

■ 論 文 ■

# AVL을 이용한 구간통행시간 산출기법 개발

A new approach to estimate the link travel time by using AVL technology

김 성 인

이 영 호

남 기 호

(고려대학교 산업공학과 교수) (고려대학교 산업공학과 부교수) (고려대학교 정보통신기술공동연구소 연구원)

## 목 차

- I. 서론
    - 1. 연구의 목적 및 필요성
    - 2. 기존 연구와 다른 독창성
  - II. 자료 처리
  - III. 구간 통행시간 산출 알고리즘
    - 1. 알고리즘 개요
    - 2. 실시간 분석통계 알고리즘
  - 3. 과거자료 분석 알고리즘
  - 4. 자료융합 알고리즘
  - IV. 알고리즘 수행 결과와 분석
    - 1. 시뮬레이션 결과와 분석
    - 2. 주행조사와 분석
  - V. 결론 및 향후 연구과제
- 참고문헌

## 요 약

이 연구는 자동 차량위치 측정기법(Automatic Vehicle Location, AVL)을 이용해서 수집한 교통상황자료를 가지고 구간 통행시간을 산출하는 알고리즘을 개발한다. AVL기법을 이용하는 경우, 처리해야 할 자료량이 많아서 실시간에 정보를 산출하는 것이 힘들다. 따라서 이 연구는 처리해야 할 자료량을 가능한 한 줄이고 자료량이 적은 경우에도 효율적인 구간통행시간을 산출하는 알고리즘을 제시한다. 이 연구의 방법론은 크게 4가지인데, 첫째, 해석 기법, 둘째, 회귀분석, 셋째, 인공지능 및 전문가 시스템, 넷째, 통계분석이다. 이 방법론을 이용해서 세 단계 알고리즘을 개발하는데, 첫째는 실시간 분석통계 알고리즘, 둘째는 과거자료분석 알고리즘, 셋째는 자료융합 알고리즘이다. 이 알고리즘 가운데 자료융합 알고리즘 결과가 산출하고자 하는 구간 통행시간이다. 실시간 분석통계 알고리즘은 연속하는 세 개 구간의 통행 패턴을 이용해서, 가운데 구간의 통행시간을 산출하는 방법을 제시한다. 또 실시간 분석통계 알고리즘으로 산출하지 못한 구간은 인접구간 상관도 정보를 이용해서 구간통행시간을 추정한다. 과거자료분석 알고리즘은 회귀분석을 이용해서 시간대별 통행시간 평균과 분산을 구하고, 이 결과를 바탕으로 인접구간 상관도 정보를 오프라인으로 구하는 알고리즘이다. 자료융합 알고리즘은 2가지 단계를 거치는데, 그것은 실시간 자료융합과 최종 자료융합이다. 실시간 자료융합은 실시간에 가까운 자료원의 실시간 분석통계 알고리즘 결과 패턴과 인접구간 상관도 정보를 이용한 구간통행시간 추정 결과를 이용해서 패턴에 따라 다른 방법으로 융합을 하는 알고리즘을 개발한다. 최종 자료융합은 실시간 자료융합 결과와 회귀분석 결과의 패턴을 이용해서 구간 통행시간을 산출한다. 이 연구를 기존 연구와 비교할 때, 세 가지 독창성이 있다. 첫째는 연속하는 세 구간 통행 패턴을 분석하였기 때문에 기존의 노드지존 방식을 탈피하였다는 점이다. 따라서 자료량이 적은 경우도 믿을만한 통행시간을 산출할 수 있다는 것이다. 둘째는 인접구간 상관도 정보를 구간통행시간 산출에 이용하였기 때문에 자료를 효율적으로 이용할 수 있다는 점이다. 셋째는 자료원 패턴을 분류하고 전문가 시스템을 이용하여 자료융합 하였기 때문에 수행속도가 빠르고, 신뢰성있는 정보를 제공한다는 점이다. 이 연구는 개발한 알고리즘 정확도를 검증하기 위해서 두 가지 검증방법을 이용하였다. 첫째는 시뮬레이션을 이용한 것이고, 둘째는 실제 주행조사 분석을 이용한 것이다. 두 가지 검증 결과는 알고리즘 정확도를 보여준다.

\* 이 연구는 한국 건설기술연구원 연구과제로 수행되었음.

# 1. 서론

## 1. 연구의 목적 및 필요성

이 연구는 자동 차량 위치 측정(Automated Vehicle Location, 이하 AVL)기법으로 수집한 자료를 가지고 교통 소통정보를 산출하는 알고리즘을 개발한다. 현재 도로시설은 크게 늘어나지 않는 상황에서 교통량은 계속 증가하는 추세이다. 그러므로, 도로 활용도를 최대한 높이기 위해서는 실시간 교통 소통정보를 이용자들에게 제공할 필요가 있다. 교통 소통정보는 구간 주행속도나 구간 통행시간을 뜻한다. 또 구간 통행시간은 주행속도를 이용하여 구할 수 있다. 최근에 교통 소통 정보는 특정구간에 검지기나 비콘을 설치하여 교통량, 점유율, 속도를 알아내어 파악하고 있다. 하지만 이 방법은 다음과 같이 두 가지 단점이 있다. 첫째는 차량인식을 할 때 검지기가 제공하는 정보의 신뢰성이 낮다. 둘째는 검지기나 비콘을 도로에 설치하고 운영하는 데는 많은 비용이 든다. 따라서 이러한 단점을 보완하는 다른 방법이 자동 차량 위치측정(Automated Vehicle Location, 이하 AVL) 기법이다. AVL기법은 GPS 장비를 탑재한 조사차량이 실제 도로를 주행한 좌표 자료를 가지고 교통정보를 산출하는 방법이다. 이 방법도 단점이 있다. 첫째는 통신 암영지대가 있을 수 있다는 점이고, 둘째는

조사차량의 대수가 많아지면 통신비용이 증가한다는 것이다. 그러나 교통정보를 산출해야하는 지역범위가 넓은 경우, 모든 구간에 교통정보 수집원을 두지 않아도 교통 상황 자료를 얻을 수 있다는 점에서 검지기나 비콘을 이용하는 방법과 대비된다. AVL 기법을 이용하는 경우 조사차량대수가 많거나 샘플링이 빈번하면 수집되는 자료량이 많아지므로 빠른 시간에 정확한 교통정보를 산출하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 이 연구는 이와 같이 AVL기법을 이용하여 수집한 차량의 위치와 시각 자료를 효과적으로 분석하여 구간별 주행시간을 파악하는 기법을 개발한다.

이 연구와 유사한 연구로 최기주, 신치현<sup>2)</sup>은 GPS와 GIS를 이용해서 통행시간을 산출하는 기법을 제시하였다. 이 연구는 오차율 10%정도의 수행도를 나타내었고, 검지기나 자동 차량 인식(Automated Vehicle Identification, AVI)방식과 같이 구간 양 끝점 정보를 기반으로 교통정보를 산출하였다. 이 때문에 노드를 지나는 점을 정확히 알 필요가 있고 그러기 위해선 GPS 샘플링 시간간격을 더욱 작게 해야만 의미있는 정보를 산출 할 수 있었다. 한편 실제 GPS 자료는 AVI와 같이 구간 양 끝점에서 자료가 올라오지 않고 구간 중간에서도 정보가 샘플링되고, 또한 샘플링 자료가 여러 가지 특수한 조건을 반영하여 나타난다. 따라서 이러한 특성을 고려하며 구간 중간에 수집되는 여러 패턴의 자료들을 고려하는 접근방식이 필요하다.

