



지점과 구간기반 자료를 활용한 실시간 통행시간 추정 모형

Real-time Travel Time Estimation Model Using Point-based and Link-based Data

유 정 훈*

Yu, Jeong Whon

Abstract

It is critical to develop a core ITS technology such as real-time travel time estimation in order that the efficient use of the ITS implementation can be achieved as the ITS infrastructure and relevant facilities are broadly installed in recent years. The provision of travel time information in real-time allows travellers to make informed decisions and hence not only the traveller's travel utilities but also the road utilization can be maximized. In this paper, a hybrid model is proposed to combine VDS and AVI which have different characteristics in terms of space and time dimensions. The proposed model can incorporate the immediacy of VDS data and the reality of AVI data into one single framework simultaneously. In addition, the solution algorithm is made to have no significant computational burden so that the model can be deployable in real world. A set of real field data is used to analyze the reliability and applicability of the proposed model. The analysis results suggest that the proposed model is very efficient computationally and improves the accuracy of the information provided, which demonstrates the real-time applicability of the proposed model. In particular, the data fusion methodology developed in this paper is expected to be used more widely when a new type of traffic data becomes available.

Keywords : *travel time estimation, hybrid model, vehicle trajectory, real-time*

요 지

최근 들어 널리 확대되는 ITS 시설과 장비의 효율적인 활용을 위해서는 실시간 통행시간예측과 같은 핵심기술의 개발이 매우 중요하다. 실시간 통행시간 예측기술을 통해 도로 이용자에게 통행시간 정보를 제공해줌으로써 운전자가 정보에 기반을 둔 선택을 할 수 있게 되며, 이에 따라 도로이용자의 통행 효율 및 도로시설 이용효율을 극대화할 수 있다. 본 연구에서는 자료 성질이 다른 VDS 정보와 AVI 정보를 하나의 틀 안에서 융합하는 모형을 제시하였으며, 이를 통해 VDS 정보의 실시간성과 AVI 정보의 현실반영 특성을 반영한 통행시간 추정이 가능하게 되었다. 또한 실시간 교통정보 제공을 위해 알고리즘의 수치연산 처리량이 실시간 현장 적용이 가능한 수준이 되도록 모형을 개발하였다. 본 연구에서 제시된 통행시간 추정 모형의 적용가능성과 신뢰성은 실제 국도 교통량자료를 이용하여 검증하였다. 실험결과에 따르면 본 모형은 연산처리 효율성이 매우 우수하여 실시간 운영이 가능할뿐만 아니라 실시간으로 수집되는 검지정보를 사용함으로써 예측의 정확도를 향상시켰다. 특히 본 연구에서 제시한 이질적 자료의 융합방법은 향후 새로운 형태의 검지자료를 활용하는데 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : *통행시간추정, 하이브리드 모형, 차량통행패적, 실시간*

* 정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교통시스템공학전공 조교수



1. 서론

국도 ITS(Intelligent Transportation System) 사업의 주요 목적중의 하나는 국도이용자에게 통행 시간(Travel Time), 예상 지체, 병목지점 등 다양한 실시간 교통소통정보를 제공해줌으로써 운전자가 정보에 기반을 둔 통행선택(Informed Decision)을 할 수 있도록 도와주기 위함이다. 이를 통해 국도이용자는 출발시간 조정 및 혼잡한 도로구간을 피하는 경로 선택과 같은 효율적인 통행이 가능하게 된다. 이러한 국도 ITS의 중추기능을 실현하기 위해 가장 핵심적인 기술 중의 하나가 바로 통행시간 추정 및 예측 알고리즘이다. 과거에는 일정한격으로 도로에 설치한 VDS(Vehicle Detection System)에서 주기적으로 검지되는 지점자료 또는 실제로 도로를 주행하면서 교통상황을 측정하는 프로브 차량(Probe Vehicle)들을 이용하여 통행시간을 추정(Estimate)해 왔다. 최근 들어서는 AVI(Automatic Vehicle Identification) 기술을 이용하여 통행시간을 추정하는 사례가 급속히 확산되었으며, AVI를 이용한 통행시간 추정은 통행료 자동징수시스템(Automated Toll Collection Systems)의 등장으로 더욱 촉진되고 있다.

다양한 형태의 검지 장비와 정보를 이용하여 통행시간을 추정하고자 하는 노력은 광범위하게 이루어져 왔다. Srinivasan 등(1996)은 신뢰성있는 실시간 통행시간을 추정하는데 필요한 프로브 차량의 대수를 산정하는 모형을 개발하였다. Wei 등(2007)은 Artificial Neural Network(ANN)을 기반으로 다양한 형태의 교통정보들을 통합하여 고속도로 통행시간을 추정하는 모형을 제시하였다. GPS(Global Positioning System) 정보와 VDS 정보를 결합하여 통행경로별로 통행시간을 추정하였으며 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)가 20% 이내로 나타났다. Sisipiku 등(1994)은 Detector 자료를 이용하여 도시부도로에서의 통행시

