

■ 論 文 ■

# 대중교통망 이동성지표 개발 (네트워크 분석을 중심으로)

Transit Mobility Measures on the Seoul Multimodal Network

노 현 수

(서울시정개발연구원 위촉연구원)

도 철 응

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

김 원 근

(한양대학교 교통시스템공학과 박사과정)

조 종 석

(서울시정개발연구원 위촉연구원)

신 성 일

(서울시정개발연구원 연구위원)

## 목 차

- I. 서론
  - II. 대중교통 이동성의 이론적 배경
    - 1. 이동성의 개념정의 및 확장
    - 2. 이동성 연구사례
  - III. 대중교통 이동성지표 제안
    - 1. 지표의 기본 상(像)
    - 2. 지표 1: 대중교통시설간 이동성 분석지표
    - 3. 지표 2: 대중교통시설까지의 접근을 포함한 이동성 분석지표
    - 4. 지표 3: 대중교통 서비스제공 분석지표
    - 5. 대중교통 이동성 산정방안
  - IV. 사례연구
    - 1. 가정
    - 2. 결과분석
    - 3. 이동성지표의 활용방안
  - V. 결론 및 향후연구
- 참고문헌

Key Words : 이동성지표, 통합대중교통, 대중교통/승용차통행시간, 최적경로탐색, 다수경로탐색

## 요 약

교통은 개인의 이동(mobility)에 기원을 둔다. 교통환경에서 이 같은 개인의 이동을 특정 값으로 제시하려는 이동성연구는 여러 각도에서 시행되어 왔으며, 그 결과로 통행자의 통행 서비스수준을 정량적으로 평가할 수 있는 다양한 방안이 제안되어왔다. 그러나 복합대중교통에 대한, 특히 지역적 범위에서 평가할 수 있는, 이동성연구는 많지 않았다. 본 연구는 복합대중교통망에 대한 이동성지표를 지점 대 지점에서 지역간 범위로 확대하여, 대중교통 승객의 접근시간, 주행시간, 환승시간을 고려한 대중교통 이동성지표를 제안한다. 복합대중교통의 이동성(mobility) 평가를 위하여, 대중교통 이동성을 도보수단까지 포함하였으며, 비교 대안수단은 대중교통의 경쟁수단인 개인교통수단으로 설정하였다. 본 연구에서 제안한 대중교통 이동성 분석지표는 지역간 대중교통 시설이 개인교통수단에 비해 어느 정도의 경쟁력을 가지는지(지표 1), 도보수단을 포함하여, 출발지역에서 도착지역까지 개인교통수단에 비해 얼마나 편리한지(지표 2), 이용자의 지역간 통행을 지원할 수 있도록 얼마나 많은 경쟁력 있는 다양한 경로가 제공되는지(지표 3)를 평가할 수 있도록 설정하였다.

Transportation is from an individual mobility. Various efforts to propose specific values of the individual mobility have been conducted in diverse transportation environment. However, mobility studies for multimodal public transportation are rare especially on not the range of line but area. This study propose a method to calculate transit mobility indices as expanding mobility analysis from point-to-point to area-to-area, considering access time to transit facility, running time and transfer time of passengers. To extract mobility indices, we included walking as a lowest category of mode and set passenger car as a competitive mode to transit mode. This study propose three public transportation mobility indices as 1) how competitive public transportation facility is offered against passenger car 2) how convenient transit mode including walking is provided against passenger car from origin to destination and 3) how many various paths are presented to support passenger's travel between regions. These indices are tested on the Seoul metropolitan area with 10 lines of urban rail and about 420 lines of bus. In addition, we proposed two political applications of proposed mobility indices to increase public transportation mobility between two regions and to maximize the mobility of study area when a line is added in the area.

## 1. 서론

최근에 효율적인 대중교통체계를 유지하고자 하는 정책과 연구가 활성화되고 있다. 그러나 대중교통 이용 행태가 복잡적이고 다양해짐에 따라, 보다 체계적이고, 효율적인 대중교통이용 활성화를 위해 대중교통체계에 대한 다양한 평가방안이 필요한 것이 현실이다. 그렇다면 대중교통 평가 시, 고려할 사항은 무엇인가? 그 해답은 간단하다. 예를 들어, 옥수동에 사는 한 통행자가 개인교통수단이 아닌 대중교통을 이용하여 대치동으로 이동 할 때, 이 승객이 "대중교통 이용이 좋다"라고 대답하였다면, [옥수동-대치동]에는 개인교통수단에 비해 양호한 대중교통 이동성을 제공하고 있는 것으로 볼 수 있다. 여기서 승객은 어떤 대중교통 수단을 이용해도 상관이 없다. 이처럼 대중교통이동성지표는 어떤 대중교통수단을 이용해도 상관없는 통합(intermodal 또는 multimodal)대중교통환경에서 이뤄져야하며, 다양한 통행 목적지에 따른 다양한 통행거리 등을 반영할 수 있도록 개인교통대비 대중교통평가라는 상대평가가 가능해야 하고, 지역의 대중교통 특성을 고려할 수 있도록 지역간 평가도 가능해야 한다.

우선 통합대중교통환경에 대하여 살펴보자. 대중교통 이용자는 통행시 다양한 대중교통 수단을 이용한다. 특히 대중교통체계 개편 후, 대중교통 환승비율은 높아지고 있다. 이러한 결과를 볼 때, 대중교통은 반드시 통합교통수단으로 고려되어야 한다. 뿐만 아니라 통합교통수단 적용 시, 수요를 배제한 물리적 네트워크의 평가가 필요하다. 대중교통체계에 수요가 적용된 대중교통 네트워크 평가가 필요하나 이는 이차적인 문제이다. 대상지역에 제공되는 대중교통서비스 수준이 어느 정도 인지를 파악하기 위해서는 대중교통시설만의 평가가 선행되고 수요가 적용된 경우를 다시 평가해야 한다. 노선만을 평가해서는 이와 같은 대상지역의 대중교통의 형평성<sup>1)</sup> 문제를 해결하기 힘들다. 그러므로 수요가 고려되기 전에 물리적 특성만을 고려한 네트워크의 평가가 필요하다.

