

□ 論 文 □

# 수익성을 감안한 경전철의 최적노선 결정방법에 관한 연구

(A Study on the Determination of Optimum L.R.T Route from the  
Viewpoint of Revenue Maximization Principles)

원 제 무                      박 창 호                      이 성 모  
(서울市立大 都市工學科 教授)    (서울大 都市工學科 教授)    (서울大 工學研究所 特別研究員)

— 목 차 —

- |                         |         |
|-------------------------|---------|
| I. 서론                   | 1. 개요   |
| II. 경전철의 최적노선 및 역사위치 결정 | 2. 자료구축 |
| 1. 경전철의 최적노선결정 모형정립     | 3. 적용과정 |
| 2. 노선결정을 위한 정수계획모형      | 4. 적용결과 |
| III. 모형적용 및 검증          | IV. 결론  |

— ABSTRACT —

Although subway system continues to be the backbone of transportation systems in a city like Seoul, there will still be areas across the city where subway services are not available. Interest has steadily grown to fill this missing routes in overall urban transportation system. Light Rail Transit (L.R.T) system has been recently thought to be an appropriate mode of transportation by businessmen, professionals and transportation industry.

In this regards, the purpose of this study is to explore whether L.R.T can be a feasible form of urban rail mode in the context of Seoul. First, the study develops the mathematical models to derive optimum route networks and stations. Integer Programming is employed to determine whether alternative routes are financially viable from the viewpoint of revenue maximization principles. Second, mathematical models developed are applied to Yoido area in order to examine the validity of model structures. The models constructed turns out be capable of handling alternative routes and stations. Application of models are successfully carried out to derive financially feasible set of routes and stations.

\* 본 연구는 1993년도 서울시 연구비지원에 의한 것임.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

악화되고 있는 도시교통문제의 대안으로 최근 우리나라 대도시에서는 지하철노선의 연장 및 건설에 도시교통정책의 초점을 맞추고 있다. 지하철은 그 교유의 특성상 대량노선통행(Line-haul trip) 수단이므로 이와 적절히 연계되어 교통발생 지역의 교통량을 집분산시켜 줄수 있는 연계교통수단의 도입이 필요하다. 일반적으로 연계교통수단의 유형은 다양하나 미래지향적으로 볼때 서울과 같은 대도시의 지하철연계 교통수단은 경전철과 같은 신교통수단을 적극적으로 검토해 보아야 할 것이다.

이를 위해서는 경전철이 어느 지역에 도입되어야 하고, 얼마나 경제성이 있는지에 대한 연구가 선행되어야 한다. 그동안 경전철의 유형과 한국도시의 적용가능성에 대한 개략적인 연구는 있었지만, 구체적으로 어디에, 어떻게, 얼마나 투자해야 하는지에 대한 연구는 매우 부족했다. 특히 최근 국가 및 지방정부의 재정의 한계성으로 민자유치와 관련하여 신교통수단 건설 및 운영에 대한 재정적 타당성을 염두에 둔 노선과 역의 선정 문제에 접근한 연구는 전무한 실정이다.

이러한 배경하에서 본 연구는 다음과 같이 2가지 단계로 진행하고자 한다. 첫째, 지하철보다 건설비가 저렴한 경전철과 같은 신교통시스템의 도입시 민자유치와 관련하여 건설비와 수익성, 투자비의 회수기간, 요금구조 등을 감안한 최적 신교통시스템 노선을 선정하는 모형을 구축한다. 둘째, 이 모형을 영등포-여의도-용산전자상가라는 사례지역에 대해 적용해 모형의 타당성을 검증하며, 민간자본의 규모, 요금변화에 따른 탄력성, 자본회수기간 등을 검토하는 것을 주요한 연구의 목적으로 한다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 재정적인 면에서 비교우위에 있는 경전철 도입시 수익성을 감안한 민자유치의 적정성과 적정노선결정 방법에 관한 것으로 역사후보지와 후보지별 수요, 이용자 요금수준이 사전에 주어지는 것을 전제로 한다. 본 연구의 범위는 노선건설비와 노선건설후의 수익성을 감안해 정수계획법(Integer Programming)으로 정식화하여 그 해법(Algorithm)을 개발하며, 사례대상지역을 중심으로 하여 모형검증을 시행한다. 특히 수익성에 초점을 맞춘 민간자본의 유치라는 관점에서 자본규모를 제약조건(Budget Constraint)으로 포함하는 최적노선 결정방법을 제시하는데 이는 민자유치시 수익성에 따른 민간자본 규모를 고려한 관점에서 출발했다.

또한 일차적으로 선정된 역사위치 및 역사수를 선정하여 건설비와 수익성, 자본회수기간, 요금체계 등을 감안해 그 적정성을 검토하며 요금수준에 따른 탄력성 및 민감도 분석을 실시한다. 본 연구의 구체적인 수행과정은 <그림 I-1>과 같다.

