

■ 論 文 ■

돌발상황하의 교통망 통행시간 예측모형

A Travel Time Prediction Model under Incidents

장 원 재

(한국교통연구원 종합교통연구실 연구위원)

목 차

I. 서론	확률적·동적 경로선택모형
1. 연구의 배경	3. 확률론 모형의 적용
2. 문헌 검토	4. 경로전환함수(Route Diversion Function)
3. 연구의 목적 및 방법	
II. 모형개발	III. 모형의 적용
1. 표기방법	IV. 결론 및 향후연구과제
2. 경로선택확률-통행량 간 관계를 이용한	참고문헌

Key Words : 통행시간예측, 동적경로선택, 변등부등식, 동적통행배정, 통행시간정보

Travel time prediction, dynamic route choice, variational inequality, dynamic traffic assignment, travel time information

요 약

전통적으로 동적 교통망 모형들은 실시간 교통운영 문제를 위한 도구로 인식되어 왔다. 이와 같은 모형들을 활용하는 방안 중 하나는 예측통행시간을 생성하는 것이다. 예측통행시간 정보는 통행자들이 혼잡한 지역에서 덜 혼잡한 지역으로 경로를 전환할 수 있도록 해 주는데 이는 교통망의 용량을 효과적으로 활용하게 한다. 이러한 접근 방법은 돌발상황이 발생했을 때 매우 효과적일 것으로 예상된다. 이 때 고려해야 할 사항은 통행시간정보가 미래 통행여건 자체에 영향을 준다는 점이다. 이로 인해 예기치 못한 과잉반응(over-reaction)을 야기할 수 있으며 예측정보의 신뢰도를 떨어뜨리는 요인으로 작용할 수도 있다.

본 연구에서는 돌발상황 발생 시를 대상으로 교통망 차원의 통행시간 예측모형을 제시한다. 이 모형에서는 모든 운전자가 개인 차내 단말기를 통해 상세한 교통정보를 이용할 수 있으며 이러한 정보를 바탕으로 경로선택에 관한 의사결정을 할 수 있다고 가정하였다. 경로기반(route-based)의 확률론적 변등부등식(stochastic variational inequality)을 통행시간예측의 기본모형으로 사용하였으며 운전자의 경로전환의사를 반영하기 위해 경로전환함수를 적용하였다. 컴퓨터 프로그램과 간단한 교통망 분석을 통해 제안된 모형의 특성을 살펴보았다.

Traditionally, a dynamic network model is considered as a tool for solving real-time traffic problems. One of useful and practical ways of using such models is to use it to produce and disseminate forecast travel time information so that the travelers can switch their routes from congested to less-congested or uncongested, which can enhance the performance of the network. This approach seems to be promising when the traffic congestion is severe, especially when sudden incidents happen. A consideration that should be given in implementing this method is that travel time information may affect the future traffic condition itself, creating undesirable side effects such as the over-reaction problem. Furthermore incorrect forecast travel time can make the information unreliable.

In this paper, a network-wide travel time prediction model under incidents is developed. The model assumes that all drivers have access to detailed traffic information through personalized in-vehicle devices such as car navigation systems. Drivers are assumed to make their own travel choice based on the travel time information provided. A route-based stochastic variational inequality is formulated, which is used as a basic model for the travel time prediction. A diversion function is introduced to account for the motorists' willingness to divert. An inverse function of the diversion curve is derived to develop a variational inequality formulation for the travel time prediction model. Computational results illustrate the characteristics of the proposed model.

1. 서론

1. 연구의 배경

동적교통망모형(dynamic network model)은 시간 대별 통행변화를 고려한 도시교통망 분석에 많이 쓰이지만 통행자들에게 예측통행시간 정보를 제공하는 데에도 활용될 수 있다. 특히 사고 등으로 인해 갑자기 발생하는 혼잡 하에서는 정확한 교통정보의 제공을 통해 교통혼잡을 크게 줄일 수 있다.

도시부에서의 비반복적 정체(non-recurrent congestion)는 대부분 교통사고나 차량 고장 등으로 인해 발생하는데 통행자들은 이와 같은 상황에서는 통행 중 혹은 통행 시작 전에 경로선택을 다시 하게 된다. 그러나 경로 변경은 통행시간을 오히려 증가시킬 위험성을 항상 내포하고 있다. 따라서 통행자들은 원래 계획했던 경로를 유지하거나 대안 경로를 찾거나 하는 의사결정을 해야 한다. 대안 경로 탐색 시 의사결정시점에서 그들이 취득할 수 있는 교통정보를 이용하게 되는데 교통정보의 공급원으로는 VMS(variable message signs), 교통방송, TV, 인터넷 등을 들 수 있다. 이러한 교통정보들은 현 시점에서는 대부분 현재의 교통상황을 제공해 주는데 그치고 있다. 돌발상황으로 인한 정체 발생 시에는 돌발상황의 유형 및 규모, 상황의 변동 등이 주요 내용이 되는데 이러한 정보는 운전자가 자신의 경로 변경을 위해 활용하기에는 한계가 있다. 따라서 잔여통행시간에 대한 예측은 해당지역에서의 개인적 운전 경험이나 추측에 의존하게 된다.

최근에는 GPS(Global Positioning System)와 지도표시기능을 갖춘 차내 내비게이션(navigation) 장치가 많이 이용되고 있다. 향후에는 이러한 내비게이션 단말기와 무선통신체계를 통해 교통망 차원의 통행시간 예측 정보가 전달될 수 있을 것이며 이러한 시스템의 도움으로 운전자들은 혼잡한 경로에서 덜 혼잡한 경로로 전환하여 그들의 통행시간을 줄일 수 있을 것이다. 교통시스템 관리자의 입장에서 실시간 교통정보의 제공을 통해 혼잡지역의 통행을 상대적으로 덜 혼잡한 지역으로 유도하는데 이러한 교통정보를 활용할 수 있다. 이러한 측면에서 교통조건에 따라 운전자가 어떻게 대응하는지가 교통정보의 활용이 포함된 교통관리전략의 수립에 있어 매우 중요한 요소가 된다.