개인교통대비 대중교통평가에 대해 살펴보자. 이는 통행자에게 자신의 개인교통수단에 비해 대중교통수단이 얼마만큼의 경쟁력을 가지는지를 나타낼 수 있다. 이는 수단의 선택대안으로 평가하기 때문에, 지역의 교통

시설 특성에 상관없이 정량적인 평가를 가능하게 하는 장점을 가지고 있다. 수단간의 경쟁요소는 통행시간, 통행비용, 안락성 등으로 다양하다. 본 연구에서는 가장 기초적인 이동성지표의 평가 및 분석을 위하여, 네트워크의 물리적 특성만을 고려하고, 수단선택 요소로 각 수단의 통행시간속성만을 사용하였다.

지역간 범위에서 네트워크기반의 대중교통에 대한 평가가 필요하다. 복잡하고 유기적으로 연결된 대중교통망에서, 하나 또는 몇 개의 노선에 대한 평가는 오히려 대중교통체계의 유기적 특성을 저해 할 수 있고, 대상지역의 대중교통의 특성이 다른 지역의 특성과 어떤 차이가 발생하는지를 고려하기 힘들게 된다. 따라서 대중교통에 대한 평가는 전체 네트워크 분석을 기반으로 한 지역간에서 이루어져야 하며, 이를 기반으로 할 때, 대상지역의 대중교통체계에 대한 구체적인 요구사항을 파악할 수 있게 된다.

이에 따라 본 연구는, 통합대중교통환경 및 지역간 범위를 고려하여, 대중교통수단이 개인교통수단에 대해 어느 정도의 경쟁력을 가지는지를 대중교통 이동성 지표로 제안하고 이에 대해 분석한다.

본 연구에서 제공하는 이동성 지표는 다음과 같다. 첫째, 지역간 대중교통시설의 승용차대비 경쟁력을 반영한 지표(지표 1: 대중교통시설간 이동성 분석지표)을 제안한다. 이는 승용차 최단통행시간 대비 대중교통수단의 출발-도착역간통행시간으로 나타낼 수 있다. 둘째, 대중교통 역까지의 접근을 고려한 이동성지표(지표 2: 대중교통시설까지의 접근을 포함한 이동성 분석지표)를 제안한다. 이는 대중교통 이용자가 인근역까지 가기 위한 도보접근을 포함하여, 임의의 한점에서 출발하여 목적역까지 승용차에 비해 얼마나 빨리 도달하는지(또는 편리한지)를 나타낸다. 셋째, 대중교통 서비스제공 분석지표(지표 3)를 제안한다. 이는 개인교통 수단에 경쟁력 있는 대중교통노선을 얼마나 제공하는지를 나타낸다.

## II. 대중교통 이동성의 이론적 배경

### 1. 이동성의 개념정의 및 확장

이동성(mobility)의 사전적 의미는 "한 지역에서 다른 지역으로 이동할 수 있는 가능성" 또는 "하나의 상

1) 특정 지역간 대중교통 서비스가 다른 지역에 비해 과다하거나, 부족하지 않음을 판단하는 기준

태 또는 조건에서 다른 상태나 조건으로 빨리 움직이거나 변할 수 있는 가능성"이다. 즉 이동성이란 한 지역에서 다른 지역으로 얼마나 빨리 가는가를 나타내는 개념이라고 할 수 있다. Florida DOT(Department of Transportation)의 이동성 지표 프로그램에서는 이동성의 사전적 의미에 교통 서비스의 질적 측면을 포함시켰다. 일반적인 이용자중심의 이동성 개념을 "사람 또는 재화가 공동체, 지역, 또는 세계 간에 이동하기 쉬운 정도"로 정의하였다.

대중교통을 이용승객에 적용하기위해 이를 재정의하면 다음과 같다. "대중교통 이용자가 대중교통을 이용하여 출발지에서 목적지까지 이동하기 쉬운 정도"로 정의 할 수 있다. 여기서 이동성은 대중교통 시설까지의 도보접근을 포함한다. 또한 이동성 개념을 지역간 범위까지 확장하면, 대중교통에 대한 이동성은 "복합교

통망상의 대중교통 이용자가 대중교통을 이용하여 한 지역에서 다른 지역까지 이동하기 쉬운 정도"로 정의할 수 있다. 즉 한 지점에서 다른 지점까지의 이동성에서 집합적 의미를 부여하여, 한 지역에서 다른 지역으로의 이동성으로 확대하여 적용할 수 있다.

## 2. 이동성 연구사례

대중교통에 적용되는 지표는 이를 사용하고자하는 목적 및 적용대상에 따라 다양하다. <표 1>에서 보는 바와 같이 대중교통의 이동성을 평가하기 위해 적용된 지표는 대중교통의 운행시간, 굴곡영향계수, 환승성, 접근성, 형평성, 대중교통의 노선거리, 대중교통 도착 지점에서의 신뢰도, 노선굴곡도, 노선중복도 등으로 다양하다. 이 같은 여러 이동성 평가지표는 크게 단일수