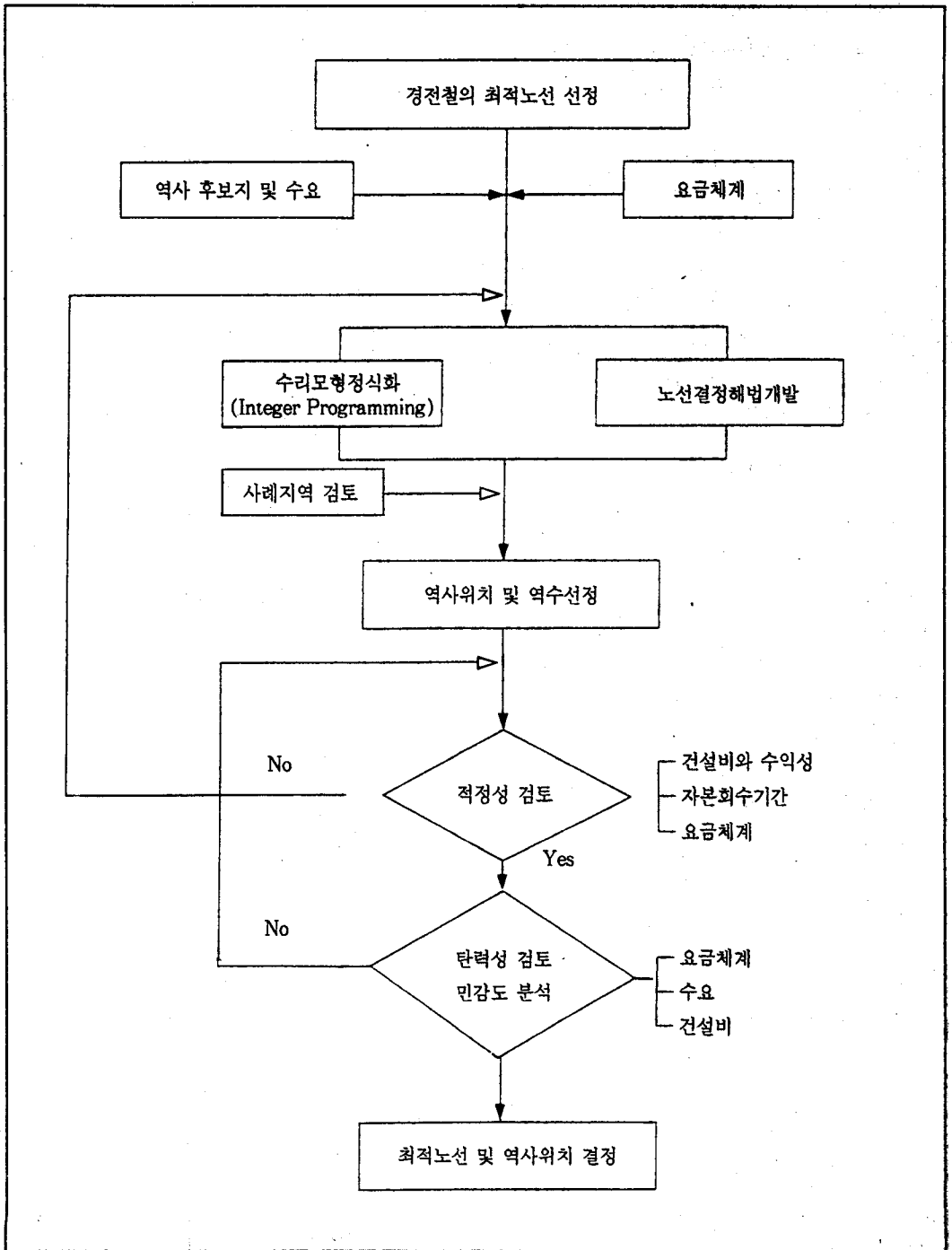
## II. 경전철의 최적노선 및 역사위치 결정

### 1. 경전철의 최적노선결정 모형정립

#### 1) 문제의 정의

본 연구는 최근 제기되고 있는 사회간접자본 확충차원에서 부족한 중앙 및 지방정부재정 부담을 민간자본 유치란 점을 감안하여 소요재원규모가 지하철보다 비교우위에 있는 경전철의 노선을 결정하는 일종의 차량운행노선 결정문제(Vehicle Routing Problem)로 볼 수 있다.

그러나 본 연구에서 다루고 있는 문제는 노선건설비, 운영비, 운행시간 등을 고려하거나 승객수요를 극대화시킬 수 있는 관점에서 노선결정이나 역간 또는 정류장간의 적정간격을 결정하는



<그림 I-1> 연구수행과정도

등 기존에 연구된 일반적인 차량운행노선 결정 문제와 달리, 민간자본유치시 그 재원규모에 의한 제약성과 수익성, 자본회수기간, 요금체계 등을 감안하여 경전철 운행노선결정에 영향을 받도록 함으로서 보다 적극적이고 실용성있는 민간자본유치에 대한 현실성 있는 대안을 제시하는데 있다.

따라서 본 연구는 민간자본유치시 건설비, 운영비, 승객수요에 따른 요금수익을 고려하여 총비용을 최소화하고 민간자본이란 관점에서 수익을 극대화할 수 있는 관점에서의 경전철의 최적노선을 결정하는 문제를 다룬다.

2) 수리모형의 정식화

(1) 가정

앞에서 전술한 경전철의 최적노선결정문제를 다루는데 있어서 본 연구는 분석을 용이하게 하기 위해 아래와 같은 전제사항들을 가정하였다.

- ① 신설 경전철 노선의 기종점은 각각 하나로 주어져 있는 것으로 가정한다.
- ② 해당지역내 각 지점간의 승객수요는 사전에 주어지는 것으로 하며, 각 역사별 승하차인원은 왕복 1일수요를 전제로 분석한다.
- ③ 해당지역내 기종점간을 연결하는 역사의 대상 후보지는 인구분포, 토지이용, 접근성 등을 감안해 사전에 결정하며, 대상후보지의 수는 차량이 정차하는 최소한의 지점수보다 많아야 한다.
- ④ 경전철의 요금체계 및 요금수준은 사전에 주어진다.

(2) 변수 및 용어정의

본 문제를 수리 모형으로 정식화(formulation)하는데 있어서 필요한 변수 및 용어는 다음과 같이 정의한다.

$N$  = 정차 가능한 총대상 역사 후보지수  
(Candidate)

$M$  = 정차지점수 (적정역사수  $M \leq N$ )

$t_{ij}$  = (i, j) 구간 운행요금 (단, 요금체계는 균일체로 간주함)

$d_{ij}$  = (i, j) 구간 통행수요

$X_{ij}$  =  $\begin{cases} (i, j) \text{ 구간이 } t \text{ 번째 운행구간에 있을 경우} & 1 \\ \text{그외의 경우} & 0 \end{cases}$

$C_{ij}$  = (i, j) 구간의 경전철 노선건설비 및 운영비

$UC$  = 재원규모

(3) 목적함수의 정의

본 연구에서 고려하고 있는 비용항목은 경전철의 건설비 및 운영비, 그리고 승객수요에 의한 요금수입으로 구성된다. 운영비는 현재 서울시 지하철공사에서 승객 1인당으로 책정하고 있는데 본 연구에서도 이의 개념을 도입하여 선정된 구간내의 통행수요에 따라 소요되는 비용으로 환산해 건설비 항목에 포함시켰다. 그러나 현재 지하철공사에서 적용하고 있는 승객 1인당 운영비는 승객 증가에 따른 비례적증가가 예상되는데 실제로 승객수 증가에 의한 운영비증가는 매우 낮을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서 적용된 운영비는 지하철공사에서 산정하고 있는 운영비를 전체 노선건설비 규모와 승객수요 등을 고려하여 보완 조정하여 적용하였다. 여기서 경전철의 노선건설비용과 운영비용은 두 지점간 노선연결시 소요되는 비용으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(X_{ij}, M) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N C_{ij} \cdot X_{ij} \quad (2.1)$$

이는 민간자본유치란 관점에서 경전철을 운행하고 경영하기 위한 전체비용을 감안한 것이다.

한편 요금수입으로 보면 민간회사의 경영뿐 아니라 수익이 보장되어야만 경전철 노선건설의 타당성이 확보될 수 있다. 요금수입은 각 역사별 승객이 통행할 수 있는 모든 경우의 수에 의해 산정될 수 있는데 이를 정의하면 식 (2.2)와 같다.

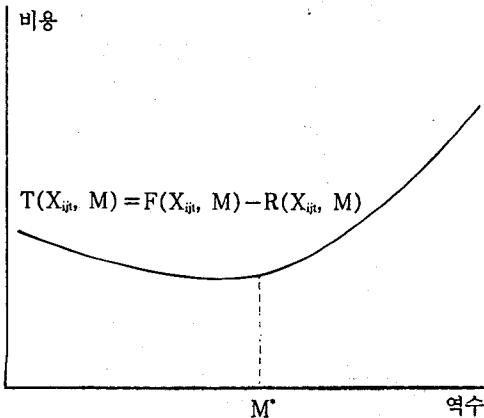
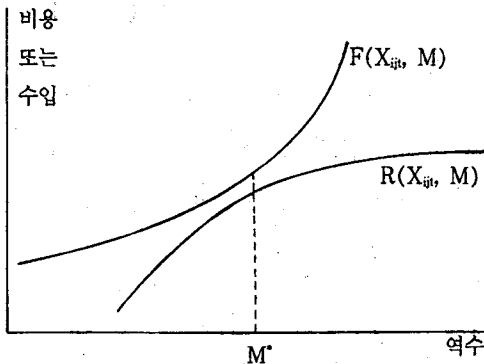
$$R(X_{ij}, M) = \sum_{i=1}^M \sum_{r=i+1}^{M+1} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N t_{ij} \cdot I_{ir} \cdot I_{jk} \quad (2.2)$$

$$\text{단, } I_{it} = \sum_{j=1}^{N-1} X_{ij}, I_{N, M+1} = 1$$

$\begin{bmatrix} i=1, 2, \dots, N-1 \\ t=1, 2, \dots, M \end{bmatrix}$  : Dummy Variables

따라서 목적함수는 민간자본유치란 관점에서 요금수익이 건설비 및 운영비를 상쇄할 수 있어야 하므로 이들의 차이, 즉 식(2.1)의 건설비 및 운영비와 식(2.2)의 요금수익이 최소화되는 역사수와 이때의 노선을 결정하는 것이어야 하는데 이를 정의하면 식(2.3)과 같다.

$$\begin{aligned} T(X_{ij}, M) &= F(X_{ij}, M) - R(X_{ij}, M) \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=1}^N C_{ij} \cdot X_{ij} \\ &\quad - \sum_{i=1}^M \sum_{t=i+1}^{M+1} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=1}^N t_{ij} \cdot d_{it} \cdot I_{it} \cdot I_{jt} \end{aligned} \quad (2.3)$$



<그림 II-1> 비용과 적정역사수의 관계<sup>2)</sup>

한편, 경전철 노선 건설비 및 운영비는 요금수익과 상쇄되는 시점(자본회수기간)과 이의관계를 규명하는 것 또한 민간자본 유치를 위한 중요한 관건이다. 경전철의 특성상 수요규모는 국지적이며 한정될 수 밖에 없는 점을 감안할때 예산규모 또한 중요한 변수로 작용할 수 있다.

