

교통망 신뢰성을 고려한 운전자 통행행태모형

임 용 택 1)

< 요약 >

일시적인 행사, 도로공사 또는 교통사고로 인해 도로용량이 저하되거나 도로가 폐쇄되는 경우, 운전자들은 당초 자신이 원하는 시간에 목적지에 도달하지 못함에 따라 스케줄 지체를 경험하게 된다. 이는 교통망의 신뢰성이 저하됨으로서 발생하는 것으로 이들 비 반복적인 혼잡요소들을 운전자의 경로선택행위에 포함시킬 필요가 있다. 이런 측면에서 본 연구에서는 기존 교통분야연구에서 소홀히 다루었던 신뢰성이라는 개념을 운전자 행태모형에 도입하는 방안을 제시코자 한다.

1. 서론

출발지는 떠난 운전자는 자신의 목적지까지 가장 빠른 경로를 선택하려는 경향이 있다. 이것은 통행자체가 도시활동에서 부가적으로 파생된 수요로서 통행시간(Travel time)과 같은 비효용(Disutility) 요소를 갖고 있기 때문이다. 즉, 이런 비효용을 최소화시키려는 방향으로 경로를 선택하게 된다. 그런데, 운전자가 최단비용경로(Minimum cost path)를 선택하기 위해서는 자신이 고려하고 있는 대안경로들에 대한 교통상황을 정확히 알고 있어야 최단경로 선택이 가능하다. 그러나 이들 경로들은 차량의 급증이나 도로기하구조의 불합리로 매일 반복되는(Recurrent) 혼잡이나, 도로공사, 일시적인 행사, 도로폐쇄 등과 같은 비반복적(Nonrecurrent)인 혼잡으로 인해 시간대별 또는 일별(Daily)로 바뀌고 있다. 따라서 이들 교통상황을 정확히 알지 못한다면 최단비용경로를 선택한다는 것은 불가능하다. 운전자 측면에서 볼 때, 특히 비반복적인 혼잡이 발생하는 경로는 매우 신뢰하기 어려운 도로로 인식되는데, 이는 반복적인 혼잡이 발생하는 경로인 경우, 사전에 예측이 가능하기 때문에 다른 경로를 전환하던가 출발시간대를 변경하여 혼잡을 피할 수 있으나, 비반복적인 경우에는 이것이 어렵기 때문이다.

현재까지 개발된 대부분의 연구들은 운전자가 자신이 고려하는 교통망에 대하여 완전한 정보를 갖고 있다는 가정에 기반을 두고 있다. 즉, 신뢰성(Reliability)이 1인 경우를 가정한다. 그러나, 실제 운전자들은 모든 대안도로들에 대한 교통상황을 완전히 알지 못하며, 즉 완벽한 신뢰성을 확보하지 못하기 때문에 이런 가정은 제한적으로 적용될 수 밖에 없다.

본 연구에서는 운전자의 통행행태(Travel behavior)와 신뢰성이라는 관점에서 지금까지 제안된 연구들의 문제점을 살펴보고, 이를 해결하기 위한 방안을 모색코자 한다. 먼저 교통분야에서 신뢰성문제와 이에 대한 기존연구들을 살펴보자.

1) 여수대학교 교통물류시스템공학부 전임강사, 전남 여수시 국동 195번지,
(Tel) 061-640-6260, (Fax) 061-640-6268, Email : limyt@yosu.ac.kr

