

■ 論 文 ■

# Set Covering 理論을 利用한 시내버스 最適路線網 構築에 關한 研究

A Study on the Optimal Urban Bus Network Design  
Using the Set Covering Theory

**이 승 재**

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

**최 재 성**

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

**백 혜 선**

(서울시정개발연구원 도시교통연구부)

## 목 차

- I. 서론
  - 1. 연구의 배경 및 목적
  - 2. 연구의 내용 및 범위
- II. 시내버스 노선계획 방법론 개발
  - 1. 관련이론 고찰
  - 2. 방법론의 구조
  - 3. 방법론의 알고리즘
- III. 방법론의 평가
  - 1. 방법론 평가를 위한 모의적용
  - 2. 방법론 향상을 위한 대안제시
- IV. 최적 노선망 도출
- V. 결론
- 참고문헌

## 요 약

지금까지 시내버스 노선계획에 관한 대다수의 연구는 개별노선에 대한 지역적인 분석을 바탕으로 하고있으나 본 연구에서는 각 노선의 개별적 고려가 아닌 네트워크 차원의 최적화를 위한 노선계획 방법론을 제시하였다.

본 연구에서 제시하는 방법론은 계획가적 관점에서 버스이용자를 포함한 모든 통행자는 최단경로로 통행하기를 희망한다는 기본 전제하에 각 기종점의 최단경로로 구성된 대안 노선망을 도출하고 matrix 형태의 집합개념을 도입한 Set Covering 이론을 적용하여 노선공급수준을 축소하였다. 또한 노선축소과정에서 지금까지 부수적 통행요소로 인식되어온 환승을 활용하여 통행수요를 만족하는 최소규모의 노선망을 도출하였다. 본연구는 고정수요를 가정하는 기존 연구와 달리 통행자 행태를 반영한 최적 노선망을 도출하기 위하여 시내버스 노선망 대안에 대한 가변수요를 구현하였다. 따라서 본 연구를 통하여 자가용이용자와 버스이용자로 구성된 전체 네트워크의 통행비용을 최소화하며 서비스 제공규모를 최소화하는 최적 시내버스 노선망을 도출하였다.

연구결과 기존연구와 비교하여 서비스 공급수준을 축소할 뿐 아니라 통행자의 행태를 고려한 해를 도출함으로써 현실성을 제고하였다.

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

교통문제와 환경문제의 중요한 해결방안인 대중교통의 활성화를 위하여 서비스제공의 기본틀을 형성하는 네트워크 구조에 대한 평가와 이를 개선할 수 있는 방법론이 마련되어야 한다고 사료되며 이에 본연구는 연구대상을 시내버스로 한정하여 최적 노선망 구축방법에 대한 연구를 수행하였다.

지금까지 국내 버스노선계획과 관련한 대부분의 연구는 기존노선이 나타내는 현상적인 문제점을 진단하고 이를 바탕으로 각 노선에 대한 개편대안을 마련하고 평가하는 것이었으나 본연구에서는 시내버스 노선계획에 있어 각 노선의 개별적 고려가 아닌 네트워크 차원의 최적화가 이루어지도록 노선을 계획하는 방법론을 모색하였다.

이와 관련한 기존의 방법론은 노선간 간격, 노선연장, 정류장간격, 배차간격 등 몇가지 파라메타에 대하여 최적해를 구하는 것이다. 즉, 고정적인 수요, 기설정된 파라메타, 승객수와 운영비용의 합을 최소화하는 목적함수와 같은 몇가지 가정을 기초로 하고있다.

그러나 본연구에서는 가변수요모형을 적용하여 네트워크 전체 통행자의 비용을 최소화하며, 직접적인 노선제공의 부수적 결과로만 인식되던 환승경로를 노선망구축의 중요한 요소로 활용하여 통행수요를 만족시키면서 노선공급을 최소화하는 일반화된 방법론을 구축하고자 하였다.

### 2. 연구의 내용 및 범위

본 연구가 제시하는 방법론은 크게 세부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 노선망 대안구성 둘째, 통행 특성을 반영한 대안평가 셋째, 최적노선망 도출.

첫째, 노선망 대안구성 과정은 최종적으로 도출되는 최적노선망 후보집합의 각 노선 기종점과 경유지를 결정하며 다양한 공급수준의 대안을 구성한다. 본 연구의 방법론은 버스를 이용하는 통행자도 최단경로의 통행을 희망한다는 기본 접근에서 각 노선은 존간 최단경로를 바탕으로 한다. 또한 모든 기종점 통행에 직접 연결노선을 제공하는 노선망과 공급비용의 최소화를 위하여 환승을 극대화하는 노선망을 공급규모의 상한과 하한으로 도출한다.

둘째, 대안평가과정은 대안노선망에 대하여 배차간

격, 환승여부, 요금지불비용, 통행시간 등 통행자의 수단선택행태를 반영하여 전체 네트워크의 통행결과를 분석하는 과정이다. 대부분의 버스노선 최적화를 위한 선행연구가 수요를 고정적인 것으로 가정하고 있으나 본 연구에서는 이를 현실화하고 버스이용자와 자가용 이용자 모두를 고려한 최적 노선망을 구축하기 위하여 가변수요를 적용한 다수단 균형통행배정을 구현하였다.

셋째, 최적노선망 결정과정으로 이는 대안평가과정에서 얻어진 시뮬레이션결과를 통하여 최적 노선망을 판단한다. 이 과정에서 비금전적 가치의 비용 전환시 다양한 파라메타(parameter)가 쓰이는데 모의 네트워크에서는 이러한 파라메타를 추정할 수 없으므로 실제 도시를 대상으로 최근에 수행된 연구결과와 값을 적용하였다.

## II. 시내버스 노선계획 방법론 개발

### 1. 관련이론 고찰

본 연구가 네트워크 계획(network design)을 대상으로 하지만 일반적인 네트워크 관련 이론에 대한 설명은 생략하고 본 연구를 통해 제시하고자 하는 방법론에서 중요한 요소로 판단되는 가변수요모형과 Set Covering 이론에 대하여 설명하고자 한다.

