

■ 論 文 ■

BI-Level Programming 기법을 이용한 교통 네트워크 평가방법 연구

A BI-Level Programming Model for Transportation Network Design

김 병 종

(한국항공대학교 항공교통물류학부 부교수)

김 원 규

(한국항공대학교 항공교통물류학부 부교수)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경
 - 2. 연구의 목적 및 내용
 - II. 문헌연구
 - III. 모형의 구축
 - 1. 상위모형의 목적함수에 관한 논의
 - 2. 하위모형 구성을 위한 논의
 - 3. 제시하는 모형
 - IV. 해답을 찾기 위한 접근방법
 - 1. 계산부담에 관한 논의
 - 2. 해법 알고리즘
 - V. 예제
 - VI. 결론 및 추후 연구
- 참고문헌
부록

Key Words : 네트워크 설계 모형, Bi-level Programming, Bit 구조, 수단분담/교통배분 결합모형, 사회적 비용

요 약

본 논문에서는 교통시설투자 의사결정을 위한 네트워크 설계 모형이 제시되었다. 모형은 사용자 평형의 통행패턴을 예측할 수 있으면서, 링크의 설치 여부를 정하는 이산형 의사결정변수를 갖는 Bi-Level Programming 형태로 구축되었다. 제시된 모형의 장점으로는 사회적 비용을 감안한 투자 결정을 묘사했다는 점과 도로와 철도로 이루어진 네트워크에서의 평형 통행패턴을 예측할 수 있다는 점이다. 정수형 변수의 Bit 구조를 이용한 효율적인 해법 알고리즘이 개발되었다. 예제를 통하여 모형과 알고리즘의 유효성을 검증하였는데, 예제 결과에서 투자의 한계효과감소 현상을 발견하였다.

A network design model has been proposed, which represents a transportation facility investment decision problem. The model takes the discrete bi-level programming form in which two types of decision makers, government and travelers, are involved. The model is characterized by its ability to address the total social costs occurring in transportation networks and to estimate the equilibrium link volumes in multi-modal networks. Travel time and volume for each link in the multi-modal network are predicted by a joint modal split/traffic assignment model. An efficient solution algorithm has been developed and an illustrative example has been presented.

본 연구는 2004년도 한국항공대학교 교비 특별연구과제 연구비 지원으로 수행되었음.

1. 서론

1. 연구의 배경

지역간 또는 광역 교통시설투자를 논의할 때 자주 등장하는 쟁점은 철도투자와 도로투자 중 어디에 투자 비중을 높일 것인가라는 문제와 어느 지역에 투자비중을 높일 것인가라는 문제이다. 지역별 비중문제는 이해 당사자별로 의견이 다른 것이 당연하고, 철도/도로 비중 문제는 다른 측면에서 의견이 엇갈린다. 철도 지지자들은 철도의 장점으로 에너지효율, 공기오염 완화, 교통사고 감소를 내세우고, 도로 지지자들은 도로의 장점으로 투자비 대비 교통량 처리능력 향상 효과 및 이용자의 편의성을 주장한다. 학계는 학계대로, 산업계는 산업계대로, 관계는 관계대로 지지그룹이 나누어지고 있어, 이 논쟁은 쉽사리 가라앉지 않으며, 결국은 과학적인 분석보다는 정치적 과정을 통하여 의사결정이 내려지게 된다.

과학적 분석보다 정치적 과정이 우선되는 현상이 생기는 이유 중의 하나는 지금까지 제시된 모형의 현실 반영 능력이 충분하지 않기 때문이라 생각된다. 현실 반영 능력이 모자라는 모형이 어느 의사결정과정 참여자의 지지하는 바와 상반되는 결론을 제시하는 경우, 그 참여자는 이에 설득되지 않으며, 모형의 약점을 지적하면서 논쟁은 계속 이어진다.

사실 교통시설투자와 같이 천문학적 투자가 필요하고, 미치는 영향이 광범위하고 다양한 문제는 투자효과가 나타나는 과정이 매우 복잡하여 모형화하기가 매우 어려운 문제이다. 또한 정부는 효율성과 형평성 기타 요인들을 동시에 고려해야 하므로 정치적 과정의 중요성이 무시되어서도 안되고, 의사결정구조 상 무시되지도 않는다. 그럼에도 불구하고, 보다 정교한 모형을 구성한다면, 모형의 설득력이 향상되어 의사결정과정에서 역할이 커질 수 있으며, 보다 합리적인 의사결정을 도모하는데 기여할 수 있다고 생각한다.

2. 연구의 목적 및 내용

교통시설투자의 효과를 측정하여 투자대안을 평가할 수 있는 모형을 제시하는 것이 연구의 목적이다. 하나 하나의 투자계획이 모여 투자후보군(candidate set)

을 형성하고, 투자후보의 조합이 투자대안이 된다. 모형의 의사결정변수는 당연히 투자후보들 중에서 어느 후보는 투자하고 어느 후보는 투자하지 않을지(향후 투자로 미룰지) 선택하는 것이다.

현실반영 능력을 향상시키기 위하여 모형이 갖추어야 할 성능은 다음과 같다. 첫째, 모형이 고려하는 네트워크는 도로와 철도를 포함해야 한다(Multimodal Network). 즉, 링크집합은 도로링크와 철도링크로 구성되며, 모형은 통행자가 도로를 이용할지 철도를 이용할지를 결정하는 과정을 반영해야 한다. 둘째, 비용함수는 다양한 형태의 비용을 감안해야 한다. 교통시설투자 시 기대하는 효과는 통행시간절감, 통행비용절감, 사고비용절감이고, 교통네트워크 및 통행 패턴이 변화에 따라 환경비용 및 유지관리비용이 변한다. 셋째는 실행 가능한 투자대안을 제시하기 위해서 예산제약을 감안할 수 있어야 한다.

교통시설 투자대안의 평가 및 선택과 관련된 일단의 모형을 네트워크 설계 모형(Network Design Model)이라 부른다. 이 문제에는 두 종류의 의사결정자가 있는데, 하나는 네트워크 구조를 결정하는 사람(정부, 투자자)이고, 다른 하나는 네트워크 내에서 어느 경로로 이동할 것인가를 결정하는 사람(통행자)이다. 두 종류의 의사결정자는 각각 다른 목적함수에 따라 의사결정을 내리며, 이를 반영하기 위하여 제시된 모형 구조가 2단계 수리모형(Bi-Level Mathematical Programming)이다. 이를 결합하면 2단계 네트워크 설계 모형(Bi-Level Network Design Model)이 된다.

