

■ 論 文 ■

목표지향 기종점 교통수요 관리모형연구
Methods for a target-oriented travel demand management

임 용 택

(전남대학교 물류교통학과 부교수)

목 차

I. 서론	1) 예제교통망
II. 교통수요관리기법과 모형화의 한계	2) 초기 통행배정결과
III. 교통수요관리모형의 개발	2. 분석결과
1. 기종점간 목표 통행시간달성을 위한 수요관리모형	1) 기종점간 목표 통행시간 달성을 위한 모형 결과
2. 특정지역 목표 교통량/용량비 달성을 위한 수요관리모형	2) 특정지역 목표 교통량/용량비 달성을 위한 모형결과
IV. 모형의 평가	V. 결론 및 향후연구
1. 예제 교통망 및 초기 통행배정결과	참고문헌

Key Words : 교통수요관리모형, 목표지향, 교통망설계, 민감도, 수리모형, 확률적 통행배정 travel demand management model, target-oriented, network design problem, sensitivity, mathematical program, stochastic traffic assignment

요 약

교통수요관리(travel demand management)는 통행수요를 적절히 제어함으로서 교통혼잡을 최소화시키려는 목적으로 시행되는 제반 교통정책이라 할 수 있다. 교통수요를 적절히 관리하기 위해서는 먼저, 정책목표를 설정하고 이를 달성할 수 있는 최적의 정책변수들을 찾아야 하는데, 현재 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이런 측면에서 본 연구는 설정된 정책목표를 달성하기 위한 교통수요관리모형과 이를 풀기 위한 알고리즘을 제시한다. 교통수요관리모형은 2가지로 개발되는데, 첫 번째 모형은, 기점과 종점간 평균 통행시간을 대상으로 목표치를 설정한 후 이 목표치를 달성하기 위한 적정 통행수요를 구하는 문제이며, 두 번째 모형은 혼잡이 심한 특정한 지역을 대상으로 해당지역에 포함된 링크의 교통량/용량비가 일정한 목표수준을 유지되도록 하는 최적 통행수요를 구하는 문제이다. 간단한 예제 교통망을 대상으로 본 연구에서 제시한 모형들을 평가한다.

Several travel demand management schemes have been used for controlling overloaded traffics on urban area. To maximize efficiency of the travel management, traffic manager has to set target level that we try to arrive in advance, and then to find optimal variable to attain this goal. In this regard, this paper presents two travel demand management models, expressed by mathematical program, and also presents their solution algorithms. The first is to find optimal travel demand for origin-destination (OD) pair, based on average travel time between the OD pair, and the second is based on the ratio of volume over capacity on congested area. An example is given to test the models.

I. 서론

대도시 교통혼잡을 완화시키는 정책들은 크게 교통시설 공급측면의 정책과 교통수요관리측면의 정책으로 구분할 수 있다. 그러나, 새로운 도로의 신설이나 확장과 같은 교통시설의 공급에는 상당한 비용과 시간이 소요되기 때문에 최근 수요관리측면의 각종 정책들이 제시되고 있다. 교통수요관리(travel demand management)는 교통시설의 공급없이 통행수요를 적절히 제어함으로써 교통혼잡을 최소화하려는 목적으로 시행되는 제반 교통정책이라 할 수 있다. 교통수요관리 정책은 주로 혼잡시간대의 통행수요발생을 억제하거나, 시공간적인 차량의 분산, 대중교통수단 이용촉진 등을 통하여 통행패턴을 변화시킴으로서 주어진 교통시설조건과 통행수요간의 균형을 이루려는 정책이다. 이런 교통수요관리 정책들이 목적하는 효과를 얻기 위해서는 먼저 교통혼잡수준에 대한 구체적인 정책목표가 필요하다. 예를 들어 특정지역의 서비스 수준(level of service, LOS)을 B로 유지시키겠다는 등과 같은 정책목표가 수립되어야 이에 맞게 교통수요관리기법들을 도입할 수 있기 때문이다. 따라서, 교통수준을 평가하고 목표수준을 달성하기 위한 모형화된 틀이 필요한데, 현재 이에 대한 연구는 찾아보기 어려우며, 대부분의 연구들이 수요관리기법들이 갖고 있는 특징이나 시행시의 방법론에 치우쳐 있는 실정이다.

이런 측면에서 본 연구는 설정된 정책목표를 달성하기 위한 교통수요관리모형을 제시하고 간단한 예제를 통하여 평가코자 한다. 현재 정책목표를 달성하기 위한 다양한 정책변수들이 존재하나, 본 연구에서는 기종점간 통행수요(origin-destination travel demand)만을 대상으로 한정한다. 따라서 설정된 정책목표를 달성하기 위한 최적 통행수요(optimal travel demand)를 구하는 문제로 모형을 구성하며 다음과 같이 2가지 형태로 제시한다. 첫 번째 모형은, 기점과 종점간 평균 통행시간을 대상으로 목표치를 설정한 후 이 목표치를 달성하기 위한 적정 통행수요를 구하는 문제이며, 두 번째 모형은 혼잡이 심한 특정한 지역을 대상으로 해당지역에 포함된 링크의 교통량/용량비(v/c)가 일정한 목표수준을 유지되도록 하는 최적 통행수요를 구하는 문제이다. 여기서 두 번째 모형은 관측교통량을 이용한 기종점 통행량추정문제(OD matrix estimation problem)와 개념적으로 유사한데, 기존 기종점 통행량 추정문제가 관측교통량에 배정교통량을 일치시키는 통행수

요를 탐색하는 데 반해, 본 연구는 관리자가 정한 목표수준(v/c)를 만족시키는 통행수요를 찾는다는 점에 차이가 있다. 관측교통량으로부터 기종점 행렬을 추정하는 문제는 국내외로 많은 연구들이 수행되어 왔으며(Cascetta, 1984; McNeil, et al., 1985; Bell, 1991; Van Zulyen, et al., 1980; Spiess, 1987; 임용택외,2000; 백승걸외,2000; 백승걸외,2001; 이승재외,2000; 김종형외,2001; 이현주외, 2004), 최근 임용택 (2006)은 목적함수의 gradient를 이용하여 OD통행량을 추정하는 논문을 발표하였다.

