

■ 論 文 ■

차량검지기 교통량 데이터를 이용한 고속도로 통행시간 추정 및 예측모형 개발에 관한 연구

Development of a Freeway Travel Time
Estimating and Forecasting Model using Traffic Volume

오 세 창

(아주대학교
환경건설교통공학부 부교수)

김 명 하

(한국도로공사
교통정보센터)

백 용 현

(아주대학교
박사과정)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구 배경 및 목적
 - 2. 연구 범위 및 방법
 - II. 관련연구 검토
 - III. 통행시간 추정 및 예측방법론 정립
 - 1. 고속도로 혼잡시 교통류 특성
 - 2. 통행시간 추정 모형
 - 3. 적용
 - 4. 칼만필터(Kalman Filter)를 이용한 예측모형
 - IV. 통행시간추정 및 예측모형의 적용
 - 1. 현장자료의 수집
 - 2. 추정모형의 적용
 - 3. 예측모형의 적용
 - V. 결론 및 향후 연구방향
- 참고문헌

Key Words : 고속도로 구간 통행시간, 교통량, 통행속도, 추정, 예측, 칼만필터

요 약

본 연구는 차량검지기 데이터를 이용한 통행시간 추정 및 예측에 관한 수집기법 및 추정·예측기법의 고찰을 통해 고속도로 환경에 적합한 통행시간 추정 및 예측모형을 개발하는 데 목적이 있다.

먼저, 기존 통행시간 추정기법의 고찰을 통해 차량검지기에서 수집되는 교통데이터 중 교통류의 변동을 민감하게 포착할 수 있는 교통량을 이용한 통행시간 추정모형을 정립하고자 하였다. 기존방식인 차량검지기 속도 데이터를 이용한 통행시간과 본 연구에서 제안한 추정모형과의 비교 분석을 위해, 실측치에 거의 근사하는 통행료 징수시스템의 출발지기준 통행시간을 이용하여 통행시간 산출기법의 적용성 평가를 수행한 결과, 고속도로 구간의 혼잡시 본 연구모형에 의한 통행시간 산출방식이 기존방식보다 신뢰성있는 통행시간을 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 고속도로 구간의 차량통과속도가 70km/h이상일 때는 기존 차량검지기 속도 데이터를 이용한 통행시간 산출방식을 적용하고 혼잡시에는 교통량을 이용한 추정모형에 의한 통행시간 산출 방식을 병용하여 적용하는 것이 타당하다는 결론을 도출하였다.

통계적 모형을 이용한 교통상황의 예측과 보다 정확한 통행시간을 예측하기 위해 본 연구에서 칼만필터를 이용한 단기 예측을 수행해 본 결과, 시시각각 변화하는 고속도로의 교통류에 대해 예측력이 우수한 것으로 판단되었다.

1. 서론

1. 연구 배경 및 목적

교통사고나 교통혼잡, 교통공해 등 교통환경에 대한 사회적 관심을 점점 높아지고 있고 도로의 신설, 확장에는 막대한 비용 뿐만 아니라 개통되기까지 장기의 건설소요시간과 용지확보 문제로 고속도로의 이용효율을 대폭 개선하기에는 한계가 있다. 따라서 고속도로를 이용하는 운전자에게 있어 교통지체의 유무, 목적지까지의 최단경로, 도로유지보수작업 상황, 노면 상태, 기상상황 등에 관한 정보는 도로를 빠르고 안전하며 쾌적하게 통행하기 위하여 필요불가결한 것이다.

정확한 고속도로 교통정보가 시기적절하게 제공되면, 고속도로 이용자는 도로의 혼잡구간이나 작업구간을 우회하거나 사전에 강설, 강우, 안개 등 기상악천후에 대비하는 것이 가능하여 운전의 안정성이나 쾌적성을 향상시킬 수 있다. 그리고 고속도로망 전체적으로는 교통사고가 감소함은 물론 교통량이 집중됨에 따라 혼잡한 교통류를 시공간적으로 분산이 유도되어 고속도로망의 이용효율을 높일 수 있는 효율과 효과가 증대된다.

서울을 중심으로 대도시권에서, 고속도로의 운영에 관한 제 문제 중 하나는 교통혼잡이다. 명절, 행락철은 물론 주말 등 대부분 휴일과 대도시권의 출퇴근 시간대에는 지체발생이 증가하여 고속도로를 이용하는 운전자들로부터 "목적지까지의 소요시간"이나 "지체발생 구간의 통과예상시간"을 제공해 달라는 요구가 증가하고 있다. 운전자의 주관적 판단에 의거하여 교통소통상황의 개선을 도모하는 교통정보의 역할은 점점 중요시되고 있다.

최근들어 비약적으로 발전하고 있는 정보통신기술을 활용한 ITS(Intelligent Transportation Systems)의 조기 실용화를 위해 도로이용자에 대한 고품질 정보의 제공이나 편리성 향상의 관점에서 제공되는 교통정보의 내용과 제공방법 등에 부가가치를 높여 고속도로 이용객에게 보다 편리성이 우수한 서비스를 실현해야 하는 과제가 국내에서 다각적으로 추진되고 있으며 선진국에서도 교통지체 예측 등의 선진적 기술에 대해서는 다각적 관점에서 검증과 실용화를 추진중에 있다.

교통정보가 고속도로 이용객들에게 신뢰받고 폭넓

게 제공되기 위해서는 첫째, 원시데이터의 신뢰도를 높여야 하며, 둘째, 고속도로 이용객들에게 시기적절하게 필요한 콘텐츠를 개발하여야 하며, 셋째, 향후 교통정보의 핵심이 되는 교통상황의 예측정보를 제공하는 것이다.

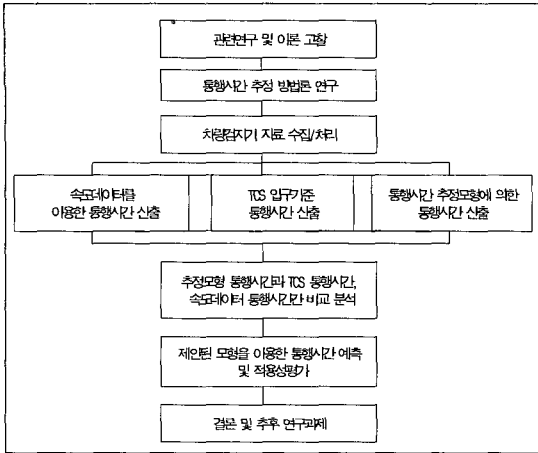
이러한 요구에 대응코자 한국도로공사에서는 가변정보표지판(VMS)이나 Web 홈페이지를 통해 지체발생구간 및 통행소요시간의 정보제공을 하고 있으나 시시각각 변화하는 교통상황의 변화에 따른 정보의 정확성과 신뢰도는 개선될 여지가 있다. 가변정보표지판(VMS)를 통해 제공되고 있는 소요시간은 예측처리를 하지 않은 소요시간 즉 "한 시점"에서의 구간 소요시간의 합이다. "한 시점" 이후에 교통상황이 변화하면 실제 통행시간과는 차이가 발생한다. 교통상황의 변화가 클수록 목적지까지의 차이만큼 "사용할 수 없는 정보"가 되고 만다. Web 홈페이지를 통해 제공되는 정보는 통행료 징수시스템(Toll Collection System)의 도착지 기준 정보로서 과거정보이며 현재의 교통상황이 반영될 수 없는 정보이다.

즉, 현실의 교통류는 시시각각 변화하는 것이므로 목적지까지의 소요시간이나 최단경로를 정확하게 산출하기 위해서는 최근 데이터 또는 현재데이터를 기초로 진행방향의 교통혼잡이 악화될지 완화될 지를 예측할 필요가 있다.