간을 예측하는 모형들에 대해서 폭넓게 논의하였으며, 기존 모형들의 검증과 Calibration에 대한 필요성과 예측력 향상을 위한 방안을 제시하였다. Sun 등(2008)은 차량 통행시간 궤적만을 이용하여 통행시간을 추정하는 방법을 제시하였다. 속도와 밀도자료를 통사에 이용하는 기존 방식과 달리 속도만을 Piecewise Truncated Quadratic 형태로 분석함으로써 실제 적용성이 매우 우수한 것으로 나타났다. Mahmassani 등(2002)은 도로지점 정보와 링크정보를 통합하여 통행시간을 추정하는 방식을 제안하였으며, 이를 유고감지시스템에 활용하였다. 한편 국내에서는 주로 VDS와 AVI 자료를 결합하여 통행시간을 예측하고자 하는 시도가 지속적으로 이루어져 왔다(김성현, 2005; 이현재, 2005). 유병석(2005)은 택시에 장착된 GPS에서 검지되는 위치좌표와 휴대폰 기지국 정보를 이용하여 도시부 간선도로의 통행시간을 추정하였다. Mobile 위치정보를 이용한 통행시간 추정은 검지지점에 대한 제약이 없다는 점에서 VDS 장비설치가 용이하지 않은 지역에 대해서 매우 유용한 대안이 될 수 있다.

고속도로와 같은 연속류에서는 신호등과 같이 교통흐름을 인위적으로 단절시키는 시스템이 없어 VDS를 통해 검지되는 지점정보만을 가지고도 대부분의 경우 통행시간 추정에 있어서의 신뢰성을 충분히 확보할 수 있다. 그러나 국도와 시가지 도로에서는 교통신호 및 주변도로로부터의 유출입차량에 의한 교통흐름의 단절이 빈번히 이루어짐으로 인해 VDS와 같은 지점정보만으로는 통행시간 추정의 신뢰성을 확보하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 AVI를 통해 검지되는 구간 통행시간 정보와 VDS에서 측정되는 각 지점별 실시간 교통류 자료를 결합하여 통행시간 추정의 신뢰도를 높이고자 한다. 본 연구에서 제시된 통행시간 추정 모형은 실제 국도 교통량자료를 이용하여 모형의 적용가능성과 신뢰성을 검증하였다.



2. 방법론

2.1 통행시간 추정 개념

본 연구에서 제시하는 통행시간 추정모형을 이해하기 위해서는 현재 개념적으로 혼재되어 사용되고 있는 통행시간 추정(Estimation)과 통행시간 예측(Forecasting)의 구체적 정의와 추정통행시간의 개념에 대해서 분명하게 설정할 필요성이 있다. 여기서 논의하는 모형과 알고리즘에서는 사용하는 지점 속도와 구간통행시간 자료는 VDS와 AVI에서 각각 얻어지며, 우선적으로 필터링(Filtering)과 보정(Imputation) 과정을 거쳐 에러가 제거된 상태라고 가정한다.

다음과 같이 단속류에 대한 교통정보제공구간에 대해서 차량 i 가 A 교차로에서 출발하여 B 교차로까지를 이동할 경우를 고려해 보자. 현재 시간이 t^* 일 때 A 지점에 설치되어 있는 VMS(Variable Message Signs)를 통해 $ABCD$ 구간의 통행시간 정보를 차량 i 에게 제공한다고 할 때 이때 제공되는 통행시간에 대한 개념은 다음과 같이 정의될 수 있다.

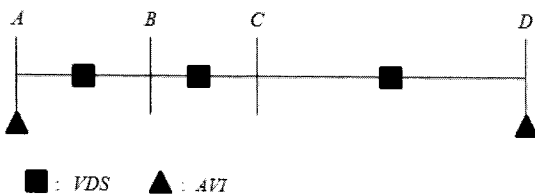


그림 1. VDS와 AVI 설치 단속류 구간

추정통행시간이라 함은 현재 VDS를 통해 검지되는 통행상태가 차량 i 가 $ABCD$ 구간을 통과할 때까지 변화하지 않는다고 가정하고 산출된 통행시간이다. 이에 반해 예측통행시간은 차량 i 가 $ABCD$ 구간을 통과하는 동안에 변화하는 통행상태를 사전에 예측한 후 이를 동적으로 반영하여 산출된 시간이다. 예를 들어, 시간 t^* 에서 AB 구간을 통행하는데 10분이 소요된다고 하면, BC 구간을 통행하는데 걸리는

시간은 $(t^* + 10\text{분})$ 후의 BC 구간의 통행상태를 예측한 후 이를 바탕으로 산정된다. 이와 같은 방법으로 CD 구간의 통행시간을 구한 후 모두 합산하여 현재 시간 t^* 를 기준으로 $ABCD$ 구간에 대한 통행시간을 예측한다.

위에서 정의된 바와 같이 예측통행시간은 차량이 이동하는 동안에 변화하는 교통상황을 미리 예측하여야만 하므로 각 교차로에서 진출입 통행량, 신호제어 등과 같은 매우 구체적이고 다양한 자료들이 실시간 또는 사전에 제공되어야만 한다. 하지만 현재 국토 ITS 사업을 통해 설치 운영되는 장비들을 통해서 이와 같은 자료들을 획득할 수 없으므로 통행시간 예측은 현실적으로 불가능한 상황이다. 따라서 현재 실질적으로 제공할 수 있는 통행시간정보는 추정통행시간에 국한된다.