II. 교통분야의 신뢰성 및 기존연구 검토

1. 교통분야의 신뢰성

시스템공학분야에서 신뢰성은 그 시스템이 정상상태에서 서비스를 제공할 수 있는 안정된 상태의 정도로 정의될 수 있다. 즉, 어느 정도로 안정된 서비스를 제공하느냐의 크기를 나타낸다. 반면, 교통분야에서의 신뢰성은 크게 2가지로 구분되는데, 첫째는 연결성(Connectivity)이며 둘째는 통행시간 신뢰성(Travel time reliability 또는 Performance reliability)이다. 연결성이란 링크(교통에서는 도로나 철도)의 절단에 따라 목적지까지 도달할 수 있느냐의 정도를 나타내는 척도다. 만약 하나의 경로로 구성된 도로에서 일부구간이 절단된 경우, 그 경로는 끊어진(Disconnected) 경로가 된다. 그러나 다수의 경로중 일부 구간이 절단된 경우에는 신뢰성은 낮아지게 된다. 이에 반해, 통행시간의 신뢰성은 비록 도로가 연결되어 있지만 용량이 부족하거나 혼잡으로 인해 제 시간에 목적지에 도달하지 못하는 경우의 신뢰성을 의미한다. 교통분야에서의 신뢰성은 주로 두 번째 경우에 해당되며, 첫 번째의 신뢰성문제, 즉 연결성은 산업공학분야에서 주로 다루어지고 있다.

일반적으로 교통망에서의 신뢰성은 시스템분야의 신뢰성문제와는 차이가 있는데, 이는 운전자의 경로선택행위(Path choice behavior)가 포함되기 때문이다. 운전자들은 경로를 선택할 때, 거리가 짧거나 시간이 빠른 또는 비용이 작게 드는 경로를 선택한다. 즉, 경로에 대한 운전자 개인들의 선호(Preference)가 개입된다. 따라서, 교통분야에서 신뢰성문제는 교통망의 기하구조상태와 이에 대한 운전자의 반응을 함께 고려해야 한다. 만약 도로의 기하구조가 완전하지 못하다면(즉, 용량이 저하되거나 도로가 폐쇄된 경우등), 그 영향은 운전자들이 이를 어떻게 받아들일느냐에 따라 다르게 나타난다. 예를 들어, 운전자들이 그 도로가 완전하지 못하다는 사실과 대안도로를 잘 알고 있다면, 그 영향은 비교적 적게 된다. 그러나, 대안도로가 없거나 운전자들이 도로상황을 잘 알고 있지 못하다면, 상대적으로 큰 영향을 미치게 된다.

2. 기존 연구검토

2.1. 연결성 모형

Bell & Iida(1998)는 연결성문제와 관련하여 다음과 같은 모형을 제시하였다. 먼저 상태변수(State variable)로서 x_i 를 다음과 같이 정의하였다.

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{if link } i \text{ functions} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

위 상태변수로 시스템의 상태를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if the system functions} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, $\Phi(x)$ 를 구조함수(Structure function)라 부르며 시스템 신뢰성 값을 찾는 데 사용된

다. 구조함수는 교통망이 직렬형태와 병렬형태로 구성된 경우에 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{직렬구조 : } \Phi(x) = \prod_i x_i$$

$$\text{병렬구조 : } \Phi(x) = 1 - \prod_i (1 - x_i)$$

위 구조함수를 이용하여 교통망에서의 시스템 신뢰성(System reliability)은 다음과 같다

$$R = E[\Phi(x)]$$

신뢰성이 직렬과 병렬시스템으로 구성될 경우, R 값은 분해법(Decomposition)을 이용하여 구할 수 있으나, 동일한 링크가 여러번 반복될 경우에는 문제의 해석이 어려워진다.

위 Bell & Iida의 모형은 교통망의 연결, 절단만을 고려하여 신뢰성값을 구하기 때문에 운전자의 경로선택행태를 고려하지 못하는 한계가 있다.

2.2. 통행시간 신뢰성모형

교통망의 신뢰성을 고려하며 운전자의 행태를 반영한 모형은 Asakura(1997)가 제시하였다. 이 모형은 링크의 용량저하를 모형에 고려하고 있어 통행시간의 신뢰성측면의 연구라 볼 수 있다. 연구의 기본 아이디어는 지진, 해일 또는 교통사고 등으로 도로용량이 저하되어 통행시간이 증가될 경우, 운전자들은 자신의 통행을 취소(Cancel)할 수 있기 때문에 이를 모형에 반영하자는 것이다. 이 경우 기존 고정수요 경로선택모형은 가변수요 경로선택모형(Variable demand route choice model)으로 변환되어 다음과 같은 최소화문제가 된다.