본 연구에서는 여행시간 추정기법들의 고찰을 통해 최적의 고속도로 구간통행시간 추정모형을 도출하고, 추정된 통행시간의 예측을 통해 예측교통정보의 가능성 또한 살펴볼 것이다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구의 내용적 범위는 통행시간 추정방법으로서 교통량의 변화패턴을 이용하여 통행시간 추정방법을 정립하고 적용가능한 통행시간 예측모형을 연구하는 것이다. 또한, 기존 연구들의 문제점을 인식하여 차량검지기 자료의 특성을 면밀히 분석하고 그 특성을 파악하여 추정모형을 적용시켜 결과를 도출한 후, 그러한 결과가 도출된 이유를 면밀히 분석하고자 한다. 이러한 분석을 바탕으로 통행료 징수시스템의 출발지 기준 통행시간과의 비교분석을 통해, 교통상황에 적절한 모형을 선택할 수 있는 고속도로 통행시간 추정 시스템을 개발하고자 한다.



〈그림 1〉 연구흐름도

연구를 위한 공간적 범위는 경부고속도로 서울영등포~기흥간, 영동고속도로 동수원~북수원 구간을 대상으로 현재 설치되어 있는 루프식 차량검지기에서 수집되는 차로별 교통량, 속도, 점유율 등의 교통데이터를 이용하여 통행시간 추정 및 예측을 실시한다.

연구방법을 위한 연구 흐름도는 〈그림 1〉과 같다.

교통혼잡정보나 여행시간 정보를 기초로 최적경로를 높은 정확도로 추정하여 디지털지도상에 경로유도를 하기 위해서는 교통정보 뿐만 아니라 고속도로상의 각종 사상과 도로구조에 대한 상세한 데이터베이스를 구축하는 정보환경의 정비가 필요하다. 현재 일정수준의 정보화가 진행되고 있지만 이를 고도화 내지 부가가치화하기 위해서는 통합시스템의 개발, 원시데이터의 신뢰도를 높이는 방안, 운전자에게 진정으로 유용한 콘텐츠 개발 그리고 더 나아가 교통정보의 핵심이라 할 수 있는 교통상황의 예측시스템이 개발되어야 할 것이다.

II. 관련연구 검토

최근 통행시간에 대한 관심이 높아지면서 기존의 차량검지기 지점정보나 통행료 징수시스템 자료를 활용한 통행시간 제공과 더불어 ITS probe 차량이나 AVI를 이용한 통행시간 수집기술이 다양화되고 있으며 통행시간을 예측하는 연구가 많이 진행되고 있는 것으로 조사되었다.

통행시간 추정에 관한 대부분 기술들은 유도식 루프검지기나 비디어 카메라를 이용한 이미지프로세싱

과 같은 “지점” 차량검지기장치를 사용하고 있으며, 통행시간 추정알고리즘은 교통량, 점유율이나 차두시간과 같은 측정할 수 있는 지점 파라미터에 기초하여 개발되었다.

기존 통행시간 예측연구의 문제점을 살펴보기로 한다.

먼저, ARIMA 모형은 시계열 데이터가 정상성을 보일 때는 예측력이 뛰어나지만 비정상시 예측력이 저조하다는 것이다. 물론, 비정상 시계열 데이터를 대수변환이나 평방근 변환을 하여 정상성 데이터로 변환하는 방법이 있지만 시계열성을 확보하는 문제는 간단차 않다. 또한, Time-lag 발생으로 예측력이 약해지는 단점을 보이고 있다.

신경망은 특히 패턴인식 분야에 널리 사용되는 모형이나 모형을 적용할 경우에는 모형에 대한 충분한 검증이 필요하다. 그리고 원하는 결과를 얻을 때까지 학습에 요구되는 시간이 너무 많이 소요된다는 문제점을 갖고 있다.

또한, 신경망 이론의 한계는 원리상 어떤 결론을 가져오게 된 이유를 설명할 수 없다는 점이다. 즉, 분석대상이 되는 데이터를 입력하게 되면 블랙박스와 같은 여러 처리과정을 거쳐 결과가 출력되지만 그러한 결과가 어떻게 출력되며, 어느 정도의 신뢰성을 갖고 있는지를 알 수 없다.

Kalman Filter의 경우, 모델의 오차와 예측 오차를 고려하여, 통계적인 처리를 하여 최적계수 “Kalman gain”을 유도하고 그 계수를 사용하여 동화하는 방법으로서, 예측정밀도를 높일 수 있지만 컴퓨터 부하가 크고(대량의 메모리 필요) 비선형향이 있으면 성립하지 않는 것이 문제점이다. 물론, 비선형에 대해서는 Extended Kalman filter가 있지만 이것 역시 고부하가 문제이다.

Kalman filter의 예측력을 높이는 방법은 교통상황에 대한 상태방정식과 관측방정식을 정확하게 설정하여야 하고 Kalman filter에서 반드시 계산되어야 하는 오차공분산의 정확한 계산이 필요하다.

통행시간 예측과 관련된 많은 연구를 조사해 본 결과, 대부분의 예측모형들이 모형의 예측력 검증은 위주로 연구가 진행되고 실제 적용시에 필요한 대상자료의 특성이나 도로상에서 발생하는 각종 상황들을 충분히 설명할 수 있도록 모형을 연구한 사례는 별로 발견하지 못하였다.

차량검지기 데이터를 입력자료로 하여, 자기회귀모델과 칼만필터법을 이용하여 통행시간 예측한 연구가 일본에서도 있었지만, 이 방법은 속도데이터를 이용한 방법으로 고속도로상의 차량검지기로부터 수집된 3년간 교통류 데이터로부터 경험적인 속도변동 패턴을 작성, 이것을 자기회귀모델과 칼만필터법에 적용한 방법으로 속도변동의 예측방법에 문제점이 있었다.

III. 통행시간 추정 및 예측방법론 정립

1. 고속도로 혼잡시 교통류 특성

고속도로상에서 발생하는 교통지체는 그 발생원인으로 크게 나눠 교통집중지체, 공사지체 및 사고지체 3가지로 구분할 수 있다.

병목부에서의 수요 교통량이 교통용량을 상회하면 돌연 주행속도가 떨어져 일정 상태로 귀착되는 지체류가 된다. 그리고 지체는 교통용량 이상으로 수요교통이 계속될 때에 발생하고 그것이 계속될 때에 지체과로서 상류측에 전달된다. 해소시에는 그 역으로 수요교통이 교통용량 이하가 될 때에 시작하여 이윽고 지체는 완전히 해소된다. <그림 2>의 Q_c 는 지체 직전의 최대교통량이고 Q_j 는 지체중의 풀리는 교통량을 나타낸다. 시각 t 가 t_{max} 시기의 수요교통량 Q_d 가 해소 교통량 이하로 되어 지체는 해소하기 시작함을 나타낸다.

지체상태로 진입할 시에는 도로용량상태에 교통량이 걸쳐져 있으므로 지체중이라도 비교적 속도가 빠르다. 따라서, 속도에 의한 혼잡판정은 이로 인해 지체검출이 지연될 가능성이 있다고 본다. 실제 고속도로상의 혼잡구간을 CCTV를 통해 관찰할 경우, 화면

상 육안에 의한 관찰에서는 혼잡상태이나 차량검지기의 속도는 70km/h의 속도를 유지하고 있어 소동이 원활한 것으로 판정될 때도 있다. 이 상태에서 혼잡상태가 지속되게 되면 해당구간의 속도가 40km/h 이하에서 비교적 안정되게 되므로 혼잡검출이 지연될 가능성은 적어진다. 따라서, 혼잡구간에서의 속도변동에는 지연이 발생되므로 교통량에 의한 혼잡판정이 보다 민감함을 알 수 있다.

고속도로 교통수요의 변동이나 도로용량의 변화에 대응할 수 있는 교통관리체계를 구축하기 위해서는 교통량, 주행속도, 밀도, 차중구성 등 시시각각으로 변하는 교통류 특성을 실시간으로 그리고 연속적으로 분석해야 한다. 이와 아울러 언제, 어느 구간에서, 어느 정도 도로용량을 감소시키는 요인이 발생하는 지 그리고 그 원인은 무엇인지도 파악해야 한다.