다음절에서는 현재까지 제시된 교통수요관리기법들에 대하여 간단히 살펴보고, 이를 모형화할때 발생하는 모형의 한계를 기술한다. 제3절에서는 본 연구에서 제시하는 교통수요관리모형에 대하여 상세히 설명하며, 이어 제4절에서 본 연구에서 개발된 모형들을 평가한다.

II. 교통수요관리기법과 모형화의 한계

교통혼잡의 정도에 따라 통행수요를 적절히 관리하는 방안들이 현재까지 다양하게 제시되어 왔다. 일반적으로 교통수요관리기법은 경제적인 기법, 행정적인 기법, 대중교통으로의 수단전환, 시공간적 통행량 분산기법, 그리고 통행수요 발생자체를 관리하는 기법 등으로 구분되는데, 혼잡통행료의 부과, 주차세인상 등은 경제적인 기법에 속하며, 차량 부제운행, 불법주차단속 등은 행정적인 기법이다. 또한 개인승용차 이용자를 버스나 도시철도와 같은 대중교통으로 수단전환을 유도하는 제반 방법이 있으며, 교통정보를 제공하거나 출근시차제 등은 시공간적으로 통행수요를 분산하는 방법들이고, 재택근무는 통행수요 발생자체를 억제하는 기법이다.

이런 교통수요기법들을 현장에 실행하기 위해서는 그 효과를 사전에 평가할 필요가 있는데, 현재 주로 이용하는 방법은 수요관리 기법의 시행전후 비교를 통하여 그 효과를 평가하고 있어 사후적인 평가에 치우쳐진 측면이 있다. 그러나, 시행오차를 줄이기 위해서는 수요관리기법을 적용하기 전에 사전에 그 효과를 평가하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 해당 기법을 모형화하고 평가할 수 있는 방법론이 필요한데, 현재까지 제시된 대부분의 평가방법들은 그 적용이 제한적이거나 여러번의 반복과정을 거쳐야 하는 어려움이 있었다. 예를 들어, 어떤 도시의 교통혼잡을 줄이기 위하여 부제운행을 검토하는 경우, 먼저 10부제를 시행한다고 가정(기종점 통행수요의

10% 감소)하고, 통행배정을 수행하여 해당지역의 교통 혼잡을 판단한다. 그런데 결과로 도출된 혼잡정도가 당초 목표치 보다 높은 경우(아직도 혼잡한 경우)에는 5부제 시행(기종점 통행수요 20%감소)을 가정하여 다시 분석하는 반복적인 과정을 거치게 된다. 주차요금의 경우도, 현재보다 10%인상, 20%, 30%인상 등 각각의 경우에 대한 분석을 개별적으로 수행해야하는 문제가 있다. 즉, 이런 접근방법은 여러 경우의 수에 대하여 반복적으로 분석해야 하는 비효율이 따른다. 따라서, 이런 비효율을 해소하기 위해서는 좀 더 계량화된 최적화 기법이 요구되며, 본 연구에서 다루고자 하는 것이 이런 계량화된 분석모형을 개발하는 것이다.

III. 교통수요관리모형의 개발

본 절에서는 교통수요를 효과적으로 관리하기 위하여 설정된 목표치를 달성하기 위한 최적 통행수요를 구하는 모형을 다음과 같이 2가지로 제시한다. 여기서 제시되는 모형은 목표지향 교통망설계모형(target-based network design model)에 기반을 두고 있으며, 이에 대해서는 임용택(2009)에 자세히 기술되어 있다. 운전자의 경로선택 행위는 로짓모형(logit model)을 이용하며, 따라서 확률적 사용자균형(stochastic user equilibrium)원리를 따른다고 가정한다.

1. 기종점간 목표 통행시간달성을 위한 수요관리모형

먼저, 기종점간의 통행시간(OD travel time)을 척도로 사용하여 교통관리자가 기점에서 종점까지 소요되는 평균통행시간에 대한 목표수준을 설정하고 이를 달성하기 위한 최적 통행수요를 구하는 문제를 살펴보자. 이 문제는 목표로 설정된 기종점 rs 간 통행시간(C_{rs}^*)과 통행배정모형에서 산출된 기종점간 통행시간(C_{rs})의 차이를 최소화시키는 통행수요(q_{rs})를 구하는 문제로 구성할 수 있다.

$$\min L(C_{rs}(q_{rs})) = \frac{1}{2} \sum_{rs} (C_{rs} - C_{rs}^*)^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t. } q_{rs} = F(C_{rs}) \quad (2)$$

$$f_k^{rs} - q_{rs}P_k^{rs} = 0 \quad (3)$$

여기서, C_{rs}^* 는 미리 설정되는 목표수준(target level)으로 자유교통류 상태에서의 기종점간 통행시간을 기준으로 다음과 같이 설정된다고 가정한다.

