

■ 論 文 ■

## 목표기반 교통계획모형 연구 A Goal-Based Transportation Planning Model

**임 용 택**  
(전남대학교 부교수)

**김 현 명**  
(AIT 조교수)

**양 인 철**  
(UCI Ph.D Candidate)

### 목 차

- |  |  |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 통행모형을 이용한 교통망 설계문제</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 교통망 설계문제</li> <li>2. 기존 교통망 설계문제의 문제점</li> </ol> <p>III. 목표기반 지역설계 기법</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 효과척도의 개발</li> <li>2. 복수효과척도를 이용한 목표기반 지역설계</li> <li>3. DYNAHAP</li> </ol> | <p>IV. 목표기반 교통계획 방법론 개발</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 효과척도 선정</li> <li>2. 지역계획을 위한 다기준 의사 결정모형</li> </ol> <p>V. 모형의 적용</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 예제지역 및 입력자료</li> <li>2. 다기준 평가기법을 이용한 최적대안 도출</li> </ol> <p>VI. 결론<br/>참고문헌</p> |
|--|--|

**Key Words :** 목표기반 교통계획, 교통망 설계문제, 지역 설계문제, DYNAHAP, 활동기반 교통계획  
goal-based transportation planning, NDP, regional planning, DYNAHAP, activity

### 요 약

일반적으로 교통망 설계문제는 특정 목적함수를 최소 또는 최대화시키는 도로의 용량이나 대중교통망 노선과 같은 교통망의 속성 값을 구하는 문제이다. 이는 수리적인 모형으로 표현되며, 수학적으로 해결 가능한 문제로 구성되기 위해 실제 교통망에서 발생하는 복잡한 현상들을 최대한 단순화하여 고려하게 된다. 이에 따라 통행수요의 근본적인 동기가 되는 활동수요의 발생과정을 고려하지 못하고, 교통패턴에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나인 지역계획 측면의 속성변화를 분석의 틀에 포함시킬 수 없다는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 교통망 설계문제를 도시계획(Urban planning) 범위로 확장한다. 즉, 토지이용 계획과 같은 교통망 계획의 상위에 위치한 계획 속성을 변경했을 때 도시 내의 활동 및 교통 패턴이 어떻게 변화하는지를 모형을 통해 예측하고, 이를 기반으로 도시의 지역 및 교통시스템을 최적화시키는 모형을 제시한다. 본 연구에서 개발된 모형을 실제 크기의 지역 교통망에 적용해 모형의 실제 적용 가능성을 실험하였다.

A network design problem (NDP) formulated as a mathematical program is generally used to find an optimum value to minimize or to maximize some objectives such as total travel time, social benefit, or others. NDP has, however, some limits of describing components of travel patterns like activities and trip generation due to its modeling simplicity, and also it has difficulty in including attributes of regional planning. In order to cope with such limits, this paper extends NDP to the urban planning field and proposes a mathematical program which can describe the interactions between urban social activities and transportation planning. Based on this model the authors try to optimize both urban activities and the transportation system. The model developed in this paper is tested to assess its application with a real-size regional transportation network.

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-521-D00575).

## I. 서론

교통망 설계문제는 도로의 용량이나 대중교통망 노선과 같은 교통망의 속성 값들이 변경되었을 때 통행자들의 의사결정이 어떻게 변화되는지를 교통모형을 통해 예측하고, 이를 기반으로 최적의 교통망 속성을 설정하는 문제이다. Abdulaal and LeBlanc (1979)은 정적 통행배정 모형을 이용해 단순한 링크 최적용량 증가 결정 문제를 bi-level 최적화문제로 구성한 이후, 다양한 교통망 설계문제 (NDP, network design problem) 문제들이 소개되었다. 하지만 일반적인 NDP문제들을 통해 얻어진 대안을 이용하여 실제 도시교통망 문제를 해결 하는 데는 한계가 있다. 수학적으로 해결 가능한 문제를 구성하기 위해, 기존 교통망 설계 문제들에서는 실제 교통망에서 발생하는 복잡한 과정들을 최대한 단순화해 고려한다. 게다가 통행패턴의 확률적 특성이나 동적 특성들도 모두 고려하지 않는다. 가장 중요한 문제점은 통행수요의 근본적인 동기가 되는 활동 수요의 발생 과정을 고려하지 못하고, 통행수요를 고정된 기중점표를 통해 반영하기 때문에 교통망의 통행 환경이 변화할 경우 발생할 활동 및 통행 수요의 변화를 고려할 수 없다는 것이다.

또 다른 중요한 문제는 실제 현실에서 교통패턴에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나인 토지이용 관련 속성변화를 분석의 틀에 포함시킬 수 없다는 점이다. 예를 들어 교통 혼잡을 줄이기 위해 정책을 계획하는 경우, 교통망의 용량을 늘리거나 혼잡 통행료를 시행하는 공급 측면의 속성 변화만을 고려할 수 있는 것이 아니라, 도심의 개발을 제한한다면, 부도심의 개발을 통해 도심으로 집중되는 수요를 분산할 수 있다. 통행 수요는 활동 수요에 의해 발생하는 파생 수요라는 말에서 알 수 있듯이, 통행관련 지표를 가장 직접적으로 변화시킬 수 있는 방법은 사람들의 활동에 영향을 미칠 수 있는 변화를 적용하는 것이다. 하지만, 기존의 교통망 설계문제에서는 교통 범위를 벗어나는 속성들을 설계의 대상으로 포함시키지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 교통망 설계문제를 도시계획(Urban planning) 범위로 확장한다. 즉, 토지이용 계획과 같은 교통망 계획의 상위에 위치한 계획 속성을 변경했을 때 도시 내의 활동 및 교통 패턴이 어떻게 변화하는지를 모형을 통해 예측하고, 이를 기반으로 도시의 지역 및 교통시스템을 최적화하는 문제에 대해 살펴본다. 본 연구에서는 이러한 문제

를 지역설계문제(ADP, Area design problem)라 정의하며, 다양한 도시계획 목표를 동시에 고려한다는 점에서 “다목표 기반 지역 설계 문제”라 호칭한다.

본 연구에서 다루는 주제는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 논의될 문제는 목표기반 지역설계문제이다. 이때 목표기반이란 지역 개발에 관련된 모든 관련 주체들의 입장을 동시에 반영한 개발 목표를 설정한 뒤 이를 달성하기 위한 구체적인 지표들을 지역 설계에 적극적으로 이용한다는 의미이다. 본 연구에서는 이를 위해 지역 활동시스템의 속성을 효율성, 생산성, 신뢰성으로 정의하고 이를 동시에 개선하는 것을 지역 개발의 목표로 설정하였다. 본 연구에서는 이러한 목표 기반 지역 개발 문제를 수학적 최적화 문제로 구성하기 위해, 먼저 계획 목표를 계량화하기 위한 효과적도 (Measure of effectiveness)를 선정한다. 기존 교통망 설계 문제에서는 총 통행 시간 최소화와 같은 통행 분석 범위 내에서 계산 가능한 척도를 주로 이용하였다. 하지만, 지역 계획 측면에서는 통행에 관련된 척도가 아니라 보다 넓은 범위에서 지역 경제의 변화를 예측할 수 있는 척도가 필요하다. 지역 설계 문제의 경우 사업의 목적은 교통 문제만을 해결하는 것이 아니라 도시 내의 사회, 경제적 문제를 함께 해결하는 것이기 때문이다. 따라서 이러한 사회, 경제적인 영향을 계량할 수 있는 다양한 효과 척도들을 개발하고, 이들을 동시에 최적화 과정에 포함시킬 수 있는 의사 결정 과정을 소개한다.

두 번째로 논의할 문제는 지역 설계 문제에서 대안의 영향을 평가하는 모형에 관련되어 있다. 일반적인 교통망 설계 문제의 경우 상위 문제에서 만들어진 설계대안의 교통망에 대한 영향을 계량화하기 위해 정적 통행배정 모형을 하위 문제에서 주로 이용한다. 이 경우 하위문제는 이용자 평형 (User equilibrium) 과 같은 단일한 규칙을 이용하게 되고, 이 문제의 수학적 성질을 상위문제에서 대안을 설계할 때 고려할 수 있다. 하지만, 지역 설계문제에서 고려되는 하위문제는 활동 시뮬레이션 모형으로서, 다양한 의사결정규칙이 복합적으로 결합된 복잡계 (complex system) 이다. 따라서 모형의 수학적 성질을 상위문제에서 대안 설계에 직접 이용하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 이렇게 하위문제가 복잡계를 묘사하는 문제인 경우에 대한 Bi-level 최적화문제에서 어떻게 해를 구해야 하는지에 대해서 논의한다. 개발된 모형을 실제 크기의 지역 교통망에 적용해 모형의 실제 적용 가능성을 실험하였다.