#### 1) 네트워크 계획에서의 가변수요모형

지금까지 수단선택과 노선선택을 결합한 균형상태(equilibrium)의 해를 구하기 위한 연구가 이루어져 왔으며 특히, 네트워크 계획에 있어 가변수요는 균형해가 이러한 네트워크 변화에 따른 영향을 반영하도록 해야 한다. 본 연구는 시내버스 노선을 계획하는 것이기 때문에 네트워크 환경이 변화된다. 즉, 기본 도로망에 시내버스 노선공급을 통해 나타나는 통행저항 변화로부터 각 O/D에 대한 연결성을 변화시켜 수단분담이 달라지는 것이다.

따라서 본 연구는 다음의 모형식을 통하여 다수단 통행배정에서 균형상태의 해를 구하였다.

$$\begin{aligned} \min f(v, g) = & \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} s_a(v + x_a) dv \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{a_i \in A_i} \sum_{a_j \in A_j} \int_0^{v_{a_i a_j}} p_{a_i a_j}(v + x_{a_i a_j}) dv \\ & - \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} (1/\eta_{pq}) \int_0^{g_m} W_{pq}(y) dy \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{st. } v_a &= \sum_{k \in K} \delta_{ak} h_k \quad a \in A \\
 v_{a_1 a_2} &= \sum_{k \in K} \delta_{a_1 k} \delta_{a_2 k} h_k \quad a_1 \in A_1^-, a_2 \in A_1^+, i \in \bar{I} \\
 \sum_{k \in K_{pq}} h_k - (g_{pq}/\eta_{pq}) - \gamma_{pq} &= 0 \quad p \in P, q \in Q \\
 h_k &\geq 0 \quad k \in K_{pq}, p \in P, q \in Q \\
 g_{pq} &\geq 0 \quad p \in P, q \in Q
 \end{aligned}$$

위의 모형식에서

- $p \in P$  : 통행 발생존 집합
- $q \in Q$  : 통행 도착존 집합
- $i \in \bar{I}$  : 자가용 네트워크의 노드 집합
- $a \in A$  : 자가용 네트워크의 링크 집합
- $a \in A_i^-$  : 노드  $i$  가 링크의 끝인 링크 집합
- $a \in A_i^+$  : 노드  $i$  가 링크의 시작인 링크 집합
- $k \in K_{pq}$  :  $pq$ 를 직접 연결하는 경로의 집합
- $k \in K$  : 모든 직접경로 집합
- $i \in \bar{I}$  : 회전 penalty가 있는 교차로 노드
- $v_a$  : 링크  $a$ 의 자가용 교통량(volume)
- $x_a$  : 링크  $a$ 의 자가용 이외의 교통량
- $v_{a_1 a_2}$  : 링크  $a_1, a_2$  사이의 회전 자가용 교통량
- $g_{pq}$  :  $pq$  존간 자가용 자가용 수요
- $\gamma_{pq}$  :  $pq$  존간 자가용 이외의 수요
- $\eta_{pq}$  :  $pq$  존간 통행의 재차인원
- $h_k$  : path  $k$ 의 교통량
- $\delta_{ak}$  : 이진변수, 링크  $a$ 가  $k$ 에 포함되면 1 그렇지 않으면 0
- $S_a(v_a)$  : 교통량-지체값(volume delay) 또는 비용 함수(cost function)
- $W_{pq}(g_{pq})$ :  $pq$  존간 통행시간의 자가용 수요함수

위의 목적함수를 세 부분으로 나누어볼 수 있는데, 첫 번째 항목은 링크  $a$ 의 교통량-지체함수(volume delay function)로 산출되는 링크 통행시간 혹은 비용, 두 번째 항목은 회전 penalty로서 증가함수

형태의 회전통행 비용함수를 적용할 수도 있으나 본 연구에서는 고정 penalty 값(2분)을 적용하였다. 세 번째 항목은 자가용 통행수요 함수 즉, 수요함수로 구해지는 존간 통행시간을 산출하는 것으로  $\int_0^{g_{pq}} W_{pq}(y)dy$ 는 일반적인  $\int_0^{G_{pq}} D_{pq}^{-1}(w)dw$  이며  $D_{pq}(c_{pq}) = g_{pq}$  로서  $D_{pq}(c_{pq}) = \frac{G_{pq}}{1 + \exp(\theta c_{pq})}$  로 하였고 여기에서  $G_{pq}$ 는  $p$ - $q$ 간의 총수단통행량,  $c_{pq}$ 는 두 존사이의 자가용 통행비용을 의미한다.

이들 세가지 요소 중 앞의 두 항목은 링크에 대한 함수이며 세 번째 항목은 존간 통행에 대한 함수로서 자가용 통행수요에 따른 통행시간 함수를 나타내어 가변수요의 균형해를 도출하는 부분이다. 이와 같이 수단선택과 노선배정이 결합된 모형에서는 균형 통행 배정결과가 네트워크 특성으로 입력되고 그 결과 새로운 균형해를 도출하는 과정을 거쳐 최종 균형상태에 도달하도록 하는 반복 순환(feedback iteration) 과정이 수반된다.

## 2) Set Covering Theory

Set Covering 이론은 일반론 'Column Generation'<sup>1)</sup>에 기초하여 네트워크계획에 적합한 Covering 개념을 정의하여 시내버스 네트워크 계획시 필수적으로 수반되는 의사결정 수행결과를 도출해내는데 유용하게 활용할 수 있는 Matrix 구조로, Avishai Ceder & Yechezkel Israeli 에 의해 제시된 것이다<sup>2)</sup>. 네트워크 계획 문제 대부분은 비용을 최소화함과 동시에 필요한 부분에 서비스가 충분히 제공되도록 하는 것이다. 이때 서비스가 공급되는 부분과 그렇지 못한 부분을 파악하고 관련비용을 분석할 수 있는 방법이 필요한데 Set Covering 이론이 이러한 요구를 효율적으로 만족시킬 수 있는 연산기법이라 판단된다.

네트워크 계획시 각 대상에 따라 적합한 형태의 Covering Matrix를 구성하게 되는데 시내버스 노선 계획에 적용되는 Matrix는 다음과 같다.

1) Ashok B. Boghani, Eric w. Kimble, Ethan E. Spencer(1991), "Can Telecommunications Help Solve America's Transportation Problems?," Arthur D. Little, Inc. Acom Park Cambridge, Massachusetts.  
 2) Avishai Ceder & Yechezkel Israeli, Non-Linear Set Covering Problem Method for Transit Network Design, 8th WCTR(World Congress of Transportation Research)(1997) p.15.