일반적으로 경전철 노선건설비와 운영수입, 적정역사수 사이의 관계는 각 경우에 따라 다를 수 있는데 이를 도식화하면 그림 <II-1>과 같다.

이 그림에서 보는 바와같이 경전철의 노선건설비와 운행 수입관계는 경전철의 수요와 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 이 수요 또한 역사수와 관계가 있으므로 이들 관계에서 적정역사수 M\*를 결정할 수 있다.

## 2. 노선결정을 위한 정수계획모형

### 1) 정수계획모형 구축

앞에서 기술한 제반 가정사항, 변수 및 목적함수를 토대로 하여 경전철 신설지역내 각 지점별 승객수요를 충족시키되 그에 따라 발생하는 총비용과 운행수익의 차를 최소화하는 기종점간 경전철 운행노선 및 역사수를 결정하는 문제를 아래와 같이 정수계획모형으로 정식화 할 수 있다.

여기서 정식화된 수리식의 제약조건을 살펴보면 우선 노선문제에 있어서 어느 특정역을 중심으로 앞뒤가 연결되어야 하며 그 연결된 구간이 선정되느냐, 안되느냐 하는 조건이 제시되어야 한다. 또 목적함수내 승객의 역별 통행행태를 나타내는 항을 보다 간편하게 하기 위하여 새로운 0,1 정수 변수(Dummy Variable)를 가정하였다.

또한 민간자본유치란 관점에서 볼때 자본규모가 무한정일수는 없으므로 민간회사에서 예상하는 재원규모를 제약조건(Budget Constraint)으로 감안하는 것이 타당하다. 이러한 점을 감안하여 정수계획모형(Integer Prgramming)을 정식화(For-mulation)하였는데 이를 제시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } T(X_{ik}, M) &= F(X_{ik}, M) - R(X_{ik}, M) \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N C_{ij} \cdot X_{ik} \\ &\quad - \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N t_{ij} \cdot d_{ij} \cdot I_{ir} \cdot I_{ik} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^{j-1} X_{ik} - \sum_{k=j+1}^N X_{ik} = 0 \quad (t=1,2,\dots,M, j=2,3,\dots,N) \quad (a)$$

$$\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N X_{ik} = 1 \quad (t=1,2,\dots,M) \quad (b)$$

$$I_{it} = \sum_{j=1}^{N-1} X_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i=1,2,\dots,N-1 \\ t=1,2,\dots,M \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Dummy} \\ \text{Variables} \end{array} \quad (c)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N C_{ij} \cdot X_{ik} \leq UC \quad (d)$$

2) 경전철의 최적노선 결정해법

앞 절에서 정의되어 있는 정수계획모형은 0-1 정수형 변수와 비음(Non-negative)의 정수값을 갖는 정수형 변수로 이루어져 있다. 본 문제에서 보면 제약식 (a), (b)에 의해 결정되는 0-1 정수해( $X_{ik}$ )는 각 노선구간에서의 건설비(운영비포함)와 운행수입에 따른 제약식(d)가 동시에 고려되어야 하므로 이에 대한 일반적인 해법(General Algorithm)을 찾는데 한계가 있다. 따라서 특정한 경우(case by case)문제의 특성에 따라 해를 도출할 수 있는 모든 경우의 수를 고려하는 것이 가능한 전수열거법(All Enumeration)<sup>1)</sup>을 적용한 결정해법을 도출하였다. 이는 노선의 단위길이당 건설비, 운영비가 소요되는 것이 아니라 노선 경유에 따라 기술적인 문제, 지하보상비 등의 각 경우를 고려해 최적해를 찾는 경우로 이의함수는 블록함수일 수도 있으나 일반적으로 구간내에서 부분해(Local solution)를 갖을수 있기 때문에 모든 경우를 비교해야 한다.

(1) 조합생성법(Combination Generating Method)을 이용한 전수열거해법(All Enumeration Algorithm)

식 (2.4)에서 제시된 목적함수의 최적해를 구하기 위해서는 대상후보역사수를 조합할 수 있는 모든 경우의 수를 고려하는 전수열거법을 사용한다. 이 경우 가능조합수, 즉 선택되는 역사의 조합을 효과적으로 추출하기 위해 조합생성법(Combination Generating Method)을 적용했는데 그 과정은 다음과 같다.

<조합생성법>

Step 1. 집합 {1, 2, ..., N}중에서 조합할 수 있는 가지수 중 사전식 배열순서(Lexicographically)에 의해 m개의 조합을 생성한다. 이의 생성방법은 <그림 II-2>와 같다.

Step 2. {1, 2, ..., m}의 초기조합을 설정한다.

Step 3. 초기조합을 제외한  $\binom{n}{m} - 1$  가지의 나머지 조합이 그 선행조합  $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 에 의해 생성된다.

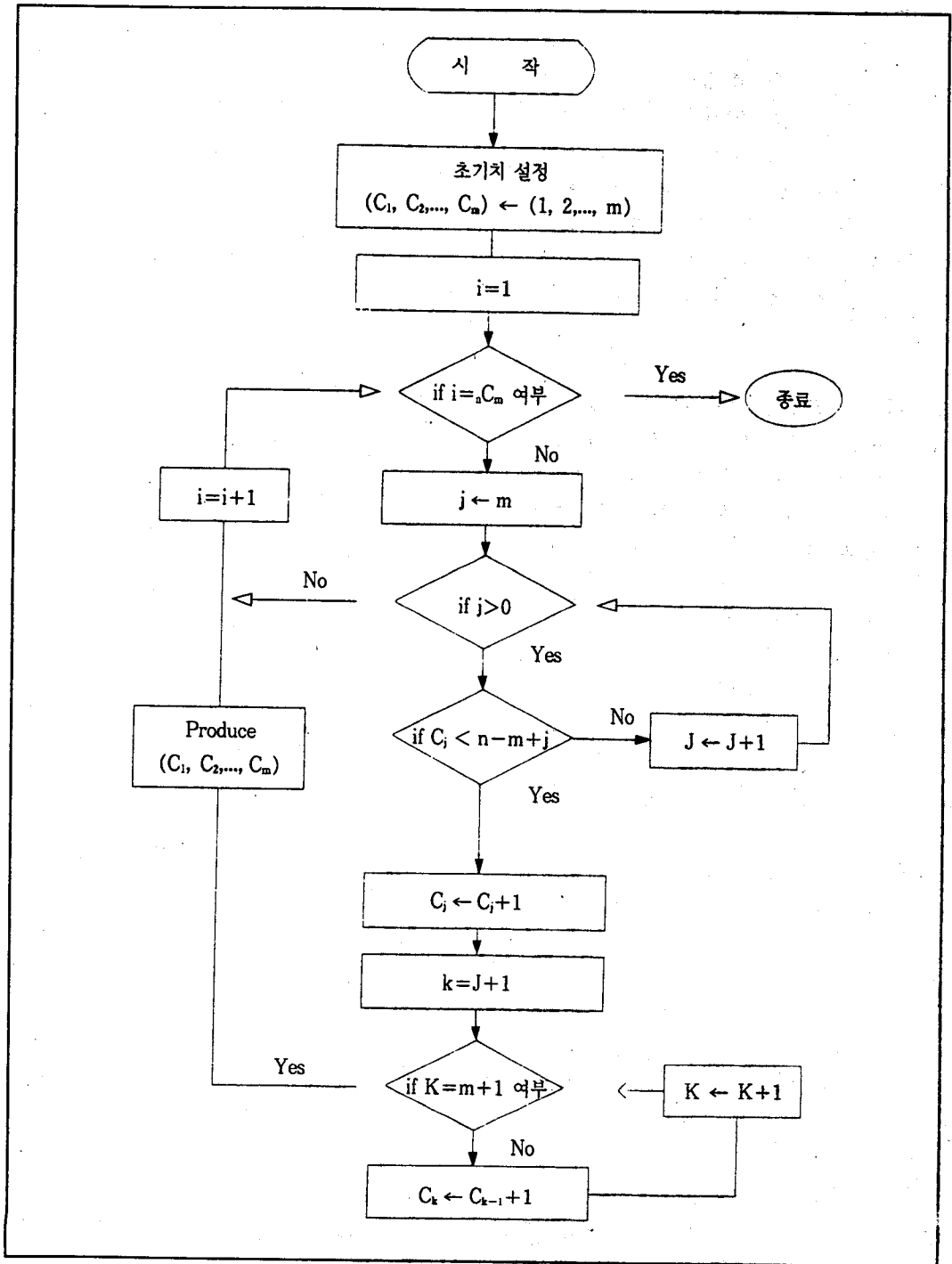
Step 4. 마지막 조합은  $\{(n-m+1), (n-m+2), \dots, n\}$ 으로 종료된다.