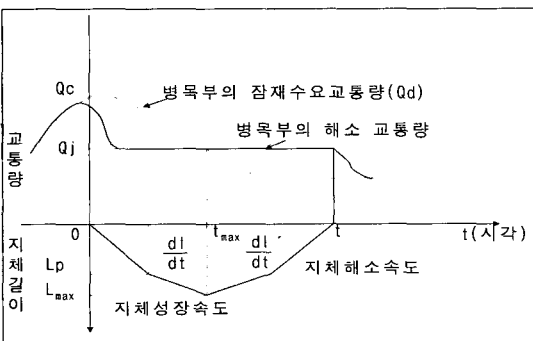
이와같이 교통수요와 도로용량의 변화를 자동적으로 파악하기 위해서는 현장에서 차량흐름을 계측할 수 있는 장치가 필요한 데, 일반적으로 차량검지기 체계가 그 역할을 맡고 있다.

먼저, 고속도로상에 설치된 차량검지기에 대해 살펴보면, 고속도로상의 차량검지기는 약 1km간격으로 설치되며, 차량검지기를 설치하는 기준은 콘크리트 구간의 경우, Loop식 차량검지기를, 그리고 아스팔트 구간의 경우, 영상식과 자석식 차량검지기를 설치하고 있다. 차량검지기는 매 30초 주기로 누적교통량, 평균속도, 평균점유율, 그리고 평균차량길이를 측정할 수 있다. 두 개의 측정지점간의 통행시간은 직접적으로 측정할 수 없으나 모형을 이용하여 추정할 수 있으며 교통류를 표현하는 데 유용한 가장 기본적인 기초량 중의 하나이다.

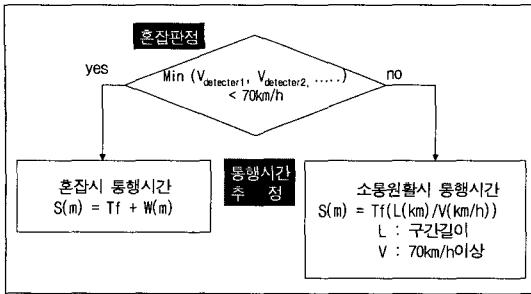
따라서, 본 연구에서는 고속도로상에 약 1km 간격으로 광범위하게 설치되어 있는 차량검지기 데이터를 활용하여 고속도로 구간 통행시간을 추정하는 모형을 연구하고자 한다.

2. 통행시간 추정 모형

본 모형의 적용을 위해서는 다음의 전제조건을 만족해야 한다. 본 연구에서 제안하는 통행시간 추정모형은 <그림 3>과 같이 크게 혼잡판정 부분과 통행시간 추정부분으로 구성되어 있다.



<그림 2> 지체전달 개념도



〈그림 3〉 구간통행시간 추정방법

1) 혼잡판정

통행시간 추정을 위한 첫 번째 단계로, 차량검지기 속도 데이터를 이용한 혼잡판정 기준은 다음과 같다.

혼잡판정기준 :

$$\min(V_{detector1}, V_{detector2}, \dots, V_{detectorn}) < 70 \text{ km/h}$$

고속도로 본선상의 지점검지기 속도 $V_{detector1}, V_{detector2}, \dots, V_{detectorn}$ 가 정해진 임계속도(예 : 70km/h 미만)이라면 구간내 혼잡이 발생한 것으로 가정된다. 이 경우가 아니라면, 교통류는 진입과 진출로에서 모두 소통이 원활한 상태이다. 그렇지만, 차량검지기의 이상데이터로 인한 대상구간내 교통혼잡 가능성을 배제하지 않고 안정적인 통행시간 산출을 위해 일정시간 동안 지속적으로 상태를 감시한다.

2) 통행시간 추정⁹⁾

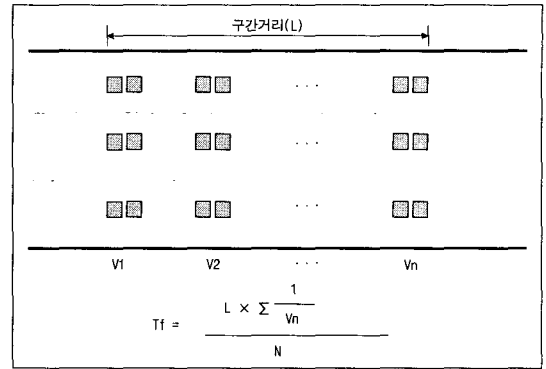
통행시간 추정을 위한 루프검지기 속도 및 교통량 데이터는 1분 데이터를 이용하며 기본 모형식은 식(1)과 같다.

$$S(m) = T_f + W(m) \tag{1}$$

여기서, T_f 는 구간의 소통원활 시 통행시간을 나타내는 상수이며, $W(m)$ 은 m분 동안에 진입하는 임의의 차량한대가 겪는 지체시간이다.

(1) 정상시

만약 혼잡판정 단계 시, 구간내 모든 차량검지기의 평균속도 데이터가 소통원활인 상태로 판정이 되면 $W(m)=0$ 으로 가정되며, 통행시간은 $S(m)=T_f$ 에 의해서 추정된다.



〈그림 4〉 정상소통시 통행시간 산출

정상소통시에는 〈그림 4〉와 같이 구간거리, 차량검지기의 속도데이터를 이용하여 조화평균으로 구간 공간평균속도로 나누어 통행시간을 산출한다.

정상시 통행시간을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{추정통행시간} &= \frac{\text{구간거리}(L, \text{ km})}{\text{공간평균속도}(\text{km/h})} \\ &\quad \times (3,600 \text{ sec/h}) \\ \text{공간평균속도} &= \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} \end{aligned}$$

(2) 혼잡시

만약 구간내 모든 차량검지기의 평균속도 데이터가 임계속도이하로 일정시간이상 지속된다면, 지체시간 $W(m)$ 은 "초과" 차량수를 계산하여, 그것을 구간을 떠나는 교통량으로 나눔으로써 추정된다. 구간의 "초과" 차량수를 $N(m)$ 을 라고 하자. 교통 혼잡상태에서, $N(m)$ 은 다음의 반복 관계식으로부터 계산된다.

$$N(m) = N(m-1) + X(m) - Y(m-\Delta) \tag{2}$$

Δ 는 자유 교통류 통행시간 T_f 와 대략적으로 같은 정수이다. 식(2)에 대하여 자세히 살펴보면, 첫 번째로, 반복관계식은 혼잡으로 판정되었을 경우에 초기값으로, $N(0)=0$ 을 설정한다. 두 번째로, 상수 Δ 값은 소통원활시 교통량 $X(m) - Y(m-\Delta)$ 가 대략 0과 같아지는 동안에 선택된다. 교통 흐름이 혼잡상태로 진입하게 되면, 소통원활의 교통류 상태가 깨지며 $X(m) - Y(m-\Delta)$ 는 분열의 크기를 나타낸다.

식(1)에서 $W(m)$, 지체시간은 "초과" 차량의 수를 마지막 M_1 분 동안의 진출교통류율로 나눔으로써 계

산된다.

예를 들어, 입의 진입지점에서의 진입교통류는 소
통이 원활할 시에는 일정시간후, 진출지점을 통과하
여 초과교통량이 0이 되지만 혼잡상황에서는 진출지
점에서 진입교통량이 모두 통과하지 못하고 구간내에
초과교통량이 남아있게 되어 식(3)과 같이 W(m)이
증가하게 된다.

$$W(m) = \frac{N(m)}{\sum_{t=m-M_1+1}^{N(m)} Y^*(t)} \quad (3)$$

여기서, $Y^*(t)$ 는 t분 동안 고속도로 기본구간 진출
지점상에서 해당구간을 빠져나가는 분당 교통량을 나
타낸다. 밀집된 차로상에서 1분 교통량은 일반적으로
잡음(noise)이 많기 때문에 상수 M_1 은 추정치를 안정
화시키기 위해 적용하였다. 유출 교통류율의 분산은
정상적으로 양의 상관계수를 갖으며, 평균 지체시간
은 무시하였다.