2. 문헌 검토

Khattak et al.(1993)이 시카고의 자가용 출퇴근자를 대상으로 한 설문을 통해 파악한 바에 따르면 돌발상황으로 인해 혼잡이 발생했을 경우에는 운전자들이 일상적으로 이용하는 경로의 예상지체가 증가할수록 경로전환에 대한 의향도 증가하는 경향을 보인다. Polydoropoulou et al.(1996)도 캘리포니아 베이 지역의 자가용 통근자를 대상으로 한 설문분석을 통해 운전자의 경로변경에 대한 의사결정에 영향을 미치는 요인들로서 일상적으로 이용되는 경로의 예상지체, 대안경로의 통행시간, 대안경로에 대한 인지된 혼잡정도, 그리고 정보취득원(information sources)을 들었다. Mahmassani and Liu(1999)는 실시간 정보제공을 가정한 실험실 모의실험을 통해 생성된 실험자료를 분석하여 실시간 정보의 신뢰도가 통근자의 출발시간과 경로선택, 그리고 운전 중 경로전환행위에 영향을 미치는 중대 요인이라 결론지었다. 그들은 또한 운전자가 경로 전환을 통해 줄이고자 하는 통행시간에는 임계치 혹은 무차별 영역이 존재하며, 이 시간은 목적지까지의 잔여 통행시간과 체계적으로 연계되어 있다고 주장했다. Hall(1996)은 교통정보서비스는 대중에 대한 서비스로서 비평형(dis-equilibrium) 상태로부터 최대한의 대안경로를 활용하는 사용자평형(user optima)상태로 나아가게 하는 수단으로 간주되어야 한다고 제안하였다. 최근에는 Abdel-aty and Abdalla (2004)가 모의실험을 통해 운전자의 경로전환행태를 연구한 바 있다. 그들은 경로 전환율에 영향을 요인들로서 통행시간감정도, 교육수준, 교통정보단말기에 대한 운전자의 친숙도 등을 들었다.

Emmerink et al.(1995), Hall(1996), 그리고 Luk and Yang (2003) 등에 의해 지적된 바와 같이 경우에 따라서 교통정보의 제공은 교통망에 부정적 영향을 미치기도 하는데 이는 교통 시스템 일부에 통행을 집중시키는 이른바 과잉반응(over-reaction)이라 불리는 현상 때문이다.

용량을 초과하는 교통량의 집중은 혼잡을 야기한다. 개개인의 통행에 관한 의사결정은 제어가 불가능하기 때문에 교통정보를 제공하는 행위 자체로는 교통망 용량을 최대한 활용하는 최적 통행 분포를 가져오는 것이 불가능하다 하겠다. 한편, 과소반응(under-reaction)도 바람직하지 못하는데 그 이유는 혼잡지역의 혼잡상태가 그대로 유지되기 때문이다.

Lo and Szeto(2004)는 혼잡시 관련 교통정보를 제공받고자 하는 사람들에게 추가 비용을 지불하도록 하여 혼잡에 대한 전체통행의 반응정도를 적정수준으로 유지하는 방안을 제안하였다. 이와 같은 접근방식에서는 고품질의 교통정보가 비용을 지불하는 일부 사람들에게만 제공되는 것을 전제로 하는 것이다. 그러므로 교통정보의 취득비용과 교통정보의 이용으로 인한 편익(통행시간 절감 등)간의 균형이 시장 적응과정을 통해서 이루어지게 된다. 이와 같은 방법은 과잉반응 문제를 피할 수는 있지만 교통망의 용량을 최대한 활용할 수는 없다.

3. 연구의 목적 및 방법

본 연구에서는 돌발상황 발생시 통행시간 예측모형을 개발한다. 이를 위해 모든 운전자가 자동차 내비게이션과 같은 개인용 차내 단말기를 통해 고품질의 교통정보에 접근할 수 있다는 이상적인 조건을 가정한다. 따라서 본 연구의 접근방식은 교통정보 서비스 제공이라는 측면보다는 교통망 최적 활용을 위한 전략 개발이라는 관점에서 보다 더 활용도가 높은 방법이라 하겠다. 운전자들은 개인용 차내 단말기를 통해 일정 기간의 예측통행시간 정보를 취득하고 이 정보와 개인의 선호도, 운전 경험 등을 바탕으로 경로선택에 관한 의사 결정을 한다고 가정한다.

본 연구에서 논의되는 통행시간예측문제를 풀기 위해서는 후보 대안경로들간에 동일한 통행시간을 유지하면서도 불균등한 경로선택확률을 가지는 상태를 찾아야 한다. 일반적으로 많이 사용되는 결정론적 교통망모형(deterministic network model)과 같이 특정 경로를 선택할 확률이 1이 되는 경로선택전략의 경우 개별 운전자의 경로선택이 통제되지 않는다면 본 연구에서 제기하는 문제를 푸는데 적용될 수 없다. 이를 좀 더 상세히 설명하기 위해 결정론적 통행시간 예측모형을 통해 산출된 통행시간 정보와 이의 배포로 인한 통행배분 문제를 예를 들어 설명한다. 먼저 예측된 통행패턴이 현실화되기 위해서는 노드 i 에서 j 로 이동하는 통행자의 $1/10$ 이 경로 k 를, 나머지 $9/10$ 가 경로 l 을 선택해야 한다고 가정한다. 정적모형을 가정했기 때문에 두 경로 모두 최단경로이며 동일한 통행시간을 가지게 된다. 그러나 동일한 통행시간하에서는 특정 경로를 선택할 가능성은 대략 반정도이므로 모형에서 예측한 $1/10$ 과 $9/10$ 의 통행배분