Step 5.  $1 \leq j \leq m$  인 j중  $C_j < n-m+j$ 인 것이 있으면 현재의 조합  $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 은 개량이 가능하고, 이 경우 위의 조건을 만족하는 가장 큰 J가 결정된다.

Step 6.  $C_j$ 를 1씩 증가시킨다.

Step 7.  $C_{j+1} \leftarrow C_j + 1, C_{j+2} \leftarrow C_{j+1} + 1, C_{j+3} \leftarrow C_{j+2} + 1, \dots, C_m \leftarrow C_{m-1} + 1$ 로 놓는다.

1) 전수열거법(All Enumeration)은 컴퓨터 처리시간상의 장애만 없다면 최적해를 찾는 가장 확실한 방법이다. 컴퓨터 처리의 시간상의 문제는 본 연구의 성격상 논외로 한다.



〈그림 II -2〉 조합생성 흐름도

(2) 주해법

앞에서 기술한 사항들을 토대로 경전철 신설지 역내 각 구간별 승객수요를 충족시키되 이에 따른 건설비 및 운영비와 운행수입의 차를 최소화 하는 최적 경전철 운행노선을 결정하고, 운행중 승객수요를 최대한 충족시키면서 총비용을 최소화하기 위한 적정 정차지점(역사수)을 결정하기 위한 주해법(Main Algorithm) 절차를 제시하면 아래와 같다. 이에 대한 흐름도는 <그림 II-3> 과 같다.

<역사수가 M개인 최적역사위치 결정방법>

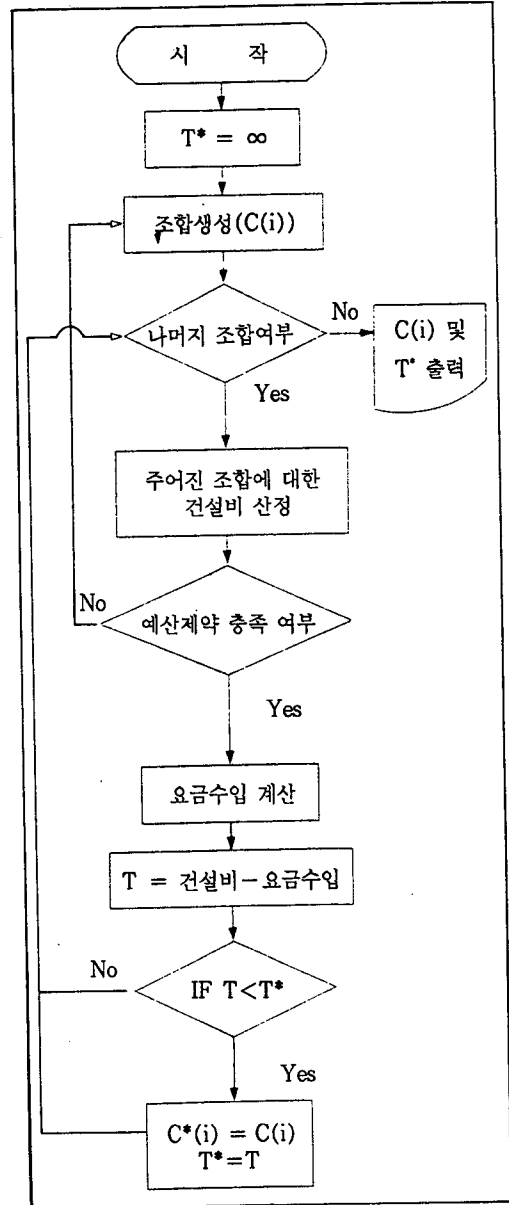
- Step 1. 대상후보지 N개의 역사중에서 M개의 역사를 선택하는 조합을 앞에서 언급한 바와 같이 조합생성법(Combination Generating Method)을 이용하여 순서대로  $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 을 생성한다.
- Step 2. 주어진 조합에 따라 구간별 노선 및 역사에 대한 건설비를 구한다.
- Step 3. 예산제약 조건을 검토한다.
- Step 4. 예산제약을 만족하지 않으면 Step 1으로 가고, 그렇지 않으면 Step 5로 간다.
- Step 5. 주어진 조합에 따른 요금수입을 계산한다.
- Step 6. 건설비에서 요금수입을 뺀 총비용을 구하고 이것이 앞 단계들의 Iteration에서 저장된 총비용보다 작으면 이값과 이때의 조합을 새로 저장한다.
- Step 7. 만약 새로운 조합이 남았으면 Step 1으로 가고 그렇지 않으면 저장된 총비용과 조합을 출력한다.

<역사수 초기치>

위의 해법은 초기치 역사수(M)를 3에서 시작하여 총 역 대상후보지수인 N까지 1씩 늘려가면서 각각 계산한다.

<대안 선택>

후보지 역사수 N-2개의 대안 중 가장 낮은 총비용과 운행수입과의 차이를 갖는 조합을 선택함으로써 위의 결과를 이용하여 최적 역사수 및 그 위치를 결정한다.