<표 1> 기존 연구방법과 이 연구 수행방법 비교

알고리즘 제목	기존 연구방법	이 연구방법	차이점과 독창성
실시간 통행시간 산출	<ul style="list-style-type: none"> <li>참고문헌[2]</li> <li>해석기법이용</li> <li>자료를 가장 가까운 노드에 할당한후 노드사이 시간차 구함. 따라서 샘플링 빈도가 큰 경우만 분석이 정확함.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자료가 들어오는 패턴별로 통행 시간 산출방법 구분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>샘플링 빈도가 적은 경우에도 분석이 정확함.</li> </ul>
과거자료 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>참고문헌[7]</li> <li>회귀분석이용</li> <li>검지기를 이용하는 경우에 대해서 회귀분석 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AVL기법을 이용하는 경우에 대해서 회귀분석 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>회귀분석을 효율적으로 하기 위해서 지역을 상관도가 있는 것 끼리 묶어서 몇 개의 구역으로 나눔</li> </ul>
자료융합	<ul style="list-style-type: none"> <li>인접구간 상관도를 이용해서 실시간 통행시간 산출에 반영하는 연구는 없었음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>인접구간 상관도를 이용해서 실시간 통행시간 산출에 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>인접구간 상관도를 실시간 통행시간 산출에 이용</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>참고문헌[6]</li> <li>퍼지선형회귀모형 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자료를 시간대로 구분하고 실시간 자료가 부족한 경우는 인접구간 상관도를 이용해서 경우를 나눔, 그리고 각 경우에 대해서 자료융합함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자료 형태와 신뢰도에 따라 경우를 구분하여 자료융합. 전문가 시스템을 이용해서 자료융합을 한 연구는 없었음.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>참고문헌[4]</li> <li>신경망 이용</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>참고문헌[7]</li> <li>베이지안 이론 이용</li> </ul>			

## 2. 기존 연구와 다른 독창성

기존의 연구들은 대부분 검지기를 이용해서 자료를 받는 경우에 관한 것이다. 특히 AVL기법을 이용하는 경우, 자료가 없는 구간에 대해 실시간 구간통행시간을 추정하는 방법에 관한 연구는 없었다. 이 연구는 구간 소통정보를 산출하기 위한 방법론으로 해석기법, 회귀분석, 인공지능 및 전문가 시스템, 통계분석을 이용한다. 이 방법론이 기존의 방법과 다른 점은 <표 1>에 나타나 있다. 이 표에 나타난 특징을 정리하면 다음과 같이 크게 세 가지로 설명할 수 있다.

첫째, 정보를 실시간에 제공할 수 있도록 AVL기법을 통해서 얻을 수 있는 자료를 처리할 때, 자료와 계산량 사이 관계를 고려하였다. 즉, 수집되는 자료가 적은 경우에도 신뢰성있는 정보를 유지할 수 있도록 하였다. 따라서 통신비용 절감효과를 기대할 수 있다.

둘째, 실시간 교통정보 산출결과를 시간대별, 인접 구간상관도 이용 여부로 나누어 신뢰도를 적용하였기 때문에 실시간 교통정보 산출결과에 신뢰도를 쉽게 알 수 있다. 그리고 이 신뢰도를 이용해서 과거자료와 융합하므로 믿을 수 있는 구간 통행시간을 산출할 수 있다.

셋째, 자료 융합을 하는데 기존의 방법과는 달리 전문가 시스템을 이용하였다. 따라서 자료의 시간대, 자료원을 구분하고 각 방법의 신뢰도에 따라 가중치를 다르게 하여 그 상황에 맞는 자료융합을 하므로 믿을만한 정보를 구할 수 있다.

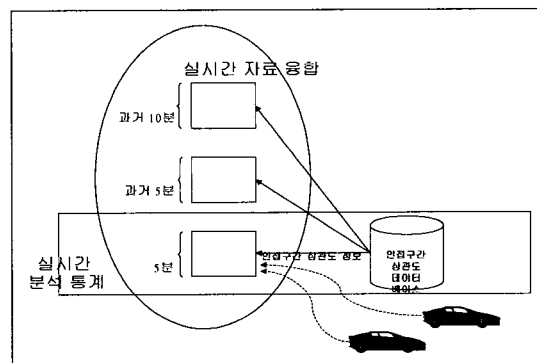
## II. 자료 처리

이제 조사차량에서 보낸 자료를 이용해서 구간 소통정보를 산출하기까지 자료가 어떻게 흐르는가에 대해서 설명한다. 조사차량에서 센터로 보낸 자료는 [차량ID, 차량좌표, 시각]의 형태로 되어 있다. 실시간 분석통계 모듈은 이 자료를 일정 간격(예를 들면, 10초마다)으로 샘플링하고 이를 모아서 5분 간격으로 분석한다고 가정한다. 다만 실시간 분석통계 모듈의 결과로 모든 구간에 대한 구간통행시간을 구해야 하는데, 분석시점 5분전에서 현 분석시점까지 모은 자료(최근 5분 자료)만을 이용할 때는 자료가 불충분한 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해서 최근 5분 동안 자료외에 다음과 같이

세 가지 자료를 더 반영한다. 첫째는 분석시점 10분전부터 분석시점 5분전까지 모은 자료(과거 5분 자료)이고, 둘째는 분석시점 15분전부터 분석시점 10분전까지 모은 자료(과거 10분 자료)이며, 셋째는 상관도가 있는 인접구간의 최근 5분 자료이다.

이 세 가지 자료를 추가하여 실시간 분석통계 모듈을 수행하는데, 추가 정보에 의해 통행시간을 구한 구간은 최근 5분 동안 모은 자료만을 이용해서 통행시간을 구한 구간에 비해 신뢰도가 떨어진다. 따라서 자료 종류에 따라 신뢰도를 정하기 위해서 가능한 패턴을 나누고 이를 비교판정하여 자료융합에 이용한다. <그림 1>은 실시간 자료를 이용해서 정보를 처리하는 구조를 나타낸다. 이 그림에서 실시간 분석통계는 5분동안 모은 자료를 가지고 구간통행시간을 분석하는데, 샘플링 자료가 없는 경우는 인접구간 상관도가 있는 구간의 실시간 분석 결과를 이용한다. 또 실시간 자료융합은 과거 5분전에 산출한 결과와 과거 10분전에 산출한 결과를 모두 이용한다.

비교 판정에 고려하는 요소는 크게 네 가지인데, 첫째는 자료가 계산시점과 비교해서 얼마나 최근 자료인지를 고려한 자료의 시간적 가치이고, 둘째는 한 구간에 대한 자료를 살펴볼 때, 한 대 조사차량이 그 구간에서 몇 개의 자료를 샘플링하였는가 하는 것이며, 셋째는 한 구간에 대해서 분석기간동안 몇 대의 조사차량이 그 구간에 관한 자료를 제공하였는가 하는 것이다. 또한 넷째는 실시간 자료가 그 구간에 대한 자료인가 아니면 상관도가 있는 인접구간에 관한 자료인가 하는 실시간 구간통행시간 산출의 근원이다. 이 네 가지 기준을 바탕으로 패턴을 구분하고 신뢰도를 평가하여 자료융합에 반영한다.



<그림 1> 실시간 정보처리 구조

그 밖에도 한 대 차량이 한 구간에 두 개 이상 샘플링 자료를 제공할 때 그 샘플링 사이 간격 같은 것도 고려할 수 있지만 이 연구에서는 고려하지 않는다.