Kim(1990), Anandalingam and Friesz(1992)에 의하면, 2단계 네트워크 설계 모형의 일반적인 구조는 아래와 같다.

$$\min_{\mathbf{x}} F(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) \quad (1)$$

$$\text{subject to } G(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) \leq 0 \quad (2)$$

where $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ solves

$$\min_{\mathbf{y}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (3)$$

$$\text{subject to } g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \quad (4)$$

여기서 벡터 \mathbf{x} 는 네트워크 구조에 대한 의사결정변

수이고, 벡터 y 는 주어진 네트워크에서 각 링크별 교통량을 의미한다. 식(1)과 식(2)로 구성되는 상위모형은 목적함수 $F(x, y)$ 를 최소화하는 최적의 네트워크 구조는 무엇인가를 찾아내고자 하는 모형이다. 네트워크 설계모형을 2단계 형태로 만든 이유는 상위모형에서 벡터 x 를 특정 값으로 설정했을 때, 이 네트워크 구조 위에서 통행자들이 어떤 통행 패턴을 만들 것인가를 하위모형이 예측할 수 있기 때문이다. 식(3)과 식(4)로 구성되는 하위(Lower Level)모형은 통행패턴을 예측하기 위한 모형이고, 일반적으로 사용자 평형 교통배분 모형의 형태를 갖는다. 이런 이유로 2단계 네트워크 설계 모형을 다른 이름으로 평형 네트워크 설계 모형(Equilibrium Network Design Model)이라고도 부른다(Kim, 1990).

본 논문의 주요 내용은 전술한 모형의 요구성능을 충족하도록 식(1)~식(4)을 구체화하는 것이며, 아울러 모형의 해법과 간단한 예제도 제시하였다.

II. 문헌연구

네트워크 설계 모형은 여러 가지 관점에서 분류될 수 있다. Yang and Bell(1998)은 비교적 최근에 발표된 문헌조사 논문에서 네트워크 설계 모형을 1) 하위모형의 특징, 2) 상위모형의 의사결정변수의 종류, 3) 상위모형의 목적함수의 종류, 4) 해법의 종류 등 네가지 기준으로 분류하였다.

그들은 하위모형으로 (결정론적) 사용자 평형 모형, 확률론적 사용자 평형모형, 수요탄력성을 감안한 사용자 평형 모형, 그리고 통행분포/교통배분 결합모형이 사용되었다고 기술하였다. 거의 대부분의 기 발표된 연구는 결정론적 사용자 평형모형을 하위모형으로 사용하였고, 확률론적 사용자 평형모형은 Chen and Alfa(1991)과 Davis(1994)의 연구에서 발견된다. O/D 수요가 네트워크의 진보에 따라 변하는 현상을 감안하는 하위모형은 Asakura and Sasaki(1990)의 연구에 나타난다. Boyce and Jason(1980)의 네트워크 설계모형에서는 네트워크의 진보가 통행분포에 미치는 영향이 고려되어 있다. 본 논문에서 제시하는 수단분담/교통배분 결합모형은 Yang and Bell(1998)의 분류상 어디에도 속하지 않는 모형이다. 수단분담/교통배분 결합모형은 이미 존재하는 모형이지만 (Sheffi, 1985), 이 모형을 네트워크 설계모형의 하위모형으로 활용한

것은 본 논문이 최초의 시도이다.

다른 분류기준으로 상위모형의 의사결정변수의 종류가 있다. 의사결정변수의 종류로 분류할 경우, 이산형 모형, 연속형 모형 그리고 혼합형 모형이 있다. 의사결정 벡터 x 가 정수형 벡터인 경우를 이산형, 실수형인 경우를 연속형이라 하는데, 이산형 의사결정 변수는 어느 링크를 건설할 것인가 아닌가를 의미하고 실수형 의사결정변수는 링크의 용량을 의미한다. 이산형 모형의 예로는 Boyce and Jason(1980), Poorzahedy and Turnquist(1982), Chen and Alfa(1991), Solanki, et al.(1998) 등이 있고, 연속형 모형의 예로는 LeBlanc and Boyce(1986), Friesz, et al. (1992), Suh and Kim(1992), Davis(1994), Cho and Lo(1999) 등이 있다. 본 논문에서 제시하는 모형은 이산형 모형에 속한다.

대부분의 네트워크 설계모형은 건설비용 제약하에서 총통행시간의 최소화를 꾀한다. 또는 이의 변형으로 건설비용을 총통행시간과 결합한 목적함수를 사용하기도 하는데 이때는 목적함수에 시간단위로 표시되는 항과 화폐단위로 표시되는 항이 있으므로 단위의 변환을 위한 상수가 필요하다. 드물게 총통행시간이 아닌 다른 목적함수를 갖는 모형도 발견되는데, Wong and Yang(1997)은 신호교차로들로 이루어진 네트워크에서 최적 신호제어를 찾기 위한 네트워크 설계모형을 제시하면서 네트워크 예비 용량 최대화를 목적함수로 삼았다. Kocur and Hendrickson(1982), William and Lam(1991) 그리고 Yang and Bell(1997)은 교통투자자와 관련된 소비자 잉여에 관하여 논의하였다. 본 논문의 모형은 Yang and Bell(1998)의 분류에 포함되지 않은 사회적 비용의 최소화를 목적함수로 삼았다.

마지막으로, 네트워크 설계모형 연구는 적용한 해법에 따라 분류될 수 있다. 상위모형 의사결정변수의 종류에 따라 전혀 다른 형태의 해법이 적용되는데, 이산형 모형은 정수계획법 형태의 해법을 적용하고, 연속형 모형의 경우는 비선형계획법 형태의 해법을 적용한다. 이산형 모형 해법은 실행가능해의 여러 가지 경우를 탐색하게 되는데 Branch-and-Bound 알고리즘과 같이 진짜 최적해를 찾아가는 해법과 진짜 최적해에 가까운 해답을 찾는 Heuristic 해법으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 Heuristic 해법을 제시하였다. 지금까지 발표된 네트워크 설계모형의 대다수는 연속형 모형에 속하고, 연속형 모형에 사용되는 여러 가지 형태의 해법은 Yang and Bell(1998)에 정리되어 있으므로 관

심 있는 독자는 참고하기 바란다.

네트워크 설계모형에 관한 국내연구로는 오세창(1995), 김재영과 임강원(2000), 임용택(2004), 임용택과 임강원(2004)을 들 수 있다. 오세창(1995)은 네트워크 설계 모형의 수리 모형을 제시하지는 않았지만, 이 부류에 속하는 수리모형은 구조가 복잡하고, 계산부담이 커 실제문제 적용에 어려움이 있다는 점에 착안하여, 해답의 품질에 크게 영향을 미치지 않을 것이라 판단되는 네트워크의 부위를 찾아내어 집성화(aggregation)하는 논리를 발표하였다. 네트워크의 크기는 계산시간에 절대적인 영향을 미치므로 이 연구를 활용하면 주어진 문제의 최적해는 아니지만, 이에 가까운 해답을 훨씬 적은 시간 안에 찾을 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 김재영과 임강원(2000), 임용택(2004), 임용택과 임강원(2004)은 연속형 네트워크 설계모형과 그의 해법을 제시하였다. 김재영과 임강원의 모형은 통행비용과 건설비의 합을 최소화하는 링크별 용량증가치를 찾는 모형을 제시하였는데, 그들의 모형은 외관상 uni-level 구조로 되어 있지만, 제약조건이 변동부등식(variational inequality)으로 구성되어 있어 평형교통량을 예측할 수 있다. 임용택(2004)의 모형도 김재영과 임강원과 마찬가지로 네트워크 설계 목적함수로 통행비용과 건설비의 합을 최소화하는 것을 제시하였으나, 하위모형으로 확률적 사용자 평형모형을 제시했다는 점에서 차이가 난다. 임용택과 임강원(2004)은 임용택(2004)의 연구를 확장하여 결정적 사용자 평형모형과 확률적 사용자 평형모형을 하위모형으로 갖는 네트워크 설계 모형 각각에 대하여 Stackelberg 게임 해법과 Cournot-Nash 게임 해법을 적용하여 결과를 비교하였다. 사용자 평형모형을 하위모형으로 갖는 모든 Bi-level 네트워크 설계모형은 Leader-Follower 게임 형태로 모형화하는 것이 보다 현실성이 높으며, 본 논문에서 제시되는 모형 역시 Leader-Follower 게임 형태의 모형이다.