## II. 통행모형을 이용한 교통망 설계문제

### 1. 교통망 설계문제

교통망 설계문제는 교통망을 구성하는 노드나 링크를 추가하거나 현재의 속성을 변경하여 기 설정된 교통계획 목표를 달성하는 문제이다. 교통망 설계문제는 다양한 기준을 통해 구분할 수 있는데, 일반적인 분류 기준 중 하나는 설계 대상인 변수가 연속변수 (continuous variable)인가 불연속변수 (discrete variable)인가를 기준으로 구분하는 방법이다. 연속변수 교통망 설계문제의 예로는 최적 링크 용량 증가문제가 있다. 즉, 한정된 예산 하에서 교통망의 혼잡을 가장 크게 줄이는 도로용량 증가안을 결정하는 문제이다. 이 문제는 Abdulaal and LeBlanc (1979)이 Hooke and Jeeves 알고리즘을 이용한 해법을 선보인 뒤, Suwansrikul et al. (1987), Tobin and Friesz (1988), Yang (1996) 등에 의해 꾸준히 연구되어 왔다. 연속변수 교통망 설계의 또 다른 주요 주제는 최적 혼잡통행료의 액수를 결정하는 문제이다. 일반적으로 혼잡통행료는 1,000원, 2,000원과 같이 불연속적인 값들을 대안으로 분석되지만, 학술논문에서는 최적화 기법을 통해 실수 값으로 계산된다. 혼잡 통행료 결정 문제를 다룬 교통망 설계관련 연구는 Dial (1999), Ferrari (1999), Ferrari (2002), Meng and Yang (2002), Zang and Yang (2004), Lo and Szeto (2009) 등이 있다. 그 밖에 연속값을 갖는 교통망 속성으로는 신호시간 등이 있다(Clegg et al. (2001), Ziyou and Yifan (2002)).

불연속 변수를 고려하는 교통망 설계문제의 대표적인 예로는 도로 신설문제가 있다. 교통망 내 신설링크 건설여부는 0이나 1의 값을 갖는 신규변수를 통해 표현된다. Boyce and Janson (1980)의 경우 예산 제약 하에서 통행 배분과 배정문제를 동시에 고려하는 교통망 설계문제를 구성하였다. Poorzahedy and Turnquist (1982)는 민감도 분석을 이용해 불연속 변수를 고려하는 교통망 설계문제에 대한 경험적 해법을 제시하였다. 또, Chen and Alfa (1991)는 Branch and Bound 알고리즘을 불연속 교통망 설계문제에 적용한 바 있다. 교통망 설계문제에 대한 보다 자세한 논의는 Yang and Bell (1998), Patrikson (2008)등에서 찾을 수 있다.

### 2. 기존 교통망 설계 문제의 문제점

전통적인 교통망 설계 문제는 상, 하위 문제를 통해

bi-level 최적화 문제로 구성된다. 이때, 상위 문제의 경우 최적의 교통망 설계 대안을 찾아내는 해 알고리즘으로 구성되며, 하위 문제의 경우 상위 문제에서 제시된 설계 대안이 교통망에 미치는 영향을 계량화 할 수 있는 수학적모형으로 구성된다. 이때, 수학적모형으로는 주로 정적 통행배정 모형이 이용된다.

정적 통행배정으로 교통망 설계 대안이 교통망에 미치는 영향을 계량화 하는 것은 다음과 같은 문제들을 갖고 있다. 첫 번째 문제는 설계 대안이 교통망 속성을 변화시키는 경우 이에 따른 통행수요의 변화를 고려할 수 없다는 점이다. 예를 들어, 교통망 설계문제에서 기존 도로의 용량을 늘리는 경우 경로전환뿐만 아니라 수요의 변화를 유발하는데, 이를 제대로 반영할 수 없다는 것이다. 두 번째 문제는 정적모형 자체가 갖는 문제점이다. 현실에서 모든 통행자들의 통행결정문제에는 시간이 관련되어 있다. 일상생활에서 통행자들이 가장 빈번하게 선택해야 하는 문제가 바로 언제 출발할 것 인가를 결정하는 것이다. 따라서 이러한 시간에 관련된 문제들을 포괄적으로 고려하기 위해서는 동적 하위 모형이 필요하다. 마지막으로 교통망 설계문제의 경우 통행자들의 활동변화를 고려할 수 없다는 점이다. 교통망은 사람들의 활동 수행을 위한 물리적 이동을 담당하는 매개체이며, 그 속성 자체가 사람들이 활동 계획을 수립하고, 활동 참여 지점을 결정하는데 결정적인 요인이 된다. 따라서 교통망 속성의 변경은 사람들의 활동 환경이 바뀌는 것을 의미하며, 이러한 변화는 사회 전체의 사회-경제적 측면에 큰 변화를 야기한다. 하지만, 기존 교통망 설계문제는 통행의 범위에서 발생하는 변화들만을 고려할 뿐, 개인들의 활동 전반에서 어떤 변화가 나타나는지를 고려할 수는 없다.

## III. 목표기반 지역설계 문제

본 연구에서는 지역설계 문제를 위한 계획기법으로 목표기반 접근법을 제시한다. 목표기반 지역설계는 기존 교통망 설계기법에 비해 보다 추상적이고 포괄적인 계획 목표를 먼저 설정하고, 이 목표의 달성여부를 확인할 수 있는 지표들을 선정하는 과정을 거친다. 이 점이 목표기반 접근법이 기존에 이용되는 지표기반 접근법과 차이를 갖는 점이라 할 수 있다. 기존 교통망 계획문제의 경우 한 두 가지 구체적인 계획지표(예를 들어 총 통행시간, 평균 교통망 통행속도)를 선정하고, 이를 최소화 또는 최소화

시키는 설계 대안을 찾는 순서로 계획이 이루어진다. 하지만, 목표기반 설계문제의 경우 먼저 추상적인 다수의 계획 목표가 사회 각층의 의견을 수렴해 설정된다. 예를 들어 지속가능한 교통망 건설, 여성이나 사회약자들의 활동환경 개선과 같은 다양한 목표가 동시에 설정될 수 있다. 다음으로는, 이러한 추상적인 목표들을 계량화할 수 있는 다양한 지표들을 발굴하고 선정한다. 이때, 사회 각층에서 제시한 다양한 계획 목표들 간의 상충이 발생할 수 있는데, 이러한 문제의 해결을 위해 본 연구에서는 다기준 의사결정 기법 (AHP, Analytic Hierarchy Process)을 최적 계획대안 계산 해법으로 이용하였다. 이 기법에서는 사회각층의 의견을 수렴해 이를 각 목표에 대한 가중치 계산에 이용한다.

## 1. 효과척도의 개발

앞에서 밝힌 것처럼 기존 교통망 설계문제의 단점들을 극복하기 위해서는 다양한 지역설계속성의 변화에 따른 개인 통행자들 및 지역의 사회경제 시스템의 변화를 정확히 계량할 수 있는 효과척도들이 필요하다. 이러한 효과척도들은 이 척도들이 교통시스템에 직접 관련된 것인가 아닌가에 따라 “통행관련척도”와 “활동관련척도”로 나누어 볼 수 있으며, 그 효과가 미치는 범위에 따라 “전역적 척도”와 “국지적 척도”로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 각 척도를 계량화할 수 있는 효과척도를 다음과 같이 제시하였다.

### 통행관련척도 :

- 1) 교통망 평균 통행속도(km/hr): 교통망 모든 링크의 동적 통행시간에 동적 교통량을 곱해 계산된 값으로 교통망 내 통행자들의 이동효율성을 보여줌 (전역 척도)
- 2) 총 통행자-거리(veh-km): 교통망 내 모든 차량들의 이동거리를 곱해 계산한 값으로 교통망의 생산성을 나타냄 (전역 척도).
- 3) 통행시간 신뢰성(%): 평균통행시간과 신뢰통행시간의 차이로 계량되는 값으로서, 기중점간의 통행시간이 특정수준의 신뢰성을 확보하기 위해서는 어느 수준의 통행시간 여유를 확보해야 하는지를 보여주는 값 (개별 기중점 국지척도, 전역척도 환산 가능).
- 4) 1일 총 출발지체차량(veh): 시뮬레이션을 통해 계산되는 값으로, 여기서 출발지체란 각 기점에서 연결

링크가 완전 혼잡상태가 되어 원하는 시간에 기점을 출발하지 못하고 지체된 차량수를 의미함. 즉, 이 값은 교통망의 Spill-back의 상대적인 수준을 보여주는 값(전역척도).