(3) 편차 보정(drift correction)

m분 동안의 “초과” 교통량 $N(m)$ 은 구간 통행시간
추정에 있어 중요하며, 혼잡상태 동안에는, 진출입 교
통량의 수로부터 추정된다. 그러나 이것은 차량검지
기 자료의 오차에 의해서 저해될 수도 있다. 특히, 루프
검지기를 이용할 시에는 이러한 오차를 규칙적으로
계속 발생될 수도 있다. 본 추정모형의 반복적인 특
성으로 인하여, $N(m)$ 의 추정식(2)는 추정치에 편차
를 발생시키는 이러한 오차에 민감하다. 이를 해결하
기 위하여 다음과 같이 편차를 보정하는 방법을 적용
하기로 한다.

m분 이전 가장 최근 30분동안의 자유 교통류 교
통량 집합을 $F(m)$ 이라하면, 관측 유출입 교통량의
현 비율을 추정하는 보정함수를 $C(m)$ 는 식(4)와 같
이 계산된다.

$$C(m) = \frac{\sum_{t \in F(m)} X(t - \Delta_2)}{\sum_{t \in F(m)} Y(t)} \quad (4)$$

이전의 자유 교통류의 불충분한 데이터 또는 식(4)
의 분모가 0인 시간(분) 동안에는, $C(m)$ 은 초기 상수
값으로 정해진다. (예, 1) 만약 보정함수 $C(m)$ 이 1

보다 작다면, 아마도 유입교통량 모두가 관측되지 않
았을 것이다. 이 경우에는 유입교통류율이 더 높은
값으로 보정되어야 한다. 만약 보정함수 값이 1보다
크다면, 유출교통류율이 보정되어야 한다.

$X_C(m)$, $Y_C(m)$ 을 m분의 보정 유출입 교통량이
라고 하면, 보정된 교통량은 식(5), 식(6)과 같다.

$$X_C(m) = \frac{X(m)}{C(m)}, Y_C(m) = Y(m) \quad (5)$$

$C(m) \leq 1$ 그리고 $C(m) > 1$ 이면,

$$X_C(m) = x(m), Y_C(m) = C(m)Y(m) \quad (6)$$

3. 적용

본 통행시간 추정모형은 해당구간내 모든 차량검지
기의 속도와 교통량을 사용하며, 매30주기의 속도와
교통량 데이터를 1분데이터로 변환하여 적용한다. 첫
번째 단계로 혼잡여부에 대한 판단을 수행한다. 구간
내 모든 차량검지기의 평균 속도데이터가 70km/h이
하의 속도를 3분이상 지속하면 혼잡으로 판단하고 그
렇지 않으면 정상소통으로 판단하게 된다.

두 번째 단계는 첫 번째 단계의 판단에 의해, 통행
시간을 산출하는 것이다. 만약 첫 단계에서 교통류가
정상이라면 통행시간은 소통신호시 통행시간으로 추
정되어 입력자료로는 지점검지기의 평균속도 데이타
를 이용하여 통행시간을 산출한다. 그렇지만, 첫 번째

단계에서 교통류가 혼잡이라면 두 번째 단계는 교
통량 자료를 이용하여 반복적인 방법으로 구간에서의
차량수를 추정하는 것으로 시작된다. 이 추정은 통행
시간을 추정하는 데 이용된다.

실제 통행시간을 추정하는 절차를 요약하면 다음과
같다.

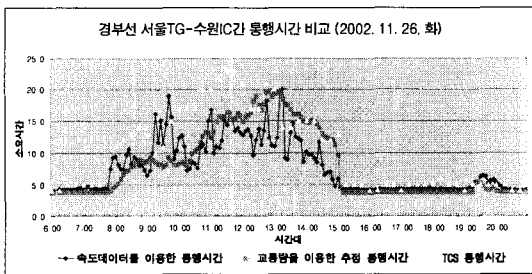
- ① 차량검지기 30초주기의 원시데이터를 1분주기로
변환한다. 자료누락시 이전 30초주기 데이터와 이후
30초주기 데이터를 보간법을 이용하여 보정한다.
- ② 현재 도로공사에서 이용하는 혼잡과 비혼잡의 기
준을 적용하여, $\min(\text{진입지점속도}, \text{진출지점속도})$
< 70km/h 이면, 혼잡으로 판정한다. 혼잡을 판정하
는 기준은 3분이상 위의 조건이 지속될 때로 한다.
- ③ 비 혼잡시라면, 차량검지기의 지점속도를 공간평

균속도로 변환시켜 통행시간을 산출한다.

- ④ 혼잡시 통행시간은 진입과 진출지점의 교통량자료를 이용하여 초과교통량을 구하고 이를 진출교통류율로 나누어 구한 지체시간과 정상시 통행시간을 합산하여 통행시간을 산출한다.

위와 같은 방법에 의거하여 모형을 적용하여 산출한 경부고속도로 서울 틀게이트 → 수원IC간 추정 통행시간의 5분주기 통행시간과 차량검지기 공간평균속도를 이용한 통행시간 그리고 TCS 출발지 기준 통행시간과의 비교 그래프는 <그림 5>와 같다.

<그림 5>에서 보듯이 6:00~8:00, 15:00~21:00 시간대의 소통이 원활할 시의 통행시간은 차이가 거의 없음을 알 수 있으나, 혼잡시간대인 8:00~15:00 시간대 각각의 통행시간을 살펴보면, 차량검지기의 속도 데이터를 이용한 통행시간은 분산이 심하고 실제 통행시간보다 낮게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 본 추정모형에 의한 통행시간은 TCS 출발지 기준에 의한 통행시간과 같은 패턴을 유지함을 할 수 있다. 패턴이 같으나 시간차이가 발생하는 문제는 차량검지기 시작지점 설치위치와 서울 틀게이트 위치와 약1km 정도 이격되어 있는 문제와 서울 틀게이트를 통과한 차량들이 정지 후 출발함으로 인해 발생하는 속도저하 문제이므로 해당시간 만큼의 보정이 이루어 지면 해결되는 문제로 본다.



<그림 5> 경부고속도로 서울TG~수원IC간 통행시간 비교

4. 적용성 평가

본 연구에서 채택한 통행시간 산출기법의 적용성 평가를 위하여 적용성(goodness-of-fit) 평가지표로는

RMSEP(Root Mean Square Error Proportion, 평균제곱근오차비)를 이용하였다. RMSEP값이 작을 수록 추정된 통행시간이 실측치와 잘 맞는다는 것을 의미한다.

$$RMSEP = \frac{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (x_i^{\text{추정치}} - x_i^{\text{실측치}})^2}}{\sum_{i=1}^n x_i^{\text{실측치}}}$$

1차 평가로 지점속도를 이용한 통행시간과 교통량을 이용한 추정 통행시간의 실측치와의 RMSEP를 비교하였다. 위에서 산출한 통행시간의 적용성 평가결과인 <표 1>을 보면, 정상소통시에는 지점검지자료를 이용하여 산출한 통행시간이, 혼잡시에는 교통량을 이용한 추정통행시간이 실측치에 보다 가까움을 알 수 있다.