본 연구의 동인은 기존의 모형의 한계를 극복하는 것이다. 즉, 첫째, 기존의 거의 모든 모형이 상위모형 목적함수로 총통행시간의 최소화만을 다루고 있기 때문에, 기타 비용을 감안할 수 없으며, 둘째, 하위모형이 도로 네트워크에서의 사용자 최적화만 다루고 있어 도로와 철도가 혼재하는 네트워크에서의 통행패턴 예측 기능이 없기 때문이다.

III. 모형의 구축

본 논문에서 제시하는 모형은 이산형 Bi-Level 네트워크 설계 모형에 해당한다. 전술한 바와 같이 벡터 \mathbf{x} 는 네트워크 구조를 결정하는 의사결정변수 벡터이고, 벡터 \mathbf{y} 는 링크 교통량을 의미하는 의사결정변수 벡터이다. 이때 기본으로 주어지는 데이터는 OD 데이터, 기존 네트워크 구조, 후보사업군이다.

1. 상위모형의 목적함수에 관한 논의

지금까지의 네트워크 설계 모형의 상위모형 목적함수는 네트워크에서의 총통행시간의 최소화이다. 본 논문이 제시하는 주요 논점 중 하나는 네트워크 구조를 평가할 때, 총통행시간만으로 평가하는 것은 부족하다는 점이다. 통행시간비용, 차량운행비용, 사고비용, 환경비용, 시설유지관리비용을 모두 포함하는 사회적 비용으로 투자 대안을 평가해야 한다.

총통행시간은 링크별 통행량과 링크별 통행시간을 곱한 후 모든 링크에 대하여 합해주면 된다. 이를 화폐단위로 변환해주기 위하여 시간가치를 곱하면 통행시간 비용이 된다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$TTC(\mathbf{y}) = \sum_{i \in A} VOT_i y_i t_i(y_i) \quad (5)$$

여기서,

$TTC(\mathbf{y})$: 통행시간비용(원)

\mathbf{y} : y_i 의 벡터

i : 링크 인덱스

VOT_i : 링크 i 이용자의 시간가치 상수¹⁾

A : 링크 집합 (기존 링크와 추가되는 링크의 합집합)

y_i : 링크 i 의 교통량

$t_i(y_i)$: 링크 i 의 통행시간 함수

여기서 $t_i(y_i)$ 는 링크 i 의 교통량이 y_i 일 때 링크통행시간을 의미하며, 도로링크인 경우 교통량 증가와 함께 증가하고 철도링크인 경우는 교통량과 관계없이 일정하다.

1) 건설교통부(1999)는 VOT 상수 값으로 도로 이용자 경우는 3,045원/인-시간, 철도 이용자 경우는 2,808 원/인-시간으로 제시.

차량운행비용은 도로인 경우는 링크속도의 2차 함수 형태로 표현할 수 있으며(국토연구원, 1999), 철도인 경우는 인-km 당 원단위 비용을 이용하여 구할 수 있다(서선덕, 1994).

$$VOC(\mathbf{y}) = \sum_{i \in H} y_i (h_0 + \frac{h_1}{v_i} + h_2 v_i^2) + r \sum_{j \in R} y_j L_j \quad (6)$$

여기서,

- VOC(y) : 차량운행비용(원)
- i, j : 링크 인덱스
- H : 도로링크 집합
- y_i : 도로링크 i의 교통량
- h₀, h₁, h₂ : 승용차 운행비용 산출을 위한 상수²⁾
- v_i : 도로링크 i의 속도
- R : 철도링크의 집합
- r : 기차운행비용 원단위³⁾
- y_j : 철도링크 j의 교통량
- L_j : 철도링크 j의 길이

사고비용은 링크 타입별 사고비용 원단위를 사용하여 근사값을 구할 수 있다.

$$AC(\mathbf{y}) = a_h \sum_{i \in H} y_i L_i + a_r \sum_{j \in R} y_j L_j \quad (7)$$

여기서,

- AC(y) : 사고비용(원)
- a_h, a_r : 도로 및 철도 사고비용 원단위⁴⁾

환경비용도 사고비용과 마찬가지로 원단위비용을 사용하여 근사값을 구할 수 있다.

$$EC(\mathbf{y}) = e_h \sum_{i \in H} y_i L_i + e_r \sum_{j \in R} y_j L_j \quad (8)$$

여기서,

- EC(y) : 환경비용(원)
- e_h, e_r : 도로 및 철도 환경비용 원단위⁵⁾

시설유지관리 비용은 교통량과 관계 없이 링크의 단위길이당 유지관리비용 원단위를 이용하여 구할 수 있다. 철도의 경우는 운행비용 원단위에 유지관리비용이 포함되었으며, 따라서 별도 산정하지 않아도 된다.

$$MC = m_h \sum_{i \in H} L_i \quad (9)$$

여기서,

- MC : 유지관리비용(원)
- m_h : 도로 유지관리비용 원단위⁶⁾

이상 논의한 비용항목은 네트워크가 하나로 주어졌을 경우의 비용산출식이다. 이를 네트워크 설계모형의 문맥으로 확장하면, 네트워크 설계변수의 벡터 **x**가 변함에 따라 네트워크 구조가 변하고, 평형교통량도 변하며, 결과적으로 비용도 변하므로 위 각 비용산출식은 교통량 벡터 **y**와 설계변수 벡터 **x**의 함수가 된다. 결국 상위모형의 목적함수는 다음 식과 같이 된다.

$$\min_{\mathbf{x}} TSC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = TCC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + VOC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + AC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + EC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + MC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (10)$$

여기서,

- TSC(x, y) : 네트워크에서 발생하는 사회적 비용

교통시설 투자와 관련된 사회적 비용에 대한 보다 자세한 논의는 이상건 외(2000)를 참조하기 바란다.

2. 하위모형 구성을 위한 논의

상위모형에서 네트워크 구조를 정하면, 하위모형에서는 링크교통량을 계산하여 상위모형에 보내주어야 한다. 본 논문에서 링크교통량 계산 시 적용하는 원칙은 평형교통량이어야 하고, 네트워크가 도로와 철도를 함께 고려한다는 점이다. 수단분담/교통배분 결합모형이라고도 불리는, 두 종류의 수단을 감안한 평형교통배분

2) 국토연구원(1999)은 상수 값으로 순서대로 97.054, 1.094.081, -8.24*10⁻⁴을 제시.
 3) 서선덕(1993)은 r 값으로 24.4 (원/인-km)를 제시.
 4) 건설교통부 통계연보(1998)를 이용하여 산출한 결과 a_h, a_r 값은 각각 29.73원/인-km, 1.70/인-km로 나타난다.
 5) 동부엔지니어링(1997)은 대기오염물질 처리비용을 기준으로 e_h, e_r 값으로 12.58원/인-km, 5.08/인-km를 제시.
 6) 한국개발연구원(2000)는 4차로 고속도로 m_h 값으로 1,170,000원/하루-km를 제시.