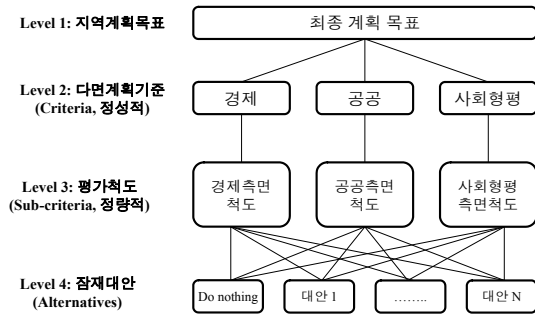
- 5) 승용차 운행비율 (%): 이 값은 전체 등록 차량 중 어느 정도 비율이 실제 운행되었는지는 보여주는 척도로서, 지역 내의 잠재 승용차 이용수요의 수준을 보여줌
- 6) 소득수준, 가구 형태별 수단선택 비율 (%): 특정한 계층에 대해 수단선택비율이 지역속성 변화 후 어떻게 변화하는지를 계량화 (국지척도).

### 활동관련척도 :

- 1) 지역 내 1일 총 활동 수(activity): 분석 지역 내의 총 1일 활동 수로서 일반적으로 의무 활동은 고정되어 있으므로, 레저나 쇼핑과 같은 비(非)의무 활동 양에 따라 크기가 좌우됨 (전역 척도).
- 2) 총 활동효용(만족도): 분석 지역 전체에 존재하는 모든 개인들의 활동 수에 각 활동에서 얻은 효용(만족도)을 곱한 값 (전역척도).
- 3) 활동 당 소요비용(\$): 의무활동/비업무활동 1단위에 참여하기 위해 개인들이 지출해야 할 비용. 지역의 활동 참여에 대한 효율성을 나타냄 (전역 및 국지 척도).
- 4) 평균 활동 반경(km): 특정 지역에서 발생한 비업무 활동이 어느 정도 반경 내에서 주로 이루어지는지를 보여주는 값. 이 값이 클수록 사람들은 활동 참여지점을 보다 큰 반경에서 선택할 수 있다는 것을 의미하며, 지역 내 교통체계가 광범위한 접근성을 제공함 (국지 척도).
- 5) 각 지역별 활동 참여량 (명): 지역 속성 변경 전후 각 지역의 활동 참여량 비교를 위한 척도. 총 활동수와는 달리 특정 지역별로 활동량의 증감을 비교함으로써, 사업 완료 시 특정지역이 활동수요를 유인하는데 있어 타 지역보다 큰 혜택 또는 손실을 경험하는지를 계량화 (국지척도).
- 6) 소득수준, 가구 형태별 활동참여지점 선택 비율 (%): 지역속성 변화 후 각 사회계층의 활동 형태가 어떻게 변화하는지를 계량화.

## 2. 복수 효과척도를 이용한 목표기반 지역설계

앞 절에서 제시된 모든 효과척도를 지역설계 문제에서



<그림 1> AHP 개념 구조도의 예

목적함수에 포함시키기는 어렵기 때문에 본 연구에서는 Yang (2008)이 개발한 AHP 기반의 최적대안 선택 기법을 채택한다. Yang (2008)은 실행대안을 선정하기 위한 AHP를 <그림 1>과 같은 다단계 과정으로 설명하였다. <그림 1>과 같은 ASP를 구축한 뒤에는 각 다면 계획기준을 만족할 수 있는 구체적인 효과척도를 선정해야 한다. Yang (2008)에서는 안전, 혼잡, 시설관리, 환경, 삶의 질 등 상호 이질적인 계획기준들을 설정하고, 각 기준을 정량화해 표현할 수 있는 효과척도들을 선정한 뒤, 이에 대한 가중치를 전문가들을 대상으로 한 설문조사를 통해 결정하였다. 예를 들어 교통혼잡의 계량을 위해서는 평균 지체나 평균통행시간, 평균통행률 등을 선정하였다.

조사된 가중치는 잠재대안 평가를 위한 Pair-wise 비교행렬 구축에 이용되며, 행렬내의 값은 각 효과척도 간의 상대적인 중요성을 나타낸다. 각 척도들의 상대적인 값을 단일적으로 정량화하기 위해서는 Pair-wise 행렬의 고유벡터(eigenvector)와 고유값(eigenvalue)을 계산한 뒤 각 효과척도들의 상대적인 중요성을 추정한다. 즉, 추정 가중치는 최대 고유값에 대한 각 효과척도의 상대적인 고유값으로 나타낸다. 각 대안의 최종 점수는 효과척도들의 추정 가중치와 각 효과척도 점수들의 곱의 합으로 계산된다. Yang (2008)의 방법론에서는 효과척도 점수가 가장 낮은 대안이 최우선 대안이 된다.

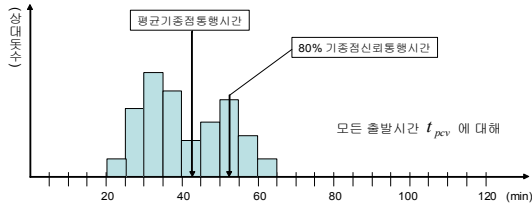
3. DYNAHAP

DYNAHAP (DYnamic Network Analysis model based on Household Activity Pattern)은 Kim (2008)에서 개발된 에이전트를 이용한 활동기반의 통행 시뮬레이션 모형이다. 이때, 모형의 최소 활동단위는 개인이지만, 각 개인은 가구의 일원으로서 사회경제활동에 가구의 자원을 이용하며, 자신도 가구의 유지를 위해 필

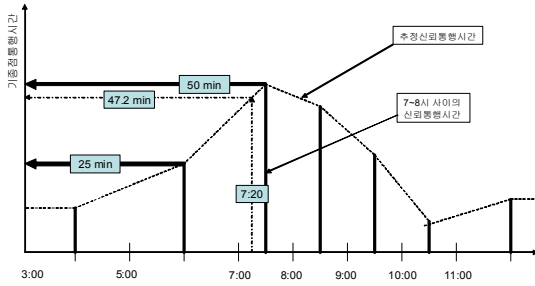
요한 활동들에 참여해 역할을 수행한다. 시뮬레이션을 위해서는 세 가지의 주체들, 즉 1) 가구, 2) 교통시스템, 3) 활동시스템이 모형화 되었다. 이러한 세 가지 주체들 간의 상호작용에 의해 공간상에서는 각 개인들의 동적 이동이 만들어지고, 가구 내에서는 각 가구 구성원들 간의 상호작용, 즉 예를 들어 누가 승용차를 이용해 통행할 것이며, 누가 가구의 유지를 위한 기본활동에 참여할 것인지가 결정된다. DYNAHAP는 기존 교통시뮬레이션 모형에 비해 통행자들의 선택모형을 더 많이 포함하고 있으며 그 내용은 다음과 같다.

1) 통행시간 모형화

DYNAHAP에서 통행시간 모형화가 갖는 가장 큰 특징은 통행시간이 결정적인 값으로 고려되는 것이 아니라, 분포로서 고려된다는 것이다. 계산의 편의성을 위해 교통망을 통행하는 모든 통행자들이 경험한 통행시간을 이용해 각 기종점별로 통행시간의 히스토그램을 구성하고, 이를 각 반복계산이 끝난 후 새로운 경험을 통해 갱신한다. <그림 2>와 같은 히스토그램이 각 기종점에 대해 각 출발시간마다 구축되며, 모형 내에서 출발시간 간격은 1~2시간으로 설정된다. <그림 2>에서 제시한 히스토그램을 통해 신뢰 통행시간을 계산할 수 있다. 예를 들어 80% 신뢰 통행시간은 100번을 통행할 경우 80번의 통행에서 이 통행시간 이하를 경험할 수 있는 값을 의미한다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 이러한 출발시간 선택문제에서 평균통행시간을 이용할 경우 원하는 시간에 도착하지 못할 확률이 50%에 달하는 문제가 발생한다. 따라서 DYNAHAP는 1일간 동적인 환경에서 활동의 시작과 종료시간을 계획하기 위해 신뢰통행시간을 이용하였다. 신뢰통행시간을 시간계획문제 (time use problem)에 이용할 때 직면하는 한 가지 문제는 하나의 출발시간에 대해 하나의 신뢰시간만이 존재한다는 것이다. 즉, 예를 들어 7~8시 사이에 1개의 신뢰통행시간이, 8~10시 사이에 하나의 신뢰시간이 존재하는 것이다. 이러한 경우 통행패턴이 급격하게 변하지 않는다면 몇 개의 신뢰통행시간 만으로 하루 동안의 시간계획을 할 수 있지만, 통행시간이 하루 동안 자주 변하는 경우에는 1~2시간동안 1개의 신뢰통행시간 만으로 활동 스케줄의 시작과 종료 시점을 정할 수 없다. 또한, 스케줄 계획 시 고려했던 기종점간 통행시간과 실제 통행에서 경험하는 통행시간에 큰 차이가 있을 수 있다. 이를 극복하기 위해 DYNAHAP에서는 하루 동안의 신뢰통행시간 변화를 보삽법을 통해 <그림 3>와 같이 추정하였다.