<표 1> 적용성 평가 결과

구분	정상시	혼잡시
지점속도를 이용하여 산출한 구간 통행시간	0.20	0.39
교통량을 이용하여 산출한 구간 통행시간	0.27	0.32

4. 칼만필터(Kalman Filter)를 이용한 예측모형

1) 모형 개요¹⁰⁾

칼만필터모형은 상태평균과 공분산을 계산하기 위한 알고리즘으로서 먼저 상태방정식(state equation)과 관측방정식(observation equation)이 구성되어진다.

$$x_{k+1} = A_k x_k + w_k \quad (\text{상태방정식})$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (\text{관측방정식})$$

여기서

x_k : 시점 k에서의 (n*1)상태벡터

A_k : 시점 k에서 k+1로의 (n*n)전이행렬

w_k : 알려진 공분산을 가진 (n*1)백색순서(white sequence)¹¹⁾로 구성인자의 평균이 0이고 다

1) 백색순서(white sequence)는 평균이 0이고, 상관없는 (uncorrelated) 확률변수로 정의된다. 즉 모든 구성인자가 평균이 0이고, 모든 다른 인자와 상호관련이 없다. 특히 이러한 확률변수가 표준(normal)이면, 가우시안(Gaussian)백색순서라 한다.

른 변수와의 상관관계가 없는 벡터
 z_k : 시점 k의 (m*1)관측벡터
 H_k : 시점 k에서 관측벡터와 상태벡터를 연결시
 켜주는 (m*n)벡터
 v_k : 알려진 공분산을 가지고 w_k 와 상관관계가
 없는 (m*1)관측오차
 w_k, v_k 에 대한 공분산은

$$[w_k w_i^T] = \begin{cases} Q_k & i=k \\ 0 & i \neq k \end{cases}$$

$$[v_k v_i^T] = \begin{cases} R_k & i=k \\ 0 & i \neq k \end{cases}$$

$$[w_k v_i^T] = 0 \quad \forall i, k$$

① 사전(prior) 예측 모형식

각 시점마다 사전 예측 추정치 (\hat{x}_k^-)를 기초로
 현재 값을 추정하게 되는데, 사전예측추정치(\hat{x}_k^-)의
 예측추정오차는 $e_k^- = x_k - \hat{x}_k^-$ 로 나타낼 수 있으며,
 오차의 공분산행렬 (P_k^-)는 식(7)과 같다.

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \quad (7)$$

② 관측치에 의한 현상태모형의 갱신

앞에서 구한 사전예측치 (\hat{x}_k^-)와 현상태벡터의
 예측치 (\hat{x}_k)를 관측벡터 z_k 를 사용하여 선형방정식으
 로 표현하면

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (8)$$

여기서,

\hat{x}_k : 갱신된 예측치

K_k : 모형내에 구축해야할 계수

따라서 갱신된(updated) 또는 사후의(posteriori)
 예측치에 대한 오차공분산 행렬은 식(8)과 같다.

$$P_k^- = E[e_k e_k^T] = E[(x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T] \quad (9)$$

위 식에 앞식들을 대입하여 정리하면,

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (10)$$

여기서 칼만이득 K_k 는 단순히 가중인자(weighting

factor)로 간주할 수 있으며, 이러한 의기에서 칼만필
 터링은 지수가증평활법(exponential moving average
 method)에 의한 예측의 일반화이다.

최적예측치를 생성하는 공분산행렬은 식(11)과 같다.

$$P_k = P_k^- - P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} H_k P_k^- \quad (11)$$

$$\text{또는 } P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

③ (k+1)시점 사전예측모형식

갱신된 추정치 \hat{x}_k 는 전이행렬(transition matrix)
 를 이용하여 (k+1)시점의 사전예측치로 추정하게 되
 는데, w_k 가 평균이 0이고 이전의 다른 w 과의 상관관
 계가 없는 것으로 가정했기 때문에 제외되어 다음과
 같은 (k+1)시점의 사전예측모형이 구축된다.

$$\hat{x}_{(k+1)} = A_k \hat{x}_k \quad (12)$$

이때 $\hat{x}_{(k+1)}$ 의 공분산 오차행렬식은 식(13)과 같이
 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} e_{k+1}^- &= x_{k+1} - \hat{x}_{(k+1)}^- \\ &= A_k e_k + w_k \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 (k+1)시점의 사전공분산행렬은 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{k+1}^- &= E[e_{k+1}^- e_{k+1}^{-T}] \\ &= E[(A_k e_k + w_k)(A_k e_k + w_k)^T] \\ &= A_k P_k A_k^T + Q_k \end{aligned} \quad (14)$$

M. 동행시간추정 및 예측모형의 적용

1. 현장자료의 수집

현재 고속도로상에는 총 1,876개소의 단일루프검
 지기, 쌍루프검지기, 영상검지기, 자석식검지기 등이 약
 1km 간격으로 설치되어있다. 단일루프검지기에서는 교
 통량, 점유율이 수집되고 있으며, 나머지 검지기들에서는
 교통량, 속도, 점유율의 데이터가 30초 주기로 수집된다.

본 연구를 위한 현장자료는 영동선 이정 31K와
 35.9K 지점의 쌍루프검지기의 속도 및 교통량자료를

이용하였다. 위 두 지점사이에는 램프가 없는 구간으로서 구간을 빠져나가고 들어오는 교통량이 없다. 따라서, 제안된 추정모형의 보다 정확한 적용결과 관측이 가능하다. 검지기 자료들은 6:00~21:00까지의 자료를 사용하였으며, 실측치는 TCS 입구기준 자료를 이용하였다. 본 연구의 진출입 지점검지기간 거리로 정의되는 구간 길이와 TCS 구간길이와의 차이 및 램프 및 통행료 지불 대기시간 등으로 인한 통행시간의 편차는 자료 처리시 보정하였다. 또한 30초 원시자료를 1분으로 집계하였으며, 자료 누락시에는 이전 30

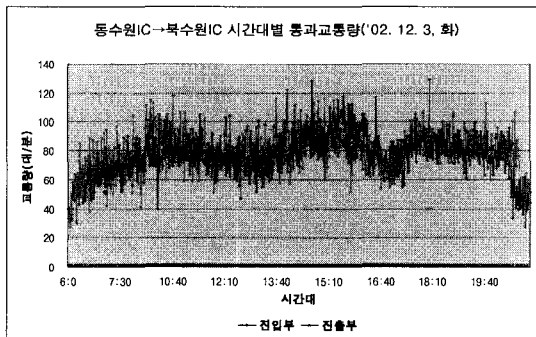
초와 이후 30초의 평균을 통해 보정하였다.

〈표 2〉는 CCTV 모니터링을 통해 조사된 영동선의 대상구간이 포함된 지체길이 및 원인을 나타낸 것이다. 지체여부는 CCTV화면을 통해 파악된 대기행렬 길이이다. 지체의 원인은 주로 퇴근시간대 교통량 집중 및 작업으로 인해 발생한 것으로 조사되었다.

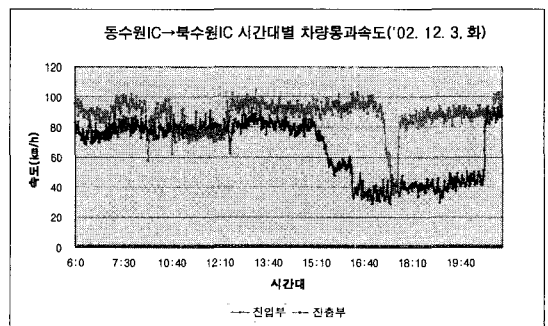
통행시간 추정을 위해 대상구간내 차량검지기의 교통량 및 속도데이터를 이용하며 12월 3일부터 12월 6일까지 수집한 교통량 및 속도데이터는 〈그림 6〉~〈그림 9〉와 같다.

