal Mixed Bus Fleet for Urban Operations", TRR1503, pp.39~48.
11. R.H.Oldfield and P.H.Bly(1988), "An Analytical Investigation of Optimal Bus Size", Transportation Research 22B, pp.319~337.
12. Shangyao Yan(2000), "A scheduling model and a solution algorithm for inter-city bus carriers", Transportation Research Part A.
13. TRB(1998), "TCRP Report 30 - Transit Scheduling : Basic and Advanced Manual".
14. TRB(1999), "TCRP Web Document6 - Report Transit Capacity and Quality of Service Manual".

✉ 주 작성자 : 이호상

✉ 교신저자 : 이호상

✉ 논문투고일 : 2006. 8. 16

✉ 논문심사일 : 2006. 9. 5 (1차)

2006. 11. 9 (2차)

2006. 11. 20 (3차)

✉ 심사판정일 : 2006. 11. 20

✉ 반론접수기한 : 2007. 4. 30