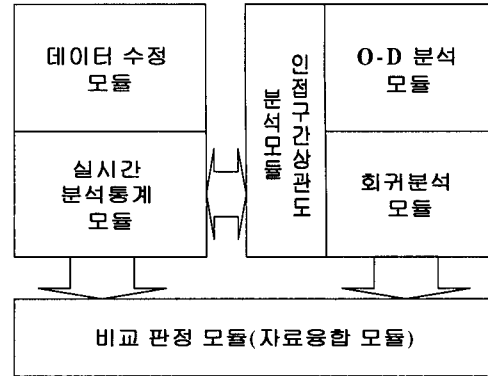
### III. 구간 통행시간 산출 알고리즘

#### 1. 알고리즘 개요

구간 소통 정보를 파악하기 위한 알고리즘은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째 실시간 분석통계 알고리즘은 실시간 자료를 이용하여 구간 통행시간을 산출하는 알고리즘이다. 이 때, 분석에 이용하는 자료는 실시간 자료 가운데 정차나 구간이탈과 같이 필요없는 자료를 걸러낸 것인데, 이 자료를 수정 실시간 자료라고 한다. 분석통계 알고리즘은 각 구간에 대해서 5분 동안 모은 자료를 분석해서 구간 통행시간을 산출하는 실시간 분석통계 모듈과 인접구간 상관도를 이용해서 구간통행시간을 산출하는 인접구간 상관도 분석모듈의 일부로 이루어져 있다. 따라서 실시간 분석통계 모듈은 수정 실시간 자료를 가지고 각 구간에 대한 실시간 구간 통행시간을 계산하는 모듈이다.

둘째는 과거 누적 자료를 분석하여 과거 자료로 나타난 여러 가지 경향을 분석하는 알고리즘이다. 이 알고리즘에 관한 모듈은 크게 세 가지이다. 첫째, O-D 분석모듈은 회귀분석 입력자료를 만들기 위해서 조사차량이 지나간 경로를 추적하는 모듈이다. 둘째, 회귀분석 모듈은 회귀분석 모형을 이용해서 각 구간에 대한 구간 통행시간 평균과 분산을 얻는 모듈이다. 셋째, 인접구간 상관도 모듈은 과거 자료를 분석해서 상관도가 있는 인접구간을 구하는 모듈이다.

셋째는 앞에서 설명한 실시간 분석 정보와 과거자료 분석 결과를 융합하는 모듈이다. 자료융합은 두 가지 단계를 거친다. 첫 번째 단계는 실시간 자료 융합으로 이것은 모든 구간에 대해 실시간 구간 통행시간을 구하는 것이 목적이다. 따라서 실시간 구간 통행시간을 구하기 위해 필요한 여러 자료에 관한 패턴을 분석하여 실시간 자료분석결과의 신뢰도를 구하고 이를 이용해서 두 번째 단계인 최종 자료융합에 이용한다. <그림 2>는 앞에서 설명한 알고리즘의 전체 개요를 나타낸다.



<그림 2> 알고리즘 개요도

#### 2. 실시간 분석통계 알고리즘

##### 1) 목적

이 알고리즘의 목적은 샘플링 자료를 이용해서 실시간 통행시간을 산출하는 것이다. 다시 말하면, 수정 실시간 자료를 이용해서 통계 분석을 하고 그 정보를 바탕으로 차량별 구간통행시간을 산출한다.

##### 2) 입력정보

입력정보는 수정 실시간 자료 데이터베이스에 저장한 내용이다. 각 차량에 대해 구간 별로 구분한 자료를 시간순으로 정렬해서 이것을 입력정보로 받는다. 또한 인접구간 상관도 정보를 저장한 데이터베이스에서 구간에 대한 상관도 정보를 받는다.

##### 3) 출력정보

출력 정보는 구간별 실시간 통행시간으로 그 결과를 실시간 정보 데이터 베이스)에 저장한다. 이때, 출력정보는 링크번호, 구간통행시간의 평균, 표준편차이다.

##### 4) 알고리즘

실시간 분석통계 알고리즘은 실시간 자료를 이용해서 구간 통행시간을 계산하는 것이다. 여기서 구간통행시간이란 교차로와 교차로 사이 구간을 통과하는 시간을 말하는 것으로 직진, 좌회전, 우회전 차량을 모두 포함한다. 샘플링 자료를 각 구간에 할당하면 한 구간에 샘플링 자료가 두 개 이상인 경우, 한 개 인 경우, 샘플링 자료가 없는 경우 등 세 가지 상황

이 발생한다. 여기서 한 구간 내 샘플링 개수가 두 개이상인 경우는 구간 통행시간 산출이 비교적 쉽고 정확하다. 하지만 너무 자주 샘플링을 하는 경우 통신비용이 증가하므로 경제성을 고려하여 샘플링 간격을 조정해야 한다. 따라서 샘플링 자료에는 한 구간 내 샘플링 개수가 한 개 이하인 경우를 포함할 수 있는데 그 정보를 효과적으로 가공하여 실시간 구간 통행시간을 산출하는 것이 중요하다.

실시간 구간 통행시간 산출은 연속된 구간을 분석하므로 구간들 사이에 있는 교차로를 통과하는 시간(예를 들면, 신호 대기시간)을 구간통행시간에 어떻게 포함시킬지도 하나의 중요한 문제가 된다. 교차로 통과시간을 분할하는 방법은 다음과 같이 세 가지로 나눌 수 있다.

- 가. 교차로 통과시간을 양 구간에 동일하게 할당하는 방법
- 나. 교차로 통과시간을 한쪽 구간에 일방적으로 할당하는 경우
- 다. 교차로 통과시간을 구간의 속도에 반비례하여 할당하는 경우

실제로 구간통행 속도가 느릴수록 교차로에서 머무르는 시간은 길어지므로 이 연구에서 제시하는 알고리즘은 위의 경우 가운데 세 번째 방법으로 교차로 통과시간을 할당한다. 그리고 샘플링 자료가 불충분할 때, 자료가 연속적으로 여러 구간에 걸쳐있는 상황을 효과적으로 이용하기 위해 다음과 같은 가정을 바탕으로 알고리즘을 전개한다.

- 가정 1. 아주 짧은 시간동안 인접 구간의 교통흐름 변화는 선형관계이다.
- 가정 2. 따라서 현재의 인접 구간 통행 속도는 어느 정도의 시간이 지나지 않은 최근 자료를 이용하여 산출한 구간의 통행속도에 비례한다.

**(1) 구간 통행시간 산출**

이제 수정 실시간 자료를 이용하여 실시간 구간 통행시간을 구하는 알고리즘을 제시한다. 먼저 차량이 지나간 경로상의 연속 세 구간을 L1, L2, L3 라 하고 연속 세 구간의 샘플 패턴을 (L1의 샘플링 개수, L2의 샘플링 개수, L3의 샘플링 개수)라 하면 패턴을 <표 2>와 같이 27가지로 나눌 수 있다.

<표 2> 연속 세 구간 통행 자료패턴

패턴 1 : (2+, 2+, 2+)	패턴 10 : (1, 2+, 2+)	패턴 19 : (0, 2+, 2+)
패턴 2 : (2+, 2+, 1)	패턴 11 : (1, 2+, 1)	패턴 20 : (0, 2+, 1)
패턴 3 : (2+, 2+, 0)	패턴 12 : (1, 2+, 0)	패턴 21 : (0, 2+, 0)
패턴 4 : (2+, 1, 2+)	패턴 13 : (1, 1, 2+)	패턴 22 : (0, 1, 2+)
패턴 5 : (2+, 1, 1)	패턴 14 : (1, 1, 1)	패턴 23 : (0, 1, 1)
패턴 6 : (2+, 1, 0)	패턴 15 : (1, 1, 0)	패턴 24 : (0, 1, 0)
패턴 7 : (2+, 0, 2+)	패턴 16 : (1, 0, 2+)	패턴 25 : (0, 0, 2+)
패턴 8 : (2+, 0, 1)	패턴 17 : (1, 0, 1)	패턴 26 : (0, 0, 1)
패턴 9 : (2+, 0, 0)	패턴 18 : (1, 0, 0)	패턴 27 : (0, 0, 0)

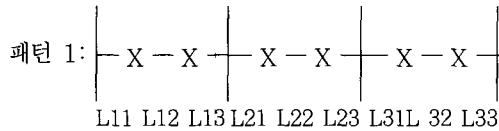
이 패턴에서 우리가 구간 통행시간을 산출하려고 하는 구간은 L2이다. 또한 2+는 샘플링 자료가 2개 이상인 경우를 한꺼번에 가리킨다. 이렇게 한 구간 샘플링 자료가 2개이상인 경우를 그냥 하나로 묶는 이유는 구간통행시간을 계산할 때 한 구간 샘플링 수가 세 개 이상이어도 그 구간의 가장 처음 자료와 마지막 자료 두 개만을 사용하기 때문이다.