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(x) dx - \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(y) dy \\ \text{subject to,} & \\ & \sum_{k \in K} h_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r \in R, s \in S \\ & h_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k \in K_{rs}, r \in R, s \in S \\ & q_{rs} \geq 0 \quad \forall r \in R, s \in S \\ & f_a \leq C_a \quad \forall a \in A \\ & f_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}} h_k^{rs} \delta_{k,a}^{rs} \end{aligned}$$

여기서, q_{rs} 는 OD쌍 r, s 간의 통행량이며, h_k^{rs} 는 OD쌍 r, s 간의 경로 k 의 통행량을 의미한다. f_a 는 링크 a 의 통행량으로 링크 a 의 용량 C_a 를 초과하지 못한다고 가정한다. 따라서 도로용량의 저하현상은 C_a 를 저하시킴으로서 반영할 수 있으며 이에 따라 기종점쌍간의 통행량도 달라지게 된다. 여기서, $\delta_{k,a}^{rs}$ 는 경로교통량 h_k^{rs} 가 링크 a 를 지나가면 1, 그렇지 않으면 0을 나타내는 Incidence 변수이다. 또한, t_a 는 링크 a 의 통행비용함수 나타내며 $D_{rs}^{-1}(y)$ 은 기종점쌍 r, s 간 통행수요함수의 역함수를 의미한다. Asakura는 링크 통행비용함수로서 Davidson식을 사용하였으며, 수요함수는 다음과 같은 지수함수를 사용하였다.

$$D_{rs}(t_{rs}) = D_{rs}^o \exp(-\gamma(t_{rs} - t_{rs}^o))$$

여기서, D_{rs}^o 는 통행수용의 상한값을 의미하며, t_{rs}^o 는 자유교통류상태에서 기종점 r, s 간 통행 시간을 그리고 γ 는 수요함수의 파라메타를 나타낸다. 위 최소화문제는 더미 경로를 추가하여 초과수요를 고려하는 형태로 교통망을 수정할 경우, 고정수요 경로선택모형이 되어 기존에 널리 사용되는 Frank-Wolfe 알고리즘을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있다.

Asakura의 모형은 운전자들이 용량저하를 고려하여 통행여부를 결정한다는 측면에서 신뢰성 문제를 고려하고 있으나 모든 경로에 대하여 완전정보를 기본적으로 가정하기 때문에 운전자의 신뢰성문제를 완벽히 고려했다고는 보기 어렵다.

또한 최근 Bell(2000)은 통행시간의 신뢰성을 평가하기 위하여 게임이론으로 모형을 제시하였다. 이모형은 기대 통행시간(Expected trip cost)을 최소화하려는 운전자와 이를 방해하고 기대통행시간을 최대화시키려는 '악한(Evil entity)' 간의 게임으로 모형을 설정하였는데, 이 연구는 2인 비타협, 제로섬게임으로 선형문제로 분해시켜 풀이 알고리즘을 제시하였다.

III. 신뢰성을 고려한 통행행태모형

본 절에서는 신뢰성문제를 고려한 교통모형의 개발에 관하여 기술코자 한다. 이 분야는 교통 분야에서도 이제 시작되는 부분으로 이론적으로나 실제적으로 명확히 정립된 이론이 없고 따라서 여러 가지 시도가 가능하다. 여기서는 Asakura의 모형을 기초로 교통정보를 제공하여 신뢰성문제를 고려하는 모형과 실시간 교통류를 제어할 통하여 신뢰성문제를 고려하는 모형을 개념적인 틀에서 제시코자 한다.