모형은 Sheffi(1985)와 Lo, et al.(2004)에서 발견할 수 있다. Sheffi(1985)는 도로 네트워크와 철도(대중교통) 네트워크가 별개로 존재하는 네트워크에서, 모든 O/D 교통수요는 두 개의 네트워크 중 하나를 선택하여 목적지에 도달하는 통행패턴을 모형화했는데, 수단선택행위 예측에는 LOGIT 모형을 활용하였다. Lo, et al.(2004)은 수단 선택 행위를 더 일반화하여, 목적지에 가는 도중에 수단간 환승을 고려할 수 있는 모형을 제시하였다.

본 논문에서는 지역간 교통의 경우 이동 도중에 수단을 바꾸는 경우가 흔하지 않으므로 비교적 제약된 형태의 모형인 Sheffi(1985) 모형을 인용한다.

3. 제시하는 모형

지금까지의 논의를 바탕으로 도로/철도를 고려하는 평형 네트워크 설계 모형은 다음과 같다.

$$\min_{\mathbf{x}} TSC(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) = TCC(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) + VOC(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) + AC(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) + EC(\mathbf{x}, \mathbf{y}(\mathbf{x})) + MC(\mathbf{x}) \quad (11)$$

$$\text{subject to } \sum_{i \in A_c} c_i x_i \leq B \quad (12)$$

where $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ solves

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} & \sum_{j \in H(\mathbf{x})} \int_0^{y_j} t_j(\omega) d\omega \\ & + \sum_{od \in OD} \int_0^{q_{od}^r} \left(\frac{1}{\theta} \ln \frac{\omega}{q_{od}^h - \omega} + t_{od}^r \right) d\omega \\ & + \sum_{k \in R(\mathbf{x})} \int_0^{y_k} t_k(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{subject to } \sum_{l \in P_{od}^H(\mathbf{x})} f_{od}^l = a_{od}^h \quad \forall od \in OD \quad (14)$$

$$\sum_{m \in P_{od}^R(\mathbf{x})} f_{od}^m = a_{od}^r \quad \forall od \in OD \quad (15)$$

$$a_{od}^h + a_{od}^r = q_{od} \quad \forall od \in OD \quad (16)$$

$$y_j = \sum_{od \in OD} \sum_{l \in P_{od}^H(\mathbf{x})} f_{od}^l \delta_{od}^{j,l} \quad \forall j \in H(\mathbf{x}) \quad (17)$$

$$y_k = \sum_{od \in OD} \sum_{m \in P_{od}^R(\mathbf{x})} f_{od}^m \delta_{od}^{k,m} \quad \forall k \in R(\mathbf{x}) \quad (18)$$

$$f_{od}^l, f_{od}^m \geq 0 \quad \forall od \in OD, l \in P_{od}^H(\mathbf{x}), m \in P_{od}^R(\mathbf{x}) \quad (19)$$

$$q_{od}^r, a_{od}^h \geq 0 \quad \forall od \in OD \quad (20)$$

여기서,

- i : 후보사업을 의미하는 링크 인덱스
- A_c : 후보사업 링크의 집합
- c_i : 후보사업 i의 투자비
- x_i : 후보사업 i를 실행할 것인가를 의미하는 결정변수 (x_i=1이면 시행, x_i = 0이면 시행하지 않음)
- B : 가용예산 총액
- od : O/D 짝을 의미하는 인덱스
- OD : 모든 O/D 짝의 집합
- q_{od} : O/D od의 교통수요
- q^r_{od} : O/D od의 교통수요 중에서 철도를 이용하는 수요
- q^h_{od} : O/D od의 교통수요 중에서 도로를 이용하는 수요
- θ : 수단선택 시 통행시간에 대한 민감도를 나타내는 parameter
- t^r_{od} : O/D od간 철도 이용 시 통행시간
- j : 도로링크 인덱스
- H(x) : 도로링크 집합, x의 함수임
- y_j : 도로링크 j의 교통량
- t_j(.) : 도로링크 j의 통행시간 함수
- k : 철도링크 인덱스
- R(x) : 철도링크 집합, x의 함수
- y_k : 철도링크 k의 교통량
- t_k(.) : 철도링크 k의 통행시간 함수
- l : O/D를 연결하는 도로경로 인덱스
- P^H_{od}(x) : O/D od를 연결하는 도로로 이루어진 경로의 집합
- f^l_{od} : O/D od를 연결하는 도로경로 l의 교통량
- δ^{j,l}_{od} : indicator 변수 (도로링크 j가 O/D od를 연결하는 도로경로 l에 속하면 1, 그렇지 않으면 0)
- m : O/D를 연결하는 철도경로 인덱스

$P_{od}^R(\mathbf{x})$: O/D od를 연결하는 철도로 이루어진 경로의 집합
 f_{od}^m : O/D od를 연결하는 철도경로 m의 교통량
 $\delta_{od}^{k,m}$: indicator 변수 (철도링크 k가 O/D od를 연결하는 철도경로 m에 속하면 1, 그렇지 않으면 0)

식(11)은 상위모형의 목적함수로 시설투자를 결정할 때, 사회적 비용의 최소화를 목적으로 한다는 것을 의미한다. 투자후보군에서 어떤 후보를 시행할 것인가는 벡터 \mathbf{x} 가 나타내주고 있는데, 유념해야 할 점은 \mathbf{x} 값에 따라 네트워크 구조가 변하고, 따라서 집합 H, P_{od}^H, R, P_{od}^R 의 내용과 철도 통행시간 t_{od}^r 이 변한다는 것이다. 식(12)는 상위 모형의 제약조건으로 투자비는 가용예산을 초과하지 못한다는 것을 의미한다. 식(13)~식(20)는 도로와 철도로 구성된 복합 네트워크에서 평형교통량을 구하고자 하는 모형으로, Sheffi(1985)에서 인용한 것이므로 구체적인 설명은 Sheffi(1985)를 참조하기 바란다.⁷⁾

IV. 해답을 찾기 위한 접근방법

1. 계산부담에 관한 논의

제시된 모형은 계산측면에서 두 가지 어려움을 준다. 첫째는 하위모형과 관련된 문제이다. 비선형계획 모형인 하위모형은 비선형계획 모형 해법의 일종인 convex combination 알고리즘을 이용하여 해결할 수 있는데, 이 알고리즘은 답이 특정값으로 충분히 수렴할 때까지 계산을 반복해야 한다. 계산시간은 노드 수, O/D 수 그리고 iteration 수의 곱에 비례하여 늘어나는데, 수렴에 이르기까지 반복해야 하는 iteration 수는 네트워크의 혼잡도가 높을수록 많이 필요하다.