<그림 II-3> 주해법 절차흐름도



### Ⅲ. 모형적용 및 검증

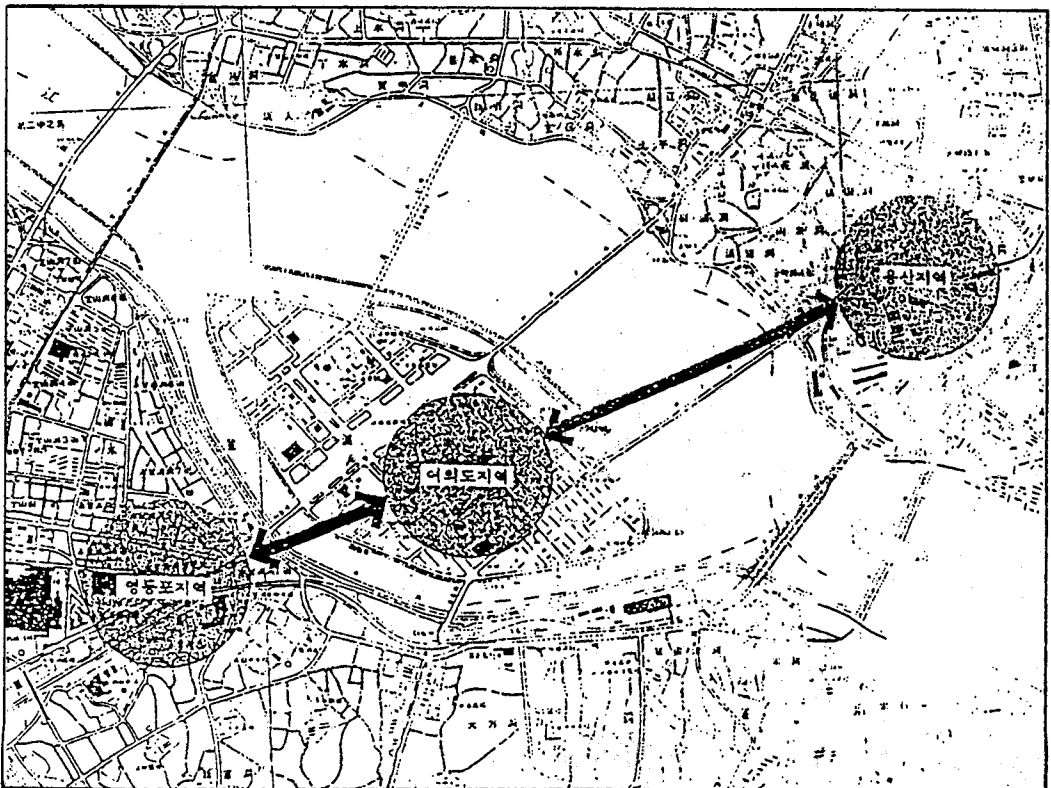
### 2. 자료구축

#### 1. 개요

본 장에서는 앞장에서 구축된 모형을 영등포-여의도-용산전자상가 지역을 잇는 영향권대(band)를 중심으로 사전에 건물군, 접근성, 인구 분포 등을 감안하여 16개 역사 후보대상지를 선정, 주어진 수요에 의거 건설비, 노선장 등을 도면에서 구하여 그 타당성과 최적노선결정, 요금수준에 따른 자본회수기간 등을 분석하였다.

모형에 적용되는 변수는 전술한 바와 같이 경전철 노선건설에 따른 건설비, 운영비, 운행수입 등으로, 대상지역은 대규모 통행발생지역과 지역적 여건상 동선체계가 한정된 영등포-여의도-용산지역을 그 대상으로 하였는데, 구체적인 대상지역은 (그림 Ⅲ-1)과 같다.

또한 대상역사 후보지 중 선정된 역사는 자료의 특성치에 따라 변화의 정도를 검증할 수 있도록 선정했는데, 자료의 구축방법 및 그 특성을 보면 다음과 같다.



〈그림 Ⅲ-1〉 분석대상지역도

### 1) 승객수요( $d_{ij}$ )

승객수요는 경전철의 역간 O/D를 대상으로 하며 유발수요는 감안하지 않고 전체수요를 대상으로 하였으며, 본 연구에서는 사전에 역사후보지별로 수요가 주어진다든 전제에서 출발하였다.<sup>2)</sup> 통상 대중교통수단의 수요는 교통량배정시 각 존간 O/D에서 대중교통수단을 이용하여 수요를 구분하여 예측하는데 이 과정에서 경전철의 역을 하나의 존으로 독립시켜 역간 O/D를 산정할 수 있다.

본 장에서 모형검증을 위한 대상후보지별 수요는 서울시 지하철본부에서 수행된 각종 보고서와 지하철공사에서 집계된 1일 역간 O/D를 기준으로 각 역별 승하차인원을 근거로 보정했으며, 서울시 제2기 지하철 건설시 수행된 수요예측결과를 참조하여 자료를 구축했는데 이는 부록에 수록하였다.

### 2) 경전철 노선건설비 및 운영비( $C_{ij}$ )

건설비는 구간별 노선건설비와 선정된 역수에 따른 역사건설비로 크게 구분할 수 있다. 경전철의 노선건설비는 구축된 경전철노선의 물리적, 지형적 여건을 가장 잘 반영할 수 있는 항목으로서 경전철수단의 노선구성에 따라 지하보상비, 구간별 개설의 어려움에 따른 추가비용 등을 자료구축시에 감안할 수 있으므로 현실여건을 충분히 모형에 반영할 수 있다. 역사건설비는 대상후보역사 중 선택되는 수에 따라 건설비가 차이가 날 수 있으며, 대상후보지역들의 이용승객수에 따라 역사규모가 달라지는데 이에 대한 비용을 모두 포함시켰다.<sup>3)</sup>

운영비는 서울지하철공사에서 지하철수송원가 산정시 수송객 1인당을 근거로 산정하고 있다. 1993년말 지하철 이용 1인당 수송원가는 238원 66전으로 제시되고 있는데, 본 연구에서는 이를 승객수요와 경전철이란 관점에서 보완·조정하여 건설비에 포함시켰다. 또한 경전철의 건설비는 역

사를 포함하여 모노레일 가좌형을 기준으로 km당 120억~140억원(교통개발연구원 내부자료) 정도로 제시되고 있어 여기서는 평균 130억원/km를 가정하였다.

### 3) 요금체계 및 수준( $t_{ij}$ )

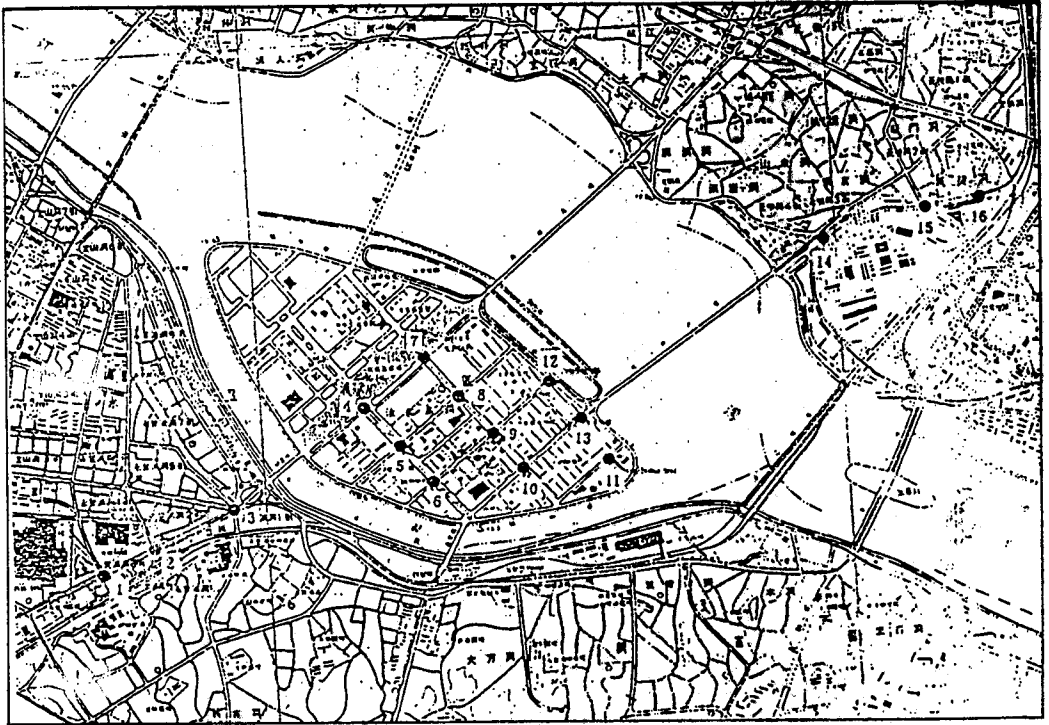
서울시내 요금체계는 시내버스의 경우 균일제인데 비하여 지하철의 경우 구간제가 적용되고 있다. 경전철의 경우 노선이 지역적 범위에 국한되고 있다는 점을 고려할 때 균일제가 적당할 것으로 판단된다. 또한 요금수준은 서울시의 현재 요금수준을 감안하여 적용하였다.