<그림 2> 신뢰통행시간의 계산



<그림 3> 추정 신뢰통행시간 곡선

2) 활동일정계획

DYNAHAP에서 활동일정계획 (activity scheduling)은 세 가지 활동에 대해 개인의 직업소유 여부에 따라 독립된 함수를 통해 이루어진다. 이 세 가지 활동 형태는 1) 의무 활동(mandatory), 2) 가변 활동(flexible), 3) 선택 활동(optional)이다. 의무 활동은 개인이 반드시 수행해야 하는 활동으로 직장근무나 교육 참여 등이 여기에 해당하며, 주로 참여지점과 시간이 고정적이다. 가변 활동은 주로 가정을 유지하는데 반드시 수행되어야 할 활동으로서 식료품 쇼핑이나 관공서 방문 등이 해당된다. 가변활동의 특징은 개인이 아니라 가구에 배정되는 활동이며, 주로 위치와 참여 시간이 가변적일 수 있다는 점이다. 마지막으로 선택 활동은 개인이 자유롭게 참여를 선택할 수 있는 활동으로 쇼핑, 레저, 그리고 사교 활동 등이 여기에 해당한다.

DYNAHAP에서 의무 활동은 개인에게 배정된 일정에 따라 수행된다. 가변 활동의 경우 가구 내에서 한 사람이 참여해야 하는데, 이 활동은 가구 내 구성원 전체의 효용함수를 극대화할 수 있도록 배정된다. 이때, 이용되는 함수는 식(1)과 같다.

$$Max \sum_m U^m - p_{ft} \cdot \xi \tag{1}$$

여기서,  $m$  : 특정 가구 구성원  
 $U^m$  :  $m$ 의 총 활동효용

$p_{ft}$  : 별점 파라미터값  
 $\xi$  : 가구 내 구성원들 간의 자유시간 최대편차값

이 별점은 가구 내 구성원들간의 자유시간 차이를 줄이기 위해 도입된 것이다. Kim 등 (2006)에서 밝힌바와 같이 일반적으로 가구 구성원들은 자유시간의 크기를 동일하게 유지하려는 경향이 있다. 예를 들어 자녀가 없는 부부를 가정해보자. 남편이 자유시간이 크고, 부인이 자유시간이 작은 경우에는 불평등한 자유시간량 때문에 갈등이 발생할 개연성이 높다. 이 보다는 두 사람이 비슷한 크기의 자유시간을 갖는 편이 안정적인 의무활동 분배 패턴이라 할 수 있다. 이러한 사항을 고려하고자 자유시간의 불균형에 별점을 적용하였다.

각 개인의 효용함수는 직업 유무에 따라 독립적으로 선택함수로 구성되었으며, 이용된 주 설명변수는 자동차 선택회계수, 총 통행시간, 총 자유시간, 스케줄별점 (스케줄에 늦는 경우) 등이다. 각 가구 구성원들은 배정된 가변 활동을 가구 효용을 최대화시킬 수 있는 사람에게 맡기고, 이와 동시에 가구 내에서 이용 가능한 차량의 이용자들도 결정한다. 즉, 가변 활동과 가구 내의 가용자원을 동시에 가구의 효용을 최대화시킬 수 있도록 배정하는 것이다.

마지막으로 선택활동의 경우 네스티드 로짓모형을 통해 모형화하였다. 구성된 네스티드 로짓의 경우 상위레벨에서는 선택활동의 발생여부를 결정하고, 하위문제에서는 선택활동의 참여지점을 결정한다. 특정 지점  $i$ 와  $k$ 에서 일정이 있는 개인  $m$ 이 중점  $j$ 에 들러 선택활동을 할 때 얻게 되는 효용( $U_m^{i,j,k}$ )은 식(2)와 같이 구성되었다.

$$U_m^{i,j,k} = Att_m^j - VOTT_m \cdot \{tt^{ij}(t_{pcv}) + tt^{jk}(t_{pcv}^{out})\} + \in COME_m \cdot Level_m^j \tag{2}$$

여기서,

- $Att_m^j$  : 개인  $m$ 의 노드  $j$ 에 대한 매력도
- $VOTT_m$  : 개인  $m$ 의 통행 시간가치를, 괄호안의 두 항은 현재 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 를 거쳐 노드  $k$ 로 진행하는데 소요되는 통행시간을 의미
- $tt^{ij}(t_{pcv})$  : 시간대  $t_{pcv}$ 에 출발했을 때, 지점  $i$ 에서 중점  $j$ 까지의 기종점 통행시간을 의미
- $tt_{pcv}^{out}$  : 노드  $j$ 에서 활동을 마치는 시간
- $INCOME_m$  : 개인  $m$ 의 가구소득 수준에 관련된 파라미터
- $Level_m^j$  : 더미변수로서 개인  $m$ 의 소득수준이 지점  $j$ 의 소득수준과 일치하는 경우 1의 값을 갖고, 아닐 경우 0의 값을 갖는다.

이 더미변수는 소득수준에 따라 각 가구들이 선호하는 활동참여지점이 달라지는 현실을 반영하기 위해 설정되었다. 즉, 각 활동지점은 활동참여에 필요한 비용 등을 고려해, 고소득, 중간소득, 저소득 계층을 위한 지점으로 구분될 수 있다. 식(2)이 지점선택의 효용을 나타낸다면, 네스티드 로짓의 상위문제에서는 활동발생여부를 결정한다. 이때, 선택 활동을 하지 않고 집에 머물렀을 때의 효용은 식(3)로 나타낸다.

$$U_m^{in-home} = Const_m^{in-home} + Marriage_m + Chdpara_m \cdot NumChd_m \quad (3)$$

여기서,

- $Const_m^{in-home}$  : 정산이 필요한 파라미터 값
- $Marriage_m$  : 개인  $m$ 의 결혼여부에 관련된 더미 파라미터 값으로 결혼을 한 경우 (+)의 값을, 결혼을 하지 않았다면 0의 값을 갖는다고 가정한다
- $Chdpara_m$  : 개인  $m$ 의 가구내 자녀수에 관련된 효용참수의 파라미터
- $NumChd_m$  : 개인  $m$ 의 가구 내 자녀 수

만약 선택활동을 수행할 경우의 효용  $U_m^{out-of-home}$  은 식(4)와 같이 구성된다.

$$U_m^{out-of-home} = Caravail_m + VOFT_m \cdot sumft_m + \ln \left\{ \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq i}} \exp \left( \frac{1}{\theta_{des}} U_m^j \right) \right\} \quad (4)$$

여기서,

- $Caravail_m$  : 개인  $m$ 의 자동차 이용가능여부를 나타내는 더미 파라미터
- $VOFT_m$  : 개인  $m$ 의 자유시간을 효용으로 변환하는 파라미터 값
- $sumft_m$  : 개인  $m$ 의 총 자유시간을 나타낸다. 두 번째 항은 자유시간이 많을수록 개인들이 선택 활동에 참여할 확률이 높아지는 행태를 반영하기 위해 추가되었다. 세 번째 항은 각 기점 효용의 로그합을 나타낸다.
- $\theta_{des}$  : 종점에서 활동에 참여해 얻는 효용과 관련된 파라미터 값

### 3) 교통시스템

DYNAHAP의 교통시스템은 크게 도로 교통과 대중 교통시스템으로 구분되며, 대중 교통시스템은 다시 주대중교통망과 보조대중교통망으로 구분된다. 대중교통망의 통행 시간은 모두 상수 값이기 때문에 혼잡효과는 고려되지 않는다. 차량 시뮬레이션을 위해서는 밀도기반의 통행속도 계산식을 이용하였다. 이용된 계산식은 Jayakrishnan 등 (1995)이 제시한 modified Greenshield 방정식을 이용하였으며, 차량 간의 속도결정은 간단한 차량추정모형을 통해 구현하였다. 자세한 설명이 필요한 독자들은 Kim (2008)을 참고하기 바란다.