〈표 1〉 연결경로(Feasible Path)를 정의하는 Matrix A

	r ∈ R	f ∈ F			
		k <sub>r</sub> =1	k <sub>r</sub> =2	...	k <sub>r</sub> =n
i, j ∈ N	{a <sup>r</sup> <sub>ij</sub> }	{a <sup>1</sup> <sub>ij</sub> }	{a <sup>2</sup> <sub>ij</sub> }	...	{a <sup>n</sup> <sub>ij</sub> }
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	{c <sub>r</sub> }	{c <sub>f</sub> }	{c <sub>f</sub> }	...	{c <sub>f</sub> }

$R = \{r_1, r_2, \dots\}$  : 노선  $r$ 의 집합으로 환승없이 직접연결  
 $F = \{f_1, f_2, \dots\}$  : 환승경로  $f$ 의 집합  
 $a_{ij}^r$  : 존  $i, j$ 의  $r$  존재여부를 나타내는 이진변수  
 $a_{ij}^f$  : 존  $i, j$ 의  $f$  존재여부를 나타내는 이진변수  
 $A_R = \{a_{ij}^r\}, A_F = \{a_{ij}^f\}$   
 $A = \{A_R, A_F\}$  :  $ij$ 의 직접연결노선 혹은 환승경로를 통한 통행가능여부를 나타내는 이진변수 Matrix  
 $t_{ij}^r, t_{ij}^f$  :  $ij$ 사이의 직접연결경로 혹은 환승경로를 이용한 통행시간  
 $t_{ij}^m$  :  $ij$ 사이의 최단경로 통행시간  
 $k_f$  : 버스환승회수

$$c_r = \sum_{i,j \in N_r} (t_{ij}^r - t_{ij}^m) \quad \forall r \in R$$

$r$ 노선으로 통행가능한 모든  $ij$ 에 대한 각각의 통행시간과 최단경로를 이용한 통행시간 차이의 누적

$$c_f = \sum_{i,j \in N_f} (t_{ij}^f - t_{ij}^m) \quad \forall f \in F$$

환승경로  $f$ 로 통행가능한 모든  $ij$ 에 대한 각각의 통행시간과 최단경로 통행시간 차이의 누적

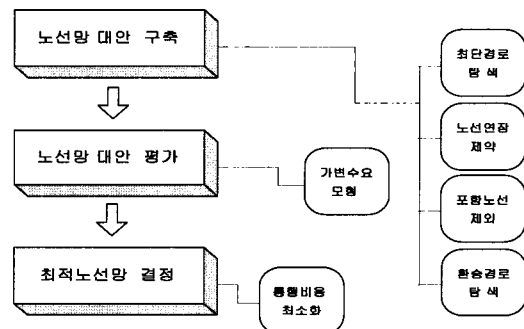
## 2. 방법론의 구조

대중교통 특히 시내버스 노선계획은 네트워크상의 노선배정과 함께 가장 복잡하고 여러 요소가 관련된 문제로서 독자적으로 문제를 모형화하기 어렵다. 이러한 문제는 부분적으로 비선형 프로그램으로 모형화될 수 있으나 이는 기존에 알려진 수학적 프로그램이나 컴퓨터 패키지(computer package)로 풀 수 없다. 본 연구에서 제시하는 방법론은 각각 분리된 독

립적 요소가 반복과정에 의해 연결되는 형태의 접근에 해당하는 것으로 판단된다. 또한 전술한 기존 연구와 같이 최적해를 구하는 동안 탐색과정의 수학적 프로그램과 의사결정 방법으로 구성된다. 본 연구를 통해 제시하고자 하는 방법론에 대해 몇가지 기본적인 성격을 규정하면 다음과 같다.

- 각 존간 통행수요에 대해 최소의 접근성을 보장하면서 노선길이를 최소화한다. (maximum covering, shortest path)
- 버스에 대한 통행수요는 가변적이다. (variable demand)
- 버스이용자는 하나의 기종점통행에 대하여 여러 경로를 이용할 수 있다.
- 운영자, 버스이용자, 자가용이용자를 모두 고려한 최적해를 도출한다.
- 노선계획과 운영요소를 연결하여 계획할 수 있도록 한다.
- 최적해 결정을 위해 여러 가지 파라메타의 민감도 분석이 가능하도록 한다.

본 연구의 방법론은 이와 같은 기본적인 구조하에 최단경로에 기초하여 대안노선을 도출한 후 최적노선망을 구성하는 노선집합을 형성하는 것으로 노선집합 대안구성을 위한 노선집합 구성순서(set covering rule)를 정의하고 가변수요모형을 적용하여 균형통행량을 배분한다. 통행배분결과 네트워크상에 나타난 통행특성을 바탕으로 최적성 판정에 필요한 여러가지 성과지표를 도출한 후 최종 목적함수 값을 산출하여 대안 노선집합으로부터 최적 노선집합을 도출한다. 따라서 본 연구가 제시하는 방법론을 개략적으로 나타내면 다음과 같다.



〈그림 1〉 방법론의 구조

### 3. 방법론의 알고리즘

#### <기본가정>

1. 모든 노선은 왕복 운행한다.
2. 통행자가 이용할 수 있는 수단은 버스와 자가용승용차 뿐이다.
3. 노선발생에 있어 차고지 제약은 고려하지 않는다.
4. 환승경로 구성시 최대 환승회수는 1회로 하고 이 경로가 최단경로와 같은 경우로 제한한다.