## 3. 적용과정

본 연구에서 정립된 모형의 검증을 위해 영등포-여의도-용산지역을 대상으로 신교통수단인 가좌형 모노레일을 전제로 각 역사별 수요는 사전에 주어진다든 가정하에 최적노선을 결정하였다. 역사 후보지는 총 16개를 선정했는데 이는 자료의 특성치, 즉 노선건설비의 변화, 운행시간의 변화, 결정된 역사별 수요에 따른 운행수입 등의 변화에 따른 민감도를 검증하기 위해 선정된 역사후보지이다.(〈그림 III-2〉 참조)

본 연구대상구간의 노선연장은 약 7km로 민자유치시 자본의 규모를 800억원으로 적용하였다. 경전철은 2~4량 편성, 2.5분 배차간격으로 차량당 정원은 80명, 혼잡율은 100%로 가정하였으며 운행시간은 1일을 기준으로 했다.

이와 같이 각 조건을 감안하여 구축된 개개 자료의 특성치를 앞의 식 (2.4)에 적용하면 식 (3.1)과 같다.



〈그림 Ⅲ-2〉 경전철 역사후보지 위치도

Minimize  $T(X_{ijt}, M) = F(X_{ijt}, M) - R(X_{ijt}, M)$

$$= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{15} \sum_{t=1}^{16} C_{ijt} \cdot X_{ijt}$$

$$- \sum_{r=1}^M \sum_{t=r+1}^{M+1} \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{16} t_{ij} \cdot d_{ir} \cdot I_{ir} \cdot I_{jt} \quad (3.1)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^{j-1} X_{ijt} - \sum_{k=j+1}^{16} X_{ikt} = 0$$

$$(t=1,2,\dots,M, j=2,3,\dots,16) \quad (a)$$

$$\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{16} X_{ijt} = 1 \quad (t=1,2,\dots,M) \quad (b)$$

$$I_{it} = \sum_{j=1}^{15} X_{ijt} \quad (i=1,2,\dots,15)$$

$$I_{16, M+1} = 1 \quad (t=1,2,\dots,M) \text{ ] Dummy Variables (c)}$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{15} \sum_{t=1}^{16} C_{ijt} \cdot X_{ijt} \leq 800 \text{억원} \quad (d)$$

여기서 역사후보지 16개 중에서 적정 역사수를 선정하는 방법은 조합생성에 의한 전수열거법 (All Enumeration Combination Generating)을 적용하였다.

#### 4. 적용결과

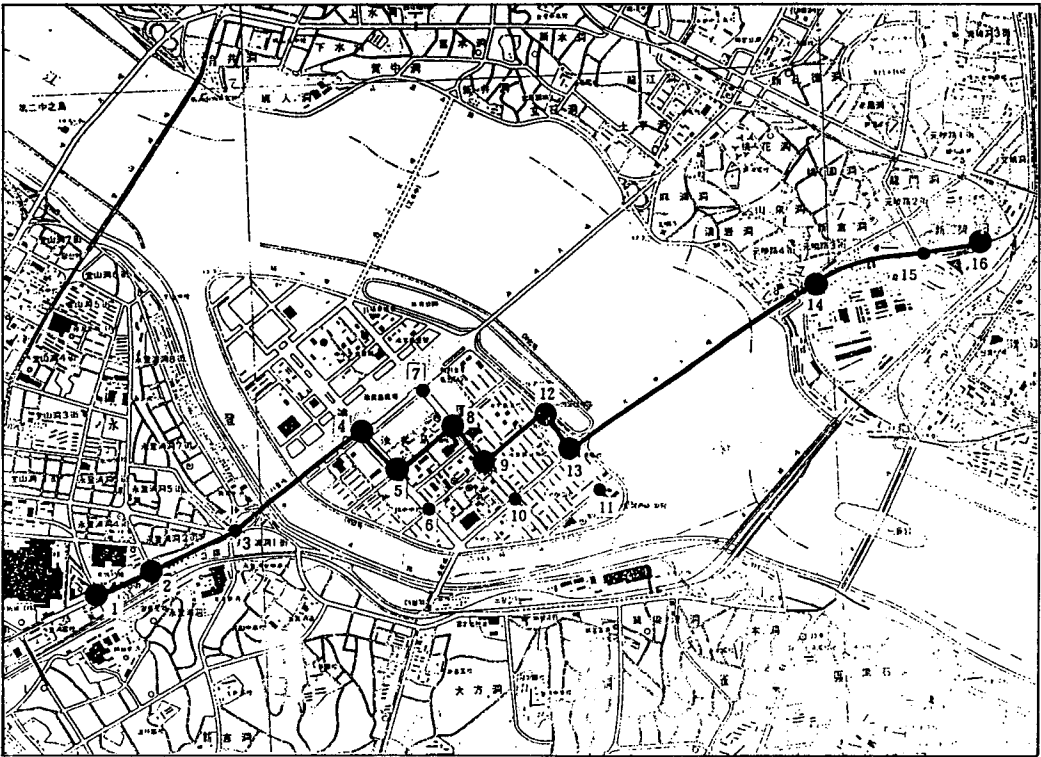
구축된 모형을 사례지역에 적용한 결과 경전철의 최적노선은 사전에 주어진 16개 역사중 10개

로 구성하는 것이 목적함수값을 가장 최소화시키는 것으로 도출되었다.

모형적용시 경전철은 전술한 바와 같이 가좌형 모노레일을 기준으로 노선 건설비를 책정했으며, 노선연장이 약 7km에 이르고 있는 점을 감안해 민자규모는 800억원으로 가정하여 그 결과를 도출하였다. 분석과정 중에 대상후보역사 16개 중 선정된 역사수에 따라 비용이 분석됨과 동시에 역간 수요에 따라 운행수입과 운영비가 도출되며, 선정된 역사들의 각 경우의 수에 따라 건설비(운

영비 포함)와 운행수익(요금수준 400원의 경우)의 차이를 조합생성법에 의거하여 전수열거해 비교하게 된다.

이러한 과정을 통해 본 연구대상지역에서 역사수가 10개로 구성되었을 때 총비용이 최소화되었으며 이때 선정된 노선은 1→2→4→5→8→9→12→13→14→16으로 나타났다. 선정된 경전철의 최종노선도를 도면에 표시해보면 <그림 Ⅲ-3>과 같다.



<그림 Ⅲ-3> 최적노선 구성도

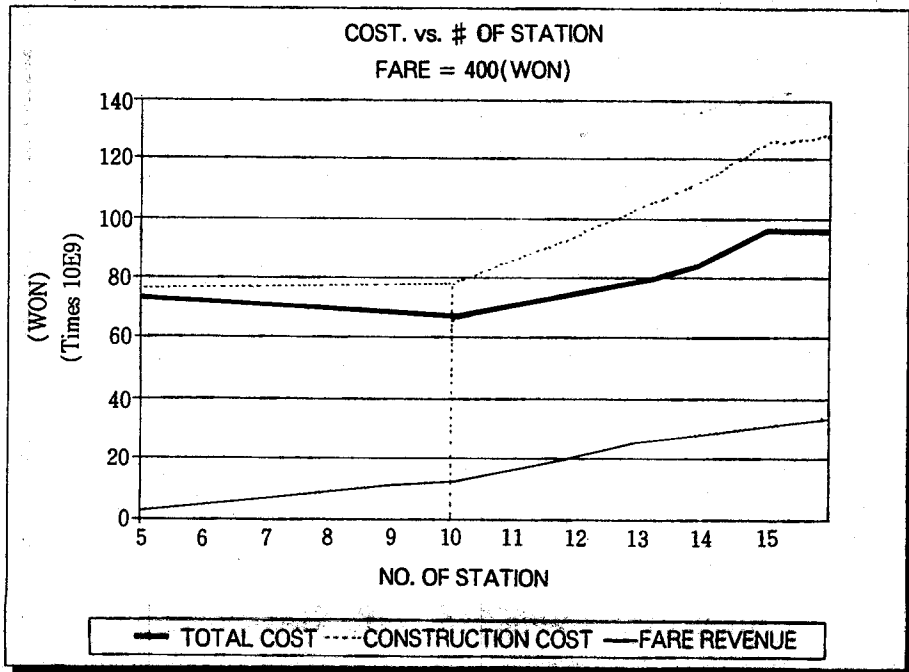
참고로 선정된 역사의 경우의 수별로 총비용을 산정해보면 불특함수형태로 나타나는데 이는 민간자본의 규모에 따라 최적노선이 다르게 결정될