<표 1> 국내·외 이동성지표에 대한 연구사례

국내연구사례	사용된지표	국외연구사례	사용된지표
서울시 시내버스노선 조정 방안 연구 (1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>노선거리</li> <li>운행시간</li> <li>지하철과의 거리 및 비율</li> <li>굴곡영향계수</li> <li>과소노선지표</li> <li>과밀노선지표</li> </ul>	Transit Capacity and Quality of Service (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>이용가능성(운행빈도, 서비스시간, 서비스 지역)</li> <li>서비스 질(재차율, 신뢰도, 대중교통/승용차 통행시간)</li> </ul>
시내버스노선의 합리적 조정방안 (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>노선운행거리</li> <li>노선운행시간</li> <li>지하철 경합비율</li> <li>지하철 연계역수</li> <li>지하철 배차간격</li> <li>차내혼잡도</li> </ul>	Florida's Mobility Performance Measures Program -Transit (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>통행에 대한 정량적지표: 승객량(총 승객통행량)</li> <li>통행에 대한 정성적지표: 승용차 통행시간/대중교통 통행시간, 신뢰도(정시성)</li> <li>접근성: coverage(서비스 제공 시간비율), 운행빈도수, span(서비스 시간)</li> <li>이용율: 부하계수(승차율)</li> </ul>
제2기 지하철 전면개편에 따른 시내버스 노선체계 개편구상 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>신속성(통행시간/인)</li> <li>쾌적성(승객수/좌석수)</li> <li>편리성(노선수 및 환승횟수)</li> <li>수익성(승객수)</li> </ul>		
지속가능성 이동성 연구 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>운행속도(운행거리/운행시간)</li> <li>운행간격(기준운행간격: 실제운행간격)</li> <li>접근성(차내, 차외시간)</li> <li>환승성(평균환승시간/총통행시간) 외 다수</li> </ul>		
시내버스노선체계 평가를 위한 정량적 지표의 설정 및 적용 (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>접근성(버스정류장수/(대지면적, 인구))</li> <li>승차안락성(재차율)</li> <li>환승률(환승통행/총수단통행)</li> <li>노선직결도(굴곡도의 역수)</li> <li>운행생산성(총통행자수/총노선거리)</li> <li>형평성(인구대비 버스노선수의 표준편차)</li> <li>차량소요대수(노선별 소요차량의 합)</li> </ul>	A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>접근도지표</li> <li>Runtime ratio(실제주행시간/ 계획주행시간)</li> <li>이동성(통행시간, 혼잡수준별 VMT 등)</li> <li>통행시간변동계수(배차시간분산/스케줄 배차시간)</li> <li>신뢰도(평균통행시간보다 높은 통행시간의 비율)</li> <li>환승통행비율</li> <li>상대지체율(이상적인 통행시간/실제통행 시간)</li> <li>굴곡도</li> <li>지체</li> <li>통행물리지표(f(VMT, 통행량)</li> </ul>
서울시 버스체계개편 (2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>노선중복도</li> <li>지하철과의 경합도(버스운행거리 대비 지하철 노선과의 경합거리)</li> <li>노선굴곡도(운행거리/직선거리)</li> <li>교차로에서의 회전(좌/우/직진)비율</li> <li>접근성(시가화면적 및 유출통행당 정류소)</li> </ul>		

단의 서비스 향상을 위해서 또는 다른 대중교통 수단을 고려한 통합 대중교통수단의 서비스 향상을 위해서 이용된다. 그리고 이동성 평가지표는 이용자를 위해, 서비스 제공자를 위해, 전체 시스템 체계를 위해 다양한 평가지표로 적용될 수 있다.

기존연구사례에서 이용자 측면에 대중교통 평가에 사용된 지표 중 통행시간이 가장 큰 비중을 차지한다. 이용자의 통행시간은 (노선운행시간), (통행시간/인), (차내, 차외시간), (환승시간) 등의 다양한 형태로 사용되었다.

두 번째로 이용자가 선택할 수 있는 (수단의 수) 또는 (역의 수) 등이 대중교통 평가지표로 제공되었다. 이용자의 대중교통 수단의 용이함을 나타내는 것으로, 주변에 얼마나 많은 대중교통 역(또는 정거장)이 있는지와 얼마나 많은 대중교통 수단이나 노선이 있는지 등을 예로 들 수 있다. 이와 같은 지표는 이용자의 통행시간을 단축시키는 서비스로 제공될 수 있다. 그 외에 교차로에서의 회전비율, 노선의 굴곡도 등이 평가지표로 사용되었다.

마지막으로 대중교통 이용자의 정성적 측면을 평가하기 위해 수요대비 공급정도가 평가지표로 사용되었다. 대중교통 이용자의 정성적 측면은 주로 안락성, 쾌적성 등을 예로 들 수 있다. 대중교통 이용에 있어서 이러한 정성적 측면을 측정하는데 가장 많이 이용되는 것이 재차율이다.

이와 같이 통합대중교통망을 기반으로 한 이용자의 이동성 평가지표를 고려 할 때, 다음과 같은 분류가 가능하다.

〈표 2〉 기존 연구에 대한 이동성 분류

가) 얼마나 빠르게 이동하는가? <sup>2)</sup>
- 운행 또는 통행시간, 운행 또는 노선거리, 운행 또는 통행 속도, 배차간격, 환승 및 대기시간, 역 또는 정거장까지의 접근시간, 노선 굴곡도, 대중교통/승용차 통행시간 등
나) 얼마나 접근하기 쉬운가? <sup>3)</sup>
- 지하철 연계역수, 노선 수 등
다) 얼마나 편안한가?
- 재차율 등

가)와 나)의 경우는 대중교통망만으로 평가가능하다. 본 연구의 목적중 하나인 대중교통망의 성능 평가

를 고려한다면, 가)의 경우에 수요가 고려되지 않은 통행시간을 적용할 수 있다. 그리고 나)의 경우는 대중교통망의 물리적인 특성만을 가지고 있다. 그러나 다)의 경우는 대중교통을 이용하는 수요를 고려해야 측정할 수 있다. 따라서 본 연구는 가)와 나)에 대한 평가를 실시한다.

### III. 대중교통 이동성지표 제안

본 장에서는 대중교통 이동성 평가를 위해 지표의 상(像)을 제시하고 이를 기본으로 한 세 가지 지표를 제안한다.

#### 1. 지표의 기본 상(像)

본 연구에서 제안하는 지표는 이용자의 관점에서 대중교통망만을 고려할 때, 개인교통수단에 비해 얼마나 빠르게 이동하는가와 대중교통 시설까지 얼마나 쉽게 접근가능한가에 초점이 맞춰진다. 지표분석을 위하여 본 연구에서는 수단경쟁요소 중 통행시간만을 고려하였다. 수단의 경쟁요소를 통행시간만으로 제시하는데 어느 정도 무리가 따르나, 이동성지표의 새로운 방향 모색에 초점을 맞추어 평가 및 분석이 용이하도록 이를 분석요소로 사용하였다. 따라서 〈표 2〉에서 제시한 기존 이동성 지표연구에 대한 분류(가, 나, 다)기준을 본 연구의 목적에 맞게 좀더 세분화하여 지표로 분류하면 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉 이동성 지표의 분류

가) 얼마나 빠르게 이동하는가?
- 대중교통시설이 얼마나 빠르게 제공되는가?(지표 1)
- 이용자가 얼마나 빠르게 이동하는가?(지표 2)
나) 얼마나 다양한 서비스가 있는가?(지표 3)

[지표 1]은 대중교통시설자체의 개인교통수단 대비 경쟁력을 나타낸다. [지표 2]는 이용자의 총 통행시간을 나타낸다. [지표 1],[2]는 각각 좋은 서비스가 제공되는지, 좋은 서비스가 제공되고 있다면 그 서비스를 이용하기 쉬운지를 판단하는데 이용할 수 있다. [지표 3]은 이용자가 개인교통수단에 경쟁력이 있는 경로가