둘째는 상위모형과 관련된 문제로, 하위모형은 상위 모형에서 정해주는 네트워크 대안마다 별도로 답을 제시해야 한다. 여기서 가장 어려운 점은 투자후보의 개수가 늘어나면 평가해야 하는 네트워크 대안 수가 기하급수적으로 늘어난다는 것이다. 하위모형을 한번 해결하는 것도 수월하지 않은데, 이를 수없이 반복해야 한다는 의미다. 투자후보 사업수가 n 이라 하면 대안 수는

$(2^n - 1)$ 가 된다. 예를 들어, $n=10$ 만 되어도 대안 수는 $2^{10} - 1 = 1023$ 이 되며, 모든 대안을 평가한다면 하위모형을 1023회 해결해야 한다.

2. 해법 알고리즘

이산형 네트워크 설계문제의 최적해를 구하는 가장 확실한 방법은 예산제약을 충족하는 모든 대안을 나열하여(전수나열 방법) 사회적 비용을 평가하는 방법이다. 이를 위해서는 나열한 모든 네트워크 대안에 대하여 교통배분 분석이 필요하므로 대안의 수가 많고, 기존의 네트워크의 크기가 클 경우에는 현실적이지 않다. 만일 교통배분을 수행하지 않고도 어떤 실행가능 대안이 다른 실행가능 대안보다 열등하다는 것을 알 수 있다면, 교통배분의 횡수를 줄이면서 최적해를 찾을 수 있으므로 전수나열에 비하여 계산 효율을 이룰 수 있게 된다.

간단한 예로, 후보링크가 세 개 있다고 가정하자. 이 경우 대안 수는 Do-Nothing 대안을 포함하여 총 8개이다. 그리고 예산제약으로 인하여 후보링크 세 개의 후보링크 전부 건설하는 것은 불가능하다고 가정한다면, 이 예의 대안들은 <표 1>과 같이 된다.

<표 1>부터 알 수 있는 것은, 후보링크가 n 개 있는 경우, 실행가능 여부에 관계없이 총 대안의 수는 (2^n) 개이고, 이를 0번부터 $(2^n - 1)$ 번까지 정수로 번호를 붙일 수 있다는 것이고, 또한 이 대안 번호의 이진법 표현에는, 그 대안이 어떤 후보 링크를 건설하고자 하는지에 대한 정보가 담겨 있다.

위 예를 전수나열 방법으로 해결하고자 한다면, 예산

<표 1> 대안번호 및 대안의 내용

대안번호	대안번호의 이진법 표현	내용	실행가능
0	[0 0 0]	Do-Nothing	o
1	[0 0 1]	1번 후보링크 건설	o
2	[0 1 0]	2번 후보링크 건설	o
3	[0 1 1]	1번, 2번 후보링크 건설	o
4	[1 0 0]	3번 후보링크 건설	o
5	[1 0 1]	1번, 3번 후보링크 건설	o
6	[1 1 0]	2번, 3번 후보링크 건설	o
7	[1 1 1]	Do-Everything	x

7) Sheffi(1985), pp.231~236.

제약 때문에 실행 불가능한 7번 대안을 제외하고 총 7개 대안에 대하여 교통배분을 실시해야 한다. 여기서, 6번 대안과 4번 대안을 비교해보면, 4번 대안은 기존 네트워크에 3번 후보링크를 더하는 것이고, 6번 대안은 기존 네트워크에 2번, 3번 후보링크를 더하는 것이다. 즉, 6번 대안은 기존 네트워크에 4번 대안을 시행하고, 거기에다 2번 후보링크를 더하는 것이다. 물론 4번 대안 및 6번 대안 모두 실행가능 대안이다. 여기서 제기되는 질문은 "6번 대안이 4번 대안보다 우월한가?"이다. 이 질문에 대한 답은 예외적인 경우를 빼고는 "그렇다"이다. 이런 관점에서 <표 1>을 살펴보면 다른 실행가능대안에 포함되지 않는 대안은 3번, 5번, 6번 대안이다. 이 예를 전수나열 방법을 통하여 최적대안을 찾는다면, 교통배분을 7회 실시해야 하나, 다른 실행가능 대안에 포함되지 않는 대안에 대해서만 교통배분을 실시한다면, 3회 실시만으로 최적대안을 찾을 수 있다.

프로그래밍 관점에서 위 논리를 어떻게 구현할 수 있을까? 이는 두 개의 정수형 변수에 대하여 논리연산자 'OR'를 적용하면 쉽게 구현된다.

[110] OR [100] → [110]
 다른 표현으로 6 OR 4 → 6
 [110] OR [101] → [111]
 다른 표현으로 6 OR 5 → 7

즉, 논리연산자 'OR'를 정수 6과 4에 적용하면 결과는 6이 되고, 이는 연산수(operand) 중 큰 수인 6과 같다. 이 결과를 이용하여 대안 4는 대안 6에 포함되는 대안임을 알 수 있다. 같은 연산을 정수 6과 5에 적용하면 결과는 7이 되는데, 연산수 6과 다른 수이다. 이 결과를 이용하여 대안 6은 대안 5를 포함하지 못함을 알 수 있다.

이를 일반화 하면, i, j 가 정수형 변수이고 $j > i$ 일 때, 만일 $i \text{ OR } j = j$ 이면 대안 j 는 대안 i 를 포함하는 것이고, $i \text{ OR } j \neq j$ 이면 대안 j 는 대안 i 를 포함하지 않는 것이다. 본 논문에서 제안하는 해법은 모든 대안을 $(2^n - 1)$ 부터 0까지 나열하되, 알고리즘 진행과정에서 이미 교통배분을 실시하여 사회적 비용이 계산된 대안에 의하여 포함되는 대안에 대하여는 교통배분을 실시하지 않고, 열등한 대안으로 간주함으로써 계산효율은 높이면

서 전수나열의 효과를 보고자 하는 해법이다.

기존의 네트워크, O/D 교통수요가 있을 때, 예산 제약 하에 n 개의 투자사업이 제안되었다고 하자. 후보 투자 사업 중에서 최적의 조합을 찾아내는 알고리즘은 다음과 같다.

```

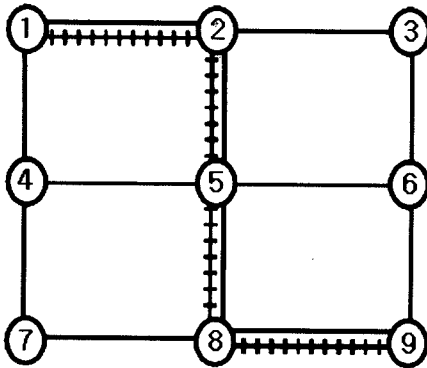
        <Bit Comparison Algorithm>
Initialization
    k = 2^n - 1
    S = ∅
Iteration
    i) If (k=0) then STOP
       Otherwise GO TO ii)
    ii)  $x_j = \begin{cases} 1, & \text{if } j^{\text{th}} \text{ bit of } k=1 \\ 0, & \text{if } j^{\text{th}} \text{ bit of } k=0 \end{cases}$ 
    iii) If ( $\sum c_j x_j > B$ ) Then
         k = k - 1
         GO TO i)
       Otherwise
         GO TO iv)
    iv) If (k OR s) = s for any s ∈ S Then
         k = k - 1
         GO TO i)
       Otherwise
         Run MS/TA Algorithm8)
         to Find y
         Evaluate and Keep TSCk(y)
         S = S ∪ k
         k = k - 1
         GO TO i)
    
```

집합 S는 다른 실행가능 대안에 포함되지 않는 대안의 집합이 되고, 위 알고리즘이 다 수행된 다음 집합 S에 속한 대안 중에서 가장 적은 사회적 비용을 발생시키는 대안을 찾으면 그 대안이 최적대안이다.