구간 통행시간을 산출하려는 구간 L2에 대한 샘플링 자료가 두 개 이상인 경우는 구간 통행시간 t2를 t21, t22, t23로 나누고, 한 개인 경우는 t2를 t21, t22의 두 개로 나누어 따로 계산한다. 따라서 위의 27가지는 연속하는 두 개의 구간 패턴이 (2+, 2+), (1, 1), (1, 0)인 경우만 분석하면 그 결과를 그대로 적용할 수 있다. 여기서 (2+, 2+), (1, 1)의 경향은 인접 두 구간에 샘플링 자료가 있는 경우이므로 그 구간에 대한 자료만을 가지고 구간 통행시간을 계산할 수 있다. 하지만 (1, 0)의 경향은 뒤의 구간 샘플링 자료가 없는 경우이므로 다른 구간을 고려하여 구간 통행시간을 계산한다. 또한 (2+, 2+) 인 경향은 두 구간의 구간에 관한 참조속력이 필요하지 않지만, (1, 1)의 경향은 구간 참조속력이 필요하다.

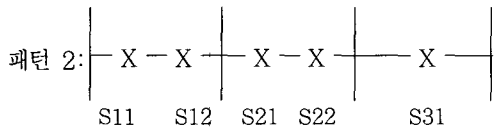
구간 참조속력이란 현 시점에서 그 구간 속력의 신뢰성있는 값이다. 이 구간 참조속력은 먼저 과거 5분 전 자료분석 결과를 이용하여 찾는다. 만일 이 결과가 없으면 과거 10분 전 자료분석 결과를 이용하며, 그 결과도 없으면 인접구간 상관도를 이용한다. 이것도 불가능한 경우엔 마지막 방법으로 회귀분석 결과에서 해당 시간대, 해당 구간의 평균속력 값을 취한다. 위의 모든 경우에서 구간 참조속력이나 샘플에 의한 속력의 역수의 비를 이용하여 교차로를 포함하고 있는 연속된 샘플링 사이의 시간을 나누게 된다.

이것을 나타내기 위해서 위의 패턴 27가지 가운데 패턴 1, 2, 3, 4, 5의 구간 통행시간 계산 방법을 설명한다. 이 다섯 가지 패턴에 대한 산출 방법을 그대로 적용하면 나머지 패턴에 대해서도 구간 통행시간을 산출 할 수 있다. 각 경우별 샘플링 자료를 분석하여 구간 통행시간을 산출하는 알고리즘을 유도하기 위해서 다음을 정의한다.

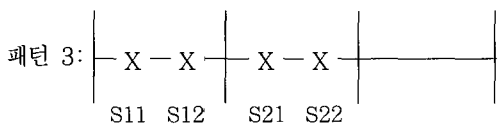
- $v_1$  : 구간 1의 속력
- $\bar{v}_1$  : 구간 1의 참조 속력
- L(1) : 구간 1의 길이



L13에서 L21까지 통행시간을  $t$ 라 할 때, L2의 통행시간  $t_2$ 를 계산하기 위해서  $t_{13} + t_{21} = t$ ,  $t_{13} : t_{21} = \frac{l_{13}}{v_1} : \frac{l_{21}}{v_2}$ 를 이용하여 방정식을 풀면  $t_{21} = \frac{v_1 l_{21} t}{v_2 l_{13} + v_1 l_{21}}$  이 된다.  $t_{23}$ 는 L2와 L3에 대해서 마찬가지로 구한다. 또  $t_{22}$ 는 자료에서 바로 나오는 값이므로,  $t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23}$ 가 된다.



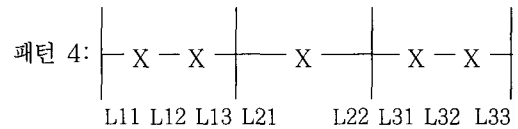
여기서  $t_{21}$ 을 구하는 방법은 패턴 1에서  $t_{21}$ 을 구하는 방법과 동일하다. 따라서  $t_{23}$ 를 구하는 방법은  $t_{23} + t_{31} = t$ ,  $t_{23} : t_{31} = \frac{l_{23}}{v_2} : \frac{l_{31}}{v_3}$ 를 이용한다. 이것을 풀면,  $t_{31} = \frac{v_2 l_{31} t}{v_3 l_{23} + v_2 l_{31}}$  이 되므로,  $t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23}$ 가 된다.



먼저  $t_{21}$ 은 패턴 1에서 구한 방법을 이용하여 구한다. 그리고  $t_{23}$ 를 구하기 위해서는 L3의 샘플링 자료가 없으므로 현재 분석중인 차량의 경로를 추적하여 이후에 미리 정한 값  $m$ 에 해당하는 개수만큼 구간을 살펴본다. 그리고 그  $m$ 개의 구간 가운데 샘플링 자료가 있는 구간이 있는지를 파악한다. 만일 그 구간이 없으면 L21의 구간 속도를 외삽(extrapolation)한다. 즉,  $t_{23} = \frac{l_{23}}{v_1}$  이 된다. 또 그 구간이 있는 경우는 그 구간이 Ln이라 하면 S22에서 다음 샘플링 지점인 Sn1 까지 시간  $t_m$ 에 대해서 다음 식을 세운다. 단 여기서  $k$ 는 비례상수를 나타낸다.

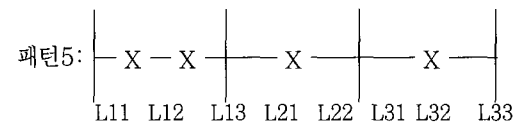
$$t_{23} + \sum_{i=3}^{n-1} t_i + t_{n1} = t_m, \quad t_2 = \frac{l_2}{v_2} k, \quad t_3 = \frac{l_3}{v_3} k, \\ t_4 = \frac{l_4}{v_4} k, \dots, \quad t_{n1} = \frac{l_n}{v_n} k, \quad t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23}.$$

이것을 풀면  $t_{23} = \frac{\frac{l_2}{v_2} (t_m + t_{21} + t_{22})}{\sum_{i=2}^n \frac{l_i}{v_i}}$  이 된다.



$t_{13} + t_{21} = \bar{t}_{12}$ ,  $t_{13} : t_{21} = \frac{l_{13}}{v_1} : \frac{l_{21}}{v_2}$ 를 풀면  $t_{21} = \frac{\bar{v}_1 l_{21} \bar{t}_{12}}{v_2 l_{13} + \bar{v}_1 l_{21}}$ 가 된다.

마찬가지 방법으로  $t_{22} + t_{31} = \bar{t}_{23}$ ,  $t_{22} : t_{31} = \frac{l_{22}}{v_2} : \frac{l_{31}}{v_3}$ 를 풀면  $t_{22} = \frac{\bar{v}_2 l_{22} \bar{t}_{23}}{v_3 l_{22} + \bar{v}_2 l_{31}}$  이므로  $t_2 = t_{21} + t_{22}$ 가 된다.