이 현실화될 가능성은 높지 않다. 이와 같은 딜레마에서 벗어날 수 있는 방안들 중 하나는 복합전략(mixed strategy)을 사용하는 것이다. 이 경우 개별 운전자들이 몇 개의 경로를 대상으로 하는 확률 분포를 가지고 있으며 전체 OD 통행량에서 해당 경로가 차지하는 비중과 동일한 확률로 해당 경로는 선택한다고 가정하는 것이다. 또 다른 방법으로는 확률론적 통행배정 기법을 적용하는 것인데 본 연구에서는 이 방법을 이용한다. 확률론적 모형에서는 실제 통행시간이 동일한 경우에도 인지통행시간이 서로 다를 수 있다. 따라서 동일한 예측 통행시간을 가지는 경로들이 운전자의 경로인식의 차이에 따라서 서로 다른 인지통행시간을 가질 수 있으며 이는 결국 서로 다른 선택확률을 나타내게 된다. 실제로 통행자의 경로 선택은 실제 통행시간이 아닌 예측 통행시간에 기반하며 예측통행시간은 운전자마다 서로 다를 수 있다. 따라서 실제 경로선택행위는 결정론적 모형보다는 확률론적 모형에 가깝다고 할 수 있다. 더구나 확률론적 경로 선택 모형에서는 통행량이 인지통행시간을 인수로 하는 선택함수를 기반으로 확률적으로 배정된다. 이와 같은 절차는 운전자의 경로선택행태와 본질적으로 동일하다. 다시 말해 확률론적 경로선택모형을 통해 생성된 링크단위 혹은 경로단위의 통행시간은 예측 통행시간으로 간주될 수 있다.

또한 통행자가 타 경로에 비해 상대적으로 긴 통행시간에도 불구하고 원래 계획했던 경로를 유지하고자하는 경향, 혹은 관성이 존재한다고 가정한다. 이와 같은 경향성을 설명하기 위해 경로 전환율(diversion rate)이 사용되는데 경로 전환율은 예측통행시간이 주어졌을 때 전환하는 통행자의 비율이 된다. 운전자의 이동 중 경로를 바꾸는 의사결정 행위는 잔여 통행거리나 경로에 대한 선호도 등 통행과 관련된 여러 요인들에 따라 달라진다고 가정한다.

본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 다음 절에서 이산시간 확률적·동적 경로선택모형(discrete-time stochastic dynamic route choice model)이 변동부등식을 이용하여 형식화되며 이는 통행시간예측을 위한 기본모형으로 사용된다. 다음으로 운전자의 경로선택행태를 설명하는 비효용함수를 설명하고 확률론적 경로선택 모형으로부터 통행시간예측을 위한 변동부등식을 도출한다. 마지막으로 예제 교통망을 통해 제안된 모형을 적용·평가한다.

II. 모형개발

1. 표기방법

본 연구에서의 교통망은 노드의 집합 N 과 방향을 가진 링크의 집합을 A 로 구성된다. 분석기간 $[0, T]$ 은 링크별로 다른 간격 T_a 로 분할된다. 아래는 본 논문에서 사용되는 주요 기호들이다. 윗첨자 “ rs ”는 출발지-도착지 쌍 r 과 s 를 나타내며 아래첨자 “ a ”는 링크 a 를, 아래첨자 “ p ”는 경로 p , 아래첨자 혹은 위첨자 “ k ”는 출발시간간격을 나타낸다. 위첨자 “ $*$ ”는 해당 변수가 최적상태임을 나타내는데 사용된다. 인덱스 변수들인 t, l, m 특정 시점이나 시간간격을 나타내는데 사용된다. 링크표기로서 $a+p$ 와 $a-p$ 는 경로 p 에서 링크 a 의 다음링크와 이전 링크를 가리킨다. 이의 주요 변수들은 아래와 같이 정의된다.

- \mathbf{J}^{rs} : r 과 s 를 연결하는 경로의 집합
- f_p^{rs} : 시간대 k 에 r 을 출발하여 경로 p 를 통해 s 로 향하는 통행율(flow rate)
- $\eta_p^{rsk}(\mathbf{f})$: 통행벡터 \mathbf{f} 에 의해 결정되는 통행조건하에 시간대 k 에 r 을 출발하여 경로 p 를 통해 s 로 향하는 통행자가 경험하는 통행시간
- $\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f})$: $(\eta_p^{rsk} \forall p \in \mathbf{J}^{rs})$ 의 벡터
- q^{rsk} : 시간대 k 에 r 을 출발하여 s 로 향하는 총통행율(flow rate)
- $P_p^{rs}(k), P_p^{rs}(\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f}))$: 시간대 k 에 r 을 출발하여 s 로 향하는 통행이 경로 p 를 선택할 확률
- $f_p^{rsky}(\mathbf{f})$: 통행벡터 \mathbf{f} 에 의해 결정되는 통행조건하에 시간대 k 에 r 을 출발하여 s 로 향하는 통행중 비반복정체 발생전에 경로 y 를 선택한 통행자들의 출발통행율(departure flowrate)
- q^{rsky} : 시간대 k 에 r 을 출발하여 s 로 향하는 통행중 비반복정체 발생전 경로 y 를 선택한 통행자들의 전체출발통행율(total departure flowrate)