추정 통행시간이 현재 교통상태가 당분간 지속된다고 보는 가정에서 산출되었다는 본질적 한계에도 불구하고 현실적으로는 적용성이 매우 높고 정보의 신뢰성도 상당부분 확보할 수 있다. 이는 일반적으로 정보제공구간이 평상시 10~20분이면 주행할 수 있는 거리이고 이러한 단기간에는 교통흐름상태의 변화가 그리 크지 않을 가능성이 높기 때문이다. 따라서 여기서 제시하는 알고리즘을 포함하여 현재 국토 ITS에서 적용되고 있는 통행시간정보제공 알고리즘들은 단거리 구간에 대해서 적용할 때 충분한 효과와 신뢰도를 담보할 수 있다. 그러므로 향후 다양한 교통관련 자료를 실시간으로 수집할 수 있는 Sensing Network이 구축된다면 통행시간 예측알고리즘이 기존의 통행시간 추정알고리즘을 대체하게 될 것이며, 이럴 경우에는 서울~대전과 같은 장거리구간에 대해서도 신뢰성있는 통행시간정보 제공이 가능할 것으로 예상된다.

2.2 VDS와 AVI를 이용한 통행시간 추정

2.2.1 VDS 모형

VDS를 이용해 추정한 통행시간은 교차로에서 교



차로까지를 통과하는데 소요된 구간순행시간과 교차로를 통과하는데 소요되는 지체시간의 합으로 구성된다. 구간순행시간은 영상검지기에 수집되는 각 차로별 지점속도를 교통량이 고려된 가중 평균값으로 산출한 지점 통과속도를 해당 구간의 길이로 나누어서 계산한다. 이에 반해 교차로 지체는 일반적으로 KHCS(Korea Highway Capacity Software) 모형을 주로 사용하여 계산하고 있다(이현재, 2005). 하지만 이와 같은 교차로 지체 산정식은 교차로 접근로별 통행량이 실시간으로 수집되어야 하고 교차로의 지체도가 높아지면 추정력이 급격히 떨어지게 되어 실제 국도에서 적용하는데 어려움이 많은 실정이다. 반면에 교차로 지체를 고려하지 않아도 되는 고속도로와 같은 연속류 구간에서는 VDS를 이용한 통행시간추정이 매우 효율적으로 적용되고 있다.

통행시간 추정 측면에서만 살펴보면 VDS는 장점과 단점을 동시에 가지고 있다. 우선 VDS는 교차로 사이를 통과하는데 소요된 구간 순행통행시간을 추정하는데 매우 효과적이고 정확도가 높으며, 실시간으로 구간 순행통행시간을 측정할 수 있다. 또한 VDS는 설치지점을 통과하는 모든 차량들을 관측하기 때문에 통계적으로 신뢰도가 매우 높은 통행시간 추정치를 제공한다. 하지만 VDS는 교차로를 통과하는데 걸리는 통과지체에 대한 직접적인 계측이 불가능하므로, 교차로 접근로에 설치된 검지기를 통해 관측되는 통행량을 바탕으로 개략적인 교차로 지체 추정을 위해 개발된 KHCS 모형을 이용하여 교차로 통과시간을 추정하게 된다. 따라서 VDS의 경우 교차로 지체를 고려하지 않아도 되는 고속도로와 같은 연속류 구간에서는 통행시간추정에는 매우 효율적으로 적용될 수 있으나, 본 연구에서 다루는 다수의 교차로가 존재하는 국도와 같은 단속류에서는 사용이 제한적일 수밖에 없다.

2.2.2 AVI 모형

AVI 자료를 활용하여 통행시간을 추정하기 위해서는 통계적으로 유의한 수준의 최소표본수를 확보하

여야 한다. 최소표본수가 확보된 후에는 정상적인 형태의 통행패턴을 형성하지 않는 차량들에 대해서 예외처리를 거치게 되며, AVI 구간단위로 차량 매칭자료를 이용하여 통과차량들의 구간통행시간을 산출하고 이를 바탕으로 특이 값들에 대한 필터링을 하게 된다. 통행시간 추정 측면에서만 살펴보면 AVI는 뚜렷한 장점과 단점을 가지고 있다. AVI는 한 쌍(Pair)이 설치된 도로구간을 통과하는데 걸리는 시간을 직접적으로 계측하므로, AVI를 통해 관측된 차량의 통행시간을 단순명료하고 정확하게 측정할 수 있다. 하지만 차량이 종점부 AVI를 통과한 후에야 해당 차량의 구간 통행시간이 측정되므로, 측정시점에서 시점부 AVI를 막 통과하는 차량이 해당 구간을 통과하는데 걸리는 시간과는 차이가 있으며, 이를 통행시간 추정의 시간차임(Time Lag)이라고 부른다. 이러한 AVI 자료는 차량이 종점에 도착한 후에야 정의되는 과거정보이므로 현재를 기준으로 시간차임(Time Lag)이 존재하는 자료이다. 따라서 현재시간 t^* 에서 실시간 통행시간 측정은 가능하지 않다. 또한 현재 설치된 AVI 수량으로는 VDS에 비해 상대적으로 통행시간 관측표본수가 매우 작기 때문에 통행시간 추정치의 통계적 신뢰도 확보가 쉽지 않은 것은 대표적인 단점이다.