$$C_{rs}^* = \alpha \overline{C_{rs}} \quad (4)$$

여기서, $\overline{C_{rs}}$ 는 경로상에 통행량이 없는 경우의 기종점 rs 간 평균 통행시간(free-flow travel time for OD pair rs)으로 실제 현장에서는 속도제한이 고려된 설계속도 통행시간(design speed travel time)의 의미를 갖는다. α 는 목표계수(target factor, Tf)로 1보다 큰 상수값이다. 즉, $\alpha = 1.0$ 이면 목표수준이 자유교통류 기종점 통행시간이 되며, $\alpha = 1.2$ 이면, 자유교통류 기종점 통행시간의 1.2배를 목표수준으로 설정하게 된다.

또한, 목적함수에 있는 C_{rs} 는 기종점 rs 간 교통량가중 평균통행시간(traffic-weighted average OD travel time)으로 다음과 같이 계산된다.

$$C_{rs} = \frac{\sum_k C_k^{rs} f_k^{rs}}{\sum_k f_k^{rs}} = \frac{\sum_k C_k^{rs} f_k^{rs}}{q_{rs}} \quad (5)$$

여기서, C_k^{rs} 는 기종점 rs 간 경로 k 를 통행하는 시간으로 식(6)과 같은 로짓모형(logit model)으로부터 산출되며, f_k^{rs} 는 기종점 rs 간 경로 k 를 통행하는 통행량으로 제약식(3)으로부터 계산된다.

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-\theta C_k^{rs})}{\sum_w \exp(-\theta C_w^{rs})} \quad (6)$$

따라서, 제약조건 식(3)은 확률적 통행배정(stochastic traffic assignment)을 나타낸다. 또한, 제약식(2)는 통행수요가 기종점간 통행시간의 함수임을 나타낸다.

식(1)의 최소화문제를 풀기 위하여, 제약조건식(2)의 역함수를 취하면,

$$C_{rs} = F^{-1}(q_{rs}) \quad (7)$$

위 식을 q_{rs}^0 에서 1차 선형근사화(linear approximation)

시키면 다음과 같이 표현된다.

$$C_{rs} \approx C_{rs}(q_{rs}^0) + \left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} (q_{rs} - q_{rs}^0) \quad (8)$$

여기서, 만약 2차 또는 그 이상으로 근사시킬 경우, 원 함수식과 좀 더 유사하게 되어 해를 빨리 찾게 되는 장점이 있으나 이 경우, 2차 또는 그이상의 미분값을 구해야 하는 어려움이 있어 일반적으로 1차 선형으로 근사화시킨 후 반복과정을 통하여 해를 찾게 된다. 이들 경우 모두 최종적으로 도출되는 해는 동일하나, 1차 선형근사시 수렴에 필요한 시간이 더 걸린다는 한계가 있다. 식(8)를 목적함수 식(1)에 대입하면 다음과 같다.

$$L(q_{rs}) = \frac{1}{2} \sum_{rs} \left\{ C_{rs}(q_{rs}^0) + \left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} (q_{rs} - q_{rs}^0) - C_{rs}^* \right\}^2$$

위 최소화문제를 풀기 위하여 목적함수를 통행수요(q_{rs})로 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial q_{rs}} = \left\{ C_{rs}(q_{rs}^0) + \left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} (q_{rs} - q_{rs}^0) - C_{rs}^* \right\} \cdot \left(\left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} \right) = 0$$

최종적으로 다음과 같은 수식을 얻게 된다.

$$q_{rs} = q_{rs}^0 - \left[\left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} \right]^{-1} (F^{-1}(q_{rs}^0) - C_{rs}^*) \quad (9)$$

따라서, 식(9)를 통하여 위 목적함수를 최소화시키는 최적설계변수, 즉 최적통행수요를 구할 수 있다. 여기서 식(9)에 포함된 미분항은 식(5)와 식(7)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial F^{-1}(q_{rs})}{\partial q_{rs}} = \frac{\partial C_{rs}}{\partial q_{rs}} = \frac{-\sum_k C_k^{rs} f_k^{rs}}{(q_{rs})^2} \quad (10)$$

또한, 식(9)를 알고리즘 형태(algorithmic form)로 표현하면 다음과 같다.

$$q_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} - \left[\left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^{n-1}} \right]^{-1} (F^{-1}(q_{rs}^{n-1}) - C_{rs}^*) \quad (11)$$

따라서, 위 최소화문제를 풀기 위한 알고리즘은 다음과 같이 정리된다.

[step 0] 초기화(initialization)

반복횟수 $n=0$ 설정

초기 설계변수 q_{rs}^0 설정

목표 상수 α 설정 및 $\overline{C_{rs}}$ 를 계산하여 목표수준 C_{rs}^* 설정

[step 1] $n = n + 1$

[step 2] q_{rs}^{n-1} 를 가지고 로짓 확률적 통행배정모형을 이용하여 C_{rs} 계산

[step 3] 통행수요 갱신(update)

$$q_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} - \left[\left. \frac{\partial F^{-1}}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^{n-1}} \right]^{-1} (F^{-1}(q_{rs}^{n-1}) - C_{rs}^*)$$

[step 4] 수렴성 검토(convergence test)

만약 $|q_{rs}^n - q_{rs}^{n-1}| < \epsilon$ 이면 정지, 그렇지 않으면 [step1]로 진행. 여기서, ϵ 는 수렴조건으로 아주 작은 값으로 미리 설정

여기서, [step 2]의 확률적 통행배정법은 다양한 기법들이 존재하나, 본 연구에서는 임용택(2003)의 직접 로짓배정법을 사용한다.