#### <단계 0> 기초자료 입력

네트워크 자료 : 노드  $N = \{n_i\}$ ,  $i=1,2,\dots,a$   
 링크  $L = \{(n_i, n_j)\}$ ,  
 $i=1,2,\dots,a$   $j=1,2,\dots,a$   
 존간 통행량 :  $Q = \{q_{ij}\}$ ,  $i=1,2,\dots,a$   
 $j=1,2,\dots,a$

#### <단계 1> 최단경로탐색에 기초한 제약조건을 만족하는 대안노선 생성

대안노선 : 최단경로 (거리기준)  
 제약조건 :  $l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}$   
 (최소, 최대 노선연장 제약)  
 $n_i, n_j = T_k$  (노선의 기종점에 차고지가 제공됨)  
 $Q_{\min} \leq Q_{n_i, n_j}$  (직접수송 최소요구 수요량)

#### <단계 2> Covering Matrix도출, 노선의 포함관계 (dominant column)에 의한 대안노선 축소

2-① 대안노선의 Covering Matrix 구성  
 행 : O/D (i, j)  
 열 : 직접연결노선  $R = \{r\}$   
 셀값 :  $(a_{i,j}^r) = 1$  or  $0$  이진변수 해당 열의 노선으로 해당 행의 O/D 통행이 가능한 경우 '1' 그렇지 않은 경우 '0'

2-② 포함관계노선(dominant column) 탐색, Matrix 축소  
 if  $\dots \forall_{i,j} (a_{i,j}^r)_{i,j} \geq \forall_{i,j} (a_{i,j}^{r'})_{i,j}$   
 then  $\dots \forall_{i,j} (a_{i,j}^{r'})_{i,j} = 0$

#### <단계 3> 노선집합 구성순서(set covering order) 정의, 환승경로에 따른 Matrix 축소, 순차적 대안노선집합 정의

- 3-① 노선집합 대안 구성시 새롭게 연결되는 O/D의 수가 많은 노선을 우선적으로 집합에 포함시키는 것으로 한다.
- 대안노선집합에 3-①의 순서에 따라 두 노선을 포함시킨다.
- 3-② 환승경로 탐색에 따른 Matrix 축소
- 대안 노선집합에 포함된 노선의 두 조합으로 이 들간의 환승노드 탐색
  - 가능한 환승경로 탐색
  - 도출된 환승경로가 집합에 포함되지 않은 후보 집합의 최단경로와 같은지 비교
  - 같은 경우 대안노선 후보집합에서 최단경로 제외
- 3-③ ②의 결과에서 ①의 노선집합 구성순서(covering order)에 따른 순차적 후보노선집합 도출
- 3-①의 순서에 따라 새로운 노선선택 대안노선 집합에 포함
  - 3-②의 과정에 따라 후보노선집합 축소
  - 후보노선집합이 공집합이 될 때까지 반복
  - 축소된 대안노선 집합 도출  $\{N1, N2, N3 \dots, Nn\}$

#### <단계 4> 각 대안노선집합에 대한 균형통행량(equilibrium demand) 산출

$$\begin{aligned} \text{Min } f(v, g) = & \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} s_a(v + x_a) dv \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{a_1 \in A_1} \sum_{a_2 \in A_2} \int_0^{v_{a1a2}} p_{a1a2}(v + x_{a1a2}) dv \\ & - \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} (1/\eta_{pq}) \int_0^{g_{pq}} W_{pq}(y) dy \end{aligned}$$

제약조건과 변수설명은 2장에서 전술한 바와 같다.

#### <단계 5> 각 대안노선집합에 대한 평가지표 산출

$$\begin{aligned} \sum_r \sum_j g_{ij}, \sum_r \sum_j r_{ij} & : \text{자가용수요, 버스수요} \\ \sum_r \sum_j t g_{ij}, \sum_r \sum_j t r_{ij} & : \text{수단별 총통행시간} \\ \sum_r \sum_j c g_{ij}, \sum_r \sum_j c r_{ij} & : \text{수단별 총통행비용} \end{aligned}$$

$$\sum_i \sum_j \theta t_{g_{ij}} + c_{g_{ij}}, \sum_i \sum_j \theta tr_{ij} + cr_{ij}$$

: 수단별 일반화된 총통행비용  
 $\theta$  : 일반화비용 산출을 위한 시간가치 파라메타

<단계 6> 각 대안노선집합에 대한 목적함수값 산출

$$Z_{Ni} = \frac{\sum_i \sum_j \theta t_{g_{ij}} + c_{g_{ij}}}{\sum_i \sum_j g_{ij}} + \frac{\sum_i \sum_j \theta tr_{ij} + cr_{ij}}{\sum_i \sum_j r_{ij}}$$

: 네트워크 전체 평균통행비용

<Output> 최적 노선집합 도출

최적노선집합 = Min {  $Z_{N1}, Z_{N2}, Z_{N3}, \dots, Z_{Nn}$  }

단계 3의 환승통행을 직접노선제공의 대안으로 인식하고 이를 활용하여 노선공급을 축소하는 과정은 대안노선집합에서 최적노선 집합을 구성함에 있어 어느 노선을 먼저 고려하는가에 따라 해가 다르게 도출될 수 있다. 따라서 최적해 도출을 위한 노선집합 구성순서(cover-ordering rule)가 중요한데 모든 O/D에 대하여 통행수요를 만족하면서 노선수와 연장을 최소화하기 위하여 연결 O/D의 수가 많고, 이미 선택된 노선과 중복 부분이 적은 노선을 우선적으로 고려하였다.

3-①에서 정의한 순서에 따라 대안노선집합을 구성하면 하나의 노선이 추가될 때마다 환승경로를 탐색한다. 하나의 노선 추가시 지금까지 대안노선집합에 포함된 노선과의 가능한 모든 두 노선조합을 도출하여 환승 노드를 찾고 이를 통해 가능한 모든 환승 경로를 찾는다. 그 결과 가정에서 설정한 환승경로 조건에 만족하지 판단하여 이를 만족할 경우 기존 노선을 이용한 환승경로로 통행이 이루어지도록 하고 이 직접연결노선은 대안노선집합에 포함시키지 않는다. 3-②의 결과를 다시 3-①에 적용하여 최종 대안노선집합과 순서를 도출한다.

### III. 방법론의 평가

모의 네트워크를 구성하여 본 연구가 제시하는 방법론을 적용하고 그 결과를 분석하여 그 적용가능성을 평가하도록 한다.

## 1. 방법론 평가를 위한 모의적용

### 1) 모의 네트워크 설정

본 연구의 방법론을 평가하기 위하여 단순한 적자 형태의 <그림 2>와 같은 네트워크<sup>3)</sup>를 설정하였다.