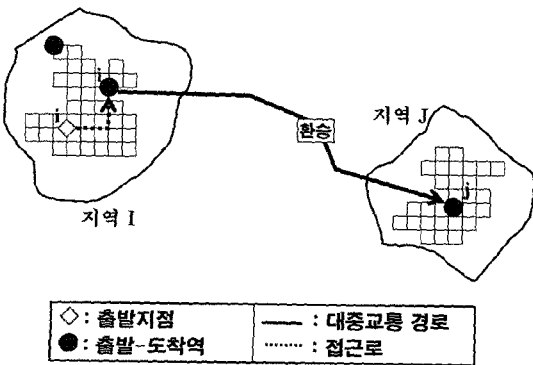
2) 광의적 개념의 이동성으로 시간에 대한 속성을 모두 포함한다.  
3) 선택 개념으로 이용자가 선택할 수 있는 대안 수를 의미한다.

얼마나 다양한지를 나타내며, 이를 다양한 서비스로 생각 할 수 있다.

본 연구의 이용자관점의 대중교통 이동성 평가를 위한 비교대안 수단은 승용차이다. 대중교통수단은 정해져 있는 노선을 스케줄에 의해서 운행한다. 그 결과로, 주로 대중교통 이동성 평가를 위해서는 스케줄된 운행 시간에 비해 얼마나 차이가 나느냐로 제한하는 경우가 많다. 그러나 이용자의 관점에서 보면, 개인교통수단에 비해 얼마나 느린가가 더욱 중요한 대중교통수단 선택 요소가 된다. 따라서 이용자의 대중교통 이용에 대한 경쟁수단은 개인교통 수단인 승용차가 되는 것이 합리적이다.

그리고 본 연구에서 제안하는 지표는 점대점(point-to-point;노드, 역)의 개별지표를 기반으로 지역지표(area-to-area;동, 구, 특정지역)로 확장하여 나타내었다(그림 1)). 개별지표는 지역 I에서 지역 J까지 대중교통 서비스가 제공될 때, i역(또는 출발지점)에서 j역까지의 대중교통의 이동성(통행시간)이 승용차의 이동성(통행시간)에 얼마만큼의 경쟁력을 가지는가를 나타낼 수 있다. 이를 지역범위로 확장하여, coverage 개념<sup>4)</sup>을 적용하면, 지역 I에서 지역 J까지의 승용차 대비 대중교통의 경쟁력을 제시할 수 있다.

이 같이 한번의 이동을 위해 두개의 지점이 필요한 이동수단의 특성 때문에, coverage 개념을 적용하기 위해서는 출발지-도착지 쌍(pair)이 존재해야한다. 이를 면(area)으로 확대하기 위해서는 지역간 다수의 출발지-도착지 쌍(pair)을 구성해야 한다. 즉 면은 다수의 선(출발지-도착지)의 집합으로 생각할 수 있으며, 지역의 이동성 지표값은 다수의 선에 대한 평균값으로 제시



(그림 1) 개별 및 지역지표의 개념도

할 수 있다. 지점 간 이동성 지표를 지역간 이동성 지표로 확대하기 위해서는 정확한 지점 간 이동성 지표가 산출되어야 한다. 이를 위해서 정확한 네트워크구성이 필요하다. 그렇지만 정확한 네트워크의 구성은 지역간 전수화자료 사용을 가능하게 하지만 여러 지역으로 확대할 경우, 이동성 지표값을 도출하기 위해서는 많은 컴퓨터 수행시간을 감수해야하는 단점을 가지고 있다.

1) 표식

본 연구의 지표의 모형화를 위해 사용한 표식은 다음과 같다.

- $M_i$  : i에서 j까지의 이동성 지표
- $M_{IJ}$  : 지역 I에서 지역 J까지의 이동성지표
- $PTM_{ij}$  : i에서 j까지 대중교통 이동성
- $CM_{ij}$  : i에서 j까지 승용차 이동성
- $S_{ij}(T_{ij})$  : 대중교통 통행시간(환승시간)
- $W_{ij}$  : 대중교통 접근시간(도보 등)
- $C_{ij}$  : 승용차 통행시간
- $k$  : 1부터 k까지 순차적인 수
- $\sum_i \sum_j 1$  : i와 j가 연결되어있으면 1

2) 개별지표

본 연구에서 적용할 지표의 기본상에서 개별지표를 나타내면 식(1)과 같다.

$$M_{ij} = \frac{PTM_{ij}}{CM_{ij}} = \frac{S_{ij}(T_{ij}) + W_{ij}}{CM_{ij}} \quad (1)$$

식 (1)은 승용차 대비 대중교통 이동성(대중교통통행시간/승용차통행시간)을 나타낸다. 대중교통 이동성은 통행시간, 환승시간, 접근시간으로 확대하여 나타낼 수 있다.

3) 지역지표

지역지표는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

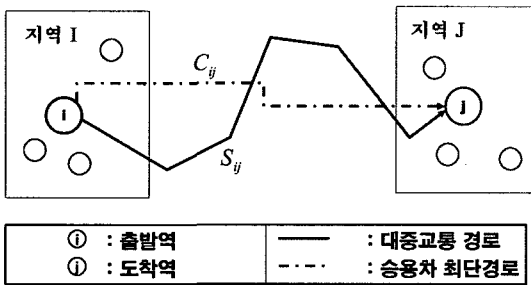
$$M_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j PTM_{ij}}{\sum_i \sum_j CM_{ij}} \quad \forall i, j; i \in I, j \in J \quad (2)$$

4) coverage개념은 단위면적당 시설물 등의 점유면적 또는 수이다. 본 연구에서는 지역 간 역 또는 출발지점 쌍(pair)으로 나타내었다.

지역지표의 값은, 지역 I와 J의 각 노드 i, j(역 또는 출발지점)의 개별지표에 대한 산술평균을 나타낸다. 이 두 가지 기본지표를 활용하여 본 연구에서 제시하는 세 가지 지표(지표 1, 2, 3)는 다음과 같다.

**2. 지표 1: 대중교통시설간 이동성 분석지표**

지표 1은 대중교통시설이 승용차에 비해 얼마나 빠른 경쟁력을 제공하는지를 나타낸다.