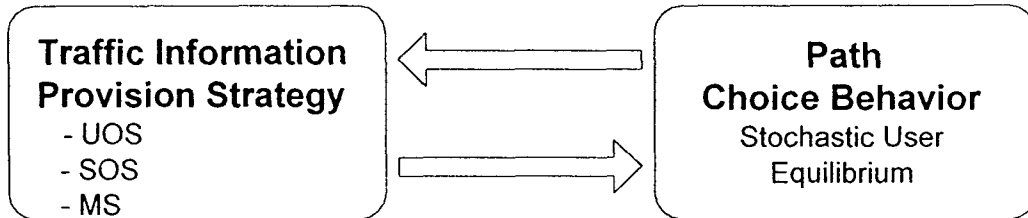
1. 교통정보를 고려한 운전자의 통행신뢰성 모형

1.1 모형의 구축

본 연구에서 제시되는 모형은 아래 <그림1>과 같이 2개의 부 프로그램으로 구성된다. 하나는 운전자의 경로선택행태를 묘사하는 모형과 또 하나는 교통정보를 전략에 따라 제공하는 모형이다. 이들 모형을 서로 영향을 미치며 안정된 상태에 도달할 때까지 반복수행 된다. 먼저, 운전자의 경로선택모형은 운전자들이 교통망을 완벽히 알지 못하는 것이 현실적이기 때문에 경로선택행위를 확률적으로 고려할 필요가 있다. 이것은 각 운전자들이 교통망에 대해 인지오차를 갖고 있음을 반영하는 것으로 Asakura의 모형보다는 좀 더 현실적이다. 특히, 일부 도로가 유고(Incident)로 인하여 용량이 저하된 경우 이런 접근법은 더욱 합리적이다.

교통정보제공 모형은 도로용량 저하등 도로의 기능이 저하된 경우, 이사실을 운전자들에게 제공하여 대안도로를 선택할 수 있도록 도와주는 기능을 한다. 물론 제공된 정보를 운전자들이 믿고 따를지는 운전자 개인의 성향에 따라 달라지기 때문에 교통정보를 제공함으로써 혼잡을 완화시킨다는 것은 강제성이 없는 방법일 수 있다. 여기에서 하나 주의할 점은 제공되는 교통정보가 운전자 개개인의 통행시간을 최소화시키는 목적으로 제공되느냐(User Optimal

Strategy, UOS) 또는 전체 교통망의 총통행시간을 최소화시키는 목적으로 제공되느냐 (System Optimal Strategy, SOS) 그리고 이들 중간형태로 제공되느냐(Mixed Strategy, MS) 로 구분할 수 있다. 이들 제공 전략에 따라 각 정보의 효과는 달라지게 되는 데 이에 대해서는 다음 1.2절에서 기술토록 한다.



<그림1> 교통정보와 경로선택모형의 관계

1.2 교통정보의 효과

Ben-Akiva,et.al.(1991)는 교통정보가 반드시 모든 운전자들에게 이익을 주는 것만은 아님을 예제를 통하여 보여주었다. 아래 <그림2>에서 보듯이 운전자위주(User Equilibrium)의 정보를 모든 운전자에게 제공할 경우, 즉 완전정보(full information)를 제공하게 되면 부정적인 영향(negative impact)이 발생하게 되어 평균비용이 오히려 증가한다고 하였다. 그이유로 정보제공에 따른 잠재적인 악영향 요인 3가지를 다음과 같이 설명하였다.

첫째, 과포화(oversaturation) 문제로 너무 많은 정보의 제공은 운전자가 주어진 정보를 제대로 처리하지 못함으로써 최적노선을 선택하지 못하게 되는 문제가 있으며,

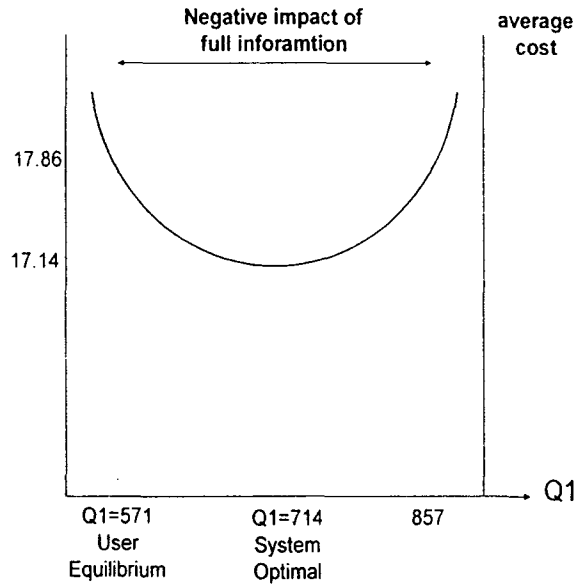
둘째, 과반응(overreaction)은 운전자가 제공된 정보에 너무 민감하게 반응함으로써 다른 운전자들의 잠재적 반응행태를 충분히 고려하지 못하여 도로의 혼잡을 한곳에서 다른곳으로 이전시키는 문제로 정보를 어떻게 제공할 것인가가 중요한 문제로 떠오르게 된다.