## IV. 목표기반 교통계획 방법론 개발

### 1. 효과적도 선정

본 연구에서는 지역설계문제를 위해 기존의 통행배정 모형대신 활동기반의 통행 시뮬레이션 모형을 이용한다. 따라서 계획과정에서 고려하는 척도들도 제3장 제1절에서 설명한 것과 같이 활동관련척도와 통행관련 척도로 구분하였다. 이와 함께 지역계획에 있어 중요하게 고려해야 할 정성적 측면으로 효율성, 생산성, 그리고 신뢰성 3가지를 선정하였다. 이 세 가지 정성적 측면은 지역이 갖는 사회경제적인 역할을 다면적으로 평가하기 위해 제시되는 개념이다. 이때, 지역계획 목표들은 설계문제에 따라 다양하게 설정될 수 있다. 여성의 사회 참여 확대나, 저소득층의 삶의 질 개선 등도 목표로 설정될 수 있다. 하지만, 언급한 목표들의 경우 구체적인 지표 개발에 많은 노력이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지역설계 문제의 간단한 예를 설명하기 위해 위에서 언급한 일반적인 세 가지 속성만을 고려하였다.

먼저 효율성이란 지역 내의 활동 및 교통체계가 얼마나 효율적으로 설치되어 있고 기능하는가를 나타내는 것으로, 이 척도는 해당 지역에서 개인들이 얼마나 쉽게 활동을 발생시킬 수 있는지를 보여준다. 그리고 생산성이란 지역 내의 활동 및 교통체계가 얼마나 많은 활동을 처리할 수 있는지를 계량하는 것이다. 마지막으로 고려하는 척도는 신뢰성이다. 효율성과 생산성은 지역 시스템에서 서비스를 공급하는 주체들에게 중요한 척도이다. 이 두 가지 척도들은 모두 시스템의 평균적인 성능을 기준으로 계산된다. 따라서 신뢰성척도는 서비스 공급자들

<표 1> 목표기반 지역계획을 위한 다면계획기준과 평가척도

	효율성 (Efficiency)	생산성 (Productivity)	신뢰성 (Reliability)
활동척도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 활동당 소요비용 (\$/회)</li> <li>• 활동당 소요통행 시간 (hr/회)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 총활동효용 (인·효용단위)</li> </ul>	-
통행척도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통행속도 (km/hr)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 총통행거리 (person·km)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통행시간 마진율(%)</li> </ul>

보다는 서비스 이용자들의 관점에서 중요한 '이용자 중심'의 평가척도이다.

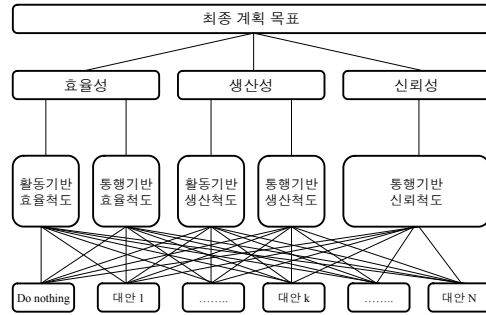
본 연구에서는 신뢰성과 관련된 활동 척도는 이용하지 않는다. 쇼핑이나 레저 등의 일별 가변성은 DYNAHAP에서 고려되지 않기 때문이다. 대신 통행측면에서는 각 기종점의 평균 통행시간과 신뢰통행시간간의 차이의 비율인 통행시간 마진을 신뢰성 척도로 이용한다. 단, 통행시간 마진은 전체 통행시간의 길이에 따라 영향을 받기 때문에 통행길이가 다른 두 기종점 쌍의 비교에는 이용할 수 없다. 따라서 비교를 위해서 통행시간 마진율을 효과적으로 선정하였다. 마진율은 통행시간마진을 전체 통행시간으로 나누어 계산한다.

그밖에 의사결정에서는 직접 고려하지 않지만 계획과정에서 고려 가능한 간접지표들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

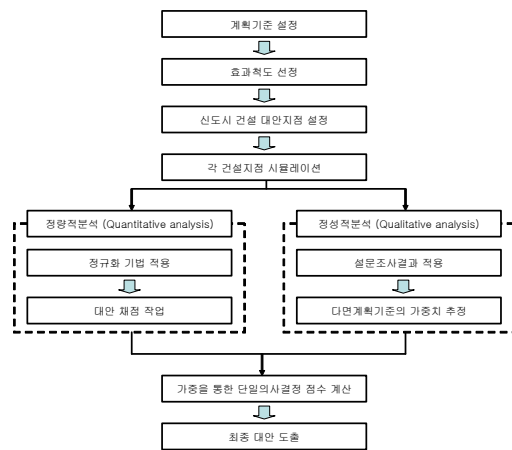
- 1) 활동관련 간접지표: 활동반경편차, 지역별 활동참여량, 활동참여지점 선택비율 등
- 2) 통행관련 간접지표: 총 지체차량대수, 승용차 운행비율, 수단선택비율 등

2. 지역계획을 위한 다기준 의사결정 위계 구축

제1절을 통해 다기준 의사결정을 위한 6가지 척도를 선정하였다. <그림 4>는 선정된 다면계획 기준과 효과척도들을 이용해 구성된 AHP구조이다. <그림 5>와 같이 최종 목표를 달성하기 위해 세 가지 다면계획기준을 설정하였는데, 이때 각 계획기준간은 독립이라고 가정한다. 신도시 대안 후보가 외생적으로 선정되면 다음 과정은 각 대안을 DYNAHAP를 통해 시뮬레이션 시키는 것이다. 각 시뮬레이션이 종결되면 각 대안에 대한 평가척도 값들을 계산한다. 이 단계부터는 최적대안 선정 작업에서 두 가지 과정을 병행하게 진행된다. 정량적 분석과정에서는 먼저 각 평가척도에 대해 정량적 기법을 적용한다.



<그림 4> 지역계획을 위한 AHP 구조도



<그림 5> 복수 효과척도를 이용한 신도시 최적 건설지점 선정 과정

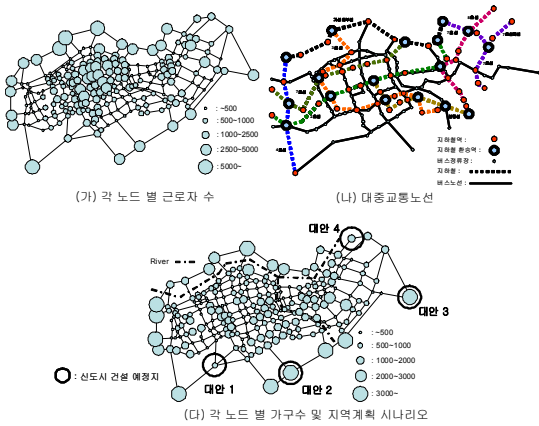
V. 모형의 적용

본 연구에서는 지역설계문제의 예로서 우리나라에서 흔히 접할 수 있는 문제인 신도시 최적위치 결정 문제를 대안으로 선정하였다. 신도시 위치 선정 문제는 지역속성 중 하나인 토지이용과 인구속성을 변경하는 문제로서, 새로운 활동참여지점이 추가됨과 동시에 활동 및 통행수요의 발생지점을 추가하는 효과가 있다. 대안에서는 먼저 예제 교통망 상에 지역계획 의사결정의 상위개념을 통해 결정된 대안 지점들을 선정한다. 즉, 정치적 고려나, 정성적 판단, 토지수용 가능성 등을 고려해 몇 곳의 대안지점들이 이미 선정되어 있다고 가정한다.

1. 예제지역 및 입력자료

본 연구에서는 서울시의 실제 교통망 일부를 예제 교통망으로 이용하였다. 교통망은 Kim (2008)에서 사용





<그림 6> 예제 교통망의 사회경제 지표 및 대중교통 노선과 신도시 대상지

한 교통망과 동일하며, 도로망내의 노드수는 234개, 링크수는 808개 이다. 신도시 개발 이전에 지역 내에 거주하는 가구 수는 200,000 가구로 설정하였으며, 총 거주민 수는 550,000으로 가정하였다. 거주민들의 가구 구성형태, 연령분포, 소득분포 등 사회경제적인 자료들은 모두 가정에 의해 발생시켰다.