〈그림 2〉 지표 1의 개념도

지역 I에서 지역 J까지의 개별지표와 지역지표를 제시하였다.

개별지표	지역지표
$M_{ij} = \frac{S_{ij}(T_{ij})}{C_{ij}}$	$M_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j \frac{S_{ij}(T_{ij})}{C_{ij}}}{\sum_i \sum_j 1}$

지표 1은 물리적 노선망이 효율적인지를 진단할 수 있다. 다음에서 지표 1의 지역지표가 어떻게 도출되는지 살펴보자.

〈표 4〉 지표 1의 예

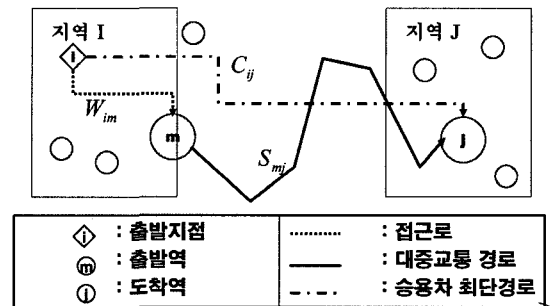
지역 I	지역 J	통행시간(분)				개별 지표	지역 지표
		승용차	대중교통				
i	j		총	환승	차내통행		
1	3	18	30	10	20	1.67	1.44
1	4	21	33	10	23	1.57	
1	5	17	28	3	25	1.65	
2	3	24	38	14	24	1.58	
2	4	21	25	0	25	1.19	
2	5	20	20	0	20	1.00	

지역 I에는 노드(역) 1, 2, 지역 J에는 노드 3, 4, 5가 있을 때, 네트워크 분석으로 〈표 4〉의 통행시간

결과를 도출했다고 하자. 개별 이동성 지표는 대중교통 통행시간/승용차 통행시간으로 쉽게 구할 수 있고 지역 지표도 각 통행을 평균하면 쉽게 구할 수 있다.

**3. 지표 2: 대중교통 시설까지의 접근을 포함한 이동성 분석지표**

이용자가 대중교통을 이용할 경우 출발지점에서 도착역까지 승용차에 비해 어느 정도의 경쟁력을 제공하는지를 나타낸다.



〈그림 3〉 지표 2의 개념도

지역 I에서 지역 J까지의 개별지표와 지역지표를 제시하였다.

개별지표	지역지표
$M_{ij} = \frac{W_{im} + S_{mj}(T_{mj})}{C_{ij}}$	$M_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j \frac{W_{im} + S_{mj}(T_{mj})}{C_{ij}}}{\sum_i \sum_j 1}$

지표 2의 지역지표가 어떻게 도출되는지 살펴보자. 〈표 5〉는 지표 1의 도출(〈표 4〉)과정에서 교통시설(역)까지의 도보시간(접근시간)을 포함하였다.

〈표 5〉 지표 2의 예

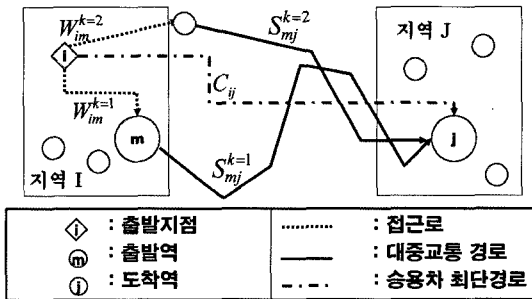
지역 I	지역 J	통행시간(분)					개별 지표	지역 지표
		승용차	대중교통					
i	j		총	환승	차내통행	접근		
1	3	19	35	10	20	5	1.84	1.67
1	4	23	41	10	23	8	1.78	
1	5	20	31	3	25	3	1.55	
2	3	24	40	14	24	2	1.67	
2	4	20	35	0	25	10	1.75	
2	5	25	35	0	20	15	1.40	

여기서 지표 1과 지표 2를 동시에 고려해 보면, 출발

지역에서 대중교통 시설이 이용자의 이동성을 보장해주는지 아니면, 대중교통 시설까지의 대중교통 이용자의 이동성이 부족한지를 지역적 범위에서 평가가 가능하다.

**4. 지표 3: 대중교통 서비스제공 분석지표**

지표 3은 얼마나 다양한 서비스가 제공되는지를 나타낸다. 다시 말하면, 얼마나 많은 대안경로를 제공하여 이용자가 쉽게 이용가능한지를 나타낸다. 예를 들어, 지역 I에서 지역 J까지 대안경로가 3개 이고, 지역 I에서 지역 M까지 대안경로가 1개 이면, 지역 I에서 지역 J까지 접근이 더욱 용이하다고 할 수 있다.



(그림 4) 지표 3의 개념도

지역 I에서 지역 J까지의 개별지표와 지역지표를 제시하였다.

개별지표	지역지표
$M_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_k [C_{ij} - (P_{ij}^k - C_{ij})]}$	$M_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j C_{ij}}{\sum_k \sum_i [C_{ij} - (P_{ij}^k - C_{ij})]}$
$P_{ij}^k = W_{im}^k + S_{mj}^k (T_{mj}^k)$	$M_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j C_{ij}}{\sum_i \sum_j 1}$

여기서  $P_{ij}^k$ 는 i, j노드의 k 번째 경로에 대한 대중교통 통행시간을 나타낸다. 개별지표  $M_{ij}$ 는  $(\sum_k P_{ij}^k)/C_{ij}$  이어야 하나, 승용차에 비해 추가로 더 걸린 대중교통 통행시간이 승용차통행시간을 넘을 경우 음수값이 도출되어 제거할 수 있도록 하였으며, 이는 승용차 시간의 2배를 초과하지 않는 경로를 승용차대비 경쟁력 있는 경로로 가정한 것과 같다.