$t_{12} + t_{21} = \bar{t}_{12}$ ,  $t_{12} : t_{21} = \frac{l_{12}}{v_1} : \frac{l_{21}}{v_2}$ 를 풀면  $t_{21} = \frac{\bar{v}_1 l_{21} \bar{t}_{12}}{v_2 l_{12} + \bar{v}_1 l_{21}}$ 가 된다. 마찬가지로  $t_{22} + t_{31} = \bar{t}_{23}$ ,  $t_{22} : t_{31} = \frac{l_{22}}{v_2} : \frac{l_{31}}{v_3}$

〈표 3〉 통행시간 산출을 위해 필요한 샘플링 자료의 패턴연관성

패턴 번호	패턴	왼쪽 방향 경향	오른쪽 방향 경향	관련된 패턴
1	(2+, 2+, 2+)	(2+, 2+)	(2+, 2+)	산출식제시
2	(2+, 2+, 1)	(2+, 2+)	(1, 1)	산출식제시
3	(2+, 2+, 0)	(2+, 2+)	(1, 0)	산출식제시
4	(2+, 1, 2+)	(1, 1)	(1, 1)	산출식제시
5	(2+, 1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	산출식제시
6	(2+, 1, 0)	(1, 1)	(1, 0)	3, 5
7	(2+, 0, 2+)	(1, 0)	(1, 0)	3
8	(2+, 0, 1)	(1, 0)	(1, 0)	3
9	(2+, 0, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
10	(1, 2+, 2+)	(1, 1)	(2+, 2+)	1, 4
11	(1, 2+, 1)	(1, 1)	(1, 1)	5
12	(1, 2+, 0)	(1, 1)	(1, 0)	3, 4
13	(1, 1, 2+)	(1, 1)	(1, 1)	4
14	(1, 1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	4
15	(1, 1, 0)	(1, 1)	(1, 0)	3, 4
16	(1, 0, 2+)	(1, 0)	(1, 0)	3
17	(1, 0, 1)	(1, 0)	(1, 0)	3
18	(1, 0, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
19	(0, 2+, 2+)	(1, 0)	(2+, 2+)	1, 3
20	(0, 2+, 1)	(1, 0)	(1, 1)	3, 4
21	(0, 2+, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
22	(0, 1, 2+)	(1, 0)	(1, 1)	3, 4
23	(0, 1, 1)	(1, 0)	(1, 1)	3, 4
24	(0, 1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
25	(0, 0, 2+)	(1, 0)	(1, 0)	3
26	(0, 0, 1)	(1, 0)	(1, 0)	3
27	(0, 0, 0)	GDB 이용	GDB 이용	없음

를 풀면  $t_{22} = \frac{v_3 t_{22} + v_2 t_{31}}{v_3 t_{22} + v_2 t_{31}}$  이므로  $t_2 = t_{21} + t_{22}$ 가 된다.

나머지 22개의 패턴 중에서 (0, 0, 0) 인 경우를 제외한 모든 패턴은 위의 5가지 패턴에서 사용한 계산 방법을 해당사항에 맞게 선택하여 사용한다. 〈표 3〉는 이것을 나타낸 것이다.

이제 마지막으로 샘플링 자료가 없는 패턴 27의 경우는 분석기간 자료만으로 실시간 구간 통행시간을 산출할 수 없는 경우이므로 실시간 자료융합방법을 이용해서 실시간 구간통행시간을 산출한다.

(2) 평균분산 산출

각 차량이 구간을 통행한 자료를 가지고 위 알고리

즘을 이용해서 산출한 결과물은 한 차량에 대한 구간 통행시간 정보이다. 이제 한 개 구간에서 여러 대 차량을 가지고 산출한 실시간 구간통행시간의 평균, 분산을 산출한다. 평균치를 산출하는 방법은 단지 산술적인 평균이 아니라, 가중치를 넣은 평균을 산출한다. 가중치는 한 구간에 대한 총 샘플링 횟수에 대한 차량의 샘플링 횟수 비율이다.

(3) 상관도를 이용한 통행시간 산출

5분동안 모은 자료를 가지고 실시간 분석통계모듈을 이용할 때, 모든 구간에 대한 실시간 구간 통행을 구하지 못할 수도 있다. 이 경우 상관도가 있는 인접구간의 실시간 분석통계 결과를 이용하여 통행시간을 산출한다.

구간 A와 B가 상관관계가 존재하고 구간A에서는 실시간 분석에서 샘플링 자료가 있어 실시간 통행시간을 산출했고 구간 B에서는 샘플링이 없는 경우가 있다. 이 때 구간 B의 통행시간을 인접구간 상관관계를 이용해서 구하면 다음과 같다. 우선 구간A의 실시간 통행시간을  $RT_A$ , 과거 평균통행시간을  $\mu_A$ , 표준편차를  $\sigma_A$ 라고 하자. 그리고 구간B의 실시간 통행시간을  $RT_B$ , 과거 평균통행시간을  $\mu_B$ , 표준편차를  $\sigma_B$  라고 하자. 구간 A와 구간B의 통행시간이 정규분포를 따른다고 가정하면  $RT_B$ 는 규모 조정(scaling)을 통해 다음 식으로 구할 수 있다.

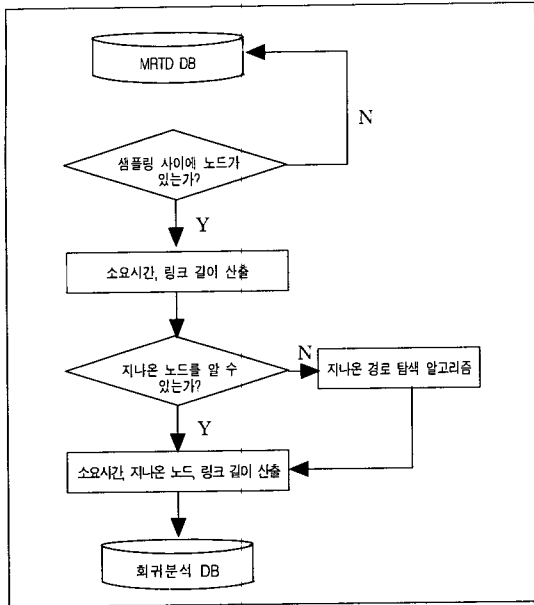
$$\frac{RT_A - \mu_A}{\sigma_A} = \frac{RT_B - \mu_B}{\sigma_B}$$

$$RT_B = \mu_B + \sigma_B \frac{RT_A - \mu_A}{\sigma_A}$$

3. 과거자료 분석 알고리즘

1) 목적

이 알고리즘은 과거 누적 자료를 가지고 회귀분석하여 구간 통행시간을 산출하는 것과 상관도가 있는 인접구간을 구하는 것이 목적이다.



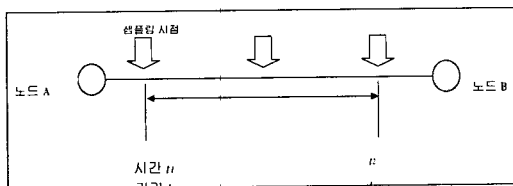
〈그림 3〉 O-D 분석 모듈 흐름도

2) O-D 분석 모듈

AVL시스템을 이용한 차량의 위치와 시각 자료는 조사차량이 일정 시간 주기로 샘플링한다. 따라서 샘플링 간격에 따라 어떤 경우는 차량이 지나온 구간을 샘플링하지 않고 그냥 지나칠 수도 있다. 따라서 O-D 경로를 추적하는 단계가 필요하다. O-D 분석 모듈에서 소요시간과 지나간 노드, 구간을 파악하는 흐름도는 〈그림 3〉과 같다. 세부 단계를 설명하면 다음과 같다.

단계 1. 연속 두 자료간에 노드 존재 여부 확인

수정 실시간 자료 데이터베이스에서 수집한 자료(수정실시간 일련번호, 시각, x 좌표, y 좌표, 차량\_ID, 구간\_ID)를 이용하여 조사 차량이 노드를 통과했는지를 파악한다. 아직 노드를 통과하지 않았으면 시점이 앞인 자료를 버리고 다음 시점 샘플링 자료가 노드를 통과했는지를 계속 확인한다. 노드를 통과했다면 소요시간, 구간길이를 산출한다.