2. 경로선택확률-통행량 간 관계를 이용한 확률적·동적 경로선택모형

본 절에서는 확률적·동적 경로선택 문제를 풀기위한 변등부등식을 형식화한다. 시간대별 경로통행량은 시간대별 경로선택확률로부터 결정될 수 있다. 경로 p 를 선택할 확률은 다음과 같이 정의된다:

$$f_p^{rsk} = q^{rsk} P_p^{rs}(k) \tag{1}$$

각각의 출발-도착존 쌍 rs 의 각 경로 p 에 대해 비용항목을 다음과 같이 정의한다:

$$G_p^{rsk}(\mathbf{f}) = f_p^{rsk} - q^{rsk} P_p^{rs}(\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f})) \tag{2}$$

여기서 $\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f})$ 는 시간대 k 에 r 과 s 를 연결하는 경로들의 경로통행시간 벡터이다. 확률론적 DUO(Dynamic User Optimal, 동적 사용자 평형) 경로 선택 모형은 다음과 같다:

$$\sum_{rs} \sum_k \sum_p G_p^{rsk}(\mathbf{f}) [f_p^{rsk} - f_p^{rsk*}] \geq 0 \tag{3a}$$

$$q_p^{rsk} = \sum_{p \in \mathbf{J}^{rs}} f_p^{rsk} \tag{3b}$$

$$f_p^{rsk} \geq 0 \tag{3c}$$

여기서, $G_p^{rsk}(\mathbf{f}) = f_p^{rsk} - q^{rsk} P_p^{rs}(\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f}))$ 이다. 시간대별 O/D 통행량 q^{rsk} 은 고정값으로 주어진 것으로 가정한다.

$P_p^{rs}(\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f}))$ 가 $\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f})$ 의 연속 사상(continuous mapping)이면 변등부등식 (3)의 해집합은 해를 가지게 된다. 변등부등식 (3)이 확률론적 경로선택 조건 (1)과 동일하다는 증명은 다음과 같다. 만약 (3a)의 \mathbf{f}^* 가 식 (1)을 만족시키면, $G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*)$ 가 0이 되기 때문에 변등부등식 (3)의 좌변도 0이 된다. 따라서 필요조건의 경우 간단히 증명된다. 충분조건의 증명을 위해서는 \mathbf{f}^* 가 변등부등식 (3)의 해라면 $G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*)$ 도 0이 된다는 것을 증명하면 된다. 실제로 \mathbf{f}^* 가 변등부등식 (3)의 해라면 $G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*)$ 이 0이어야 하는데 그 이유는 만약 0이 아니면 변등부등식 (3)에 모순되는 통행벡터 \mathbf{f} 를 다음과정을 통해 만들 수 있기 때문이다. 먼저 $\mathbf{f} = \mathbf{f}^*$ 로 설정한다. 다음 경로집합 rs 에서 $G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*) > 0$ 와 $G_q^{rsk}(\mathbf{f}^*) < 0$ 를 만족하는 경로 p 와 q 를 선택한다. 이와 같은 경로 p 와 q 는 반드시 존재하는데 그 이유는 0이 아닌 $G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*)$ 가 존재하므로 식(4)로 인해 반대의 부호를 가진 $G_q^{rsk}(\mathbf{f}^*)$ 가 존재해야 하기 때문이다.

$$\sum_m f_p^{rsm*} = q^{rsm*} = \sum_m q^{rsm*} P_p^{rs*}(k) \tag{4}$$

다음과 같은 변수를 정의한다:

$$f_p^{rsm} = f_p^{rsm*} - \Delta f$$

$f_q^{rsk} = f_q^{rsk*} + \Delta f$, 여기서 $0 < \Delta f \leq f_p^{rsk*}$ 이다. 여기서 $f_p^{rsk*} > 0$ 인데 그 이유는 $G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*) > 0$, 그리고 $f_p^{rsk} \geq 0$, $q^{rsk} > 0$, $P_p^{rs}(\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f})) \geq 0$ 이기 때문이다.

따라서 부등식(3a)는 다음과 같이 되며,

$$\begin{aligned} & \sum_{rs} \sum_k \sum_p G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*) [f_p^{rsk} - f_p^{rsk*}] \\ &= G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*) (f_p^{rsk*} - \Delta f - f_p^{rsk*}) + \\ & \quad G_q^{rsk}(\mathbf{f}^*) (f_q^{rsk*} + \Delta f - f_q^{rsk*}) \\ &= G_p^{rsk}(\mathbf{f}^*) (-\Delta f) + G_q^{rsk}(\mathbf{f}^*) (\Delta f) < 0 \end{aligned}$$

이는 \mathbf{f}^* 가 변등부등식(3)의 해라는 가정과 모순된다.

3. 확률론적 모형의 적용

예측에 있어 무엇보다도 중요한 것은 예측된 정보의 신뢰성이다. 정보가 부정확하다고 한번이라도 인식되면 통행자의 정보수용 의사가 달라질 수 있다. 따라서 예측 통행시간 정보는 실제 예측된 바와 같은 통행시간을 나타내야 한다. 그러므로 통행시간예측모형은 예측된 통행시간을 실현하는 예측통행시간 정보를 산출하는 고정점 문제(fixed-point problem)로 귀착된다.

운전자의 경로 인지가 정확히 모형화되었다는 가정 하에 각 출발존 r과 도착존 s에 대하여 $G_p^{rsk}(\mathbf{f}) = 0$ 을 만족하는 경로통행시간 벡터 $\boldsymbol{\eta}^{rsk}(\mathbf{f})$ 가 예측통행시간으로 간주될 수 있다. 왜냐하면 주어진 경로선택확률함수에 의해 배정된 통행량은 예측된 통행시간을 이끌어 낼 것이기 때문이다.

확률론적 모형이 통행시간예측모형으로 사용될 수 있지만 운전자의 운전 중 전환행태를 설명하기 위해서는 또 다른 함수가 필요하다. 돌발상황으로 인한 정체 발생 시 이 함수는 교통망에서의 통행시간을 예측하는데 있어 중요한 역할을 한다.