총수단통행량은 모든 O/D에 대하여 균일하게 시간당 40 통행으로 하여 전체 625개 O/D쌍, 통행량 25,000 통행으로 설정하였다. 또한 모의 네트워크에 적용하기 위하여 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- 네트워크의 노드는 도로망의 노드이면서 동시에 버스정류장이다.
- 하나의 노드에 하나의 존 센트로이드가 연결되어 있다.
- 통행수요로 주어지는 O/D는 총수단(자가용, 버스) O/D이다.
- 최소, 최대 노선연장 제약은 12km, 18km이며 균일 수요 가정에 따라 직접수송 최소수요 제약은 적용하지 않는 것으로 한다.

1*	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1\* : 모의 네트워크의 노드번호

<그림 2> 방법론 적용을 위한 모의 네트워크

### 2) 방법론의 적용

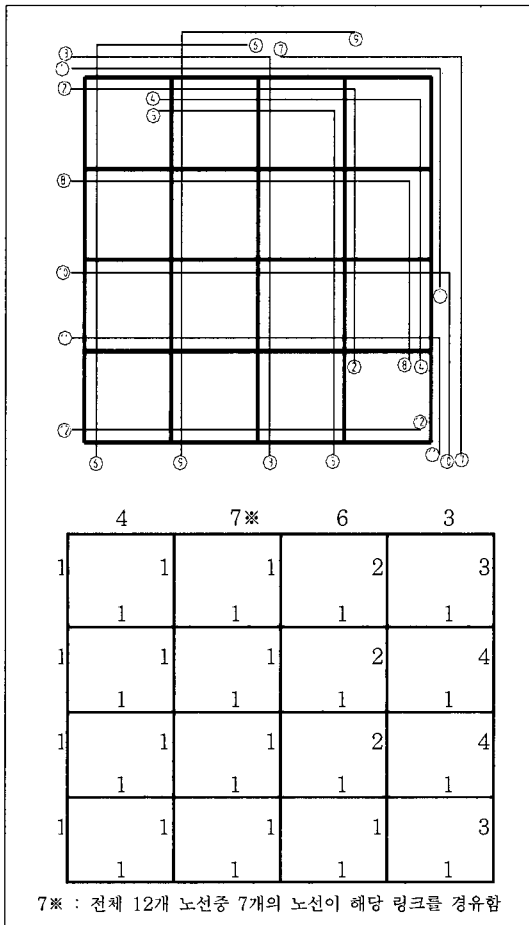
모의 네트워크가 25개의 존으로 설정되었으므로 단계 1에 따라 각 O/D의 최단경로를 도출하면 625개의 경로가 도출되며 이중 25개의 존내부 통행을 제외하고 같은 경로를 왕복 운행한다고 가정하였으므로 300개의 최단경로가 대안노선의 전체집합으로 도출된다. 이중 단계 2의 과정을 거쳐 연장제약을 만족하는 120개의 노선에 대하여 각 노선간의 포함관계(dominant column)를 정의하고 covering matrix

3) 25개 노드, 40개 링크(왕복 8차로, 링크거리 3km), 모든 링크를 버스와 자가용이 공유

를 축소하면 35개의 대안이 남게된다. 다시 단계 3을 통하여 환승경로를 탐색하고 matrix를 축소하면 12개의 노선대안이 도출된다.

이상의 결과에 따라 35개의 노선을 구성할 경우 모든 통행수요에 대하여 직접연결노선을 제공할 수 있고 12개의 노선을 구성하면 환승이 수반되는 노선이 제공된다. 즉, 환승통행이 증가함에도 불구하고 노선공급을 최소화하는 것으로 가정하면 최적노선집합은 12개 노선이 된다. 이 결과에 대하여 각 노선의 경유지를 도시하고 네트워크의 링크별 경유노선수를 나타내면 <그림 3>과 같다.

정확한 최적노선망을 결정하기 위해서는 다수단 균



<그림 3> 12개 노선집합의 개별노선도, 링크별 경유노선수

형통행량배분을 통한 비용평가가 이루어져야 한다. 그러나 최적 노선집합은 환승을 극대화하는 최소규모 12개노선 이상의 공급수준에서 결정되므로 일차적으로 이상의 결과를 살펴보면 네트워크상의 노선 분포가 상당히 편중되어있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 적용한 네트워크는 수요가 고르게 분산되어있는 단순한 격자형으로 이러한 노선편중이 바람직하다고 볼 수 없다. 따라서 노선망의 네트워크 분포문제를 개선하기 위한 대안적 방법론을 제시하면 다음과 같다.

**2. 방법론 향상을 위한 대안제시**

**1) 환승경로 탐색시 난수적용**

위의 결과에서 노드번호가 작은 링크에 노선이 집중되어 있는 것을 발견할 수 있는데 이러한 경향은 초기 모든 존에 대한 최단경로로부터 노선대안을 축소해가는 과정에서 노선연장의 내림차순과 노드번호의 오름차순으로 순서를 결정했기 때문인 것으로 판단된다. 환승경로를 통한 노선축소과정은 대안집합에 노선이 추가될 때마다 환승경로를 탐색하여 대안집합 추가대상에서 노선을 제외하므로 어떤 노선을 먼저 대안집합에 포함시켜 어떤 환승경로를 도출하느냐에 따라 노선축소결과가 달라지게 된다. 따라서 기점의 노드번호가 작은 노선을 우선적으로 고려할 경우 노드번호가 작은 부분의 노선은 대안집합에 포함되고 기점의 노드번호가 큰 노선은 환승경로를 활용하게 되어 위의 결과와 같은 노선편중이 나타난다.

이와 같은 노선분포의 편중을 막기 위하여 노선대안 축소과정<sup>4)</sup>에 난수를 적용하여 <그림 4>의 결과를 도출하였다.

**2) 최단경로 탐색과정에서 네트워크분포 고려**

두 번째 대안적 방법론은 최단경로 탐색과정<sup>5)</sup>에서 네트워크분포를 고려하는 것이다. 본 연구의 방법론은 최단경로에 기본 바탕을 두고 있어 최종적으로 도출되는 노선망의 형태도 최단경로에 의해 결정된다 할 수 있다. 그러므로 본연구의 초기단계인 최단경로

4) 전체 알고리즘 여섯 단계 중 3단계의 두 번째 과정  
5) 여섯 단계 중 1단계

탐색과정에서 네트워크의 분포를 고려하도록 하는 방안을 제시한다.