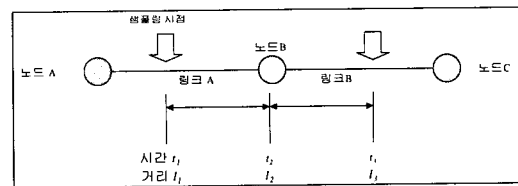
〈그림 4〉 샘플링 사이에 노드가 없는 경우

소요시간 =  $t_2 - t_1$

지나간 구간 길이 =  $l_2 - l_1$

단계 2. 지나온 노드를 아는 경우

샘플링 자료를 통해 차량별로 지나온 구간을 추적하여 지나온 노드를 알 수 있는 경우는 〈그림 5〉과 같이 소요시간과 구간길이를 산출하고 지나온 노드에 1값을 넣는다.



〈그림 5〉 지나온 노드를 아는 경우

소요시간 =  $t_3 - t_1$

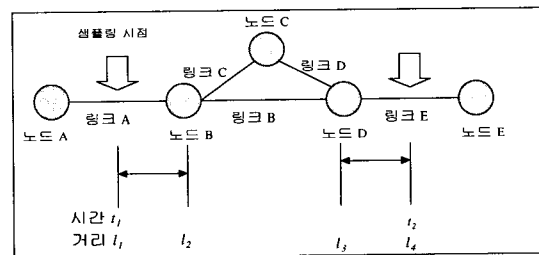
구간 A 길이 =  $l_2 - l_1$

구간 B 길이 =  $l_3 - l_2$

지나간 노드 B = 1

단계 3. 지나온 노드를 알 수 없는 경우

샘플링 자료 사이에 노드가 두개 이상이어서 지나온 노드를 알 수 없는 경우는 경로 탐색 알고리즘을 통하여 지나온 구간을 추적한다. 〈그림 6〉을 이용하여 산출정보를 표현하면 다음과 같다.



〈그림 6〉 지나온 노드를 알 수 없는 경우

소요시간 =  $t_2 - t_1$

구간 A 길이 =  $l_2 - l_1$

구간 B 길이 = 구간 전체 길이

구간 E 길이 =  $l_4 - l_3$

지나간 노드 B = 1

지나간 노드 D = 1



우선 경로 탐색 알고리즘은 노드 B와 노드 D만 통과했는지 아니면 노드 B, 노드 C, 노드 D를 통과했는지를 파악한다. 만약 노드 B와 노드 D만을 통과했다면 <그림 6>과 같이 정보를 생성한다.

단계 4. 생성한 정보를 회귀분석 DB에 저장한다.

3) 회귀분석 모듈

(1) 입력정보

회귀분석은 회귀분석 데이터베이스에 저장한 자료를 이용한다. 그 내용은 회귀분석 일련번호, 차량\_ID, O-D구간 내 소요시간, 지나간 구간, P/V 일련번호, 날씨 대한 자료이다.

(2) 출력정보

회귀분석 이후에 출력되는 정보는 구간\_ID, 차량\_ID, 날씨, 통행시간평균, 통행시간분산, 혼잡도 등급, 통행속도이다. 회귀분석을 통해 구한 정보는 과거 자료 분석 데이터베이스에 저장한다.

(3) 종속 변수

종속 변수  $Y_i$ 는 O-D 구간 내 소요시간을 나타낸다.

(4) 독립 변수

- 구간 변수는 구간 개수 n개이다.
- 월 변수는 11개이고 요일 변수는 6개이며 러시아워 변수를 따로 구분한다.
- 사고 변수는 사고가 발생한 경우를 나타내는 변수이다.
- 날씨 변수는 날씨가 통행속도에 영향을 미치는 상황을 반영하는 변수이다.

(5) 회귀모형

$$\begin{aligned}
 Y_i &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n && \text{(구간)} \\
 &+ \beta_{m1} X_{m1} X_1 + \dots + \beta_{m1n} X_{m1n} X_n && \text{(월)} \\
 &: && : \\
 &+ \beta_{m11} X_{m11} X_1 + \dots + \beta_{m11n} X_{m11n} X_n \\
 &+ \beta_{a1} X_{a1} X_1 + \dots + \beta_{a1n} X_{a1n} X_n && \text{(요일)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &: && : \\
 &+ \beta_{a6} X_{a6} X_1 + \dots + \beta_{a6n} X_{a6n} X_n \\
 &+ \beta_{r1} X_{r1} X_1 + \dots + \beta_{r1n} X_{r1n} X_n && \text{(러시아워)} \\
 &+ \beta_{a1} X_{a1} X_1 + \dots + \beta_{a1n} X_{a1n} X_n && \text{(사고)} \\
 &+ \beta_{w1} X_{w1} X_1 + \dots + \beta_{w1n} X_{w1n} X_n && \text{(날씨)} \\
 &+ \epsilon_i
 \end{aligned}$$

- $Y_i$  : 소요시간
- $\beta$  : 회귀분석을 통해 구하고자 하는 파라미터 값
- $X_i$  : 구간 l을 지나간 경우. 구간 l의길이
- $X_{mk}$  : k월 자료이면 1, 아니면 0인 지시변수, 단, 12월은 모든 변수값이 0인 경우이다.
- $X_{dj}$  : j요일 자료면 1,아니면 0인 지시변수, 단, 일요일은 모든 변수값이 0인 경우이다.
- $X_r$  : 침두, 비침두를 나타내는 지시변수, 러시아워 이면 1 아니면0
- $X_a$  : 유고사항을 나타내는 지시변수, 사고가 발생한 경우는 1 아니면 0
- $X_w$  : 날씨에 관한 지시변수, 날씨가 소통상태에 영향을 주면 1 아니면 0

4. 자료융합 알고리즘

1) 목적

이 알고리즘은 구간통행시간의 신뢰성을 높이기 위해서 여러 자료원으로 산출한 구간 통행시간을 비교하고 그 패턴에 따라 신뢰도를 구해서 융합한 구간통행시간을 구한다.

2) 입력정보

자료융합 알고리즘 입력자료 가운데 실시간 정보 데이터베이스에서 넘어오는 것은 세 가지이다. 첫째, 최근 5분 동안 자료를 가지고 구한 실시간 구간 통행시간, 둘째, 과거 10분에서 5분까지 자료를 가지고 구한 구간통행시간, 셋째, 과거 15분에서 10분까지 자료를 가지고 구한 구간통행시간이다. 그리고 인접 구간 상관도 데이터베이스에서 들어온 인접구간 상관도 정보, 실시간 구간 통행시간 정보, 회귀분석결과가 결합해서 인접구간을 이용한 실시간 구간통행시간을 구한 것도 다른 입력자료가 된다. 마지막으로 회귀분석결과도 자료융합 알고리즘의 입력자료이다.

3) 출력정보

자료융합 알고리즘을 수행한 결과, 출력 정보는 전체 구간의 믿을만한 구간통행시간이다.

4) 알고리즘

자료융합 알고리즘은 신뢰성있는 구간통행시간을 산출하기 위해서 자료융합을 하는 데 전문가 시스템을 이용한다. 다시 말하면 구간통행시간을 산출하기 위한 자료융합을 할 때, 입력 자료원 패턴을 몇 가지로 나누고 그 패턴을 바탕으로 자료융합을 한다. 여기서 자료융합은 크게 두 가지 모듈로 나눈다. 첫 번째는 실시간에 가까운 자료들을 융합하는 실시간 자료융합모듈이고 둘째는 실시간 자료융합결과와 회귀분석 결과를 융합하는 최종 자료융합모듈이다.

(1) 실시간 자료융합 모듈

① 자료원

실시간 자료융합을 할 때, 고려하는 자료원은 다음과 같이 크게 4가지이다.