4. 경로전환함수(Route Diversion Function)

통행자는 타 경로에 비해 상대적으로 긴 통행시간에도 불구하고 원래 계획했던 경로를 유지하고자 하는 경향을 가지고 있다. 그러나 기대잔여통행시간이 임계점을 넘게 되면 운전자들은 기대 잔여통행시간을 줄이기 위해 대안 경로를 찾게 된다. 이러한 의사결정과정에는 원래 계획했던 경로와 대안경로의 통행시간차이를 비교하는

것도 포함된다. 운전자의 전환의사는 현재 경로와 대안 경로의 예측통행시간차이의 함수로 표현될 수 있다. 일반적으로 통행시간의 차이가 커질수록 경로전환율은 높아진다. Ramsay et al.(1997)은 호주 멜버른의 돌발 상황 발생 자료와 Wardman et al.(1997)이 수행한 진술선호조사 결과로부터 추정된 전환곡선식을 제안한 바 있다. 전환율 d는 다음식으로 표현된다.

$$d = \frac{1 + e^{-2.4}}{1 + e^{-\beta u + 2.4}} - e^{-2.4} \tag{5}$$

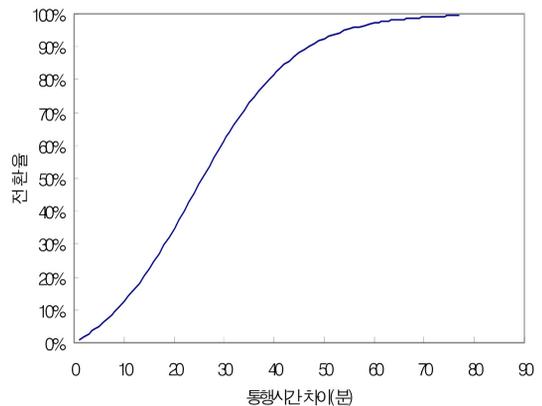
여기서 u는 현재경로와 대안경로의 통행시간차이를 분으로 나타낸 것이며, β 는 전환의사를 나타내는 민감도 계수이다. 만약 $\beta=0$ 이면 전환은 발생하지 않는다. <그림 1>은 이 관계를 나타낸다. <그림 1>의 수평축은 통행시간차이를, 수직축은 전환율을 나타낸다.

전환함수는 현재 경로와 대안경로간의 통행시간차이가 주어졌을 때 임의의 운전자가 경로를 전환할 확률을 나타내는 확률함수로 볼 수 있다.

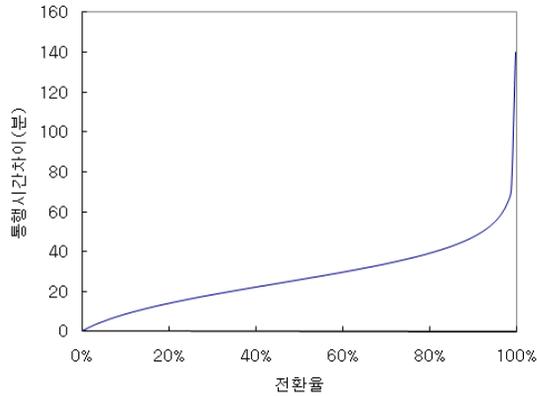
전환곡선은 일반적으로 하나의 대안경로만이 존재할 때 사용된다. 통상의 교통망에서는 보통 많은 수의 대안 경로가 존재한다. 본 연구에서는 하나 이상의 대안경로가 존재하는 경우에도 사용될 수 있도록 확률론적 경로 선택개념을 이용하여 전환함수를 확장한다.

식(5)는 가역함수이므로 도치된 관계를 도출할 수 있는데 이를 식으로 나타내면

$$u = \frac{-\ln\left(\frac{1-d}{r + e^{-2.4}}\right) + 2.4}{\beta} \tag{6}$$



<그림 1> 전환곡선



〈그림 2〉 경로전환함수의 역함수

〈그림 2〉는 전환함수의 역함수를 나타낸다. 역함수를 사용하는 이유는 원래 계획했던 경로로부터의 전환통행량을 통행량 조정(flow adjustment) 연산과정에서 손쉽게 구할 수 있기 때문이다. 따라서 식(6)을 이용하여 전환 통행량을 이에 상응하는 등가통행시간(equivalent travel time)으로 변환할 수 있다. 변환된 시간은 이는 원래 계획했던 경로를 계속 이용하고자 하는 관성으로 해석될 수 있다. 여기서 등가통행시간은 항상 음의 값을 가진다.

전환통행량으로부터 얻어지는 등가통행시간은 원래 계획했던 경로에만 영향을 미치기 때문에 전환함수의 역함수는 여러 개의 대안경로가 존재하는 경우에도 사용될 수 있다.

경로가 운전자의 원래계획경로인지의 여부에 따라서 경로통행시간이 다르게 인식될 수 있기 때문에 각각의 통행에는 처음 계획했던 경로에 대한 정보가 포함되어야 한다. 따라서 배정되거나 혹은 조정되는 통행량은 출발존, 도착존, 출발시간과 함께 계획경로(initial planned route)도 명시되어야 한다.

변등부등식 형식화에 사용되는 비효용 함수는 다음과 같이 정의된다:

$$C_p^{rsky}(\mathbf{f}) = \eta_p^{rsk}(\mathbf{f}) + \chi(f_p^{rsky}(\mathbf{f}), q^{rsky}) \quad (7)$$

여기서 $\chi(f_p^{rsky}(\mathbf{f}), q^{rsky})$ 는 주어진 전환곡선의 역함수이다. 만약 $p \neq y$ 이면 $\chi(f_p^{rsky}(\mathbf{f}), q^{rsky})$ 는 0이 된다.