<그림 6>는 지역내 직장인들의 직장위치 분포, 각 노드별 거주가구 분포, 그리고 지하철과 간선버스노선으로 구성된 대중교통망을 보여준다. 신도시 건설 후보지는 4곳으로 압축되어 있다고 가정하였다(즉, <그림 6>의 (다)와 같이 대안을 4개로 설정). 각 후보지의 위치는 <그림 6>에 도해하였으며, 각 위치에는 40,000가구 규모의 신도시가 건설되는 것으로 가정하였다. 네 가지 대안은 분석지역 외곽의 노드들 중 도심과의 거리, 다양한 교통수단을 통한 연결성을 고려해 비교가 용이할 것으로 판단되는 지점들을 선정하였다. 신도시 내 각 가구의 차량등록대수, 가구수입과 같은 다른 사회경제속성들은 지역 내 평균값을 적용해 발생시켰다.

2. 다기준 평가기법을 이용한 최적대안 도출

1) 쌍대 비교행렬 구축

먼저 각 다면계획기준의 상대적인 중요도를 결정하는 정성적 분석을 진행하자. 정성적 분석을 위해서는 각 정성적 다면계획 기준에 대해 지역계획 관련자들로 부터 상대적인 중요도를 설문조사를 통해 파악해야 한다. Yang (2008)은 다기준 의사결정 모형의 정산을 위해 트리의 차로 이용 제한에 대한 미 도로국 전문가들의 의견을 수렴하

<표 2> Saaty's Scale

Intensity of importance	Definition
1	Equal importance
3	Marginally strong
5	Strong importance
7	Very strong
9	Extremely strong
2,4,6,8	When compromise is needed (Fuzzy condition)

였다. 각 정성적 기준에 대한 의견이 조사되면 이를 이용해 쌍대 (Pair-Wise) 비교행렬을 구성해야 한다. Satty and Vargas (1980)는 행렬구성을 위한 Scale을 <표 2>와 같이 제시하였다.

<표 2>의 Satty의 Scale에 의해 본 연구에서 고려하는 계획기준 간의 비교행렬을 구성할 수 있다. 이때, 행렬의 구성에서는 두 가지 중요한 사항을 고려해야 한다. 식(5)와 같은 정방행렬을 고려해보자.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \tag{5}$$

이때, 쌍대 행렬은 다음 두 규칙을 만족해야한다.

- 1) 행렬 내의 한 항으로서  $a_{ij}$ 가 있다고 가정하자. 만약  $a_{ij} = \alpha$ 이면  $a_{ji} = 1/\alpha (i \neq j)$ 이다.
- 2) 만약 두 다항기준  $i$ 와  $j$ 가 동등하게 중요하다면  $a_{ij} = a_{ji} = 1$ 이다. 실제 사업을 수행할 경우 다양한 관련자들에 대해 설문조사를 실시하여 각 다항기준 간의 상대적인 중요도를 파악할 수 있는 정보를 수집해야 한다. 하지만, 본 연구에서는 다항척도 간의 중요도를 임의로 가정한다. 가장 중요한 속성은 효율성으로 가정하고, 그 다음이 생산성, 그리고 마지막으로 신뢰성을 고려한다. 가정을 통해 도출된 쌍대 행렬은 <표 3>과 같다.

쌍대 행렬이 구축되면 AHP에서는 수학적인 방법을 통해 수용 가능한 범위 내에서 행렬이 일관성을 갖는지를 추정하기 위해 고유벡터(Eigenvector)와 고유값

<표 3> 구축된 Pair-wise 행렬

	효율성	생산성	신뢰성
효율성	1	1/3	1/7
생산성	3	1	1/3
신뢰성	7	3	1

<표 4> 행렬 고유값의 계산

	효율성	생산성	신뢰성	고유값
효율성	1	3	7	0.9331
생산성	1/3	1	3	0.3382
신뢰성	1/7	1/3	1	0.1226

(Eigenvalue)를 계산해야 한다. 이 분석에서 고유벡터들은 의사결정자들의 우선순위를 나타내며, 고유값은 쌍대행렬 내에서의 불일치성을 나타낸다. 선호도를 반영하는 가중치들은 행렬의 최대 고유값에 대한 고유벡터의 집합을 추정함으로써 결정될 수 있다. 최대 고유값이 중요한 이유는 이 값이 클 경우 판단의 작은 동요에도 안정적이기 때문이다 (Yang, 2008). 그 값은 식(6)과 같이 정의된다.

$$Aw = \lambda_{max} w \tag{6}$$

여기서,

A : 쌍대 비교 행렬

w : 최대 고유값에 대응하는 고유벡터

$\lambda_{max}$ : 최대 고유값

이때 최대 고유값 ( $\lambda_{max}$ )는 행렬의 행이나 열의 수보다 크거나 같아야한다. <표 4>는 추정 가중치를 보여준다.

추정된 가중치가 얼마나 논리적인가는 일관성지수 (CI, Consistency Index)를 통해 판단할 수 있다(Saaty, 1980).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{7}$$

n은 Pair-wise 행렬의 행이나 열의 수를 나타낸다. 이 때, 주의할 점은 일관성지수의 향상이 반드시 추정 가중치가 참값에 가까워짐을 의미하는 것이 아니라, 단지 판단의 임의성이 줄어들고 좀 더 논리적인 상태로 접근함을 의미한다는 점이다(Yang, 2008). 위와 같이 CI값이 계산 되면 이를 이용해 일관성 비율 (CR, Consistency ratio)를 계산한다.

$$CR = \frac{CI}{Random\ Consistency} \tag{8}$$

<표 5>는 Saaty에 의해 제시된 Random consistency index이다. CR값이 0.1 (10%)보다 큰 경우에는 현재의

<표 5> Random consistency index (Satty, 1980)

n	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.58	0.90	1.12
n	6	7	8	9	10
RI	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

<표 6> 일관성 검증 결과

n (행렬내의 열수)	3
$\lambda_{max}$	3.007
Consistency index	0.0035
Consistency ratio	0.0060

쌍대행렬이 매우 높은 임의성을 갖고 있기 때문에 의사결정자들의 선호를 제대로 반영하지 못함을 의미한다. 이 경우 쌍대행렬을 다시 구성하는 것이 좋다(Yang, 2008). 본 연구에서 이용하는 쌍대행렬의 일관성 검증 결과는 <표 6>과 같다. 검증결과 CR값이 10%보다 훨씬 작은 0.6% (0.006)이기 때문에 <표 3>에서 제시한 쌍대행렬은 논리적으로 유효하다고 판단할 수 있다.

2) 결정점수의 계산

각 대안에 대해 10회의 시뮬레이션을 실시하여 <표 7>과 같은 효과척도의 평균값을 얻었다.

쌍대행렬을 통해 각 의사결정기준의 가중치가 결정되면, 정규화 과정을 통해 100점 만점의 단일 단위를 갖는 결정점수의 계산이 가능하다. 이 정규화를 통한 결정점수 계산 기법은 Yang (2008)에 의해 개발되었다. 각 의사결정 기준의 평가척도들에 가중치를 곱해 얻은 결정점수를 통해 다양한 의사결정 기준이 반영된 다변 평가에 의한 최적 신도시 위치를 결정할 수 있다.

<표 7> 대안들의 효과척도 값

평가척도	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4
활동당 소요비용 (\$/회)	9.84	8.40	7.76	9.58
활동당 소요통행시간 (min/회)	21.66	10.65	8.34	19.70
첨두통행속도 (km/hr)	69.98	73.48	77.76	56.03
총활동비용 (인·효용단위)	4445412.1	5572170.7	5549961.9	5349655.1
총통행거리 (person-km)	5343972.2	4754286.1	4532478.4	5282699.0
통행시간 마진율 (%)	20.73	20.80	20.76	20.72

Yang (2008)은 복수의 정성적 의사결정기준을 단일 척도로 변환할 수 있는 정규화 기법을 개발하였다. Z-score라 불리는 이 기법은 분석에 이용되는 자료들이 정규분포 한다는 가정에 기반하고 있다. 이러한 가정아래 대안  $i$ 의 평가척도  $j$ 에 대한 Z-score는 식(9)과 같이 계산 된다.

$$Z_j^i = \left( \frac{X - \mu}{\sigma} \right)^j \tag{9}$$

- $j$  : 평가척도
- $i$  : 대안번호
- $X$  :  $i$ 번째 대안의  $j$  평가척도의 평균값
- $\mu$  : 모든 평가 대안에 대한  $j$  평가척도의 평균값
- $\sigma$  : 모든 대안들에 대한 평가척도  $j$ 의 표준편차
- $Z_j^i$  : 대안  $i$ 의 평가척도  $j$ 에 대한 Z-score

식(9)에 의해 Z-score가 계산되면, Yang (2008)이 제시한 <표 8>에 의해 그 값을 100점 만점의 값으로 변환할 수 있다.