수 있다는 가능성을 보여주는 것이다. (<표 III-1>, <그림 III-4> 참조)

<표 III-1> 선정 역사수에 따른 총비용 변화결과

역사의 수	총비용-요금수입(억원)	총비용(억원)	요금수입(억원)
5	740.1	768.3	28.2
6	727.1	768.3	41.2
7	710.6	768.3	57.7
8	693.8	768.3	74.5
9	677.3	774.8	97.5
10	666.5	774.8	108.3
11	705.1	852.8	147.7
12	746.3	930.8	184.5
13	788.9	1,021.8	232.9
14	850.6	1,112.8	262.2
15	956.2	1,241.5	285.3
16	956.0	1,261.0	305.0

주) 요금수준을 400원으로 했을 경우



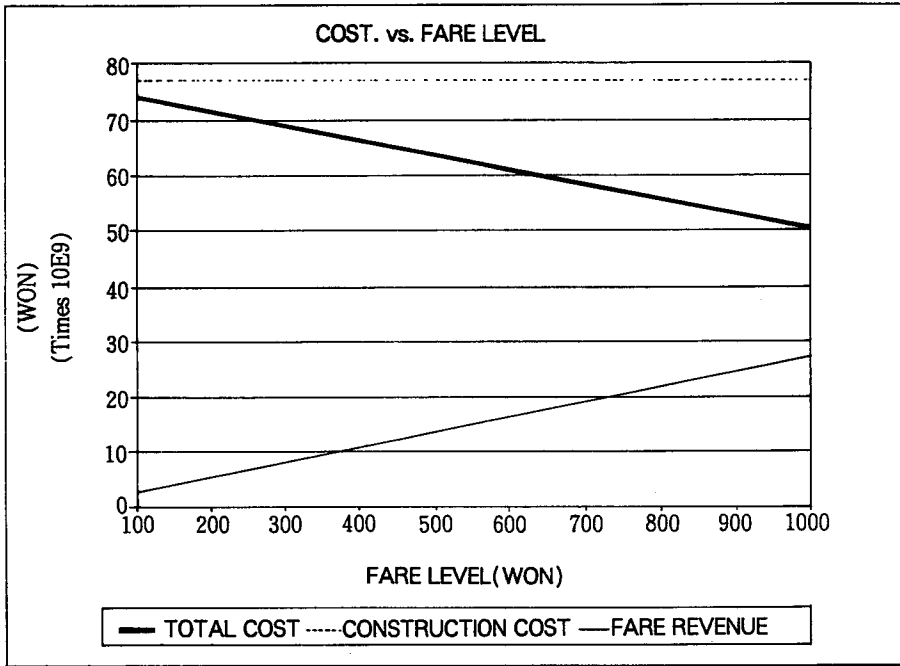
<그림 III-4> 선정된 역사에 따른 총비용의 변화도

본 연구에서 요금구조는 경전철의 특성 및 공간적 영향권을 감안하여 균일제를 적용하였다. 그러나 요금수준의 변화에 따른 자본회수기간을 평가하기 위하여 요금구조를 100원에서 시작하여 1,000원까지 100원 단위로 증가시키면서 분석하였다. 분석결과

요금수준이 300원까지는 자본회수기간이 나타나지 않고 있으며 요금이 400원인 경우 자본회수기간<sup>4)</sup>이 18년, 500원 일때 11년, 600원 일때 8년이 소요되는 것으로 분석되었는데, 이는 <표 III-2>, <그림 III-5>에 나타나 있다.

<표 III-2> 요금수준에 따른 자본회수기간 산정결과

요금수준(원)	총비용-요금수입(억원)	총비용(억원)	요금수입(억원)	자본회수기간(년)
100	743.0	768.3	25.3	∞
200	717.8	768.3	50.5	∞
300	682.5	768.3	75.8	∞
400	666.5	774.8	108.3	18
500	639.5	774.8	135.3	11
600	612.4	774.8	162.4	8
700	585.3	774.8	189.5	6
800	558.3	774.8	216.5	5
900	531.2	774.8	243.6	5
1000	504.1	774.8	270.7	4



<그림 III-5> 요금수준에 따른 총비용 변화도

한편 수요의 변화에 대한 민감도 분석은 본 연구에서는 제외했는데 이는 수요가 사전에 독립적으로 주어진다고 가정했기 때문이다. 또한 요금수준의 변화에 대한 양상은 수요가 일정하다는 전제와 요금체계가 균일제란 가정에서 출발하였으므로, 그 변화는 단조증가형태를 나타내게 되어 본 연구에서 여타항목에 대한 민감도분석은 별 의미가 없는 것으로 판단되었다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 사회간접자본 확충이란 차원에서 수익성을 감안한 민간자본의 효율적 유치를 위한 경전철의 최적노선결정모형을 제시하였다. 최적노선 결정방법은 정수계획법으로 모형을 정식화하였으며, 각 선정된 역사들의 경우의 수를 감안하여 건설비(운영비 포함)와 운행수익의 차이가 최소화되도록 하는 목적함수를 정의하였는데, 그 해법은 조합생성법에 의한 전수열거법을 적용하였다.

특히 본 연구에서는 민간자본 유치란 점을 중시하여 유치가능한 민간자본 규모를 제약조건(Budget Constraint)로 적용하였는데, 이는 민간자본의 유치한계와 수익성 보장에 따른 규모의 적정성을 감안하기 위해서이다.

본 연구는 유치가능한 민간자본의 규모가 가장 큰 관건으로 작용하며, 수요는 사전에 독립적으로 주어져야 한다는 문제점이 내포되어 있다. 한편 자본회수기간, 운행수익성 등은 요금체계 및 수준에 따라 달라질 수 있는데, 이는 현재의 물가상승 등을 감안해 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 전술한 바와 같이 경전철 도입시 일정규모의 민간자본을 포함한 모형을 적용했는데, 연구대상구간은 국지적 차원에서 수요가 많은 것으로 예상되는 영등포-여의도-용산지역을 중심으로 영향권대(band)를 설정하였다. 대상지역에 대한 토지이용상태, 인구분포, 접근성 등과 경

전철의 특성 등을 감안하여 역사후보지를 16개로 선정, 최적노선을 도출하였다.

본 연구에서 구축된 모형은 향후 적정수익성을 감안한 각종 민간자본 유치시 신교통수단 노선 또는 지하철노선의 확장, 개설 등에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 요금체계, 요금수준의 변화에 따른 탄력성 분석 등을 통해 보다 합리적인 수익성 검토, 자본회수기간 등을 산정할 수 있을 것으로 기대되며 대중교통 수요예측은 독자적인 과정으로 수행되는 것이 일반적인데 이 수요예측을 포함한 종합적이며 전과정이 동시에 수행되는 보다 현실적인 대중교통 통합모형 구축이 요망되는데, 이는 향후 연구과제로 남긴다.