2. 특정지역 목표 교통량/용량비(v/c) 달성을 위한 수요관리모형

이번 절에서는 교통수요관리가 필요한 특정지역에 목표 서비스 수준(target LOS)을 설정하고 이를 달성하기 위한 최적 교통수요를 구하는 문제를 다루고자 한다. 서비스 척도(measure of effectiveness)로는 통행시간, 통행속도, 교통량/용량비 등 다양하게 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 교통량/용량비(v/c)를 서비스 척도

로 고려하다. 따라서, 본 문제는 목표 대상지역에 속하는 링크의 교통량/용량비가 설정된 목표값과 같아지도록 하는 기중점 통행수요를 구하는 문제가 되며, 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\min L(v(q_{rs})) = \frac{1}{2} \sum_{b \in B} \left(\frac{v_b}{c_b} - X_b^* \right)^2 \quad (12)$$

$$\text{s.t. } f_k^{rs} - q_{rs} p_k^{rs} = 0 \quad (13)$$

$$v_b = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \delta_{bk}^{rs} \quad (14)$$

여기서, B 는 교통관리가 필요한 지역에 포함된 링크들의 집합이며, v_b 는 링크 b 의 교통량(volume)을 나타내고, c_b 는 링크 b 의 용량(capacity)이다. 목적함수의 X_b^* 는 목표(target) 교통량/용량비로 교통운영 또는 관리자가 효율적인 교통수요관리를 위하여 달성코자 설정하는 목표치이다. 따라서, 일반적으로 $0.0 \leq X_b^* \leq 1.0$ 의 범위를 갖는다. 제약조건식(13)은 확률적 통행배정모형(stochastic traffic assignment)으로 f_k^{rs} 는 기중점쌍 rs 간 경로 k 를 이용하는 통행량이고, q_{rs} 기중점쌍 rs 간 통행수요(travel demand)이며, p_k^{rs} 는 기중점 rs 간 경로 k 를 이용하는 확률로서 앞서와 같이 로짓(logit)모형을 사용한다. 또한, 조건식(14)는 링크 교통량과 경로 교통량간의 관계를 나타내는 정의적인 조건(definitional constraint)으로 δ_{bk}^{rs} 는 링크 b 가 기중점 rs 간 경로 k 에 속하면 1, 그렇지 않으면 0인 인시던스변수(incidence variable)이다. 따라서, 목적함수는 확률적 통행배정으로부터 산출된 교통량/용량비($\frac{v_b}{c_b}$)와 설정된 목표수준과의 차이를 최소화시키는 기중점 통행수요(q_{rs})를 구하는 문제가 된다.

식(12)로 표현되는 최소화문제는 앞 절과 동일하게 해를 구할 수 있는데, 먼저 식(13)과 식(14)로부터 $v_b = v_b(q_{rs})$ 의 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서, 이식을 q_{rs}^0 에서 1차 선형근사화(linear approximation)시키면 다음과 같이 표현된다.

$$v_b \approx v_b(q_{rs}^0) + \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} (q_{rs} - q_{rs}^0) \quad (15)$$

식(15)를 목적함수 식(12)에 대입하면 다음과 같다.

$$L(q_{rs}) = \frac{1}{2} \sum_b \left\{ \frac{1}{c_b} \left(v_b(q_{rs}^0) + \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} (q_{rs} - q_{rs}^0) \right) - X_b^* \right\}^2$$

따라서, 이식을 통행수요(q_{rs})로 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial q_{rs}} = \sum_b \left\{ \frac{1}{c_b} \left(v_b(q_{rs}^0) + \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} (q_{rs} - q_{rs}^0) \right) - X_b^* \right\} \cdot \left(\frac{1}{c_b} \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} \right) = 0$$

$$q_{rs} = q_{rs}^0 - \left[\sum_b \left\{ \frac{1}{c_b} \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} \right\}^2 \right]^{-1} \cdot \sum_b \left\{ \frac{v_b(q_{rs}^0)}{c_b^2} \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} - \frac{1}{c_b} \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^0} X_b^* \right\} \quad (16)$$

따라서, 식(16)을 통하여 최적설계변수(최적통행수요)를 구할 수 있다. 여기서 식(16)에 존재하는 미분항 $\frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}}$ 는 체인룰(chain rule)과 제약조건식(13),(14)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} = \frac{\partial v_b}{\partial f_k^{rs}} \frac{\partial f_k^{rs}}{\partial q_{rs}} = \delta_{bk}^{rs} p_k^{rs} = p_b^{rs} \quad (17)$$

이상의 과정을 통하여 본 연구에서 제안한 식(12)를 풀기 위한 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

[step 0] 초기화(initialization)

반복횟수 $n=0$ 설정

초기 설계변수 q_{rs}^0 와 목표 서비스수준 X_b^* 설정

[step 1] $n=n+1$

[step 2] q_{rs}^{n-1} 를 가지고 로짓모형을 이용하여 v_b, p_k^{rs} 계산

[step 3] 통행수요 갱신(update)

$$q_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} - \left[\sum_b \left\{ \frac{1}{c_b} \left. \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \right|_{q_{rs}=q_{rs}^{n-1}} \right\}^2 \right]^{-1}$$

$$\cdot \sum_b \left\{ \frac{v_b(q_{rs}^{n-1})}{c_b^2} \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \bigg|_{q_{rs}=q_{rs}^{n-1}} - \frac{1}{c_b} \frac{\partial v_b}{\partial q_{rs}} \bigg|_{q_{rs}=q_{rs}^{n-1}} \right\} X_b^*$$