원래 계획했던 경로로부터 전환되는 통행량은 현재 경로와 대안경로간 통행시간 차이의 함수이다. 운전자의

행태가 확률론적이라 가정했기 때문에 실제 통행시간이나 배포된 통행시간 대신에 인지통행시간차이가 대신 사용된다.

통행시간예측과 경로선택을 위한 변등부등식은 다음 식과 같이 정의된다:

$$\sum_{rs} \sum_k \sum_p C_p^{rsky}(\mathbf{f}) [f_p^{rsky} - f_p^{rsky*}] \geq 0, \quad (8a)$$

$$q_p^{rsky} = \sum_{p \in \mathbf{P}^{rs}} f_p^{rsky}, \quad (8b)$$

$$f_p^{rsky} \geq 0, \quad (8c)$$

여기서 $C_p^{rsky}(\mathbf{f})$ 는 식(7)에 의해 결정된다. 전과 마찬가지로 시간대별 O/D 통행량 \mathbf{q}^{rsk} 는 고정값으로 주어진 것으로 가정한다. $\eta^{rsk}(\mathbf{f})$, $P_p^{rsk}(\mathbf{C}^{rsk}(\mathbf{f}))$, $\chi(f_p^{rsky}, q^{rsky})$ 가 모두 \mathbf{f} 의 연속함수이고 (8b)와 (8c)에 의해 정의되는 가능해 집합(feasible set)이 콤팩트 볼록(compact and convex)이기 때문에 최소한 한 개의 해가 존재한다. 또한 $\chi(f_p^{rsky}, q^{rsky})$ 가 단조함수이기 때문에, 만약 $\eta_p^{rsky}(\mathbf{f})$ 도 단조함수이면, $C_p^{rsky}(\mathbf{f})$ 도 단조함수가 된다.

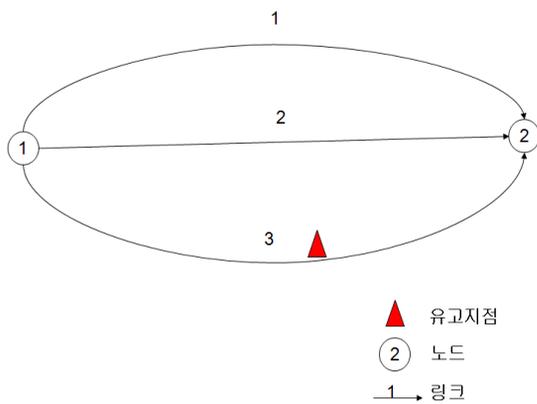
III. 모형의 적용

제시된 모형을 예제를 통해 살펴본다. 분석적 통행전파모형(analytical flow propagation model), 동적 네트워크 로딩(dynamic network loading) 방법과 알고리즘은 Jang et al.(2005)에서 제시된 방법을 적용하였다. 네트워크 로딩방법은 주어진 시간대별 기중점 통행량에 대한 기중점 통행시간을 생성하기만 하면 미시 교통시물레이션 모형을 비롯하여 어떤 모형을 사용해도 상관없다.

확률론적 선택함수는 다항로짓 함수를 사용하였다. 시간대 k 에 기점 r 을 출발하여 계획경로 y 를 가지고 종점 s 를 향하는 통행들이 경로 p 를 선택할 확률은 다음과 같다:

$$P_p^{rsky} = \frac{e^{-\theta C_p^{rsky}}}{\sum_m e^{-\theta C_m^{rsky}}} \quad (9)$$

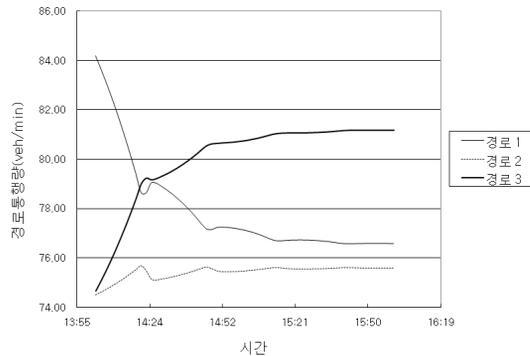
여기서 θ 는 분산변수(dispersion parameter)이다.



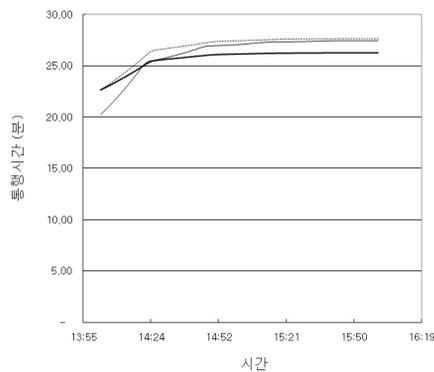
〈그림 3〉 통행시간예측모형 평가 교통망

〈표 1〉 평가 교통망의 링크 속성

링크 번호	시작 노드	끝 노드	연장 (km)	차선수	자유통행속도 (kph)	링크용량 (veh/hr)
1	1	2	20	3	60	2200
2	1	2	30	2	80	2200
3	1	2	30	4	80	2200



〈그림 4〉 확률통행배정으로부터 산출된 경로통행분포



〈그림 5〉 확률통행배정으로부터 산출된 시간대별 경로통행시간

〈그림 3〉에 나타난 바와 같이 3개 링크를 가진 간단한 교통망을 고려해 보자. 〈표 1〉은 교통망의 속성을 나타낸다. 노드 1에서 노드 2로 이동하는 총 교통류율은 분석시작시점인 14시부터 시작해서 처음 2시간 동안 14,000 veh/hr이라 가정한다.