지표 3의 지역지표 산출은 <표 7>에 나타내었으며, 노드1에서 노드3으로 가는 2번째 경로(음영부분)의

<표 6> 지표 3의 예

지역 I	지역 J	대안 경로수 (k)	통행시간(분)				개별 지표	지역 지표	
			승용차	대중교통					
i	j	(k)	총	환승	차내통행	접근			
1	3	1	19	35	10	20	5	6.33	2.69
		2	19	40	7	25	8		
1	4	1	23	41	10	23	8	2.88	
		2	23	43	14	22	7		
1	5	1	20	31	3	25	3	1.54	
		2	20	36	7	20	9		
2	3	1	24	40	14	24	2	2.18	
		2	24	45	14	26	5		
2	4	1	20	35	0	25	10	2.22	
		2	20	36	3	25	8		
2	5	1	25	35	0	20	15	0.96	
		2	25	39	0	19	20		

대중교통 통행시간은 승용차 통행시간의 2배를 초과하기 때문에  $M_{ij}$  값은 음수로 표현되어, 지표계산에서는 배제된다. 즉 노드 1에서 노드 3의 통행에서 경쟁력 있는(승용차 통행시간의 2배를 넘지 않는) 대중교통경로는 1개인 것이다.

**5. 대중교통 이동성 산정방안**

본 연구에서 사용된 이동성 산정기법은 크게 대중교통 이동성 지표 1과 2를 분석하기 위한 복합교통망에서 최적경로탐색 알고리즘<sup>5)</sup>과 지표 3을 분석하기 위한 복합교통망에서 다수경로 탐색알고리즘을 적용하였다.

우선 복합교통망 최적경로탐색으로 수단간의 환승점수를 고려하여 만족하도록 구성하였다. 유사한 적용기법은 이미영 외(2004)에서 소개 되었다.

$$\pi^{rb} = \min \pi_m^{rb} + d_{mn}^{ab} + C_n^b, \pi_n^{rb} \tag{3}$$

여기서,

$\pi_n^{rb}$  : 출발지 r에서 링크 b의 도착지점까지 수단 n으로 도착한 최적통행시간

$d_{mn}^{ab}$  : 인접링크 a와 b를 각각 m과 n수단으로 통행시 수단전환 시간

$d_n^b$  : 링크 b를 수단 n으로 통행시 통행시간

지표 3을 계산하기 위해 복합교통망에서 다수의 서비

5) 승용차 최적경로탐색기법도 복합교통망으로 처리하여 산정 가능함.

스 경로탐색 알고리즘은 Shier(1979)가 제안한 K 경로 탐색알고리즘에 링크표지를 도입하여 환승을 고려하도록 설계하였다(이미영, 백남철(2005)). 또한 서비스노선으로 기 탐색된 노선의 재 탐색되는 것을 방지하기 위하여, Park(1998)과 임용택(2004)가 적용한 overlapping penalty 부과방안을 적용하였다.

### IV. 사례연구

본 연구의 사례연구를 위해 사용된 네트워크는 2002년 센서스 조사를 위해 사용된 emme/2 네트워크이며, 기존 도로망 네트워크와 지하철 10개 노선과 버스체계 개편 후의 420여개 버스노선의 대중교통 네트워크를 포함한다. 다음은 본 사례연구를 위한 가정, 적용대상지역 및 분석결과에 대하여 나타내었다.

#### 1. 가정

이동성 지표 값을 도출하기 위해 본 연구는 다음을 가정하였다.

- 이동성의 측정단위인 통행시간은 (통행거리/통행속도)로 도출하였으며, 통행속도는, 가상적으로 오전 첨두를 가정하여, <표 7>과 같이 나타내었다.

<표 7> 수단별 통행속도의 설정

링크구분	수단의 통행속도(Km/h)			
	버스	승용차	도보	지하철
고속도로	35	35	4	-
간선도로	30	30	4	-
보조간선도로	15	15	4	-
일반도로	10	15	4	-
램프	10	10	4	-
국도	15	10	4	-
지방도	15	15	4	-
시군도	15	15	4	-
환승 또는 도보	-	-	4	-
지하철, 철도	-	-	-	30

- 승용차가 차내탑승시간만을 수단특성으로 하는 것과는 달리, 대중교통수단의 특성을 부여하기 위해서, <표 8>과 같이 대중교통 통행시간을 구분하였다. 본 연구에서 버스의 (대기+환승)페널티는 7분, 지하철의 (대기+환승)페널티는 3분으로 가정하였다.

<표 8> 대중교통 통행시간구분

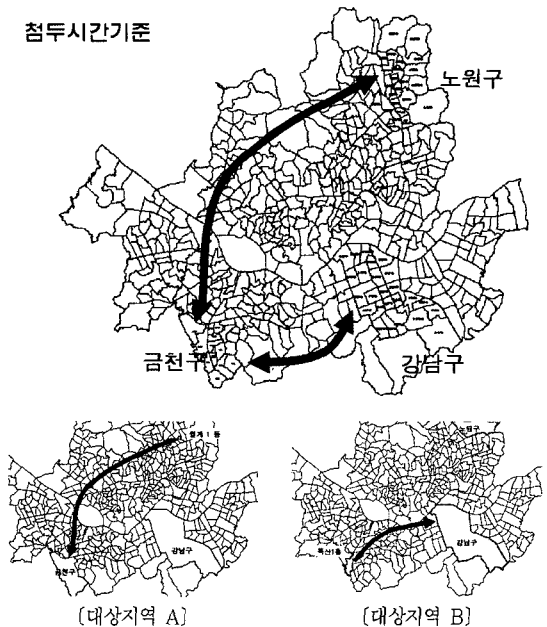
대중교통		승용차
시간구분	이용수단	
접근시간	도보	차내통행시간
대기시간	대기페널티	
환승이동시간	도보	
환승대기시간	환승페널티	
차내통행시간	대중교통	

서로 다른 노선이 동일링크상에 있을 때, 각 노선으로 서로 다른 노드(정류장)에서 정차할 때, 도보접근이 가능하도록 하였다.

#### 2. 결과분석

사례연구를 위한 대상지역은 서울시의 노원구, 금천구, 강남구로 선정하였다. 그리고 이동성 평가는 [노원구 월계1동에서 금천구: 대상지역 A], [금천구의 독산1동에서 강남구: 대상지역 B]에 대하여 적용하였다.