- a. 최근 5분동안 자료를 이용해서 실시간 구간 통행시간을 구한 결과(최근 5분 자료)
- b. 과거 10분부터 과거 5분까지 자료를 이용해서 구간통행시간을 구한 결과(과거 5분 자료)
- c. 과거 15분부터 과거 10분까지 자료를 이용해서 구간통행시간을 구한 결과(과거 10분 자료)
- d. 인접구간 상관도를 이용해서 상관도가 있는 구간의 실시간 자료를 참조하여 구간통행시간을 구한 결과(인접구간 자료)

② 자료융합 절차

- a. 각 구간에 대해서, 앞에서 설명한 ① 자료원에서 최근 5분 자료를 입력 한다.
- b. 각 구간에 대해서, 구간 통행시간평균을 구하고 평균의 30% 이내에 속하지 않는 자료는 버린다. 그리고, 남은 자료가 차량 세 대 이상에 해당하지 않으면 자료를 모두 버린다.
- c. 남은 자료가 차량 세 대 이상에 해당하는 구간에 대해서, 평균하여 실시간 구간 통행시간을 계산해서 라벨을 붙인다.

〈표 4〉 실시간 자료융합을 해야하는 구간

구간	최근 5분 자료	과거 5분 자료	과거 10분 자료	인접구간 자료
1	1			
2	0	1	0	1
3	1			
4	1			
	0	0	1	1
	1			
	1			
	0	1	1	0

이 때, 단계 b를 이용하면 실시간 통행시간을 산출하지 못한 구간이 생길 수 있다.

- d. 우선 단계 c에서 라벨이 붙은 구간은 신뢰도를 1로 준다.
- e. 라벨이 붙지 않은 구간은 실시간 자료융합을 한다. 다시 말하면 실시간 자료융합을 해야 하는 구간은 〈표 4〉에 음영으로 나타나는 바와 같이 최근 5분 자료가 부족하여 라벨이 붙지 않은 구간이다. 이때 실시간 자료융합은 앞에서 설명한 네 가지 자료원 가운데 최근 5분 자료를 제외한 세 가지 분석결과를 이용한다. 〈표 4〉는 라벨을 1로 표시하였다.
- f. 자료의 라벨패턴에 따라 실시간 자료융합하는 방법은 〈표 5〉에 나타나 있다.

각 자료원 가운데 과거 5분 자료와 과거 10분 자료에서 1에 해당하는 값은 최근 5분 자료에 대해 라벨을 붙이는 방법과 마찬가지로 라벨을 붙인 것이고, 인접구간 자료에 해당하는 라벨은 상관도가 있는 인접구간에 대한 최근 5분 자료의 라벨과 같다.

〈표 5〉 라벨패턴에 따른 실시간 자료융합방법

최근 5분	과거 5분	과거 10분	인접구간	자료융합방법
0	1	1	1	시계열 방법
0	1	1	0	
0	1	0	1	가중치 평균법
0	0	1	1	
0	1	0	0	상관도 계수 이용
0	0	1	0	
0	0	0	1	
0	0	0	0	산출할 수 없음

〈표 5〉를 보면 라벨 패턴에 따라 크게 세 가지 실시간 자료 융합방법을 이용하는데, 먼저 시계열 방법을 이용해서 구간통행시간을 구하는 식은 다음과 같다.

$$RT_0 = 2RT_5 - RT_{10}$$

단, 여기서  $RT_0$ 는 최근 5분 자료평균,  $RT_5$ 는 과거 5분 자료평균이고,  $RT_{10}$ 은 과거 10분 자료평균이다.

또 가중치 평균법을 이용하는 경우는 과거 5분 자료와 인접구간 자료에 라벨이 있으면,

$$RT_0 = \frac{(1 + \rho_{LB})RT_5 + 2\rho_{LB}RTN}{1 + 3\rho_{LB}}$$

이다. 만일 과거 10분 자료와 인접구간 자료에 라벨이 있으면,

$$RT_0 = \frac{(1 + 3\rho_{LB})RT_{10} + 4\rho_{LB}RTN}{1 + 7\rho_{LB}}$$

가 된다. 여기서  $RTN$ 는 인접구간 자료 평균이고,  $\rho_{LB}$ 는 인접구간 상관도를 평가할 때 상관도가 있다고 판정한 하한치 기준이다.

여기까지 구한 결과는 신뢰도를 1이 되어 최종 자료 융합에서 회귀분석결과를 포함하지 않고 그대로 이 결과가 최종 구간 통행시간이 된다.

한편, 상관도 계수를 이용하는 경우는 과거 5분 자료, 과거 10분 자료, 인접구간 자료 가운데 한 가지만 라벨이 붙은 경우로 그 결과가 그대로 실시간 자료 융합 결과이다. 하지만 이 경우는 신뢰값이 1보다 작아서 회귀분석결과를 이용하여 최종 자료융합을 한다. 먼저 과거 5분 자료에 라벨이 붙은 경우는

$$RT_0 = RT_5(\text{신뢰도: } \frac{1 + \rho_{LB}}{2})$$

이다. 그리고 과거 10분 자료만 라벨이 붙은 경우는

$$RT_0 = RT_{10}(\text{신뢰도: } \frac{1 + 3\rho_{LB}}{4})$$

이다. 또 인접구간 자료만 라벨이 붙은 경우는

$$RT_0 = RTN(\text{신뢰도: } \rho_{LB})$$

이다.

## (2) 최종 자료융합 모듈

최종자료융합은 실시간 자료융합 결과와 회귀분석 결과를 융합하는 과정이다. 먼저 실시간 자료융합에서 신뢰값이 1인 경우는 회귀분석결과를 이용할 필요가 없이 그대로 실시간 자료융합결과를 이용한다. 또

실시간 자료융합 결과, 신뢰값이 1이 아닌 경우는 회귀분석 결과를 이용하는데 이 경우 회귀분석 결과의 신뢰값은 다음과 같이 구한다.

$$R_h = 0.5 + \phi\left(\left|\frac{RT - \mu}{\sigma}\right|\right)$$

여기서  $R_h$ 는 회귀분석 결과의 신뢰값이고,  $RT$ 는 〈표 5〉에서 상관도 계수를 이용하는 경우, 라벨이 붙은 자료원의 구간통행시간이다. 또  $\phi(z)$ 는 표준정규 분포를 따르는 확률변수가  $z$ 이상일 확률을 가리킨다. 이제 이 신뢰값을 가지고 두 자료를 베이저안 방법으로 융합하여 구한 결과가 최종 자료융합 결과이다.

$$t_{jj} = \frac{t_{j'}RT_0 + t_{j''}R_h}{RT_0 + R_h}$$

여기서,  $t_{jj}$ 는 최종 자료융합한 결과로 구간  $j$ 의 통행시간 산출값이다. 또  $t_{j'}$ 는 실시간 융합 결과로 계산한 구간  $j$ 의 통행시간 산출값이고,  $t_{j''}$ 는 회귀분석 결과로 나온 구간  $j$ 의 통행시간 산출값이다.

한편, 실시간 자료 가운데 라벨이 붙은 자료원이 하나도 없는 경우는 회귀분석 결과를 그대로 구간 통행시간으로 사용한다.

이 연구에서 개발한 자료융합방법은 자료원별 산출 결과 패턴을 이용해서 경우별로 다른 신뢰값을 가지고 융합하는 방법이다. 따라서 이 방법을 이용하면 차량 운전자나 교통 방송국의 상황 정보를 보조자료로 이용하는 경우에 대해서도 신뢰값을 매겨서 추가로 융합할 수 있다. 그 경우, 실시간 융합 결과가 없어서 회귀분석결과만을 이용하는 구간에 대한 통행시간 산출결과는 훨씬 더 정확해진다.