시간대별 통행분포는 확률론적 경로선택 문제를 풀어서 얻을 수 있다. 〈그림 4〉와 〈그림 5〉는 $\theta = 0.05$ 일 때 통행량 분포와 통행시간변화를 보여준다.

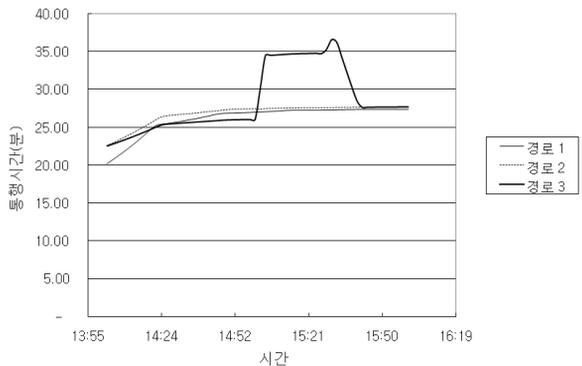
다음, 분석시작시점으로부터 60분이 지난 후에 링크 3에서 돌발상황이 발생했다고 가정하자. 돌발상황 발생으로 인한 효과는 해당 링크의 용량이 일정시간동안 감소하는 것으로 모형화할 수 있다. 본 예제에서는 링크의 용량이 30분 동안 40% 감소하는 것으로 가정하였다.

〈그림 6〉은 돌발상황 발생 후 경로 전환율이 0인 상태의 시간대별 경로통행시간을 나타낸다. 경로 3의 통행시간은 급격히 증가하며 대략 15시 30분경에 최고점에 달한다.

식(8)과 같이 형식화된 통행시간예측문제를 $\beta = 10$ 인 상태를 기준으로 풀어본다. 로짓 분산계수 θ 는 일반적인 통행조건 시의 0.1 대신 10 을 사용했는데 그 이유는 돌발상황 하에서 운전자의 대응을 좀 더 강조하기 위함이다.

〈표 2〉는 교통정보제공 전후의 경로 통행량 분포를 비교한 것이다. (a)는 최초의 확률론적 통행배정을 통해 얻어진 결과이고 (b)는 운전자의 경로 전환이 없다고 가정한 상태의 결과이며, (c)는 운전자가 경로전환함수 및 확률론적 경로선택함수에 따라 경로전환을 한 경우를 각각 나타낸 것이다.

〈표 2〉의 (a) 에 나타난 것처럼 돌발상황이 발생하지 않은 경우에는 3개의 경로에 대한 경로통행시간이 비슷하다. 돌발상황이 발생했음에도 경로전환이 없는 경우에



〈그림 6〉 돌발상황 발생 후 시간대별 경로통행시간

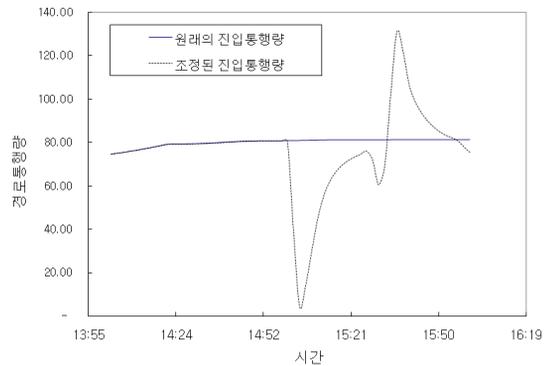
〈표 2〉 통행량 및 통행시간 비교 (시간대 15:08 - 15:10)

	경로 번호	계획경로 번호	통행량 (veh/min)	통행시간 (min)	등가 통행시간(분)
(a)	1	1	77.04	27.13	-
	2	2	75.51	27.51	-
	3	3	80.79	26.15	-
(b)	1	1	77.04	27.09	-
	2	2	75.51	27.49	-
	3	3	80.79	34.51	-
(c)	1	1	73.93	28.42	-0.39
	2	1	2.88	28.36	-
	3	1	0	30.65	-
	1	2	2.08	28.42	-
	2	2	73.51	28.36	-0.3
	3	2	0	30.65	-
	1	3	12.61	28.42	-
	2	3	23.19	28.36	-
	3	3	45.14	30.65	-2.36

는 링크3의 용량감소로 인해 경로 3의 통행시간이 26.15 분에서 34.51 분으로 증가한다. 예측통행시간이 제공되고 운전자의 경로전환이 허용되는 경우의 통행 분포와 통행시간 변화는 〈표 2〉의 (c)와 같다. 경로 1을 통해 이동하던 일부 운전자가 경로2로 전환하거나 혹은 그 반대의 경우도 발생하는데 이는 운전자의 인지통행시간의 차이로 인해 발생하는 것이다. 그러나 경로 3의 통행시간 증가로 인해 경로 1이나 2에서 경로 3으로 전환하는 통행자는 없다. 반대로 경로 3을 이용하던 많은 운전자들이 경로 1로 전환(12.61 veh/min)하거나 경로 2로 전환(23.19 veh/min)하였다. 〈표 2〉의 마지막 열은 전환곡선의 역함수로부터 산출된 전환통행량에 상응하는 등가통행시간을 나타낸다. 비록 경로3의 통행시간이 다른 두 경로에 비해 크지만 돌발상황 발생 전 경로 3을 이용하고 있던 통행의 55% 이상이 여전히 경로 3을 이용하는 것으로 나타났는데 그 이유는 원래의 계획경로를 유지하고자 하는 경향으로 인한 것이다.

〈표 2〉에 나타난 결과를 확인해 보자. 위에서 언급한 바와 같이 예측 결과는 두 개의 경로선택조건을 만족시켜야 한다. 첫 째는 원래의 계획경로와 대안경로간의 통행시간차이에 상응하는 전환율과 관련된 선택 조건이며 두 번째는 확률론적 경로선택조건이다.