2.2.3 VDS와 AVI 결합 모형

점차적으로 설치가 확장되고 있는 AVI의 효율적인 활용을 위해 VDS와 AVI를 각각 사용하여 추정된 통행시간 추정값을 결합하여 새로운 추정통행시간을 산출하고자 하는 노력들이 다양하게 시도되어 왔다(김성현, 2005; 이현재, 2005). 하지만 VDS 통행시간과 AVI 통행시간은 본질적으로 차원(Dimension)이 다른 값들이기 때문에 단순히 결합하는 것은 매우 성급한 접근방법이라고 볼 수 있다. 첫째, 공간적으로(Space) 차원이 다른 점을 들 수 있다. VDS 자료는 어느 한 지점에서 관측된 지점정보(Point-based)이고 AVI 자료는 시점과 종점이 정의되는 구간정보(Link-based)이다. 둘째, 시간적으



로(Time) 차원이 다르다는 사실이다. VDS 자료는 실시간으로 정의되는 순간정보(Instantaneous)인 반면에 AVI 자료는 위에서 살펴본 바와 같이 시간차집이 발생한 과거정보이다. 따라서 VDS만을 이용한 기존의 통행시간 추정방식을 개선하여 AVI와 VDS를 동시에 활용함으로써 통행시간 추정치의 정확도를 향상시키기 위한 새로운 모형의 개발이 요구된다.

2.3 Hybrid 모형

앞에서 살펴본 바와 같이 통행시간정보의 정확도는 최우선적으로 교통검지장비들의 설치 밀도에 의해 결정되며, 한정된 수의 교통검지장비의 활용도를 높이기 위해 VDS와 AVI 장비 각각의 장점과 단점을 체계적으로 분석하여 장점을 최대한 살리고 단점을 보완하는 방식이 되어야 한다. VDS 자료와 AVI 자료를 결합하여 통행시간을 추정하는 Hybrid 모형에서는 앞서 설명한 바와 같이 우선 차원이 다른 두 가지 정보를 동기화(Synchronization)시킬 필요가 있다. 현재 시간 t^* 에서 상대적으로 정확한 정보는 실시간으로 검지되는 VDS 자료라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 VDS 정보를 이용하여 구간순행시간을 산출하고, 현행 방식으로 신뢰성이 있는 추정이 어려운 교차로 통과시간은 AVI 자료를 활용하여 구하는 방식을 제안하고자 한다.

2.3.1 통행시간 추정식

VDS와 AVI의 장점을 살리고 단점을 보완하기 위해 통행시간을 “교차로간 구간순행시간”과 “교차로 통과지체”의 합으로 구성한 모형식을 이용한다. 이때 “교차로간 구간순행시간”은 시간차집이 발생하지 않고 통계적으로 신뢰도가 매우 높은 VDS의 구간순행시간 측정값을 이용한다. “교차로통과지체”는 일반적으로 시간이 흐름에 따라 변화가 매우 크지는 않기 때문에 측정시 시간차집의 영향이 크지 않다고 볼 수 있으며, 따라서 바로 이전에(예를 들어 5~15분 전) 측정된 AVI 통행시간값과 VDS를 통해 측정된

구간순행시간을 활용하여 “교차로통과지체”를 간접적으로 측정하게 된다. 이러한 방식은 각 교차로별 교통특성을 충분히 감안하기 어려운 KHCS 모형에 비해서 매우 단순명료하고 현실감이 있다고 할 수 있다.

그림 2에서와 같이 통행시간정보 제공간격은 Δt 이며 현재 시간을 t^* 라고 하면, 현재시점 t^* 에서 추정하는 통행시간 T_{t^*} 를 구하는 식은 다음과 같다.

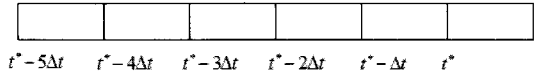


그림 2. 통행시간 정보제공 간격

$$T_{t^*} = VDS_{t^*} + G_{t^*} \quad (1)$$

여기서,

T_{t^*} : 현재 시점 t^* 에서 추정된 구간 통행시간

VDS_{t^*} : 현재 시점 t^* 에서 VDS를 통해 측정된 “교차로간 순행통행시간” 측정값

G_{t^*} : 현재 시점 t^* 를 기준으로 교차로 통과지체(AVI 통행시간 측정값과 VDS를 통해 측정된 구간순행시간의 차이 값)