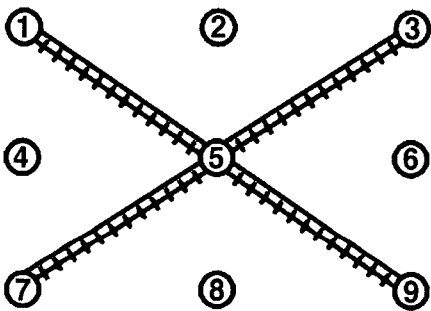
V. 예제

제시된 모형과 알고리즘의 검증 및 성능평가를 위하여 다음의 가상 네트워크를 고려하였다. <그림 1>은 기존 네트워크를 나타내고 있으며, <그림 2>는 후보사업을 보여준다. 실선은 도로링크를, 점사표시선은 철도링크를 의미한다. 모든 링크는 양방향 링크이다. 편의상 O/D는 노드 1,3,7,9 간 12개의 O/D가 존재한다고 가정하였다. 링크별 규격, O/D 교통수요, 후보사업별

8) Joint Modal Split/Traffic Assignment Algorithm은 Sheffi(1985), pp.236~238 참조



〈그림 1〉 기존 네트워크



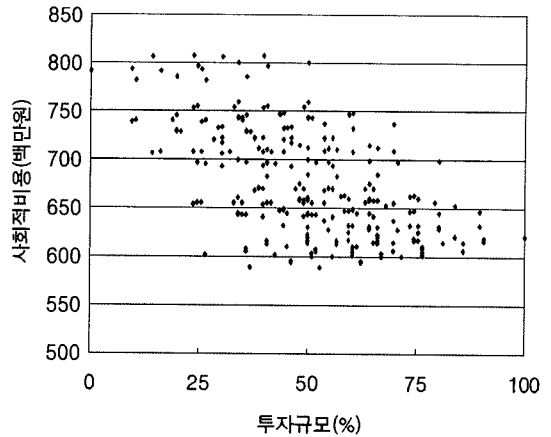
〈그림 2〉 후보사업 링크

규격은 부록에 수록하였다. 후보사업데이터 중에서 투자규모는 화폐단위로 표시한 것이 아니라 도로링크의 경우 km당 1단위의 투자가, 철도링크의 경우 km당 1.2단위의 투자가 들어간다고 가정한 것이다.

부록 데이터에서 보여주듯이 후보사업을 모두 시행하는 경우에는 사업비로 1,060단위의 투자비가 소요된다. 예제에서는 Do-Nothing 시나리오, Do-Everything 시나리오 그리고, 소요예산 총액의 75%, 50%, 25%가 가용한 시나리오 등 5개 시나리오에 대한 분석을 수행하였다. 도로링크 4개, 철도 링크 4개 등 8개의 후보사업을 설정하였기 때문에 대안 수는 256개 (0번부터 255번)이다.

위 예제의 모든 대안에 대하여 교통배분을 실시하고 사회적 비용을 계산하여 〈그림 3〉의 결과를 얻었다.

〈그림 3〉의 전반적인 추세를 보면, 투자를 늘리면 사회적 비용을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 동시에 투자를 늘리되 어느 후보링크를 건설할 것인지를 현명하게 판단해야 원하는 효과를 얻을 수 있으며, 그렇지 않은 경우 오히려 사회적 비용이 늘어날 수도 있음을 보여준다. 전수나열 방법으로 찾은 시나리오 별 최적대안의 비용구조는 〈표 2〉와 같다.



〈그림 3〉 256개 대안의 투자규모 및 사회적 비용

〈표 2〉 시나리오 별 최적대안

시나리오	Do-Nothing	25% 가용	50% 가용	75% 가용	Do-Everything
최적 대안번호	0	12	208	240	255
이진법 표현	00000000	00001100	11010000	11110000	11111111
투자규모 (%)	0.0	23.6	36.8	52.8	100
총 사회적 비용	7.91E+08	6.53E+08	5.89E+08	5.89E+08	6.21E+08
통행시간 비용	4.31E+08	2.75E+08	2.40E+08	2.40E+08	2.25E+08
차량운행 비용	3.30E+07	3.08E+07	7.99E+07	7.99E+07	6.76E+07
사고비용	1.69E+08	1.67E+08	1.22E+08	1.22E+08	1.31E+08
환경비용	7.58E+07	7.46E+07	6.49E+07	6.49E+07	6.65E+07
유지관리 비용	8.19E+07	1.06E+08	8.19E+07	8.19E+07	1.31E+08

〈표 2〉는 Do-Nothing 대안에 비해, 투자가 늘어날수록 통행시간비용이 많이 줄어들고 있음을 보여준다. 통행시간비용의 절감이 다른 비용항목에서의 손실을 충당하고 그 이상의 비용절감을 이루기 때문에 사회적 비용이 줄어들고 있다. 도로 투자사업인 대안 12와 철도 투자사업인 대안 208을 비교해보면, 대안 208의 차량운행비용 대안 12에 비하여 많이 늘어난 반면, 유지관리비용은 줄었다. 이는 비용함수의 차이에서 나는 현상으로, 도로부문의 유지관리 비용은 별도로 산정하나 철도부문의 유지관리비용은 차량운행비용 원단위에 포함시키기 때문이다. 철도 투자사업인 대안 208의 사고비용과 환경비용이 도로 투자사업인 대안 12에 비하여 많이 들어 있다. 대안 240은 대안 208에 비하여 두번째 철도 후보링크를 하나를 더 건설하는 대안이지만, 비용구조는

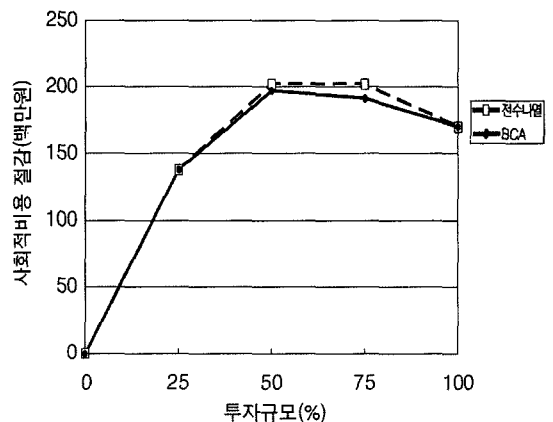
동일하다. 이런 현상은 네트워크 설계모형에서 종종 나타나는 현상으로 추가된 링크에 교통량이 하나도 배정되지 않기 때문에 나타난다. 대안 255(Do-Everything)은 대안 208에 비하여 통행시간비용과 차량운행비용은 약간 줄이나, 나머지 비용항목은 오히려 그 이상으로 늘어나, 사회적 비용 측면에서는 오히려 불리하다.