확률론적 배경에서는 주어진 기종점 및 출발시간에 대해 사용된 경로의 인지경로통행시간이 같아야 한다. 전환교통량에 상응하는 등가통행시간은 운전자들이 원래의 계획경로를 따를 때 주어지는 인지통행시간의 감소로



〈그림 7〉 시간대별 진입통행량(링크 3)

간주될 수 있다. 따라서 등가통행시간은 인지통행시간의 일부로 볼 수 있다. 따라서 등가통행시간과 전환교통량이 식(5)에 주어진 관계를 만족시키면 첫번째 경로선택조건이 만족된 것이라고 결론내릴 수 있다. 예를 들어 $\beta = 1.0$ 인 조건하에 식(5)를 적용하면 0.39 분은 전체 76.81 통행 중 2.39 통행에 해당한다.

두 번째 경로선택조건은 예측통행시간과 등가통행시간을 합한 후 로짓선택함수를 이용하여 경로선택확률을 계산하여 확인할 수 있다. 예를 들어 원래 계획경로가 1인 통행자가 경로 1을 선택할 확률은 식(9)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$P_1^{12k1} = \frac{e^{-\theta C_p^{rsdy}}}{\sum_m e^{-\theta C_m^{rsdy}}} = \frac{e^{-10(28.42-0.39)}}{e^{-10(28.42-0.39)} + e^{-10(28.36)} + e^{-10(30.65)}} = 0.963$$

각각의 경로에 배정된 통행량은 배정확률에 전체 통행량을 곱하면 쉽게 확인할 수 있다.

〈그림 7〉은 돌발상황이 발생한 후 링크 3으로의 진입 통행량의 변화를 나타낸다. 예상대로, 돌발상황 발생 직후 진입 통행류율은 급격히 낮아진다. 어느 정도의 시간이 지난 후 링크 3으로의 진입통행량이 증가하는데 그 이유는 경로 3의 혼잡이 완화되고 전환교통량으로 인해 나머지 경로의 혼잡이 증가했기 때문이다.

IV. 결론

본 연구에서는 돌발상황 발생 시의 교통망 차원의 통

행시간 예측모형을 제시하였다. 개발된 통행시간 예측 모형은 돌발상황 발생 시 예측교통정보를 배포하여 혼잡 지역의 통행을 상대적으로 비혼잡한 지역으로 분산시킬 수 있는 최적 전략을 도출하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

제시된 모형은 모든 운전자가 교통정보에 접근가능하며 이를 통해 경로선택에 관한 의사결정을 한다는 이상적인 조건을 가정하였다. 이는 모형의 단순화를 통해 문제를 간명하게 만든다는 장점이 있는 반면 실제 적용에는 장애요인이 된다. 이러한 점에서 제시된 모형은 예측 통행시간 기반의 통행정보 제공서비스 프로토타입 제시에 그치고 있다. 따라서 실용화를 위해서는 돌발상황 발생시 운전자 행태를 좀더 면밀하게 반영할 수 있는 행태모형의 도입과 교통정보의 전달 및 활용측면에서의 여러 변수들-예측시간정보 취득 여부, 실시간교통정보 취득 여부 등을 모형에 반영할 수 있는 후속연구가 필요하다.

참고문헌

1. Abdel-Aty, M., Abdalla, MF(2004) "Modeling drivers' diversion from normal routes under ATIS using generalized estimating equations and binomial probit link function" *Transportation*, Volume 31, Number 3, pp.327~348(22).
2. Emmerink, RHM, Axhausen, KW, Nijkamp, P, and Rietveld, P(1995) "Effects of information in road transport networks with recurrent congestion" *Transportation* 22, pp.21~53.
3. Hall, RW(1996) "Route choice and advanced traveler information systems on a capacitated and dynamic network" *Transportation Research C* 4, pp.289~306.
4. Khattak, AJ, Schofer, JL, and Koppelman, FS(1993) "Commuters' en route diversion and return decisions : analysis and implications for advanced traveler information systems" *Transportation Research Part A*, 27, pp.101~111.
5. Jang W, Ran B, Choi K(2005) "A discrete time dynamic flow model and a formulation and solution method for dynamic route

choice" *Transportation Research Part B*, Vol. 39, pp.593~620.

6. Lo, H.K., Szeto, WY(2004) "Modeling advanced traveler information services:static versus dynamic paradigms" *Transportation Research Part B*, 38, pp.495~515.
7. Luk, JYK, Yang, C(2003) "Comparing driver information systems in a dynamic modeling framework" *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129 No. 1, 42-50.
8. Mahmassani, HS and Liu, YH(1999) "Dynamics of commuting decision behavior under advanced traveler information system" *Transportation Research Part C*, 7, pp.91~107.
9. Polydoropoulou, A, Ben-Akiva, M, Khattak, A, and Lauprete, G(1996) "Modeling revealed and stated enroute travel response to ATIS" *Transportation Research Record*, 1537, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.38~45.
10. Ramsay, ED, Catchpole, JE, and Luk, JYK(1997) "An evaluation of VicRoads' Drive Time System" *Research Rep. ARR No. 305*, ARRB Transport Research, Vermont South, Victoria, Australia
11. Wardman, M, Bonsall, PW, and Shires, JD(1997) "Driver response to variable message signs : a stated preference investigation" *Transportation Research Part C*, Vol. 5 No. 6, pp.389~405.

✉ 주 작 성 자 : 장원재
 ✉ 교 신 저 자 : 장원재
 ✉ 논문투고일 : 2009. 10. 26
 ✉ 논문심사일 : 2010. 1. 18 (1차)
 2010. 10. 20 (2차)
 2011. 1. 6 (3차)
 ✉ 심사판정일 : 2011. 1. 6
 ✉ 반론접수기한 : 2011. 6. 30
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필