G_{t^*} 는 과거(t^* 이전 5~15분전)에 측정된 G 값들을 이용하여 추정된 수치이며, 이는 현재 시점 t^* 에서의 “교차로통과지체”는 현재 교차로를 통과하고 있는 차량들이 종점부 AVI를 통과한 후에야 측정이 가능하기 때문이다. 하지만 일반적으로 “교차로통과지체”는 단기간 내에 급격하게 변화하지는 않기 때문에 단기 추정치를 활용하여도 무방한 것으로 판단된다. 따라서 G_{t^*} 에 대해서 신뢰성 있는 값을 추정할 수 있다면 T_{t^*} 는 실시간으로 추정이 가능하며, 과거에 관측된 자료에 대해서는 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} T_{t^*-\Delta t} &= VDS_{t^*-\Delta t} + G_{t^*-\Delta t} \\ T_{t^*-2\Delta t} &= VDS_{t^*-2\Delta t} + G_{t^*-2\Delta t} \\ &\vdots \\ T_{t^*-n\Delta t} &= VDS_{t^*-n\Delta t} + G_{t^*-n\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$



2.3.2 $T_{t^*-n\Delta t}$ 추정

과거 자료에서 $T_{t^*-n\Delta t}$ 는 해당 시간대에 관측된 AVI 정보가 가장 잘 반영한다고 볼 수 있으며 AVI 자료를 이용한 $T_{t^*-n\Delta t}$ 는 다음과 같이 차량의 Time-Space Diagram을 이용하여 산출된다.

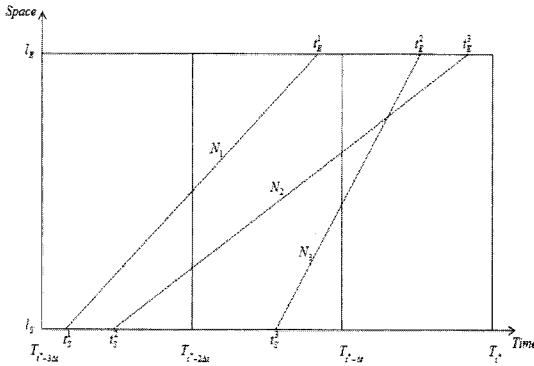


그림 3. 차량 Time - Space Diagram

AVI를 통해 과거에 관측된 N_1, N_2, N_3 , 세 차량에 대한 Time-Space Diagram을 그려보면 위와 같은 통행궤적(Travel Trajectory)을 구할 수 있다. 차량의 실제 통행궤적은 순행구간통행과 교차로 통과를 거치므로 계단형으로 표현되지만 여기서는 AVI 자료를 바탕으로 직선으로 단순화하였으며, Time 축과 Space 축을 각각 x 축과 y 축으로 정의할 때 차량 N_i 의 통행궤적에 대한 직선식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$y = \frac{l_E - l_S}{t_E^i - t_S^i} (x - t_S^i) + l_S \quad (3)$$

여기서,

l_S : 구간 시점

l_E : 구간 종점

t_S^i : 차량 N_i 의 구간 시점 통과 시간

t_E^i : 차량 N_i 의 구간 종점 통과 시간

그림 3에서 묘사된 세 차량들의 통행궤적을 살펴보면, 가장 왼쪽에 정의된 첫 번째 시간구간(Time Interval)인 $T_{t^*-3\Delta t}$ 와 $T_{t^*-2\Delta t}$ 사이에서는 차량 2대

(N_1, N_2)가 관측되었고, 두 번째 시간구간에서는 3대(N_1, N_2, N_3)의 차량이 관측되고, 마지막 세 번째 시간구간에서는 2대(N_2, N_3)의 차량이 관측되었다. 이렇게 시간구간별로 다르게 관측된 AVI 차량정보를 가지고 각 시간구간별로 다음과 같이 구간 통행시간을 산출할 수 있다.

$$V_{t^*-n\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^m s_{t^*-n\Delta t}^i}{\sum_{i=1}^m d_{t^*-n\Delta t}^i} \quad (4)$$

$$T_{t^*-n\Delta t} = \frac{l_E - l_S}{V_{t^*-n\Delta t}} \quad (5)$$

여기서,

$V_{t^*-n\Delta t}$: $t^*-n\Delta t$ 와 $t^*-(n-1)\Delta t$ 사이 시간구간의 차량 평균 통행속도

m : 분석기간 동안 AVI에 관측된 차량 수

$s_{t^*-n\Delta t}^i$: $t^*-n\Delta t$ 와 $t^*-(n-1)\Delta t$ 사이 시간구간에 차량 N_i 가 이동한 거리

$d_{t^*-n\Delta t}^i$: $t^*-n\Delta t$ 와 $t^*-(n-1)\Delta t$ 사이 시간구간에 차량 N_i 가 이동한 거리

2.3.3 G_{t^*} 추정

위에서 구한 $T_{t^*-n\Delta t}$ 를 이용하여 식(2)로부터 $G_{t^*-n\Delta t}$ 값들을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{t^*-\Delta t} &= T_{t^*-\Delta t} - VDS_{t^*-\Delta t} \\ G_{t^*-2\Delta t} &= T_{t^*-2\Delta t} - VDS_{t^*-2\Delta t} \\ &\vdots \\ G_{t^*-n\Delta t} &= T_{t^*-n\Delta t} - VDS_{t^*-n\Delta t} \end{aligned} \quad (6)$$