세째로는 집중(concentration)문제로 정보의 제공은 실제도로 상황과 운전자의 예측 상황을 줄이는 경향이 있어 정보의 제공은 비슷한 선호를 가진 운전자들을 동일한 출발시간대에 동일한 노선상에 집중시킬 우려가 있다. 이경우 더 많은 정보의 제공은 더욱 심각한 혼잡을 야기시킬 우려가 있다.

이와 같은 부정적인 효과들은 정보제공자가 얼마나 많은 운전자에게, 어떻게, 어느 수준으로 정보를 제공해야하는가에 대한 전략적인 문제점을 시사하고 있다. 이런 측면에서, 도로공사나, 교통사고 등으로 인해 도로용량이 저하된 경우, 즉 신뢰성이 저하된 경우,

- 얼마나 많은 운전자에게 관련 정보를 제공해야 하는가?
- 어떤 정보전략으로 정보를 제공해야하는가?
- 또, 이런 정보를 어떻게 제공되어야 하는가?

등이 주요한 이슈로 떠오르게 된다.



<그림2> 교통정보의 역효과(Ben-Akiva,et.al.,1991)

2. 교통류를 제어할 고려한 고속도로통행 신뢰성 모형

현재까지 개발된 대부분의 고속도로 진입제어(Ramp metering)들은 고속도로 본선부와 진입램프부의 유입교통량을 고정된 것으로 가정하고 본선부의 교통상황에 영향을 주지 않는 범위내에서 진입교통량을 최대화하는 모형이 기초를 이루어 왔다. 그러나 실제로 고속도로 진입 램프제어를 실시하는 경우, 운전자들은 다른 대안 경로를 선택하기 때문에 이러한 분석은 운전자의 경로선택행위를 충분히 반영하지 못하는 측면이 있었다. 또한, 고속도로 본선부의 공사나 사고로 인하여 도로용량이 저하된 경우, 고속도로망을 관리하는 입장에서 총 통행시간을 최소화시키는 방안이 요구된다. 이런 배경하에서, 여기서는 도로용량 저하시 운전자의 실시간 경로선택행위를 고려하며 최적 고속도로 램프제어전략을 도출하는 모형을 개발코사 한다. 이를 위하여 운전자의 경로선택행위는 동적 운전자 균형원리에 따라 개발되며 램프진입제어 전략은 최적제어이론(Optimal control theory)을 이용하여 동적모형으로 개발한다.

2.1 동적 운전자 균형

운전자의 실시간 경로선택행위를 Wardrop(1952)이 제시한 운전자 균형원리를 동적으로 확장하여 사용되고 있다. 동적으로 확장된 균형원리는 다음과 같이 표현된다.

동적 운전자균형조건(dynamic user equilibrium conditions)

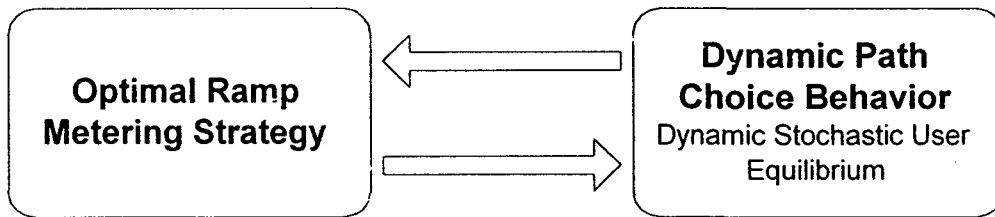
$$C_p^{f,rs}(t) = C^{f,rs}(t) \text{ 이면 } f_p^{rs}(t) > 0$$

$$C_p^{f,rs}(t) \geq C^{f,rs}(t) \text{ 이면 } f_p^{rs}(t) = 0 \quad \forall r, s, p$$