대안 208과 대안 255의 비교에서, 투자는 늘어났는데, 사회적 비용이 오히려 늘어남을 보았는데, 이 현상을 Braess의 역설과 함께 논의하는 것은 의미있는 일이다. Braess의 역설의 본래의 의미는 교통 네트워크를 개선시킨 후의 총통행시간이 개선 전의 총통행시간보다 오히려 늘어나는 현상을 의미한다(Sheffi, 1985). 그리고 이런 현상은 매우 드문 현상으로 알려져 있다(Sheffi, 1985, Yang and Bell, 1998). 그런데 교통 네트워크의 성능을 논할 때, 본 논문에서와 같이 통행시간비용 및 다른 비용항목을 포함하는 사회적 비용을 고려한다면, Braess의 역설은 흔한 현상이 된다. 앞서 살펴본 <그림 3>에서 두 점을 골라서 비교해보면, 더 많은 투자를 요하는 대안이 더 큰 사회적 비용을 초래하는 경우를 얼마든지 찾을 수 있다. 이런 현상은 우리가 교통투자 의사결정을 할 때, 후보링크를 매우 신중하고 현명하게 선택해야 함을 의미한다. 좀 더 논의를 진행하면, Do-Everything 대안을 시행할 만큼의 재원이 있다 하더라도, 무조건 모든 사업을 시행하는 것이 아니라, 적은 사업비로 더 좋은 결과를 얻을 수 있는 대안은 없는가를 심사숙고해야 한다는 결론에 이른다.

<표 3>은 예산 가용 시나리오별로 전수나열 방법으로 찾은 최적 대안과 본 논문에서 제시한 해법으로 찾은 대안을 비교한 표이다. <표 3>의 최적대안번호는 256개 대안 중에서 각 시나리오별 최적대안을 의미하고, 이 번호의 이진법 표현에서 각 대안이 어느 후보링크를 건설하는 것인지를 알 수 있다. 전체 소요 투자비의 25%가 가용한 시나리오의 경우, 제시된 해법은 교통배분을 16회 실시하면서 전수나열 방법과 같은 최적대안을 찾아 냈다. 전수나열 방법으로는 교통배분을 23회 실시해야 한다. 50% 가용 시나리오에서 전수나열 방법을 사용하면 교통배분을 123회 실시해야 하나, 제시된 해법으로는 51회 실시하면 된다. 계산상의 이득은 보았지만, 제시된 해법은 진짜 최적대안을 찾지는 못하고, 그에 근접한 해답을 찾았음을 알 수 있다. 75% 가용 시나리오에서도 유사한 결과가 나왔다. 이 결과에 비추어 볼 때, 계산부담을 줄이면서 진짜 최적

<표 3> 전수나열과 제시된 해법의 성능 비교

시나리오	해법	최적대안번호	이진법표현	사회적 비용	교통배분회수
Do-Nothing	-	0	00000000	7.91E+8	1
25% 가용	전수나열	12	00001100	6.53E+8	23
	BCA	12	00001100	6.53E+8	16
50%가용	전수나열	208	11010000	5.89E+8	136
	BCA	209	11010001	5.94E+8	51
75%가용	전수나열	240	11110000	5.89E+8	233
	BCA	245	11110101	6.00E+8	30
Do-Everything	-	255	11111111	6.21E+8	1



<그림 4> 예산 시나리오 별 최적대안의 투자효과

해에 가까운 해답을 찾고자 하는 Heuristic 해법의 본래 취지에 제시된 해법이 부합함을 알 수 있다.

<표 2>와 <표 3>은 가용 예산 시나리오별로 최적대안을 시행할 경우 사회적 비용이 어떻게 변하는가를 보여준다. 사회적 비용 변화 추이를 기존 네트워크의 사회적 비용과 비교하면, 투자의 효과로 얻어지는 사회적 비용 절감이 되며, 이를 <그림 4>에 표시하였다. 전수나열로 표시된 선이 진짜 최적대안을 시행한 효과이고, BCA로 표시된 선이 본 논문에서 제시한 해법으로 찾은 대안을 시행한 효과이다. 이 그림에서 투자규모가 늘어날수록 투자효과는 점점 줄어드는 한계효과감소현상을 볼 수 있다.

VI. 결론 및 추후 연구

본 논문에서는 교통시설투자결정을 위한 네트워크 설계 모형과 해법 알고리즘이 제시되었다. 모형화 측면에서 볼 때, 단순히 총통행시간만을 고려하는 의사결정이 아니라 보다 포괄적인 사회적 비용을 감안할 수 있는 모형이라는 점과, 도로만으로 이루어진 네트워크가 아니고

도로와 철도로 이루어진 네트워크를 다룰 수 있다는 점에서 기존의 모형보다 좀 더 발전시켰다고 볼 수 있다.

알고리즘 측면에서 보면, 정수형 변수의 Bit 구조를 활용하여 계산복잡성이 심각한 이산형 최적화 문제를 다룰 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

현실 반영 능력에서 보면 상식적으로 인지하고 있는 한계효과감소법칙이 예제를 통해 재현되었고, 시설투자 원가구조가 명확하다면 Cost/Benefit 분석을 통하여 최적의 투자규모와 최적 네트워크 대안을 함께 찾을 수 있는 모형으로 발전할 수 있다.

본 논문의 한계로는 다음과 같다. 첫째, 사회적 비용을 계산하는데 사용한 비용원단위 값이 시간적으로 오래된 값이라 현재 시점의 비용계산은 못한다. 둘째, Sheffi의 수단분담/교통배분 결합모형을 하위모형으로 적용했기 때문에 그의 모형의 한계는 곧바로 제시된 모형의 한계가 된다. 그의 모형에서 수단분담률은 LOGIT 모형으로 추정하는 것으로 가정하였는데, 이때 비효용함수의 독립변수로 기종점간 통행시간과 기종점별 특수성 파라미터만 고려하였다. 일반화교통비용 형태로의 발전이 가능한 부분이다. 셋째, 제시된 해법 알고리즘은 Braess의 역설이 존재하지 않을 때 최적대안을 찾을 수 있는데, 예제의 대안 208과 대안 255의 비교에서 보듯이 시설은 늘었는데 사회적 비용이 오히려 늘 수 있다는 점에서 Braess의 역설은 실제로 존재함을 발견하였다. 이는 알고리즘 수행 중에 교통량평가 및 비용산출을 하지 않고 넘어간 대안 중에 해법이 찾은 최적대안보다 더 좋은 대안이 있을 수 있다는 가능성을 배제하지 못한다. 이런 점에서 Braess의 가설 존재 여부와 관계없이, 적절한 수준의 계산량으로 최적의 네트워크 대안을 찾을 수 있는 알고리즘의 개발이 추후 연구과제이다.

참고문헌

1. 건설교통부(1999), *고속도로 민자유치 타당성 분석 연구*.
2. 건설교통부(1998), *교통통계연보*.
3. 국토연구원(1999), *도로사업투자분석 판람*.
4. 김재영·임강원(2000), "유전자 알고리즘을 이용한 변동부등식 제약하의 연속형 가로망 설계", *대한교통학회지*, 제18권 제1호, 대한교통학회, pp.61~73.
5. 동부엔지니어링(1997), *Inland Water-ways in Korea: Pre-feasibility Study*.