각 시간구간별로 구해진 과거 $G_{t^*-n\Delta t}$ 들을 이용하여 현재 시점에서의 G_{t^*} 을 구하는 방법으로 회귀분석, 시계열분석, Kalman Filter 등 다양한 모형들이 활용가능하다. 실시간 처리가 요구되는 G_{t^*} 추정을 위해 본 연구에서는 연산처리가 간결하고 Curve



Fitting에 편리하게 사용되는 Polynomial Regression을 적용하였다(Walpole 등, 2002). Polynomial Regression 모형은 다양한 형태의 변화를 가지는 관측값에 대한 Extrapolation에 매우 효과적이며 수식은 다음과 같다.

$$G_t = \beta_0 + \beta_1 t^1 + \beta_2 t^2 + \dots + \beta_k t^k + \epsilon_t \quad (7)$$

여기서, t : 시간주기 t

G_t : 시간주기 t 에서 관측된 G 값

설정된 k 값에 따라 모형 추정에 소요되는 (t, G_t) 관측치의 개수가 결정되며, k 의 선택은 도로구간의 교통 및 물리적 특성에 따라 유동적으로 적용할 수 있다. 관측값을 이용하여 Polynomial Regression 식이 추정되고 나면 G_t 는 다음과 같이 구해진다.

$$G_t = \beta_0 + \beta_1 (t^*) + \beta_2 (t^*)^2 + \dots + \beta_k (t^*)^k \quad (8)$$

3. 모형 적용

3.1 실험 자료

본 연구에서 제안된 통행시간 추정모형의 실제 적용성을 검증하기 위해 수도권에 위치한 국도46호선 퇴계원~답내 구간에 운영중인 국도 ITS 장비에서 수집한 자료를 사용하였다. 실험 대상 도로구간인 국도46호선은 서울 동부지역과 춘천간의 장거리 통행과 수도권 동북부 택지개발지구에서 서울로 출퇴근하는 단거리라 교통이 혼재되어 있는 구간이며, 특히 주말에는 여가통행이 몰려 교통정체가 상시적으로 발생하는 교통 혼잡구간이다. 분석대상 구간은 총 4.36km로 시점과 종점에 AVI 설치되어 있으며, 구간 내에 총 3개의 VDS가 설치되어 있다.

VDS에서 수집된 원시자료 중에서 비정상적인 자

료들은 필터링(Filtering)을 통해 제거하고 누락된 자료는 보정한 후 통행속도 추정에 사용된다. 필터링과 보정을 거친 자료는 마지막으로 평활화 과정을 통해 특이치를 제거하고 나면, 표 1에서 제시된 바와 같은 형태로 이용할 수 있게 된다.

표 1. 통행시간 추저에 사용되는 VDS 검지자료

검지기ID	날짜	발생시분	교통량	평균속도	점유율
1246026040	20060307	1800	111	70.7	0.057
1246026050	20060307	1800	90	84.9	0.035
1246026060	20060307	1800	88	69.4	0.044
1246026040	20060307	1801	127	70.6	0.065
1246026050	20060307	1801	104	84.8	0.04
1246026060	20060307	1801	77	70.4	0.036
1246026040	20060307	1802	93	70	0.05
1246026050	20060307	1802	120	85.5	0.047
1246026060	20060307	1802	79	70.7	0.037
1246026040	20060307	1803	123	70.5	0.063
1246026050	20060307	1803	95	86.7	0.037
1246026060	20060307	1803	82	70.8	0.038
1246026040	20060307	1805	117	70.5	0.06
1246026050	20060307	1805	133	84.7	0.053
1246026060	20060307	1805	80	68.1	0.039

AVI를 통해 검지된 차량자료는 통행시간 산정에 필요한 최소표본수의 확보가 우선되어야 하며, 최소표본수가 확보된 경우에는 비정상적인 통행패턴을 보이는 원시자료에 대한 보정을 거치게 된다. 특히 AVI에 검지된 차량들은 구간단위로 매칭(Matching)하게 되므로 차량이 구간중간에서 정차하는 것과 같은 특이 값들에 대한 필터링을 반드시 거쳐야만이 통행시간 추정의 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 연구에서 사용된 AVI 검지 자료 형태는 표 2에서 제시된 바와 같다.

3.2 결과 분석

일반적으로 VMS(Variable Message Signs)을 통해 운전자에게 제공되는 교통정보는 5분 단위로



표 2. AVI 검지 자료

AVI 구간ID	날짜	구간진입	구간진출	속도(km/h)
1294676030	20060307	173236	174013	33.95
1294676030	20060307	173349	174019	39.78
1294676030	20060307	173352	174021	39.89
1294676030	20060307	173402	174021	40.94
1294676030	20060307	173359	174027	39.99
1294676030	20060307	173408	174029	40.72
1294676030	20060307	173241	174047	31.93
1294676030	20060307	173426	174050	40.41
1294676030	20060307	173435	174056	40.72
1294676030	20060307	173447	174200	35.83
1294676030	20060307	173516	174209	37.57
1294676030	20060307	173556	174216	40.83
1294676030	20060307	173559	174332	34.25
1294676030	20060307	173603	174333	34.48
1294676030	20060307	173606	174334	34.63
1294676030	20060307	173615	174336	35.18
1294676030	20060307	173613	174342	34.56
1294676030	20060307	173721	174343	40.62
1294676030	20060307	173625	174344	35.34
1294676030	20060307	173635	174345	36.08
1294676030	20060307	173810	174422	41.71
1294676030	20060307	173747	174428	38.69
1294676030	20060307	173801	174436	39.28
1294676030	20060307	173812	174438	40.2
1294676030	20060307	173453	174451	25.95