첨두시간기준

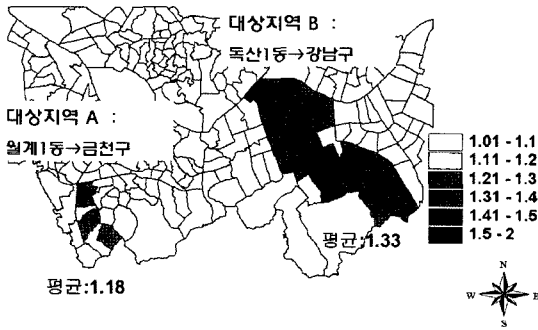


<그림 5> 사례연구 대상지역

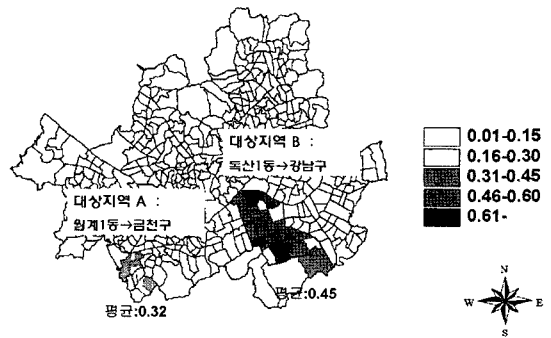
대상지역 A와 대상지역 B에 대해 지표 1을 적용한 결과는 <그림 6>과 같다.

대상지역 A의 지표 값은 1.18(금천구 각 동의 지표 값에 대한 평균)로 산출 되었고, 대상지역 B의 지표 값은 1.33으로 산출되었다. 이는 개인교통수단(승용





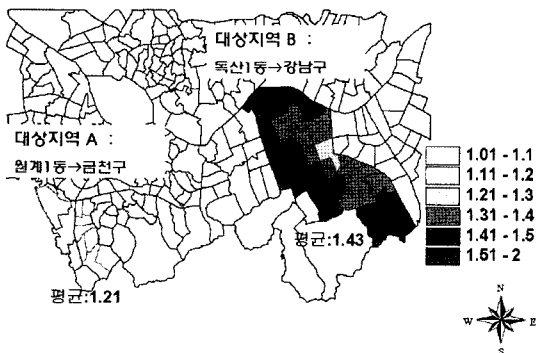
〈그림 6〉 지표 1의 결과



〈그림 8〉 지표3의 결과

차)을 비교대안수단으로 고려할 때, 대상지역 A가 대상지역 B보다 더 나은 대중교통 시설을 제공하고 있다고 할 수 있다. 대상지역 A의 승용차 평균통행시간은 72분이, 대중교통 통행시간은 84분이 소요되어, 12분 차이를 보였다. 반면에 대상지역 B의 승용차 통행시간은 54분이고, 대중교통 통행시간은 73분으로, 19분 차이를 보였다.

대중교통 시설까지의 도보접근을 포함하여 나타낸 지표 2의 값은 〈그림 7〉과 같다.



〈그림 7〉 지표 2의 결과

이는 출발지에서 도착지(도착역)까지를 분석한 결과이며, 지표 1의 결과와 같이 지표 2에서도 대상지역 A가 더 나은 지표 값을 제시하였다. 지표 1의 결과와 비교하면, 각 대상지역에서 대중교통 시설까지 도보접근이 용이한지의 여부를 판단할 수 있다. 지표 1과 2의 값 차이는, 대상지역 A는 0.03(=1.21-1.18)으로 차이가 거의 없었고, 대상지역 B는 0.1(=1.43- 1.33)의 차이를 보여, 대상지역 B에서 더 큼을 알 수 있다. 즉, 대중교통 시설까지의 접근은 대상지역 A가 대상지역 B에 비해 용이함을 나타낸다.

대중교통 서비스제공 분석지표(지표 3)의 결과값은 〈그림 8〉과 같다.

대상지역 A에 대해서는 0.32, 대상지역 B에 대해서는 0.45의 지표 값을 나타내었다. 서비스 기여도 수준이 높을수록 지표 값이 낮아지도록 설계하였으므로, 지표 1, 2와 마찬가지로, 지표 3에 대해서도 대상지역 A가 더 좋은 서비스를 제공하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 여기서 '더 좋은 서비스'는 유의해서 해석해야 한다. 서비스 수준이 양호한-즉, 통행시간이 빠른- 대안노선 1개와 서비스 제공수준이 낮은 여러 개의 대안노선을 비교할 때, 상황에 따라 전자가 양호할 수도 있고, 또는 반대로 후자가 양호한 서비스가 제공된다고도 할 수도 있기 때문이다.

이상의 3개 지표를 대상지역 A와 B에 적용해 볼 때, 대상지역 A(월계1동→금천구)가 대상지역 B(독산1동→강남구)에 비해 양호한 대중교통 시설이 설비되어있고, 대중교통시설 까지도 접근하기 용이하며, 양호한 대중교통 서비스가 제공되고 있음을 확인할 수 있다. 좀 더 세부적으로 분석하기 위해서는 속도굴곡도(대중교통통행속도/승용차 통행속도)나 거리굴곡도(대중교통 통행거리/승용차 통행거리)를 활용할 수 있다.

### 3. 이동성지표의 활용방안

이 이동성지표는 대중교통 시설연결체계 투자고려, 접근성 향상 시설투자, 노선개설, 대중교통 시설 우선 투자 등의 구체적인 정책결정에 활용 가능하다. 두 지역간의 이동성을 증진시키는 방안에 대하여 살펴보자.

$$M_{ij} = \frac{PTM_{ij}}{CM_{ij}}, M_{ij} = \frac{PTM_{ij}}{CM_{ij}} \quad (4)$$

식(4)는 이동성지표를 간단히 나타낸 것이다.  $M_i$ 는 지역 I(i 지점)와 J(j 지점)의 이동성 지표를 나타내고  $PTM$ 은 대중교통을,  $CM$ 은 승용차의 이동성을 나타낸다. 지역 I와 J의 이동성을 증진시키기 위해서는  $M_i$  값을 낮추어야 한다. 이를 낮추는 방안은 크게 승용차의 이동성( $CM_{ij}$ )을 고정한 상태에서 대중교통에 투자하여 ( $PTM_{ij}$ )를 증진하는 방안과 반대로 대중교통의 이동성( $PTM_{ij}$ )을 유지하고 승용차의 이동성( $CM_{ij}$ )을 수요관리를 통하여 억제하는 방안을 들 수 있다.