〈표 2〉 대상구간 지체현황

일자	구간	지체시간대	원인
12.3(화)	동수원 → 복수원	17:07-20:26	교통량 증가
12.4(수)	동수원 → 복수원	16:07-20:15	교통량 증가 및 작업
12.5(목)	광교터널 → 복수원	10:35-11:03	교통량 증가
	동수원 → 복수원	14:53-19:47	교통량 증가
12.6(금)	광교터널 → 복수원	13:50-17:44	교통량 증가 및 작업
	동수원 → 광교터널	17:44-19:56	교통량 증가

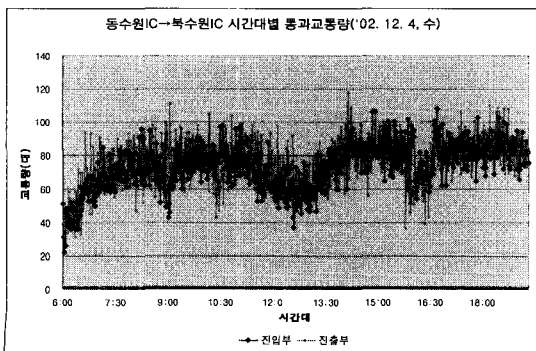


(a)

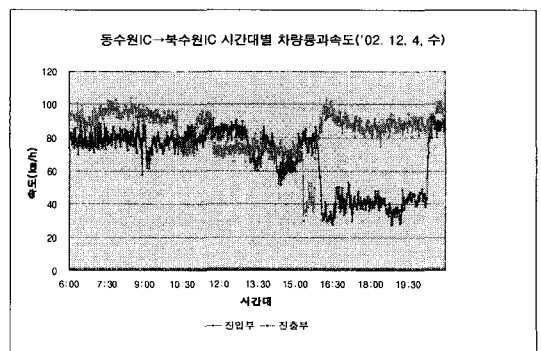


(b)

〈그림 6〉 동수원IC→복수원IC교통량 및 속도그래프(12월3일)



(a)



(b)

〈그림 7〉 동수원IC→복수원IC교통량 및 속도그래프(12월4일)

〈그림 6〉의 12월 3일의 경우, 진출입지점의 속도 경향이 매우 달랐다. 진입지점인 동수원IC인접 지점에서는 13시45분부터 18시40분까지 지체를 보였으며, 복수원IC인접 지점에서는 15시40분부터 16시05분까지 일시적인 지체를 나타내었다. 또한, 퇴근시간대인 19시 20분경부터 다시 두지점의 속도가 떨어지는 경향을 볼 수 있었다. 이는 교통량 그래프에서도 해당 시간대 통과교통량이 갑자기 낮아진 것을 통해 확인할 수 있다.

〈그림 7〉의 12월 4일의 경우, 역시 16시00분부터 20시15분까지 지체를 보이는 진입지점 검지자료와는 달리 진출지점은 15시15분부터 15시45분까지만 지체를 보인다.

〈그림 8〉의 12월 5일의 경우, 역시 진입지점은 14시30분부터 19시45분까지 진출지점은 16시30분부터 17시까지의 약 30분 동안만 지체를 나타내었다.

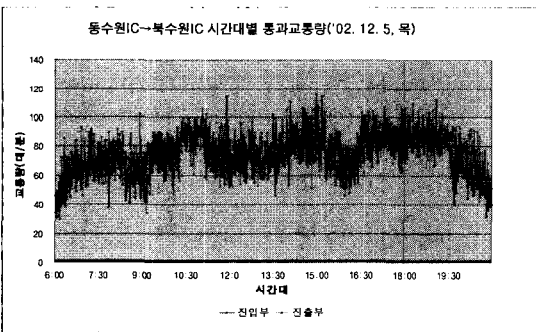
〈그림 9〉의 12월 6일의 경우에는 작업의 영향으로 진출지점의 경우, 15시15분부터 19시45분까지로 지체시간대가 연장되었다.

2. 추정모형의 적용

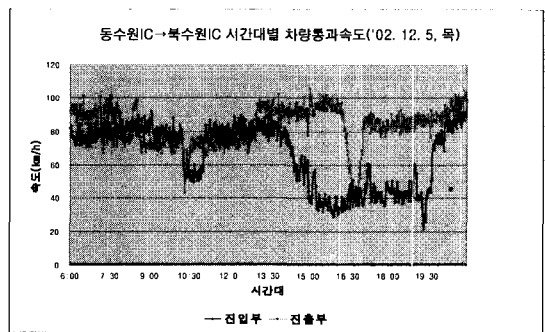
1) 통행시간 추정 결과

12월 3일부터 12월 6일까지의 영동고속도로 동수원IC → 복수원IC간 차량검지기 데이터를 이용하여 산출한 추정모형의 통행시간, 기존 속도데이터를 이용하여 산출한 통행시간, 그리고 실측 통행시간이라 할 수 있는 통행료징수시스템(TCS)에서 산출한 통행시간의 비교결과 그래프는 〈그림 10〉에서 보는바와 같다.

1절에서 분석한 대상구간 진입부와 진출부의 교통량 및 속도 그래프에서 보듯이 지체상태로 들어가는 시점에는 교통량이 용량상태의 교통류에 걸쳐져 있으므로 비교적 속도가 빠르고 속도변동이 불안정하다는 것을 알 수 있다. 〈그림 10〉의 12월 3일부터 12월 6일까지의 통행시간 비교 그래프를 보면, 혼잡시간대 통행시간에 있어서는 속도데이터를 이용하여 산출한 통행시간 그래프는 실측치와는 상당한 차이를 보이고

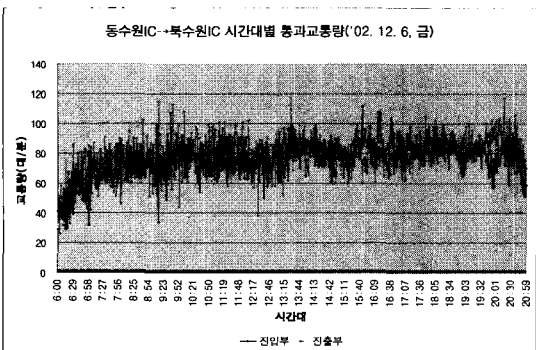


(a)

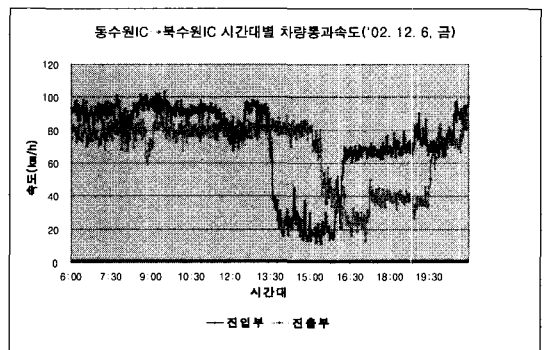


(b)

〈그림 8〉 동수원IC→복수원IC교통량 및 속도그래프(12월5일)

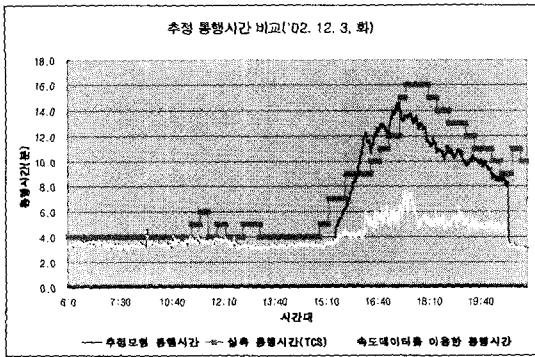


(a)

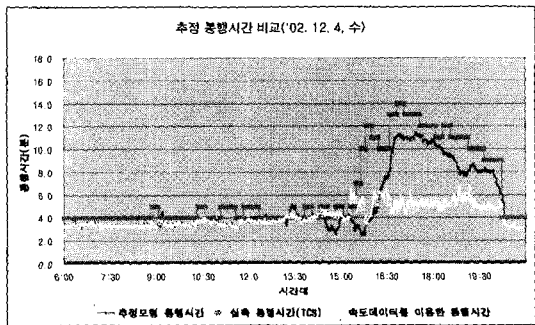


(b)