갱신되고 있다. 따라서 모형검증을 위한 실험에서는 실시간 통행시간 추정시 Δt 를 5분으로 설정하였으며, 분석에 사용된 자료는 07:35~08:05분까지의 30분 동안 관측된 자료를 활용하였다.

AVI에 관측된 차량들의 Time-Space Diagram을 식 3을 통해 시간 구간별 차량 이동거리 및 통행시간을 표 3에 제시된 바와 같이 구할 수 있다. 산출된 $s_{i-n\Delta t}^i$ 와 $d_{i-n\Delta t}^i$ 를 이용하여 식 4와 식 5를 이용하여 시간구간별로 차량 평균 통행속도와 구간 통행시간을 추정할 수 있다.

표 4에 제시된 바와 같이 AVI를 이용해 구한 시간 구간별 총 통행시간과 VDS를 통해 구해진 순행구간 통행시간의 차이를 통해 각 시간구간 별 교차로 통과지체($G_{i-n\Delta t}^i$)를 구할 수 있다.

표 4에 제시된 바와 같이 최근 30분 동안 5분 간격으로 추정된 교차로 통과지체 추이를 이용하여 현재시간구간 T_0 (8:05~8:10)에서의 구간통행시간을 예측할 수 있다. 즉, 현재 시점 t^* (8:05)에서 측정된 VDS_t^* 와 과거추이를 통해 예측되는 G_t^* 를 합한 값이 T_0 에서의 구간통행시간이라고 할 수 있다. 이를 위해 Polynomial Regression을 이용하여 G_t^* 를 추정한다. 본 실험에서는 5분 간격으로 최근 30분 자료를 사용하므로 k 값을 3으로 설정한 다음과 같은 Polynomial 식을 사용하였다.

표 3. 시간 구간별 차량 이동거리 및 통행시간

시간 구간	T_6		T_5		T_4		T_3		T_2		T_1	
	이동 거리	통행 시간	이동 거리	통행 시간	이동 거리	통행 시간	이동 거리	통행 시간	이동 거리	통행 시간	이동 거리	통행 시간
07:35~07:40	1373.57	287	1309.54	255	114.99	12	1241.49	168	891.01	75	3468.99	292
07:40~07:45	338.71	47	219	22	528.48	60	1597.72	225	1141.62	94	3218.38	265
07:45~07:50	760.91	300	325.04	29	1400.69	204	23.38	2	1005.15	77	3354.85	257
07:50~07:55	2135.31	215	3460.32	300	2061.26	217	2326.84	206	2742.14	300	219.37	24
07:55~08:00	1814.76	159	3237.62	300	2075.28	218	2437.13	218	2926.17	300	224.34	23
08:00~08:05	2204.28	227	3221.67	300	2132.81	226	2569.29	231	2959.28	300	207.15	21
	2224.49	225	2747.9	300	2361.3	267	2712.39	242	2965.99	300	177.96	18
	2277.32	234	3129.19	300	2320.5	256	2874.73	300	2231.7	259		

(계속)



	3433.07	300	2224.69	224	3144.74	295	3289.51	295	1922.87	172		
	3362.47	300	2135.51	216	1435.78	300	3114.29	285	1370.29	143		
	3353.85	300	2082.68	214	2893.81	300	2973.69	281	1481.76	139		
	2862.14	300	2063.73	213	1859.31	258	3003.56	279	1189.09	135		
			2040.44	212	644.24	254	2946.83	269	899.46	131		
			1361.84	129	2677.19	245	2420.17	262	397.12	48		
			1208.31	120	2297.98	224	2865.78	257	206.07	19		
			640.84	56	2379.16	221	2616	255	21.37	2		
			567.71	50	2194.9	221	2821.18	253				
			241.58	21	1683.79	151	2284.72	240				
			235.37	21	1271.67	133	2227.19	236				
			212.41	19	1249.93	127	1998.7	226				
			124.03	13	1143.29	118	2039.5	225				
					1059.79	114	1944.56	223				
					429.56	40	1387.27	133				
					187.75	18	1320.58	126				
					170.15	16	1154.7	116				
							1215.26	114				
							114.86	24				
							48.23	5				
합계	26140.9	2894	32789.4	3314	39718.4	4495	57569.6	5696	24351.1	2494	10871	900
속도 (km/h)		32.52		35.62		31.81		36.39		35.15		43.48
시간 (초)		482.69		440.66		493.43		431.38		446.54		360.96