즉, 시점 t 에서 기종점 r, s 간의 p 경로를 이용하는 경우, 통행비용 $C_p^{f,rs}(t)$ 이 t 시점의 기종점 r, s 간의 최소경로 비용 $C^{f,rs}(t)$ 과 같으면 경로 통행 $f_p^{rs}(t)$ 이 발생하며, 최소경로 통행비용보다 크게 되면, 통행량이 발생하지 않게 된다.

2.2 모형의 구축

위 동적 운전자 균형원리는 교통망에 대한 실시간 완전정보를 가정하고 있다. 따라서 본 연구에서와 같이 운전자들이 교통상황을 완벽하지 알지 못하며, 도로 일부가 제대로 기능을 발휘하지 못한 경우를 반영하기 위해서는 동적 확률적 경로선택모형(Dynamic Stochastic Path Choice Model)이 필요하다. 또한, 도로 용량저하시 이를 혼잡상태로 발전시키지 않기 위해서는 진입램프전략이 필요한데 이에 대해서는 앞에서 기술한 대로 최적제어이론을 이용하여 최적 진입제어량을 구하게 된다. 따라서 이들 두 개의 하위 프로그램도 아래 <그림3>에서와 같이 상호 영향을 미치며 안정상태에 도달할 때까지 반복과정을 거쳐 해를 구하게 된다.



<그림3> 최적 램프제어와 동적 경로선택모형의 관계

위 문제는 비볼록(Non convex)형태로 하나의 문제로 풀기 어렵기 때문에 원 문제를 2개의 문제로 나누어 Bi-level문제로 변화시켜 풀 수 있다. 여기서, 상위문제(Upper level problem)는 램프제어문제로 놓고, 하위문제(Lower level problem)는 동적 경로선택 문제로 구성한다. 이렇게 변환이 되면, 각 문제들은 개별적으로 풀이가 가능한데, 상위문제는 선형제어기의 CARE조건을 만족시킨다는 상황에서 풀고, 하위문제

는 Frank-Wolfe 알고리즘을 수정한 대각화 알고리즘(diagonal algorithm)으로 풀 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 교통분야와 관련된 기존 신뢰성연구들에 대한 검토와 통행시간 신뢰성이라는 측면에서 2가지 새로운 모형의 개발방안을 제시하였다. 교통분야는 시스템 공학분야와는 달리 도로를 사용하는 운전자의 통행행태가 모형에 고려되어야 하는 어려움이 있다. 즉, 도로공사나 사고로 도로의 기능이 저하되는 경우, 운전자들의 대안 경로선택행위를 신뢰성 모형내에 고려해야 한다. 이런 측면에서 본 연구는 교통망 신뢰성과 교통정보와의 결합모형과 고속도로에서의 유고로 인한 최적 램프미터링에 대하여 개념적인 틀에서 모형의 개발방향을 제시하였다. 비록 본 연구에서 제시한 모형들의 구체적인 구성식(Formulation)과 이의 수행결과를 제시하지는 못했지만, 신뢰성이라는 개념을 교통분야와 결합시키는 기본틀을 제시했다는데 논문의 의미가 있다.

참고문헌

- Asakura Y.(1997) Comparison of some reliability models in a deteriorated road network, Journal of EASTS, Vol.2, No.3, 705-720
- Bell M.G.H.(2000) A game theory approach to measuring the performance reliability of transport network, Transportation Research 34B, 533-545
- Bell M.G.H and Iida Y(1998) Transportation Network Analysis
- Ben-Akiva M., Andre de Palma, I. Kaysi(1991) Dynamic network models and driver information systems, Transportation Research 25A, 251-266
- Wardrop J.G.(1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proc. Inst. Civ. Eng., Part. 2, 325-378