[step 4] 수렴성 검토(convergence test)

만약 $|q_{rs}^n - q_{rs}^{n-1}| < \epsilon$ 이면 정지,

그렇지 않으면 [step1]로 진행. 여기서, ϵ 는 수렴조건으로 아주 작은 값으로 미리 설정

IV. 모형의 평가

1. 예제 교통망 및 초기 통행배정결과

1) 예제교통망

본 연구에서 제시된 2개의 교통수요관리모형을 평가하기 위하여 <그림 1>과 같은 예제교통망을 사용한다. 예제 교통망은 그림에서 보듯이 9개의 노드와 12개의 링크 그리고 6개의 경로로 구성되어 있으며, 1번 노드가 기점이고 9번 노드가 종점인 하나의 기종점쌍을 갖는다. 각 링크에 대한 속성은 <표 1>에 나와 있으며, 경로집합은 <표 2>와 같다. 초기 통행수요는 $q_{19} = 100$ 통행이며, 확률적 로짓모형에 사용되는 스케일 파라메타 $\theta = 0.02$ 로 설정한다. 또한, 각 링크의 통행비용함수는 다음과 같은 BPR식을 이용한다.

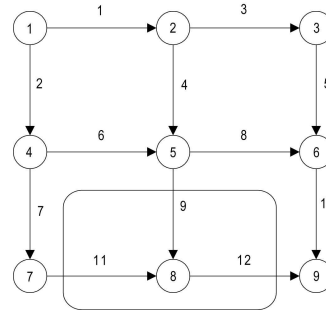
$$t_a = t_{a0} \left[1 + 0.15 \left(\frac{v_a}{c_a} \right)^4 \right]$$

<표 1> 예제 교통망의 네트워크 입력자료

링크번호	초기 통행비용(t_{a0})	용량(c_a)
1	12	35
2	10	35
3	15	20
4	10	35
5	15	20
6	10	35
7	15	25
8	10	35
9	10	35
10	12	35
11	15	20
12	10	35

<표 2> 각 경로의 구성

통행경로	경로구성
Path 1	①→②→③→⑥→⑨
Path 2	①→②→⑤→⑥→⑨
Path 3	①→②→⑤→⑧→⑨
Path 4	①→④→⑤→⑥→⑨
Path 5	①→④→⑤→⑧→⑨
Path 6	①→④→⑦→⑧→⑨



<그림 1> 예제 교통망

그림에서 타원형으로 표시된 지역(링크9,11,12)은 두 번째 모형인 특정지역의 교통량/용량비목표를 분석하기 위하여 설정된 지역이다.

2) 초기 통행배정결과

먼저, 교통수요관리방안이 도입되지 않은 초기상태의 통행배정결과를 살펴보자. 즉, 초기 통행수요 $q_{19} = 100$ 을 확률적 통행배정으로 교통망에 배정한 결과로 <표 3>과 <표 4>에 나타나 있다. <표 3>은 각 링크별 통행비용과 배정된 교통량, 그리고 교통량/용량비(v/c)가 나와 있으며, 특정지역으로 설정된 링크9, 링크11, 링크12의 경우 교통량/용량비가 1.02, 0.77, 1.46 (평균 $v/c=1.08$)으로 나타나

<표 3> 초기 확률적 통행배정결과(링크)

링크번호	링크통행비용	배정교통량	교통량/용량비
1	18.83	48.85	1.40
2	16.84	51.15	1.46
3	15.59	14.34	0.72
4	11.42	34.51	0.99
5	15.59	14.34	0.72
6	11.63	35.75	1.02
7	15.79	15.40	0.77
8	11.42	34.51	0.99
9	11.63	35.75	1.02
10	18.83	48.85	1.40
11	15.79	15.40	0.77
12	16.84	51.15	1.46

<표 4> 초기 확률적 통행배정결과(경로)

항목	경로비용	경로교통량	동등경로비용 (Ec_i^s)	
path (i)	1	68.847	14.340	202.000
	2	60.492	16.948	202.000
	3	58.723	17.559	202.000
	4	58.723	17.559	202.000
	5	56.953	18.191	202.000
	6	65.271	15.403	202.000
C_{19}	61.161	-	-	
\bar{C}_{19}	45.333	-	-	

혼잡함을 알 수 있다. 경로별 배정결과는 <표 4>에 나와 있는데, 여기서 하나 유의할 점은 확률적 사용자 균형(stochastic user equilibrium, SUE)상태가 되면, 각 기종점 별로 사용된 모든 경로에 대하여 동등경로비용(equivalent path cost, Ec)이 동일하게 된다는 것으로, 이는 식(18)과 같이 정의되며 이에 대해서는 임용택(2003)에 자세히 기술되어 있다.