6. 서선덕(1994), *지역간 철도 운행비용 모형의 정립*.
7. 오세창(1995), "교통망 설계 문제의 해결을 위한 교통망 집성화 절차", *대한교통학회지*, 제13권 제3호, 대한교통학회, pp.87~98.
8. 이상건·임영태·김병중·김원규(2000), *국가수송 분담구조의 적정성 평가모형에 관한 연구*, 국토연구원 보고서 2000-26.
9. 임용택(2004), "민감도 분석을 이용한 연속형 교통망설계모형의 개발", *대한교통학회지*, 제22권 제2호, 대한교통학회, pp.65~76.
10. 임용택·임강원(2004), "Bi-level program에서 Cournot-Nash게임과 Stackelberg게임의 비교연구", *대한교통학회지*, 제22권 제7호, 대한교통학회, pp.99~106.
11. 한국개발연구원(2000), *도로부문사업의 예비타당성 조사 표준지침(개정판)*.
12. Anandalingam, G. and Friesz, T.L.(1992), "Hierarchical Optimization: An Introduction", *Annals of Operations Research, Vol. 34: Hierarchical Optimization*, Edited by Anandalingam, G. and Friesz, T.L., J.C. Baltzer AG, pp.1~11.
13. Asakura, Y. and Sasaki, T.(1990), "Formulation and Feasibility Test of Optimal Road Network Design Model with endogenously Determined Travel Demand", *Proceedings of the 5th World Conference on Transport Research*, Yokohama, Japan, pp.351~365.
14. Boyce, D.E. and Jason, B.N.(1980); "A Discrete Transportation Network Design Problem with Combined Trip Distribution and Assignment", *Transportation Research Part B*, Vol.14, pp.147~154.
15. Chen, M. and Alfa, A.S.(1991), "A Network Design Algorithm Using a Stochastic Incremental Traffic Assignment Approach", *Transportation Science*, Vol.25, pp.215~224.
16. Cho, H. and Lo, S.(1999), "Solving Bilevel Network Design Problem Using a Linear Reaction Function without Nondegeneracy Assumption", *Transportation Research Records 1667*, Paper No. 99-1486, pp.96~106.
17. Davis, G.A.(1994), "Exact Local Solution of

- the Continuous Network Design Problem via Stochastic User Equilibrium Assignment", *Transportation Research Part B*, Vol.28, pp.61~75.
18. Friesz, T.L., Cho, H.J., Mehta, N.J., Nam, K., Shah, S.J. and Tobin, R.L.(1992), "A Simulated Annealing Approach to the Network Design Problem with Variational Inequality Constraints", *Transportation Science*, Vol. 26, No. 1, pp.12~26.
 19. Kim, T.J.(1990), *Advanced Transport and Spatial Systems Models: Applications to Korea*, Springer-Verlag.
 20. Kocur, G. and Hendrickson, C.(1982), "Design of Local Bus Service with Demand Equilibration", *Transportation Science*, Vol.16, pp.149~170.
 21. LeBlanc, L.J. and Boyce, D.E.(1986), "A Bilevel Programming Algorithm for Exact Solution of the Network Design Problem with User-Optimal Flows", *Transportation Research Part B*, Vol. 20, No.3, pp.259~265.
 22. Lo, H.K., Yip, C. and Wan, Q.K.(2004), "Modeling Competitive Multi-modal Transit Services: a Nested LOGIT Approach", *Transportation Research Part C*, Vol. 12, pp.251~272.
 23. Poorzahedy, H. and Turnquist, M.A.(1982), "Approximate Algorithm for the Discrete Network Design Problem", *Transportation Research Part B*, Vol. 16, No.1, pp.45~55.
 24. Sheffi, Y.(1985), *Urban Transportation Networks*, Prentice Hall.
 25. Solanki, R.S., Gorti, J.K. and Southworth, F. (1998), "Using Decomposition in a Large-scale Highway Network Design with a Quasi-optimization Heuristics", *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No.2, pp.127~140.
 26. Suh, S. and Kim, T.J.(1992), "Solving Nonlinear Bilevel Programming Models of the Equilibrium Network Design Problem: A Comparative Review", *Annals of Operations Research*, Vol. 34: *Hierarchical Optimization*, Edited by Anandalingam, G. and Friesz, T.L., J.C. Baltzer AG, pp. 203~218.
 27. William, H.C.W.L. and Lam, W.M.(1991), "Transport Policy Appraisal with Equilibrium Models 1: Generalized Traffic and Highway Investment Benefits", *Transportation Research Part B*, Vol.25, pp.253~279.
 28. Wong, S.C. and Yang, H.(1997), "Reserve Capacity for a Signal Controlled Road Network", *Transportation Research Part B*, Vol.31, pp.397~402.
 29. Yang, H. and Bell, M.G.H.(1997), "Traffic Restraint, Road Pricing and Network Equilibrium", *Transportation Research, Part B*, Vol.31, pp.303~314.
 30. Yang, H. and Bell, M.G.H.(1998), "Models and Algorithms for Road Network Design: a Review and Some New Developments", *Transport Reviews*, Vol.13, No.3, pp.257~278.

✉ 주 작 성 자 : 김병중

✉ 논문투고일 : 2005. 6. 11

논문심사일 : 2005. 8. 17 (1차)

2005. 10. 12 (2차)

2005. 11. 8 (3차)

심사판정일 : 2005. 11. 8

✉ 반론접수기한 : 2006. 4. 30

부록: 예제에서 사용된 데이터

A. 기존 네트워크 데이터

- # of nodes = 9
- # of highway links = 12
- # of rail links = 4

highway link data

from	to	거리	FF속도	용량
1	2	70	100	4000
1	4	50	100	2000
2	3	70	100	2000
2	5	50	100	4000
3	6	50	100	2000
4	5	80	100	2000
4	7	100	100	2000
5	6	80	100	2000
5	8	50	100	4000
6	9	100	100	2000
7	8	70	100	2000
8	9	70	100	4000

rail link data

from	to	거리	FF속도	용량
1	2	70	80	999999
2	5	50	80	999999
5	8	50	80	999999
8	9	70	80	999999

B. OD 교통수요 데이터

of OD = 12

OD demand

from	to	수요
1	3	3000
1	7	3000
1	9	4000
3	1	3000
3	7	2500
3	9	2500
7	1	3000
7	3	2500
7	9	3000
9	1	4000
9	3	2500
9	7	3000

C. 후보 투자사업 데이터

- 총소요예산 = 1,060
- # of highway candidate links = 4
- # of rail candidate link = 4

highway candidates

from	to	거리	FF속도	용량	투자소요
1	5	100	100	2000	100
5	9	150	100	2000	150
3	5	100	100	2000	100
5	7	150	100	2000	150

rail candidates

from	to	거리	FF속도	용량	투자소요
1	5	100	80	999999	110
5	9	150	80	999999	170
3	5	100	80	999999	110
5	7	150	80	999999	170