표 4. 시간구간별 교차로 통과지체

시간구간	T_6	T_5	T_4	T_3	T_2	T_1
$T_{i-n\Delta t}$	482.69	440.66	493.43	431.38	446.54	360.96
$VDS_{i-n\Delta t}$	445.17	403.46	458.51	394.11	404.42	323.15
$G_{i-n\Delta t}$	37.52	37.20	34.92	37.28	42.12	37.81

$$G_i = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \epsilon_i \quad (9)$$

통계 Package인 MINITAB을 이용하여 식 9를 추정하였으며 통계분석 결과는 그림 4에 제시된 것과 같다. 이때 계산 편의상 T_6 에 해당하는 t 값을 1로 하고 시간구간별로 t 값을 1씩 증가시켰다. 따라서 G_i 를 구하기 위한 t 값은 7로 설정된다.

The regression equation is					
$G = 47.3 - 13.0 t + 4.28 t^2 - 0.393 t^3$					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	47.273	8.784	5.38	0.033	
t-12.99	10.01	-1.30	0.324		
t^2	4.277	3.2031.34	0.313		
t^3	-0.3929	0.3027	-1.30	0.324	
S = 2.436 R-Sq = 57.1% R-Sq(adj) = 0.0%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	15.794	5.265	0.89	0.569
Residual Error	2	11.871	5.936		
Total	5	27.665			
Source	DF	Seq SS			
t	1	4.926			
t^2	1	0.866			
t^3	1	10.002			

그림 4. MINITAB 출력 결과



4. 결론

급속도로 확대되는 ITS 기반 시설의 효과적인 활용과 운전자 차량내에 장착되는 고가 장비들의 효용을 극대화하기 위해서는 신뢰성있는 실시간 교통정보의 제공이 매우 중요하다. 특히 운전자가 통행하고자 하는 구간에 대한 실시간 통행시간 정보 제공은 현재 운영되고 있는 교통정보제공체계의 핵심 항목이라 할 수 있다. 따라서 ITS를 통해 수집되고 제공되는 통행시간 정보의 신속성과 정확도를 향상시키기 위한 노력이 꾸준히 이루어져 왔다.

본 연구에서는 VDS와 AVI를 통해 수집되는 수치자료들의 차원 특성을 고려한 통행시간 추정모형을 제시하였다. 공간적, 시간적으로 다른 성질을 가지는 VDS 통행시간정보와 AVI 통행시간정보를 하나의 틀 안에서 융합할 수 있는 모형을 개발하였으며, VDS 정보의 실시간성과 AVI 정보의 현실반영 특성을 살리는데 중점을 두었다. 또한 교통정보제공이 실시간으로 이루어져야 한다는 제약조건을 반영하여 실시간 현장 적용이 가능한 수준의 수치연산 처리량을 가지도록 통행시간 추정 알고리즘을 구축하였다.

본 연구에서 제시된 모형은 실제 국토 ITS 자료를 활용하여 모형의 실제 적용성을 검증하였으며, 실험결과 매우 우수한 연산처리 효율성을 보임으로써 현장에서 실시간 운영이 가능한 현실적인 모형으로 판단된다. 향후 실시간 교통류 검지장비가 확대 설치됨에 따라 신뢰성 높은 통행시간 정보를 제공하는 것이 가능해질 것으로 판단되며, 본 연구에서 제시한 차량 이동 궤적을 이용한 통행시간 추정 기법은 차량 GPS 추적 정보와 같은 새로운 검지자료가 수집가능해지면 보다 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 1학기 아주대학교 정착연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김성현(2005), "일반국도의 동질구간 내 지점 및 구간검지기 자료의 융합을 통한 통행시간 추정 알고리즘 개발", 박사학위논문, 서울대학교.
- 이현재(2005), "VDS와 AVI 기반의 최적 통행시간 추정 모형 개발", 박사학위논문, 아주대학교.
- 유병석(2005), "Mobile 위치정보를 이용한 통행시간 추정모형 개발", 박사학위논문, 서울대학교.
- Mahmassani, H. S., Hass, C., Logman, H., and Shin, H. (2002) "integration of point-based and link-based incident detection and traffic estimation", Technical Report FHWA/TX-04-0-4156-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Sisiopiku, V. P. and Roupail, N. M. (1994) "Toward the use of detector output for arterial link travel time estimation: a literature review", *Transportation Research Record*, 1457, pp. 158-165.
- Srinivasan, K. K., and Jovanis, P. P. (1996) "Determination of number of probe vehicles required for reliable travel time measurement in urban network", *Transportation Research Record*, 1537, pp. 15-22.
- Sun, L., Yang, J. and Mahmassani, H. (2008) "Travel time estimation based on piecewise truncated quadratic speed trajectory", *Transportation Research Part A, Vol. 42, No. 1*, pp. 173-186.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Te, K., and Yee, K. (2002) *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Wei, C. and Lee, Y. (2007) "Development of freeway travel time forecasting models by integrating different sources of traffic data", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56, No. 6, pp. 3682-3694.

접 수 일: 2008. 2. 29

심 사 일: 2008. 3. 3

심사완료일: 2008. 3. 7