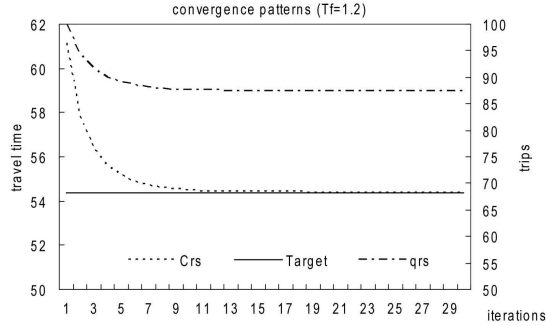
$$Ec_i^s = C_k^{r,s} + \frac{1}{\theta} \ln(f_k^{r,s}) \quad (18)$$

표에서 보듯이 사용된 6개의 경로간 동등경로비용이 모두 동일하여, 확률적 사용자 균형(SUE)에 도달했음을 알 수 있다. 또한, 이때의 평균 통행시간은 $C_{19} = 61.161$ 이며, 경로상에 통행량이 없는 경우의 기종점간 평균 통행시간(free-flow travel time for OD pair)은 $\bar{C}_{19} = 45.333$ 으로 나타났다.

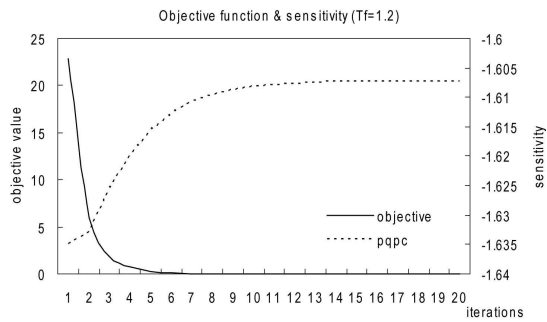
2. 분석결과

1) 기종점간 목표 통행시간달성을 위한 모형결과

먼저, 목표계수(target factor, Tf)를 $\alpha = 1.2$ 로 설정한 경우에 대하여 살펴보자. 이 경우 교통관리자가 목표로 설정한 기종점간 통행시간은 $C_{19}^* = \alpha \bar{C}_{19} = 1.2 * 45.333 = 54.400$ 이 된다. 이 목표 통행시간을 달성하기 위하여 본 연구에서 제시한 모형을 적용한 결과들이 <그림 2>, <그림 3>, 그리고 <표 5>에 나타나 있다. <그림 2>에서 보듯이 반복횟수가 증가함에 따라 기종점 평균통행시간(C_{19})이 목표치인 54.4로 수렴함을 알 수 있으며, 이때 기종점간 통행수요(q_{19})도 초기 100통행에서 87.432통행으로 감소하고 있다. 즉, 기종점간 통행시간을 목표치인 54.4로 유지하기 위해서는 통행수요를



<그림 2> 통행수요와 통행비용의 수렴성($\alpha = 1.2$)



<그림 3> 목적함수와 민감도($\frac{\partial q_{19}}{\partial C_{19}}$)($\alpha = 1.2$)

감소시켜야 함을 의미한다. <그림 3>은 반복횟수에 따른 목적함수값과 민감도값의 변화를 보여주고 있는데, 목적함수값은 지속적으로 감소하여 반복횟수가 7~8회가 되면 0으로 수렴하며, 기종점간 통행시간에 대한 통행수요의 변화율인 민감도 값도 $\frac{\partial q_{19}}{\partial C_{19}} = -1.607$ 로 수렴하고 있다.

즉, 기종점간 통행시간이 1단위 증가하면 통행수요는 1.607 단위 감소함을 나타낸다. <표 5>는 교통수요관리방안이 도입되지 않은 초기상태와 목표치를 도입하여 관리가 이루어진 최종결과를 보여주고 있다. 표에서 보듯이 각 경로들의 통행시간이 감소하고 있으며, 평균 기종점간 통행시간도 초기

<표 5> 초기상태와 최종결과 비교($\alpha = 1.2$)

항목	초기		최종		
	경로비용	동등경로비용	경로비용	동등경로비용	
path (i)	1	68.847	202.000	62.622	188.547
	2	60.492	202.000	53.632	188.547
	3	58.723	202.000	51.798	188.547
	4	58.723	202.000	51.798	188.547
	5	56.953	202.000	49.965	188.547
	6	65.271	202.000	58.920	188.547
C_{19}	61.161		54.400		
q_{19}	100.00 통행		87.432 통행		

<표 6> 목표계수(α)값의 변화에 따른 최적통행수요

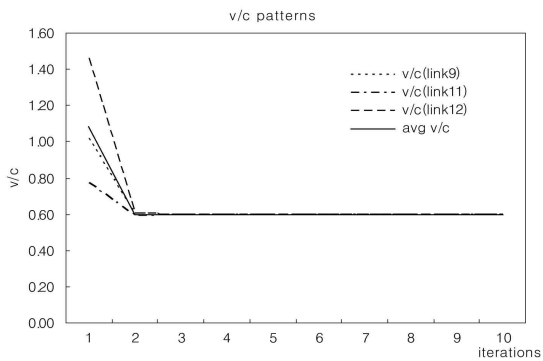
항목	초기	목표계수(α)			
		1.1	1.2	1.3	1.4
C_{19}^*	-	49.866	54.400	58.933	63.466
C_{19}	61.161	49.866	54.400	58.933	63.466
q_{19}	100.00	74.402	87.432	96.381	103.374
$\frac{\partial q_{19}}{\partial C_{19}}$	-	-1.492	-1.607	-1.635	-1.628

61.161에서 54.400인 목표치로 감소하고 있다. 또한, 동등 경로비용이 각 경로간에 동일하여 확률적 사용자 균형 (SUE)상태에 수렴했음을 확인할 수 있다.