즉, 300개의 O/D쌍에 대하여 노선길이를 기준으로 하여 내림차순으로 최단경로 탐색순서를 정의하고 최단경로가 네트워크에 분산되도록 하기 위해 하나의 최단경로가 결정될 때마다 이 노선이 경유하는 링크에 대해 비용을 인위적으로 증가시켜 순차적인 최단경로 탐색과정에서 네트워크의 노선분포가 고르게 도출되도록 하는 것이다.

이상의 두가지 대안적 방법론의 결과를 위와 같은 형식으로 나타내면 <그림 4>와 같다.

지금까지 세가지 노선대안 도출방법을 제시하였는데 이들 사이의 정확한 비교는 각 방법론의 대안집합에 대하여 최종 목적함수값을 산출해야 한다. 그러나

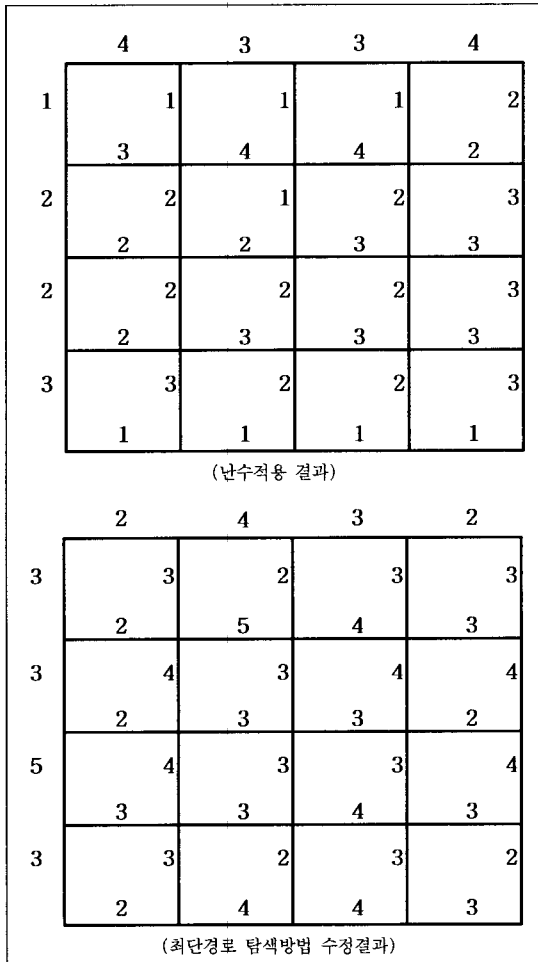
최소의 공급으로 최대의 서비스를 제공한다는 측면에서 세가지 방법론이 도출한 환승을 통한 최소노선집합을 기준으로 어느 방법론이 더 우수한 해를 도출하는지 검토하고자 한다.

<표 2>의 결과를 살펴보면 세 번째 최단경로수정 방법의 노선분포 분산이 첫 번째와 비교해 현저히 작아 네트워크상의 노선분포 고려측면에서는 바람직한 것으로 나타났다. 그러나 세가지 방법론을 공급최소화라는 측면에서 비교하면 첫 번째 방법론이 노선수 12개, 전체 노선연장 207km로 가장 바람직한 것이라 판단된다.

결과적으로 공급최소화와 네트워크분산 두가지 모두를 만족시키지는 못하였으나 비용최소화라는 목적을 고려하여 통행자 행태를 반영한 최적 노선집합 도출은 첫 번째 방법론의 결과에 대해서만 수행하는 것으로 한다.

<표 2> 세가지 방법론의 결과비교

방법론	노선수	노선연장(km)	링크별 경유노선수의 분산
① 초기방법	12	207	2.102
② 난수적용	17	276	0.882
③ 최단경로수정	22	378	0.676



<그림 4> 2가지 대안적 방법론의 결과

**IV. 최적 노선망 도출**

최적 노선망을 도출하기 위하여 통행자 행태를 반영하여 시내버스 네트워크 계획에 따른 수단분담과 통행배정의 균형을 찾아 이용자의 비용이 최소화되는 노선집합을 도출한다. 따라서 35개의 노선대안집합에 대하여 균형통행량을 찾고 평가지표를 산출하였다.

노선대안집합에 대한 평가과정에서 대안집합 확장시 노선개수가 같더라도 어떤 노선으로 구성되어 있는가에 따라 평가결과가 달라진다. 즉, 최적 노선집합을 결정함에 있어 어느 노선을 먼저 집합에 포함시키는지 하는 순위결정이 중요한 요소가 된다.

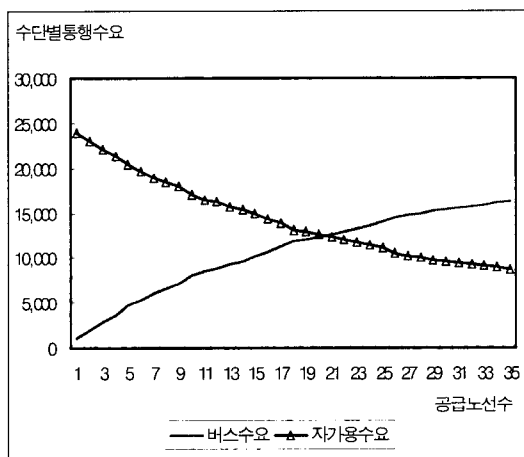
본연구는 최소의 노선공급으로 최대의 서비스를 공급하고자 하는 것이므로 첫 번째 포함되는 노선은 35개의 대안중 연결 O/D쌍이 가장 많은 노선이되고 두 번째는 나머지 34개의 노선중 첫번째 노선이 연결하



지 못하는 O/D쌍중 가장 많은 O/D쌍을 연결할 수 있는 노선이 된다. 세번째 이후는 두 번째와 같은 방식으로 결정하며 이때 환승을 고려한 12개 노선을 우선적으로 고려한다.