<표 8> 100점 만점 환산 표 (Yang, 2008)

Z값 범위	변환식
$1.645 \leq Z < Max(Z)$	$50 + \left\{ \left[ 95 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-1.645)}{(Max(Z)-1.645)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$1.282 \leq Z < 1.645$	$50 + \left\{ \left[ 90 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-1.282)}{(1.645-1.282)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$1.038 \leq Z < 1.282$	$50 + \left\{ \left[ 85 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-1.038)}{(1.282-1.038)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$0.842 \leq Z < 1.038$	$50 + \left\{ \left[ 80 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-0.842)}{(1.038-0.842)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$0.676 \leq Z < 0.842$	$50 + \left\{ \left[ 75 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-0.676)}{(0.842-0.676)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$0.526 \leq Z < 0.676$	$50 + \left\{ \left[ 70 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-0.526)}{(0.676-0.526)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$0.387 \leq Z < 0.526$	$50 + \left\{ \left[ 65 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-0.387)}{(0.526-0.387)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$0.255 \leq Z < 0.387$	$50 + \left\{ \left[ 60 + 5 \times \left\{ \frac{(Z-0.255)}{(0.387-0.255)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-0.255 \leq Z < 0.255$	$50 + \left\{ \left[ 40 + 20 \times \left\{ \frac{(Z+0.255)}{(0.255+0.255)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-0.387 \leq Z < -0.255$	$50 + \left\{ \left[ 35 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+0.387)}{(-0.255+0.387)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-0.526 \leq Z < -0.387$	$50 + \left\{ \left[ 30 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+0.526)}{(-0.387+0.526)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-0.676 \leq Z < -0.526$	$50 + \left\{ \left[ 25 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+0.676)}{(-0.526+0.676)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-0.842 \leq Z < -0.676$	$50 + \left\{ \left[ 20 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+0.842)}{(-0.676+0.842)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-1.038 \leq Z < -0.842$	$50 + \left\{ \left[ 15 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+1.038)}{(-0.842+1.038)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-1.282 \leq Z < -1.038$	$50 + \left\{ \left[ 10 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+1.282)}{(-1.038+1.282)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$-1.645 \leq Z < -1.282$	$50 + \left\{ \left[ 5 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+1.645)}{(-1.282+1.645)} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$
$Min(Z) \leq Z < -1.645$	$50 + \left\{ \left[ 0 + 5 \times \left\{ \frac{(Z+Min(Z))}{(-1.645+Min(Z))} \right\} \right] \times 0.5 \right\}$

<표 9> 대안들의 평가척도별 점수 (100점 만점)

평가척도	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	가중치
활동당 소요비용	56.90	85.77	95.24	60.74	0.9331
활동당 소요통행시간	56.47	88.91	93.84	60.63	
침두통행속도	71.58	83.38	90.33	54.43	0.3382
총활동 비용	56.89	85.79	95.23	60.75	
총통행거리	57.43	86.91	94.95	59.65	
통행시간마진율	71.80	71.11	71.17	71.93	0.1226

3) 최종결정점수

<표 9>는 대안들의 효과척도별 점수와 가중치를 보여 준다. 효과척도들을 항목별로 보면 대안 2와 대안 3이 모든 항목에서 높은 평가를 받고 있음을 알 수 있다. 대안 1의 경우 활동관련 척도들이 매우 낮은 평가를 받았다. <표 7>를 보면 대안 1의 교통망 전체의 침두 통행속도의 경우 69.98 (km/hr)로 대안 2와 대안 3에 비해 크게 낮지 않았으나, 활동 당 소요되는 비용이 회당 \$ 9.84로 대안 3에 비해 \$2 이상 높았다. 또, 활동 당 소요되는 통행시간 역시 회당 21.66 분으로 대안 3의 8.34분에 비해 크게 높았다. 대안 4 역시 모든 평가 척도에서 대안 1과 유사한 점수를 보였다. 이러한 대안 1과 대안 4의 활동관련 척도의 낮은 평가점수는 대안 1과 대안 4에 신도시가 건설될 경우 도시 전체 주민들의 활동 환경이 상대적으로 악화됨을 의미하는 것이며, 이를 주민들의 삶의 질 역시 악화될 수 있음을 의미한다. <표 7>의 효과척도 값과 <표 8>를 이용해 효과척도 값들은 100점 만점의 정규점수로 환산된다.

<표 9>의 정규점수는 가중치와 함께 식(10)을 통해 각 대안의 결정점수로 환산될 수 있다.

$$DS_i = \sum_{k=1}^n (W_k \cdot P_k)^i \tag{10}$$

여기서

$DS_i$  : 대안의  $i$ 의 결정점수

$W_k$  : 다면계획기준  $k$ 의 추정가중치

$P_k$  : 다면계획기준  $k$ 에 속하는 효과척도들의 총합

<표 10>과 같이 최종적으로 계산된 총점에 따르면 대안 3이 최적 신도시 위치로 결정되었다. 건설지점 부근의 건설 전 소통상황, 대중교통망과의 연계성, 교통망 전체의 통행시간의 변동, 주 활동지점들과의 거리 등을 고

&lt;표 10&gt; 각 대안의 최종결정점수

	효율성	생산성	신뢰성	총점
가중치	0.9331	0.3382	0.1226	-
대안 1	172.58	38.66	8.80	220.05
대안 2	240.79	58.41	8.59	307.80
대안 3	260.71	64.32	8.73	333.76
대안 4	164.05	40.72	8.82	213.58

려할 때 지점 2와 3은 1과 4에 비해 우수한 입지여건을 가지고 있다고 판단된다. 1이나 4의 경우 주 활동지점으로 접근하기 위해서는 기존에 통행량이 많은 축을 통과해야 하기 때문에 효율성이나 생산성 측면에서 제외되는 것이 타당하다고 판단된다. 다만, 대안 2와 대안 3의 최종결정점수치는 크지 않으므로 시물레이션 횟수의 변경이나, 또 다른 쌍대행렬에 의해 그 우선순위가 바뀔 수 있다. 실제 과업에서는 복수의 최종결정점수를 통해 통계적 유의수준을 고려해 두 대안간의 상대적 우위 여부를 판단할 수 있다. 결과해석에 있어 주의할 사항은 현재 시나리오 평가에 이용된 DYNAHAP내의 여러 함수나 모듈들은 아직 실제 자료를 통해 정산되거나 검증되지 않았다는 점이다. 본 논문에서는 행동기반 모형을 정책 의사결정에 이용하는 방법론을 제시하는데 초점을 맞추었기 때문에, 실제 정산에 관련된 사항들은 향후 연구에서 다루고자 한다.

## VI. 결론

본 연구에서는 기존 교통계획 문제에서 연구되어온 교통망 설계문제의 개념을 토지이용 분야로 확장하는 지역설계문제의 개념을 제시하고 그 문제의 예를 제시하였다. 기존 교통망 설계 문제의 경우 계획 가능한 변수나 설계 시 고려되는 영향 변수들 모두 교통망 관련 속성들로 제한되어 왔다. 예를 들면, 신규 도로나 대중교통망 노선이 설계변수로 설정되고, 총 통행시간이나 총 차량-통행거리등의 척도들이 사업의 영향을 계량화하는데 이용되어 왔다. 하지만, 교통 인프라가 도시의 형태에 미치는 영향은 교통시스템의 반경 내에 머무르지 않는다. 도로망의 신설이나 지하철의 개통이 주변 지역의 토지이용을 어떻게 변화시키는지의 지난 수 십 년간의 경험을 통해 충분히 확인된 바 있다.