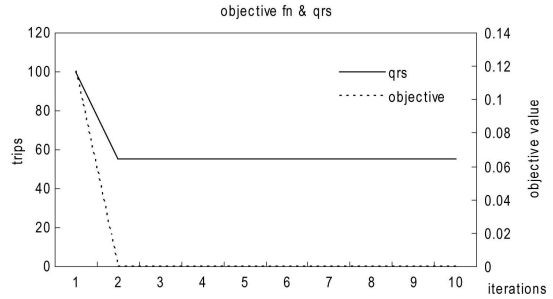
<표 6>은 목표계수(α)값을 1.1에서 1.4까지 변화시킨 경우의 결과들을 보여주고 있는데, 예상했던 대로 목표계수가 작을수록 기중점간 평균통행시간(C_{19})은 작게 되며 통행수요 역시 작게 된다. 그러나 목표계수가 커지면 허용되는 기중점간 평균통행시간 역시 커지기 때문에 더 많은 통행수요가 발생하게 되며, $\alpha = 1.4$ 인 경우 통행수요는 $q_{19} = 103.374$ 통행으로 초기 100통행보다 오히려 더 많은 통행이 발생하게 된다. 즉, 초기 통행조건 보다 혼잡이 더 심해진다고 볼 수 있다.

2) 특정지역 목표 교통량/용량비(v/c) 달성을 위한 모형결과

두 번째 예제에서는 <그림 1>의 예제 교통망에서 링크9, 링크 11, 그리고 링크12로 구성된 지역의 목표 교통량/용량비 달성을 위한 모형의 산출결과를 살펴보자. 목표치를 0.6 ($X_b^* = 0.6$)으로 설정한 경우의 결과값들이 <그림 4>, <그림 5>와 <표 7>에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 각 해당링크별 v/c 와 평균 v/c 가 모두 0.6으로 수렴하고 있으며, 이에 따라 목적함수도 0으로 수렴하고 있다. 또한, 통행수요도 100통행에서 55.316 통행으로 감소하고 있으며, <표



<그림 4> 교통량/용량(v/c)의 수렴성($X_b^* = 0.6$)



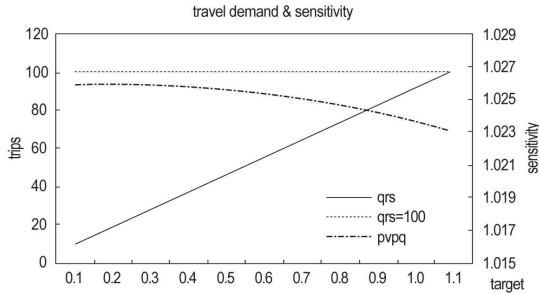
<그림 5> 통행수요와 목적함수의 변화($X_b^* = 0.6$)

<표 7> 초기상태와 최종결과 비교($X_b^* = 0.6$)

항목		초기		최종	
		경로비용	동등경로비용	경로비용	동등경로비용
path (i)	1	68.847	202.000	54.409	141.577
	2	60.492	202.000	44.461	141.577
	3	58.723	202.000	42.473	141.577
	4	58.723	202.000	42.473	141.577
	5	56.953	202.000	40.484	141.577
	6	65.271	202.000	50.430	141.577
q_{19}		100.00 통행		55.316 통행	

7>은 이런 결과들을 정리한 내용이다. 여기서 하나 유의해 야할 점은, 특정지역에 속하는 링크를 통과하는 경로뿐만 아니라, 다른 링크를 통과하는 경로들의 통행수요도 함께 감소하고 있다는 점이다. 이는 본 연구가 특정 목표수준으로 혼잡을 완화시키기 위하여 기중점간 최적 통행수요를 찾는 문제이기 때문에 당연한 결과이기도 하지만, 교통수요관리 측면에서 볼 때 타 경로의 통행수요도 함께 감소한다는 점 (이는 사용자균형 경로선택원리를 가정하더라도 기인함)에서 불합리한 측면이 있다. 이런 결과는 통행수요가 변하기 때문에 발생하는 것으로, 만약 수요를 고정시킨 상태에서 이런 문제를 풀게 되면 타 경로로 통행수요가 분산하게 되어 타 링크의 (v/c)비가 높아질 것으로 예상된다. 그러나, 이런 문제는 혼잡지역 진입제어(metering)관리에 속하는 또 다른 연구과제가 된다.

<그림 6>과 <표 8>은 목표 X_b^* 값을 0.1에서 1.1까지 점진적으로 증가시킨 경우에 도출된 기중점간 통행수요와 민감도($\sum_b \frac{\partial v_b}{\partial q_{19}}$)값의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 목표치가 증가함에 따라 통행수요도 증가하고 있는데, 이는 목표 X_b^* 를 증가시키면 교통망에 더 많은 통행이 가능하기 때문이다. 민감도의 경우는 아주 미세하게 감소하고 있으며, 이는 X_b^* 값이 클수록 기중점 통행수요의 증



<그림 8> 목표값(X_b^*)의 변화에 따른 통행수요와 $\sum_b \frac{\partial v_b}{\partial q_{19}}$ 값의 변화

<표 8> 교통량/용량비 목표(X_b^*)값의 변화에 따른 최적통행수요

항목	평균 v/c	q_{19}	$\sum_b \frac{\partial v_b}{\partial q_{19}}$
초기	1.08	100.00	-
교통량/용량비 목표값 (X_b^*)	0.1	0.10	9.217
	0.2	0.20	18.43
	0.3	0.30	27.65
	0.4	0.40	36.87
	0.5	0.50	46.09
	0.6	0.60	55.31
	0.7	0.70	64.54
	0.8	0.80	73.77
	0.9	0.90	83.00
	1.0	1.00	92.22
1.1	1.10	101.44	