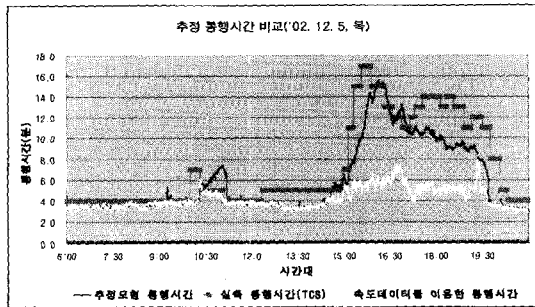
〈그림 9〉 동수원IC→복수원IC교통량 및 속도그래프(12월6일)



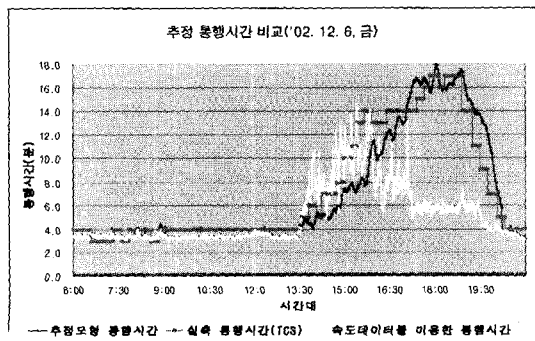
(a)



(b)



(c)



(d)

(그림 10) 추정 통행시간 비교(12월 3일~12월 6일)

있으며, 특히 12월 6일자 그래프에서는 혼잡시간대에서 상당한 변동을 보이고 있음을 알 수 있다.

그러나, 추정모형에 의해 산출한 통행시간 그래프는 실측치와 같은 패턴을 유지하고 있음을 알 수 있다. 실측치 통행시간의 경우, 램프 진입과 진출시 소요되는 시간을 제거하지 않은 데이터이므로 이를 제거하게 되면, 더 높은 정확도를 보일 것으로 사료된다.

2) 적합성 평가 결과

(표 3)은 일자별 추정모형별 RMSEP 값의 비교표이다. 표의 값에서 볼 수 있듯이 기존의 지점점지기 속도를 이용하여 산출한 통행시간의 경우 RMSEP 값이 본 연구에서 제안한 교통량을 이용하여 산출한 방법에 비해 2배 이상 높은 값을 나타내었다. 이것은 그래프에서 확인 할 수 있듯이 특히 진입지점과 진출지점의 속도값의 차가 큰 구간의 교통특성으로 인하여 혼잡시에는 통행시간이 과소추정되었기 때문이다.

(표 3) 기존 방법과의 적용성 비교

구분	12월 3일	12월 4일	12월 5일	12월 6일
교통량을 이용하여 산출한 구간 통행시간	0.31	0.31	0.30	0.22
지점속도를 이용하여 산출한 구간 통행시간	0.74	0.63	0.72	0.78

3. 예측모형의 적용

1) 모형 적용 절차

본 연구에서는 실시간 정보제공에 있어 중요한 예측정보 산출을 위하여 비교적 단기예측에서 신뢰성이 높은 칼만 필터를 이용하여 5분 후 예측통행시간을 산출하였다.

칼만필터를 이용한 예측은 다음과 같은 과정을 반복 적용하여 수행하였으며, 상태방정식은 AR(1)으로 가정하였다.

STEP 0. 초기입력

- 사전예측치 : $\hat{x}_{k|k-1}$ - 오차공분산 : $P_{k|k-1}$

STEP 1. 칼만이득의 계산

$$G_k = P_{k,k-1} C_k^T (C_k P_{k,k-1} C_k^T + R_k)^{-1}$$

STEP 2. 관측치에 의한 갱신

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + G_k (v_k - C_k \hat{x}_{k|k-1})$$

STEP 3. 갱신된 예측치에 대한 오차공분산의 계산

$$P_{k|k} = (I - G_k C_k) P_{k|k-1}$$

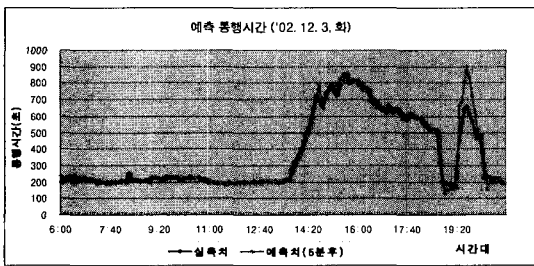
STEP 4. 장래치 예측

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k}$$

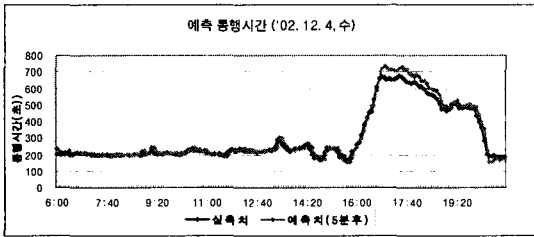
$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + \Gamma_k Q_k \Gamma_k^T$$

2) 모형 적용결과

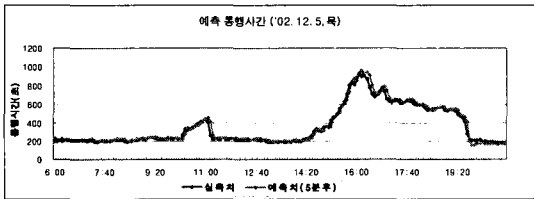
2절에서와 마찬가지로 12월 3일부터 12월 6일까지의 영동고속도로 동수원IC→북수원IC 구간을 대상으로 하였으며, 통행시간 예측결과는 <그림 11>, 추정치와의 비교그래프는 <그림 12>와 같다.



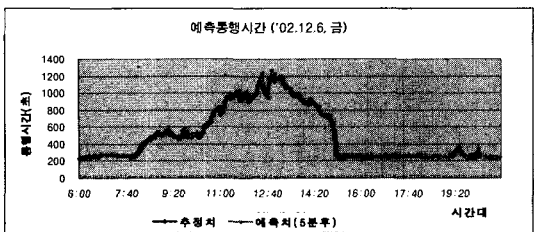
(a)



(b)

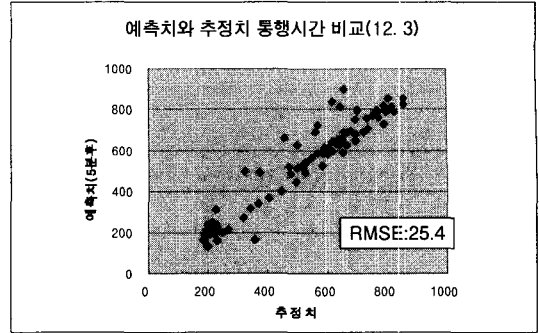


(c)

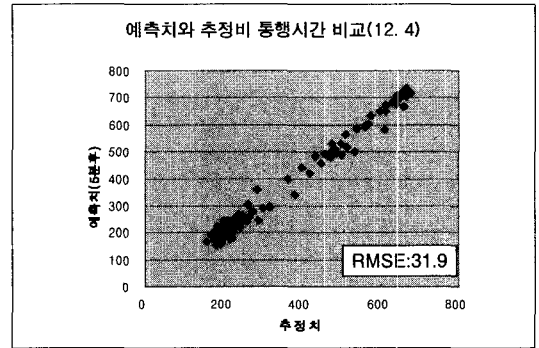


(d)