이러한 도시 전반의 영향을 계량화하기 위해 행동기반 교통계획 기법을 개발하고 이를 토지이용 문제를 포괄하는 지역설계 문제에 적용하였다. 다양한 영향을 여러 각도에서 계획 과정에 반영하기 위해, 교통 시스템이

도시에 미치는 영향을 효율성, 생산성, 신뢰성으로 구분하고 각각을 계량화 할 수 있는 구체적인 효과척도를 제시하였다. 제시된 효과척도의 변화는 활동기반 교통 시물레이션 모형인 DYNAHAP를 통해 계량화되었다. 저자들은 복수의 효과척도를 정책의 의사결정과정에 반영하기 위해 “복수 효과척도를 이용한 목표기반 지역설계 기법”을 개발하였다. 개발된 기법은 서울 동남권 교통망에 가상자료를 이용해 4개로 제시된 신도시 건설위치 대안들 중 최적대안을 찾는 데 적용되었다. 최적대안 계산 과정에서는 효율성 관련척도가 최우선적으로 반영되었으며, 최적대안은 효율성과 생산성에서 다른 대안에 비해 높은 결정점수를 기록하였다.

제시된 지역설계 문제의 실무 적용 잠재력에도 불구하고, 실제 과업에서 본 연구의 성과가 재현되기 위해서는 몇 가지 문제가 해결되어야 한다. 첫 번째는 활동기반 교통시물레이션 모형의 발전과 정산이 필요하다. 현재 이용된 DYNAHAP는 교통 인프라가 도시 내 사람들의 활동에 미치는 영향을 계량할 수 있으나, 정산을 거친 적이 없으며 실무 적용을 위해서는 모형에 포함된 다양한 하위 모듈들의 개선이 필요하다. 또, 현재 이용하고 있는 모형들이 각 역할에 있어 최적의 모형인지에 대한 검토도 필요하다. 이러한 발전은 활동기반 교통계획 문제의 발전과 함께 이루어져야 할 문제이다. 두 번째 과제는 지역계획문제에서 교통 시스템이 도시에 미치는 영향을 정확히 계량할 수 있는 효과척도들에 대한 연구가 선행되어야 한다. 예를 들어 도시 내 교통이나 활동의 신뢰성을 계측하는 효과척도에 대한 연구는 기존에 수행된 예가 거의 없다. 어떻게 실제 주민들이 경험하는 시스템의 신뢰성을 계량할 수 있을지에 대한 논의가 필요하다. 세 번째로 본 연구에서 이용한 다기준 평가법은 다양한 복수 목적 최적화문제의 해법일 뿐으로, 목표기반 교통계획기법의 발전을 위해서는 다양한 다목적 계획법에 DYNAHAP를 결합해보는 노력이 필요하다. 네 번째로 교통망의 불확실성을 적극적으로 분석에 도입하려는 노력이 필요하다. 예를 들어 기존 교통계획에서는 OD표내의 기종점간 통행량이 상수로 정의되지만, 실제 일별 통행량은 날마다 다른 값을 갖는다. 이러한 실제 현실의 가변성이 교통계획에 반영되어야 보다 신뢰성 있는 대안 선정이 가능할 것이다. 다섯 번째로 보다 정확한 목표기반 교통계획을 위해서는 각 다면계획기준을 정확히 반영할 수 있는 평가척도의 개발이 선행되어야 한다. 현재의 결과를 보면, 최적대안 결정에 있어 효율성 척도의 영향이 절대적임을 알 수 있다. 이러한 결과도, 새로

운 평가척도를 통해서도 다르게 나타날 수 있다. 마지막으로 다기준-다차원 의사결정에 대한 연구가 필요하다. 지역설계 문제의 성격상 다양한 효과척도들이 계산과정에 포함되며, 많은 척도들은 서로 상충할 수 있다. 이를 어떻게 정확히 고려할 것인지, 서로 상충이 최소화되는 척도들을 새로 개발하는 문제들을 실제 자료나 조사를 기반으로 연구해야 한다. 이러한 다기준-다차원 문제에 대한 해법 개발은 현재 교통계획의 주요 의제 중 하나인 “지속가능한 개발” 기법을 발전시키는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Abdulaal M. and L. J. LeBlanc (1979), “Continuous equilibrium network design problem”, *Transportation Research Part 13B* (1), pp.19~32.
2. Boyce D. E. and B. N. Janson (1980), “A discrete transportation network design problem with combined trip distribution and assignment”, *Transportation Research 14B* (1-2), pp.147~154.
3. Chen M. and A. S. Alfa (1991), “A network design algorithm using a stochastic incremental traffic assignment approach”, *Transportation Science* 25 (3), pp.215~224.
4. Clegg J., M. Smith, Y. Xiang and R. Yarrow (2001), “Bilevel programming applied to optimizing urban transportation”, *Transportation Research Part 35B* (1), pp.41~70.
5. Dial R. B. (1999), “Minimal-revenue congestion pricing part I: A fast algorithm for the single-origin case”, *Transportation Research Part 33B* (3), pp.189~202.
6. Ferrari P. (1999), “A model of urban transport management”, *Transportation Research Part 33B* (1), pp.43~61.
7. Ferrari P. (2002), “Road network toll pricing and social welfare”, *Transportation Research Part 36B* (5), pp.471~483.
8. R. Jayakrishnan, W. K. Tsai and A. Chen (1995), “A dynamic traffic assignment model with traffic-flow relationship”, *Transportation Research Part 8C* (3), pp.51~72.
9. Jose H-V (1995), “Comparative Assessment of AHP and MAV in Highway Planning: CASE STUDY”, *Journal of Transportation Engineering*, 121(2), pp.191~200.
10. Kim H. (2008), “New dynamic travel demand modeling methods in advanced data collecting environments”, Ph.D. dissertation, University of California, Irvine.
11. Kim H-K, H. Kim, M. G. McNally (2006) A household activity scheduling model incorporating a task allocation process with week-based learning mechanisms, 11th International Conference on Travel Behavior Research, Kyoto, Aug16-20.
12. Lo H. K. and W. Y. Szeto (2009), “Time-dependent transportation network design under cost-recovery”, *Transportation Research Part 43B* (1), pp.142~158.
13. Meng Q. and H. Yang (2002), “Benefit distribution and equity in road network design”, *Transportation Research Part 36B* (1), pp.19~35.
14. Patriksson M. (2008), “On the applicability and solution of bilevel optimization models in transportation science: A study on the existence, stability and computation of optimal solutions to stochastic mathematical programs with equilibrium constraints”, *Transportation Research Part 42B* (10), pp.843~860.
15. Poorzahedy H. and M. Turnquist (1982), “Approximate algorithms for the discrete network design problem”, *Transportation Research Part 16B* (1), pp.45~55.
16. Saaty and Vargas (1980), “The Logic of Priorities: Application in Business, Energy, Health, and Transportation”, Kluwer/Nijhoff Publishing.
17. Suwansirikul C., Friesz T. L. and R. L. Tobin (1987), “Equilibrium decomposed optimization: A heuristic for the continuous equilibrium network design problem”, *Transportation Science* 21 (4), pp.254~263.
18. Tobin R. L. and T. L. Friesz (1988), “Sensitivity analysis for equilibrium network flow”, *Trans-*

- portation Science 22 (4), pp.242~250.
19. Tudela A., N. Akiki, and R. Cisternas (2006), "Comparing the Output of Cost Benefit and Multi-Criteria Analysis an Application to Urban Transport Investments", Transportation Part 40A (5), p 414-423.
  20. Yang C. (2008), "Developing decision-making process for prioritizing potential alternatives of truck management strategies", Ph.D. dissertation, University of California, Irvine.
  21. Yang H. (1996), "Sensitivity analysis for the elastic-demand network equilibrium problem with applications", Transportation Research Part 31B (1), pp.55~69.
  22. Yang H. and M. G. H. Bell (1998), "Models and algorithms for road network design: a review and some new developments", Transport Reviews, 18(3), pp.257~278.
  23. Yedla S. and R. M. Shrestha (2003), "Multi-Criteria Approach for the Selection of Alternative Options for Environmentally Sustainable Transport System in Delhi", Transportation Research Part 37A (8), pp.717~729.
  24. Zhang X. and H. Yang (2004), "The optimal cordon-based network congestion pricing problem", Transportation Research Part 38B (6), pp.517~537.
  25. Ziyou G. and S. Yifan (2002), "A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice", Transportation Research Part 36B (4), pp.313~323.

✉ 주 작 성 자 : 임용택

✉ 교 신 저 자 : 임용택

✉ 논문투고일 : 2009. 5. 30

✉ 논문심사일 : 2009. 8. 12 (1차)

2009. 8. 19 (2차)

✉ 심사판정일 : 2009. 8. 19

✉ 반론접수기한 : 2010. 2. 28

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필