또한 대중교통 노선투자시 대상지역 전체에 미치는 영향을 분석하여 최대의 대중교통 이동성을 보장하는 방안으로 투자유도가 가능하다.

$$\min Z = \sum_i \sum_j [a_1 I_{ij}^1 + a_2 I_{ij}^2 + a_3 I_{ij}^3] \quad (5)$$

$a_1, a_2, a_3$  : 가중치

$I_{ij}^1$  : 지표1

$I_{ij}^2$  : 지표2

$I_{ij}^3$  : 지표3

식(5)는 대상지역 전체의 이동성이 향상되는 방안을 제시할 수 있으며, 노선의 중복도 허용한다. 즉 중복도를 단순히 대중교통 효율성 저해요소로 받아들이지 않는 것을 말한다.

## V. 결론 및 향후연구

본 연구는 대중교통 중심의 교통체계를 활성화하기 위한 방안으로, 기존의 특정수단 또는 특정목적에 부합하도록 설계한 대중교통이동성 지표를 확대하여 통합대중교통망에 적용 가능케 하였다. 본 연구의 대중교통 이동성 지표는 개인교통수단을 비교대안수단으로 하여, 대중교통시설, 인근 역 또는 정류장까지의 접근을 포함한 이동성뿐만 아니라, 선택가능한 다양한 노선제공 수준까지도 평가할 수 있는 이동성 분석지표를 제시하였다.

제안된 지표는 최적경로탐색모형을 이용하여 서울시의 가로 및 대중교통망에 적용하였다. 이를 기반으로 월계1동→금천구(대상지역 A)와 독산1동→강남구(대상지역)의 사례지역에 대한 지표결과를 도출 및 분석하였다. 본 연구에서 제시하는 3개 지표의 적용이 가능하였고, 이를 적용할 경우 대중교통시설에 대한 정책적 판

단에 충분한 도움을 줄 수 있을 것이라 판단하였다.

향후 연구로는 우선, 통행비용의 산정에 있어서 본 연구에서 고려하지 못한 정량요소(통행비용, 시간가치 등)와 정성적 요소를 조사 및 분석하여 본 연구에서 제시하는 통행시간에 추가적으로 반영이 필요하다. 그리고 본 연구에서 제시하는 지역지표는 지점 대 지점연결을 집합으로 구성하여 나타내므로 많은 컴퓨터 수행시간을 갖게 된다. 이를 해결하기 위해서는 지역의 특성을 나타낼 수 있는 대표지점을 선정하여 사용하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 추가적으로 최적경로 탐색알고리즘과 다수경로 탐색알고리즘을 개선하여 효율성을 증가시킬 수 있다. 마지막으로 특정지역을 대상으로 서비스변화(예, 대중교통체계 개편 전-후)에 따른 모형의 검증작업이 필요하다.

## 참고문헌

1. 서울시정개발연구원(1994), 서울시 시내버스 노선 조정 방안 연구.
2. 서울시정개발연구원(1995), 시내버스노선의 합리적 조정방안.
3. 서울시정개발연구원(2000), 제2기 지하철 전면개통에 따른 시내버스 노선체계 개편구상.
4. 국토계획(2000), 도시 버스교통 평가지표의 개발과 종합화방법에 관한 연구.
5. 서울시정개발연구원(2003), 도로교통망의 이동성 분석지표 개발.
6. 국토연구원(2002), 지속가능한 이동성 연구.
7. 이상용·박경아(2003), "시내버스노선체계 평가를 위한 정량적 지표의 설정 및 적용", 대한교통학회지, 제21권 제4호, 대한교통학회, pp.29~44.
8. 이미영·백남철·남두희·신성일(2004), "거리비례제 요금부과에 따른 최소요금경로탐색", 대한교통학회지, 제22권 제6호, 대한교통학회, pp.101~108.
9. 이미영 외(2005), "제약조건을 고려한 통합대중교통망의 대안경로탐색", 한국ITS학회 논문집, 제4권 제1호.
10. 임용택(2004), "일반가로망에서 교통정보제공을 위한 n-path 알고리즘의 개발", 대한교통학회지, 제22권 제4호, 대한교통학회, pp.135~145.
11. 신성일(2004), "교통망에 적합한 K 비루프 경로 탐색 알고리즘", 대한교통학회지, 제22권 제6호.

대한교통학회, pp.121~131.

12. Chicago Transit Authority(2001), CTA(Chicago Transit Authority) Service Standards.
13. Florida DOT(2000), Florida's Mobility Performance Measures System.
14. Lomax T, Shawn T, Shunk G(1997), Quantifying Congestion : Final Report, NCHRP Report 398, Vol. 1.
15. Lomax T, Shawn T, Shunk G(1997), Quantifying Congestion : User's Guide, NCHRP Report 398, Vol. 2.
16. Potts R.B. and Oliver R.M.(1972), Flows in Transportation Networks, Academic Press.
17. TRB(2001), A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System, TCRP Report 88.
18. TRB(2001), Transit Capacity and Quality of Service Manual, TCRP Report 100.
19. Azevedo J. A., Costa M. E. O. S., Madeira J.J.E.R.S., and Martins E.Q.V.(1993), "An Algorithm from the Ranking of Shortest Paths", European Journal of Operational Research, Vol. 69.
20. Bellman R. and Kalaba R.(1968), "On Kth Best Policies", J. SIAM 8.
21. Dijkstra E. W.(1959), "A Note of Two Problems in Connected with Graphs" Numerical Mathematics I.
22. Kirby R. F. and Potts R. B.(1969), "The Minimum Route Problem for Networks with Turn Penalties and Prohibitions", Transportation Research 3.
23. Lee M.(2004), "Transportation Network Models and Algorithms Considering Directional Delay and Prohibition for Intersection Movement", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin Madison.
24. Moore E. F.(1957), "The Shortest Path through A Maze", Proc. Int. Conf. on the Theory of Switching, Harvard Univ., Cambridge, MA.
25. Park, D. J.(1998), "Multiple Path Based Vehicle Routing in Dynamic and Stochastic Transportation Networks", Ph.D. Thesis, Texas A&M University.
26. Shier R. D.(1979), "On Algorithms from Finding the k Shortest Paths in a Network", Networks, Vol. 9.
27. Yen J.Y.(1971), "Finding the K shortest Loopless Paths in a Network", Management Science, Vol.17.

♣ 주 작 성 자 : 노현수  
 ♣ 논문투고일 : 2005. 10. 29  
 ♣ 논문심사일 : 2005. 11. 30 (1차)  
                   2005. 12. 15 (2차)  
 ♣ 심사판정일 : 2005. 12. 15  
 ♣ 반론접수기한 : 2006. 4. 30