#### 참고문헌

1. 이성모, 대중교통 통합체계 모형구축에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1994
2. 서울특별시 지하철본부, 지하철 추가노선 건설사업 교통영향평가-5호선 신설, 1990
3. 서울특별시 지하철본부, 지하철 7호선 건설사업 교통영향평가, 1990
4. 서울특별시 지하철본부, 지하철 8호선 건설사업 교통영향평가, 1991
5. 서울특별시 지하철본부, 지하철 6호선 건설사업 교통영향평가, 1993
6. 서울특별시 지하철공사, 주요현황 통계자료, 1992
7. 서울특별시 지하철공사, 서울지하철 1991, 1991
8. 서울특별시, 서울시 교통현황조사, 1990
9. Vukan R Vuchic, Urban Public Transportation-Systems and Technology, Havard University Press, 1981
10. Vuran R Vuchic, Place of Light Rail Transit in the Family of Transit Modes, Light Rail Transit, Special Report 161,

TRB, 1975

11. Vuran R Vuchic, Intersection Spacing for Line-Haul Passenger Transportation, Ph. D, Dissertation-Graduate Report, The Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, December 1966.
12. S.C.Wirainghe, A Model of a Coordinated Rail and Bus Transit System, Ph.D. Dissertation, The Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, May 1976.
13. S.C.Wirainghe, V.F.Hurdle and G.F.Newell, Optimal Parameters for a Coordinated Rail and Bus Transit System, Transportation Science, Vol.11, pp.359-374, 1977
14. David G.Leuberger, Linear and Nonlinear Programming, Second Ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1989
15. Selim G.Akl, The Design and Analysis of Parallel Algorithms, Prentice-Hall Intersectional Ed., pp.147-148, 1989
16. Marshall L.Ficher, The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems, Management Science, Vol 27, No 1, 1981
17. L.S.Lasden, Optimization Theory for Large Systems, MacMillan Co., 1970
18. R.S.Garfinkel and G.L.Nemhauser, Integer Programming, John Wiley & Sons, 1972
19. M.Bazaraa and C.M.Shetty, Nonlinear Programming, John Wiley & Sons, 1979
20. Jeremy F.Shapiro, Mathematical Programming, John Wiley & Sons, 1979
21. William A.Jessiman, George A.Kocur, Attracting Light Rail Transit Ridership,

Light Rail Transit, Special Report 161, TRB, 1975

〈주〉

- 1) 이 도표에서 알수 있는 바와 같이 경전철의 노선건설비와 운행수입 관계는 신교통수단 수요와 밀접한 관계가 있을 뿐 아니라, 이때의 수요 또한 역사수와 어느 정도 관계가 있으므로 이들의 관계로부터 적정 역사수  $M^*$ 을 결정할 수 있다.
- 2) 이는 경전철노선 건설의 소요비용이 일정이상될 뿐만 아니라 일단 노선이 건설되면 그 변경이 어렵기 때문에 수요예측이 상당히 중요하기 때문이다.
- 3) 물론 이는 실제상황에 대비해 보다 정밀하게 수요, 역사수, 역사규모에 대한 비용을 구분할 수 있는데 이는 자료의 정도(精度)에 좌우되는 문제라 할 수 있다.
- 4) 자본회수기간 산정은 순현재가치(Net Present Value)를 기준으로 하였으며, 할인율은 12%를 적용하여 산정하였다.



<부록 A> 구축된 기초자료

DIRECTION	DISTANCE (km)	DEMAND	CONST. COST(1E8WON)
1----> 2	.350	8023.	45.500
1----> 3	.900	1927.	117.000
1----> 4	2.000	116.	260.000
1----> 5	2.350	124.	305.500
1----> 6	2.700	29.	351.000
1----> 7	2.500	63.	325.000
1----> 8	2.800	35.	364.000
1----> 9	3.150	14.	409.500
1---->10	3.450	13.	448.500
1---->11	4.250	4.	552.500
1---->12	3.650	9.	474.500
1---->13	3.950	3.	513.500
1---->14	5.850	0.	760.500
1---->15	6.550	0.	851.500
1---->16	6.900	0.	897.000
2----> 3	.550	9539.	71.500
2----> 4	.660	4154.	85.800
2----> 5	1.010	4430.	131.300
2----> 6	1.360	1037.	176.800
2----> 7	1.160	2273.	150.800
2----> 8	1.460	1265.	189.800
2----> 9	1.810	507.	235.300
2---->10	2.110	465.	274.300
2---->11	2.910	139.	378.300
2---->12	2.310	312.	300.300
2---->13	2.610	106.	339.300
2---->14	4.510	2.	586.300
2---->15	5.210	0.	677.300
2---->16	5.560	3.	722.800
3----> 4	1.100	1244.	143.000
3----> 5	1.450	1327.	188.500
3----> 6	1.800	311.	234.000
3----> 7	1.600	681.	208.000
3----> 8	1.900	379.	247.000
3----> 9	2.250	152.	292.500
3---->10	2.550	139.	331.500
3---->11	3.350	42.	435.500
3---->12	2.750	93.	357.500
3---->13	3.050	32.	396.500
3---->14	4.950	1.	643.500
3---->15	5.650	0.	734.500
3---->16	6.000	1.	780.000
4----> 5	.350	6474.	45.500
4----> 6	.700	1516.	91.000
4----> 7	.500	3322.	65.000
4----> 8	.800	1848.	104.000
4----> 9	1.150	741.	149.500
4---->10	1.450	680.	188.500

4---->11	2.250	203.	292.500
4---->12	1.650	456.	241.500
4---->13	1.950	155.	253.500
4---->14	3.850	3.	500.500
4---->15	4.550	0.	591.500
4---->16	4.900	4.	637.000
5---->6	.350	6544.	45.500
5---->7	.800	3909.	104.000
5---->8	.500	7220.	65.000
5---->9	.850	2893.	110.500
5---->10	1.150	2656.	149.500
5---->11	1.950	794.	253.500
5---->12	1.350	1782.	175.500
5---->13	1.650	605.	214.500
5---->14	3.550	12.	461.500
5---->15	4.250	2.	552.500
5---->16	4.600	17.	598.000
6---->7	1.150	914.	149.500
6---->8	.850	1687.	110.500
6---->9	.500	2742.	65.000
6---->10	.800	2517.	104.000
6---->11	1.600	753.	208.000
6---->12	1.000	1689.	130.000
6---->13	1.300	574.	169.000
6---->14	3.200	11.	416.000
6---->15	3.900	2.	507.000
6---->16	4.250	16.	552.500
7---->8	.300	7453.	39.000
7---->9	.650	2986.	84.500
7---->10	.950	2742.	123.500
7---->11	1.750	820.	227.500
7---->12	1.150	1840.	149.500
7---->13	1.450	625.	188.500
7---->14	3.350	12.	435.500
7---->15	4.050	2.	526.500
7---->16	4.400	18.	572.500
8---->9	.350	5512.	45.500
8---->10	.650	5061.	84.500
8---->11	1.450	1514.	188.500
8---->12	.850	3396.	110.500
8---->13	2.150	156.	279.500
8---->14	4.050	3.	526.500
8---->15	4.750	0.	617.500
8---->16	5.100	4.	663.000
9---->10	.300	8198.	39.000
9---->11	1.100	2452.	143.000
9---->12	.500	5501.	65.000
9---->13	.800	1869.	104.000
9---->14	2.700	35.	351.000
9---->15	3.400	5.	442.000
9---->16	3.750	52.	487.500
10---->11	.800	7457.	104.000
10---->12	.800	5040.	104.000

10---->13	. 600	4654.	78. 000
10---->14	2. 500	88.	325. 000
10---->15	3. 200	13.	416. 000
10---->16	3. 550	130.	461. 500
11---->12	. 700	9069.	91. 000
11---->13	. 400	10229.	52. 000
11---->14	2. 300	194.	299. 000
11---->15	3. 000	29.	390. 000
11---->16	3. 350	287.	435. 500
12---->13	. 300	8463.	39. 000
12---->14	2. 200	161.	286. 000
12---->15	2. 900	24.	377. 000
12---->16	3. 250	237.	422. 500
13---->14	1. 900	181.	247. 000
13---->15	2. 600	27.	338. 000
13---->16	2. 950	267.	383. 500
14---->15	. 700	719.	91. 000
14---->16	1. 050	7009.	136. 500
15---->16	. 500	12605.	65. 000