가분에 대한 해당 링크의 증가량이 작아짐을 의미한다. 또한, 표와 그림에서 보듯이 X_b^* 가 1.0에서 1.1사이(정확히는 $X_b^*=1.08$)에서 100이라는 통행수요가 발생하는 데, 이는 초기 통행수요와 같은 값으로 본 모형이 초기 상태를 정확히 재현하고 있음을 알 수 있다. 즉, 모형의 재현력을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 기종점간 통행수요를 관리할 수 있는 수리적인 모형으로 기종점간 통행시간을 목표로 설정한 경우와 특정지역 교통관리를 위하여 해당지역의 교통량/용량비를 목표로 설정한 경우 등 2가지 형태의 교통수요 관리모형과 이를 풀기 위한 알고리즘을 제시하였다. 본 모형들을 간단한 예제 교통망을 통하여 분석한 결과 각 모형들이 수렴함을 확인할 수 있었으며, 여러 가지 의미 있는 결과들도 얻을 수 있었다.

최근 교통수요관리에 대한 관심이 높아짐에도 불구하고

고 이를 네트워크 차원에서 계량화시키려는 연구들이 부족한 실정에서 본 연구는 이를 위한 기초 연구라는 데 의미가 있다고 할 수 있다. 그러나 기초 연구로서 여러 가지 한계를 가지고 있는데, 무엇보다 좀 더 큰 교통망을 대상으로 본 연구에서 제안한 모형을 평가할 필요가 있으며, 적정 목표치(target level)를 구하는 문제도 향후에 논의되어야 할 부분이다. 또한, 차량 부제운행이나 교통정보에 의한 시공간적 통행분산, 혼잡통행료부과 등 다양한 교통수요관리기법들에 대해서도 수리적인 모형개발이 가능할 것으로 보이며, 제IV절 모형의 평가부분에서 기술하였듯이, 통행수요를 고정시킨 상태에서 혼잡지역 진입제어(metering)를 푸는 문제도 향후 연구과제로 남아 있다.

참고문헌

1. 김종형 · 이승재(2001) 다차종통행배분을 이용한 통행량기반 수요추정기법개발, 대한교통학회지, 제19권 제1호, 대한교통학회, pp.77~88.
2. 백승걸 · 김현명 · 임용택 · 임강원(2000) 링크관측 교통량을 이용한 도시부 OD 통행행렬 추정 (GA와 SAB 알고리즘의 비교를 중심으로), 대한교통학회지, 제18권 제6호, 대한교통학회, pp.89~99.
3. 백승걸 · 김현명 · 임용택 · 임강원(2001) 관측교통량을 이용한 다차종 OD 통행량 추정, 대한교통학회지, 제19권 제2호, 대한교통학회, pp.61~72.
4. 이승재 · 김종형(2000) Gradient방법과 일반화최소자승법을 이용한 관측교통량기반 O/D 추정방법에 관한 예측력 비교평가 연구, 대한교통학회지, 제18권 제2호, 대한교통학회, pp.41~51.
5. 임용택 (2003) 확률적 로짓 통행배정모형의 해석 알고리즘, 대한교통학회지, 제21권 제2호, 대한교통학회, pp.95~105.
6. 임용택 (2006) 확률적 통행배정하에서 기종점 통행량 추정 모형의 개발, 대한교통학회지, 제24권 제4호, 대한교통학회, pp.149~159.
7. 임용택 (2009) 목표지향 교통수단선택을 위한 연속형 교통망설계모형, 대한교통학회지, 제27권 제6호, 대한교통학회, pp.169~178.
8. 임용택 · 김현명 · 백승걸(2000) 유전알고리즘을 이용한 OD 추정모형의 개발과 적용에 관한 연구 (서울시 내부순환도로를 대상으로), 대한교통학회지, 제18권 제4호, 대한교통학회, pp.117~126.

9. 이현주 · 이승재(2004) Conjugate Gradient 기법을 이용한 관측교통량 기반 기중점 OD행렬 추정 모형 개발, 대한교통학회지, 제22권 제1호, 대한교통학회, pp.43~61.
10. Bell M. G. H.(1991) The Estimation of Origin-Destination Matrices by Constrained Generalised Least Squares, Transportation Research 25B, pp.13~22.
11. Cascetta E. (1984) Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data : generalized least squares estimator, Transportation. Research 18B, pp.289~299.
12. McNeil S. Hendrickson C.(1985). A regression formulation of the matrix estimation problem, Transportation Science Vol. 19, pp.278~292.
13. Spiess,H.(1990) A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem, INRO
14. Willumsen, L.G.(1978) Estimation of an O-D matrix from traffic counts - A review, Working paper 99.
15. Van Zuylen H. J. and Willumsen L. G. (1980) The most likely trip matrix estimated from traffic counts, Transportation Research 14B, pp.281~293.

✉ 주 작 성 자 : 임용택

✉ 교 신 저 자 : 임용택

✉ 논문투고일 : 2009. 8. 8

✉ 논문심사일 : 2009. 10. 20 (1차)

2009. 10. 27 (2차)

2009. 11. 17 (3차)

✉ 심사판정일 : 2009. 11. 17

✉ 반론접수기한 : 2010. 4. 30

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필