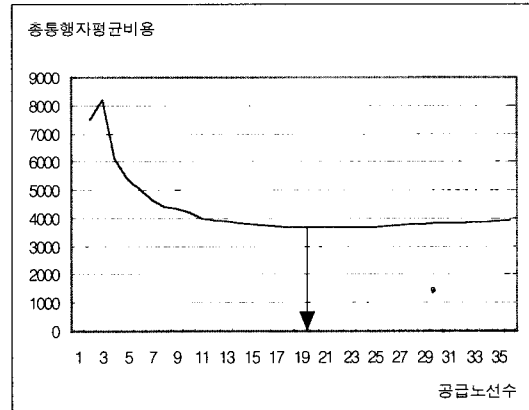
이와 같이 도출된 35개의 대안집합 각각에 대하여 시뮬레이션(simulation)<sup>6)</sup>을 수행하여 최적노선 도출을 위한 통행자비용과 운전자수익 평가에 필요한 여러 가지 평가지표를 산출하였다. 시뮬레이션과정에서 균형통행량을 찾고 비용을 산출하는 각 파라메타는 모의 네트워크에서 추정 불가능하므로 최근 교통개발연구원에서 수행된 [수원시 도시철도 타당성조사 보고서('97)]와 이유화의 [버스노선개편을 위한 평가기준 및 방법연구]의 자료를 적용하였다.<sup>7)</sup>

〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 버스노선 공급이 증가하면서 자가용 통행에서 버스통행으로 수단 전환이 이루어져 버스수요가 증가하다가 일정수준에 이르면 증가폭이 작아지는데 본 연구의 방법론이 잉여의 노선제공을 철저히 배제하였기 때문에 35개의 범위안에서는 계속해서 수단전환이 일어나고 있는 것으로 보인다. 이상의 균형통행량 결과를 이용하여 각 후보 노선집합에 대한 평가자료를 산출하였다. 목적함수로서 최소화하고자 하는 비용은 앞에서 정의한 바와 같이 자가용 이용자와 버스이용자의 통행비용으로 금전적으로 지불하는 비용과



〈그림 5〉 각 노선 후보집합의 수단통행수요

시간비용을 모두 합한 평균 통행비용을 산출하면 다음과 같다.



〈그림 6〉 각 노선 후보집합의 통행자평균비용

〈그림 6〉의 그래프에서 평균이용자비용도 노선공급이 일정수준에 이르면 더 이상 감소하지 않는 것으로 나타났으며 평균이용자 비용의 최소점은 19개의 노선이 공급될 때 나타난다. 따라서 본 연구가 제시한 방법론의 최적노선망은 〈그림 7〉과 같은 19개의 노선으로 구성된다.

도출된 최적 노선망은 모든 O/D쌍에 대해 직접 연결노선을 제공하는 35개 노선보다 규모가 작아 직접 연결이 결여되는 O/D가 발생하지만 19개 노선에는 환승을 통한 최소 연결성 확보에 필요한 12개의 노선이 포함되어 있어 기본적으로 1회 환승을 통한 통행은 모두 만족된다. 이와 같은 19개의 노선이 제공될 경우 직접통행비율이 얼마나 되는지 600개의 각 공간 직접 연결 노선수를 나타낸 〈표 3〉을 통하여 알아 보았다.

〈표 3〉에서 보는 바와 같이 전체 600개의 O/D쌍중 직접 연결되는 O/D쌍이 466개, 환승이 요구되는 O/D쌍이 159개로 이들이 차지하는 비율은 동일한 수요량을 가정하였기 때문에 각각 78%, 22%에 해당한다. 이상에서 도출된 19개 노선집합의 각 노선을 모의 네트워크에 도시하고 각 링크에 이를 경유하는 노선수를 나타내면 다음과 같다.

6) Emme/2를 활용하였음.

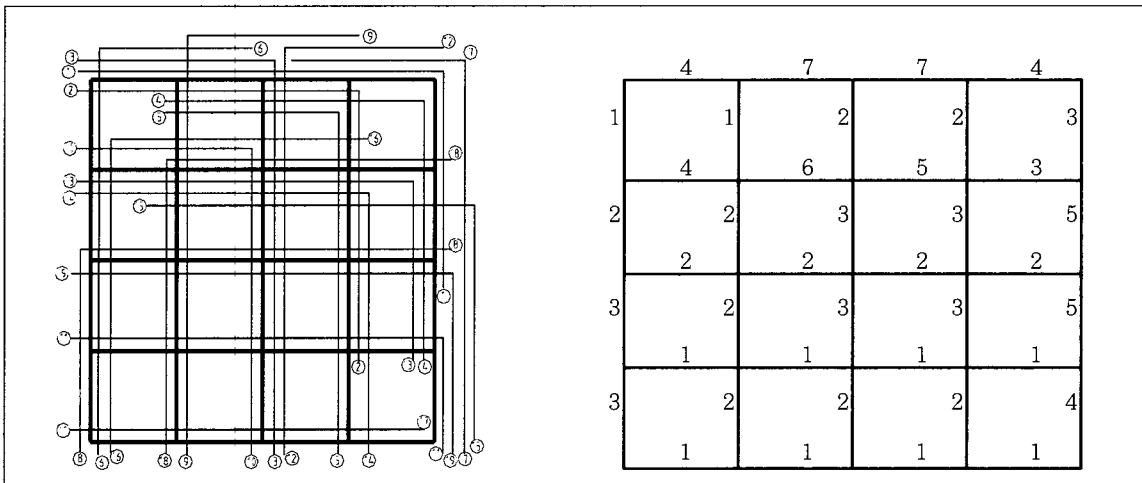
7) • 도시형버스 운송원가 : 305,020원/일, 1,107원/1km  
• 자가용이용 통행자 시간가치 : 2,536원/시간