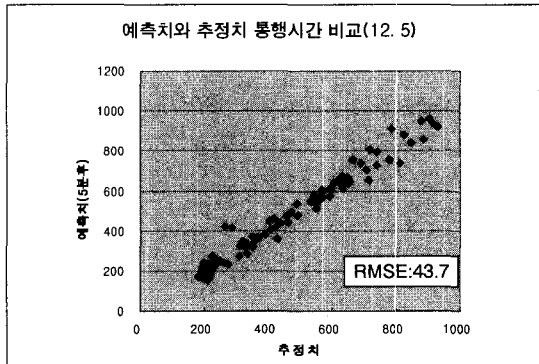
<그림 11> 통행시간 예측 결과



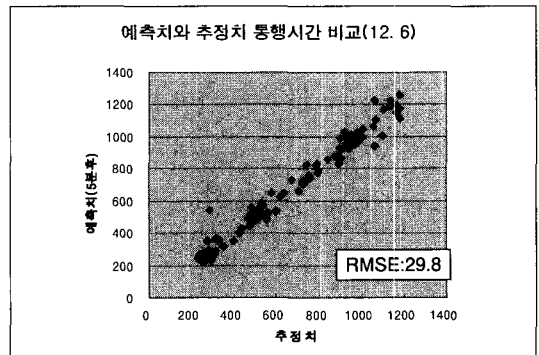
(a)



(b)



(c)



(d)

<그림 12> 예측치와 추정치 통행시간 비교

3) 적합성 평가 결과

〈표 4〉는 칼만 필터를 이용한 5분후 예측 통행시간과 추정모형에 의한 통행시간의 실측통행시간에 대한 RMSEP값의 비교표이다. 표의 값에서 볼 수 있듯이 12월4일을 제외한 3일간의 통행시간 예측값은 추정치와 비교할 때, 신뢰도의 차이가 발생하지 않았다. 이것은 예측통행시간을 실시간 교통정보 제공 시 활용될 수 있는 가능성을 제시한 것이라 할 수 있다.

〈표 4〉 예측통행시간의 평균제곱근오차비율(RMSEP) 비교

구분	12월3일	12월4일	12월5일	12월6일
예측통행시간	0.28	0.43	0.31	0.25
추정통행시간	0.31	0.31	0.30	0.22

V. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 고속도로상의 혼잡 특성과 차량검지기 데이터와의 관계를 분석하여 소통원활시와 혼잡시를 판정하고 통행시간을 추정하고 예측하는 모형을 정립하였다. 제안된 추정모형의 적합성을 평가해 본 결과, 소통원활시에는 차량검지기 속도데이터를 이용한 통행시간을 적용하고 혼잡시에는 교통량 데이터를 이용한 통행시간 추정모형이 실측치로 설정한 통행료 징수시스템의 요금소간 통행시간과 같은 패턴을 산출한다는 결론을 도출하였다.

그리고, 이 추정모형을 기초로 하여 칼만 모형을 이용한 단기 통행시간 예측을 수행하여 보았다. 예측된 통행시간을 실측치와 비교한 결과, 비교적 양호한 예측결과를 나타내었다. 특히, FTMS 차량검지기와의 같이 많은 관측자료가 제공되는 시스템 환경에서는 본 연구에서 제안한 통행시간 추정 및 예측모형이 보다 정확한 통행시간을 산출할 수 있는 적절한 모형이라고 본다.

통행시간을 예측한 정보를 제공하는 경우에는 확정되지 않는 사실을 제공하는 것으로 장시간에 걸쳐 제공될 시에는 다수의 도로이용자에게 영향을 미친다는 점에 감안하여, 본 연구내용의 적용타당성에 대해 각종 상황과 다른 도로조건 하에서 테스트, 평가작업과 보정을 실시하여 정확성 및 적절성을 확보하는 것도 또한 필요하다.

하나의 예측모형으로 고속도로상에서 발생하는 모

든 사상을 망라할 수는 없다. 시시각각 변화하는 교통상황, 그리고 도로구조나 기상조건에 따라 변화하는 교통류 등을 예측하기 위해서는 각 상황에 대한 예측력이 우수한 모형을 발굴하여 적용해 나가는 연구도 시도해 볼 필요가 있다고 본다.

참고문헌

1. 남궁성의 4, 고속도로 통행시간 예측시스템 개발, pp.22~23, 2000.
2. 아주대학교, FTMS 기능개선 최종보고서, 한국도로공사, 1998d.
3. 한국도로공사, 고속도로 통행시간 예측시스템 개발연구, 1999c.
4. 井上淳一, 田中直樹, "時間情報提供への取り組みとその評價", 高速道路と自動車, 37(8), 1994.
5. 村上陽三郎, 券上安爾, "自動車兩認識装置を用いた旅行時間計測に関する基礎的研究", 高速道路と自動車, Vol.40, No.4, 1997.
6. 町田光幸, 渡邊眞吾, "高速道路の遅滞とその豫測について", 高速道路と自動車, Vol.36, No.9, pp.38~39, 1993.
7. 和田光市, "プローブ情報システムの概要", 高速道路と自動車, Vol.44, No.12, p.52, 2001.
8. Texas Transportation Institute & Texas A&M University System, Travel Time Data Collection Handbook. 15-9, VI11-6, 1998.
9. Bart Van Arem, Martie J.M. Van Der Vlist, M.(Rik) Muste, Stef A. Smulders, Travel time estimation in the GERDIEN project, *International Journal of Forecasting*, 13, pp. 76~77, 1997.
10. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Brown R. G, Wiley 1996.

- ☞ 주 작 성 자 : 김명하
- ☞ 논문투고일 : 2003. 5. 6
- 논문심사일 : 2003. 8. 27 (1차)
- 2003. 10. 2 (2차)
- 2003. 10. 20 (3차)
- 심사판정일 : 2003. 10. 20
- ☞ 반론접수기한 : 2004. 2. 28

1999. First of all, estimating traffic accident models are presented by using existed data statistically. The models help to maximize traffic accident decrease through control of the presented factor. Secondly, optimum construction cost of improvement is presented to prevent overcapitalization. However, this paper is limited because it was difficult to sort the data with various areas and to approach various ways.

Development of a Freeway Travel Time Estimating and Forecasting Model using Traffic Volume

OH, Sei-Chang · KIM, Myung Ha · HAIK, Yong Hyun

This study aims to develop travel time estimation and prediction models on the freeway using measurements from vehicle detectors. In this study, we established a travel time estimation model using traffic volume which is a principle factor of traffic flow changes by reviewing existing travel time estimation techniques.

As a result of goodness of fit test, in the normal traffic condition over 70km/h, RMSEP(Root Mean Square Error Proportion) from travel speed is lower than the proposed model, but the proposed model produce more reliable travel times than the other one in the congestion. Therefore in cases of congestion the model uses the method of calculating the delay time from excess link volumes from the in- and outflow and the vehicle speeds from detectors in the traffic situation at a speed of over 70km/h.

We also conducted short term prediction of Kalman Filtering to forecast traffic condition and more accurate travel times using statistical model. The results of evaluation showed that the lag time occurred between predicted travel time and estimated travel time but the RMSEP values of predicted

travel time to observations are as low as that of estimation.

Intersection Sight Distance Based on Critical Gap at Unsignalized Intersections

LEE, Sul-ki · LEE, Yong Jae · KIM, Sukeun

The sight distance at unsignalized intersections is the one of the fundamental geometric design elements, and can ensure safety and efficient operations. Despite its importance, little research attention has been directed in Korea compared to developed countries such as European countries, the United States, and Japan. AASHTO ISD policies have been applied to the intersection design in Korea without any revise, which can produce unrealistic and unadoptable design values. Those values are emerged from several reasons because the AASHTO ISD has been calibrated based on the local data. Therefore, the ISD hardly takes into account the local characteristics of Korea such as driving behavior, vehicular movement and roadway conditions.

The objective of this study is to calculate the appropriate ISD values for unsignalized intersections in the urban area in Korea. In this study, we employed the ISD model of AASHTC(2001), which is based on gap acceptance theory and can account for and take the driving and roadway conditions in Korea into consideration. The approach can also consider the complex driving maneuvers at the intersections in a proper and simple manner. The results in this study show that the ISD design criteria currently used in Korea are more conservative(safer) than those of the USA. In other words, the ISD using field data collected in this study has generally smaller values than those in USA.