• 자가용 주행원가 : 200원/km  
• 버스용이용 통행자 시간가치 : 1,670원/시간

〈표 3〉 최적노선망의 존간동행 연결노선수

O \ D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	-	4	4	2	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	L	1	0	1	L	L		
2	4	-	7	5	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2*	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	L	
3	4	7	-	7	4	1	1	2	2	3	1	1	2	2	3	1	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1	
4	2	5	7	-	4	0	1	1	2	3	0	1	1	2	3	0	1	1	2	2	L	1	1	1	1	1	
5	1	2	4	4	-	0	0	1	0	3	0	0	1	0	3	L*	0	1	0	2	L	L	1	0	1	1	
6	1	1	1	0	0	-	4	4	3	1	2	0	1	1	1	2	0	1	1	1	2	0	1	1	L	L	
7	0	1	1	1	0	4	-	6	5	3	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	
8	1	1	2	1	1	4	6	-	5	3	1	1	3	1	2	1	1	3	1	2	1	1	3	1	1	1	
9	1	2	2	2	0	3	5	5	-	3	1	1	0	3	2	1	1	0	3	2	1	1	0	2	1	1	
10	1	2	3	3	3	1	3	3	3	-	0	1	0	0	5	0	1	0	0	4	L	1	0	0	2	2	
11	1	1	1	0	0	2	1	1	1	0	-	2	2	2	2	3	S*	0	0	1	3	S	0	0	1	1	
12	0	1	1	1	0	0	2	1	1	1	2	-	2	2	2	1	2	0	0	1	1	2	0	0	1	1	
13	1	1	2	1	1	1	1	3	0	0	2	2	-	2	2	1	0	3	0	1	1	0	3	0	1	1	
14	1	2	2	2	0	1	1	1	3	0	2	2	2	-	2	1	0	0	3	1	1	0	0	2	1	1	
15	1	2	3	3	3	1	2	2	2	5	2	2	2	2	-	1	0	0	S	5	1	0	0	S	3	3	
16	1	1	1	0	L	2	1	1	1	0	3	1	1	1	1	-	1	1	1	1	3	S	S	0	1	1	
17	0	1	1	1	0	0	2	1	1	1	S	2	0	0	0	1	-	1	1	1	0	2	S	0	1	1	
18	1	1	2	1	1	1	1	3	0	0	0	0	3	0	0	1	1	-	1	1	0	0	3	0	1	1	
19	1	2	2	2	0	1	1	1	3	0	0	0	0	3	S	1	1	1	-	1	0	0	S	2	1	1	
20	L	1	2	2	2	1	2	2	2	4	1	1	1	1	5	1	1	1	1	-	0	0	S	S	4	4	
21	1	1	1	L	L	2	1	1	1	L	3	1	1	1	1	3	0	0	0	0	-	1	1	1	1	1	
22	0	1	1	1	L	0	2	1	1	1	S	2	0	0	0	S	2	0	0	0	1	-	1	1	1	1	
23	1	1	2	1	1	1	1	3	0	0	0	0	3	0	0	S	S	3	S	S	1	1	-	1	1	1	
24	L	1	1	1	0	1	1	1	2	0	0	0	0	2	S	0	0	0	2	S	1	1	1	-	1	1	
25	L	L	1	1	1	L	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	-	1

2※ : 2→14존으로의 통행시 환승없이 연결하는 버스노선수가 2개임을 나타냄.  
 L※, S※ : 5↔16은 최대, 11↔17은 최소 연장제약에 의해 직접연결노선이 없음을 나타냄.



〈그림 7〉 최적 노선집합의 개별노선도와 링크별 경유노선수

이와 같이 도출된 19개의 버스노선으로 네트워크를 구성하면 총통행비용과 공급비용을 최소화하는 최적노선망을 제공하는 것으로 판단된다.

**V. 결론**

본 연구는 시내버스노선망 계획에 있어 네트워크 차원의 체계적인 접근법과 전체 통행자의 비용

을 최소화하는 일반화된 방법론을 제시하였다. 노선망 대안 도출시 환승경로를 활용함으로써 set covering 이론을 이용한 기존연구와 비교하여 서비스 공급수준을 축소할 뿐 아니라 가변수요모형을 적용하여 통행자의 수단선택 행태를 고려한 해를 도출하여 현실성을 제고하였다. 연구과정에서 세가지 방법론이 검토되었는데 초기방법론의 결과에서 나타난 노선망의 네트워크 분포 편중 문제를 해결

하기 위하여 단계 3을 변형하여 난수를 적용하는 방법과 단계1을 변형하여 노선생성의 기초인 최단 경로 탐색과정에서 이를 고려하는 두가지 대안적 방법론을 검토하였다.

그 결과 첫 번째 방법론과 비교하여 최적해를 향상시키지는 못하였으나 두가지 중요한 시사점을 발견하였다. 첫째, 노선망의 네트워크분포 편중을 해소하기 위해서는 난수적용보다 최단경로 탐색과정에서 이를 고려하는 것이 바람직하다. 둘째, 최단경로 탐색과정에서 네트워크분포를 고려함에 따라 굴곡도가 증가하여 노선간의 공유부분이 적어지고 노선공급 규모가 증가하게 된다. 따라서 향후 이러한 측면을 고려하여 최적해를 향상시키는 새로운 방법론이 제시될 수 있는 것으로 판단된다.

또한 공간 통행수요가 다른 경우 수요가 많은 기중점 통행에 대하여 직접연결노선을 제공하거나 통행량이 많은 링크에 많은 노선이 경유하도록 수요분포를 고려한 노선결정 방법론도 연구되어질 수 있을 것으로 사료된다.

본연구는 시내버스 노선계획에 있어 버스이용자와 자가용 통행자, 버스운영자와 정책결정자 등 현실적 이해관계의 중요성을 고려하여 최종적으로 우수한 해를 도출함과 동시에 다양한 계획적 요소를 고려할 수 있는 일반화된 방법론을 제시하고자 하였다.

## 참고문헌

1. Avishai Ceder and Nigel H. M. Wilson, BUS NETWORK DESIGN, Transportation Research B. vol. 20B No. 4 pp.331~344, 1986.
2. Avishai Ceder & Yechezkel Israeli, Creative Objective Functions for Transit Network Design, IFAC Transportation Systems Chania, Greece, 1997 vol.2 pp.684~690, 1997.
3. Avishai Ceder & Yechezkel Israeli, Non-Linear Set Covering Problem Method for Transit Network Design, 8th WCTR(World Congress of Transportation Research) p.15, 1997.
4. Lampkin, Saalmans, Silman et al, Dubois et al, The Design of Routes, Service Frequencies and Schedules for a Municipal Bus, Oper. Res.Quart. 18. pp.375~397, 1967.
5. 유영근, 도시 버스교통수요예측과 최적노선망 결정방법에 관한 연구, 영남대학교 1997 박사학위
6. 이유화, 버스노선개편을 위한 평가기준 및 방법연구, 서울시립대학교 1998 석사학위.
7. 김인경, 자가용 운전자와 버스승객을 대상으로한 정보제공전략 평가에 관한 연구, 서울시립대학교 1998 석사학위.