## IV. 알고리즘 수행 결과와 분석

### 1. 시뮬레이션 결과와 분석

이 연구에서 개발한 구간통행시간 산출 알고리즘 수행도를 평가하기 위해서 시뮬레이션을 통해서 실제 값과 산출값을 비교하였다. 이를 위해서 먼저 서울 성북구 일대 지도를 비주얼 베이직으로 그리고 그 위에서 조사차량의 이동을 발생시켜 각 조사차량별로

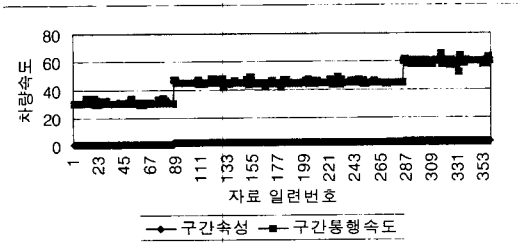
미리 정한 샘플링 시점이 되면 그 때의 차량 위치, 시각, 좌표를 얻어서 그 자료를 이 연구에서 개발한 알고리즘에 적용하였다. 이 때 차량의 이동은 미리 정한 세 가지 속도를 바탕으로 움직인다고 가정하였으며 자료를 이용해서 알고리즘을 수행해서 나오는 구간 통행시간과 실제 발생시킨 속도로 얻을 수 있는 구간통행시간을 비교하였다.

시뮬레이션 대상 지역은 노드가 54개, 구간이 174개이다. 또 조사 차량은 총 50대를 운행한다. 각 구간에 대해서 시간대에 따라 조사차량이 지나가는 속도를 미리 정하는데, 이 속도값은 30km/시, 45km/시, 60km/시 세 가지 가운데 하나이다. 차량이 노드에 도착하면, 운행 구간속도를 받아서 차량을 운행한다. 차량을 운행하면서 계속 좌표값을 갱신하는데, 미리 정한 샘플링 시점이 되면 시각의 차량 좌표를 실시간 자료 데이터베이스로 보내서 그 좌표가 속한 구간을 정하고 알고리즘을 수행하는 과정을 거치게 된다.

〈그림 7〉은 구간통행시간을 산출해서 나온 결과들을 실제 속도와 비교한 것이다. 알고리즘 수행으로 나오는 것은 구간 통행시간이지만 실제값과 쉽게 비교하기 위하여 이 연구는 각 출력값을 속도로 환산하여 비교한다. 그림에 나타난 바와 같이 알고리즘 수행결과는 실제 속도에 적은 오차를 가지고 구간 통행시간을 산출하는 것을 알 수 있다. 여기서 오차율을 이용해서 알고리즘 수행도를 정량적인 수치로 평가한다. 오차율은 다음 식으로 구한 값이다.

$$\frac{\sum_{j \in L} |RV_{ij} - \widehat{RV}_{ij}|}{\sum_{j \in L} RV_{ij}} \times 100(\%)$$

여기서  $RV_{ij}$ 는 조사차량  $i$ 가 구간  $j(j \in L)$ 을 통행한 실제 속도이고,  $\widehat{RV}_{ij}$ 는 그 때 알고리즘으로 산

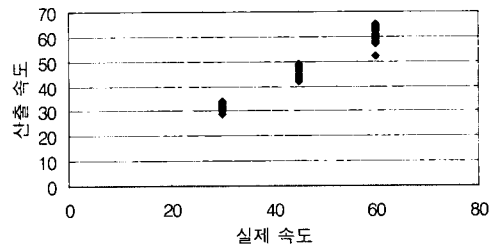


〈그림 7〉 알고리즘 수행결과

출한 산출속도이다.

〈그림 7〉의 결과에 대한 오차율은 1.48%이다. 이 결과는 이 연구에서 개발한 세 가지 알고리즘을 수행하여 최종 결과인 자료융합 알고리즘 수행결과와 실제 시뮬레이션을 발생시킨 값을 비교한 것이다. 따라서 알고리즘은 매우 정확한 구간 소통 정보를 산출한다는 것을 알 수 있다.

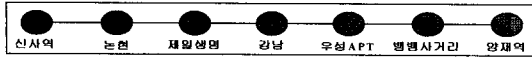
한편 각 속도별로 산출값이 실제값과 얼마나 떨어져서 나타나는지를 알기 위해 나타낸 것이 〈그림 8〉이다. 그림을 통해서 알 수 있는 바와 같이 알고리즘 산출 결과는 실제 속도에 상관없이 실제속도 주위에 밀집하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서 개발한 알고리즘은 어떤 경우에도 오차가 작은 교통소통 정보를 산출한다.



〈그림 8〉 산출 결과의 속도별 분포

## 2. 주행 조사와 분석

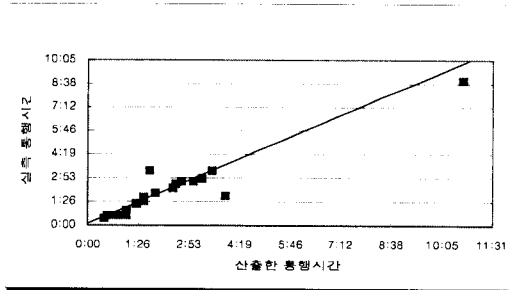
알고리즘 정확성을 검증하기 위해서 실제 조사차량을 이용해서 주행하고 주행을 통해서 얻은 위치와 시각 자료를 가지고 알고리즘을 수행하였다. 조사를 수행하기 위해서 (주)인테크산업에서 제조한 GPS1000 장비를 대우 프린스 승용차에 탑재하고 조사하였다. (주)ITS 인테크의 협조를 얻어 수집한 자료는 교통센터로 전송하였으며, 교통센터에서 맵 매칭(map matching)시킨 자료를 받아서 조사분석에 이용하였다. 조사 일시는 1998년 11월 20일이며 조사구간은 강남대로(신사동~양재역 구간)이다. 〈그림 9〉은 조사 구간을 나타낸다. 주행 조사는 차량 한 대를 이용하였기 때문에 이 연구에서 개발한 알고리즘 가운데, 실시간 분석통계 알고리즘에 대한 정확도만을 평가하였다.



〈그림 9〉 주행 조사 구간

실제 주행구간은 6개 도로(12개 구간)이지만 실시간 분석통계 모듈은 연속한 세 구간 주행 자료를 이용해서 가운데 구간 통행시간을 산출하는 모듈이므로 양 끝구간 네 개를 제외하여 총 8개 구간에 대해서 분석하였다. 또 얻은 자료를 분석하기 위해서 주행조사 대상의 노드와 링크 좌표정보를 (주)ITS 인테크에서 받아서 이용하였다.

이 알고리즘 수행결과는 〈그림 10〉과 같다. 알고리즘 수행 결과에 대한 수행도를 측정하기 위해서 시뮬레이션 검증과 마찬가지로 오차율을 이용하였는데, 그림에서 45도 방향의 직선이 오차율 0%인 직선이다. 실제 주행조사 결과 오차율은 5.4%였다. 따라서 매우 정확한 결과를 산출할 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 10〉 주행조사 결과

### V. 결론 및 향후 연구과제

이 연구는 지능형 교통시스템에서 AVL기법을 이용해서 얻은 자료를 분석하여 구간통행시간을 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 교통소통시간을 산출하는 문제는 정보를 산출하는 지역 범위가 넓고, 이용할 자료가 많을 뿐 아니라 실시간으로 정보를 산출할 수 있어야 하기 때문에 해결하는 것이 매우 어려운 문제이다.

이 연구에서 개발한 알고리즘은 과거자료를 오프라인으로 분석하고, 온라인으로는 실시간 정보를 시간대별로 나누어 분석한다. 이러한 실시간 분석결과는 최근 몇 개의 결과를 가지고 실시간 융합하여 오프라인으로 분석한 결과와 최종융합하는 단계를 거친다. 이러한 과정을 통해서 구간통행시간을 산출하는 것이 이 연구에서 개발한 연구 내용이다.

이 연구에서 개발한 알고리즘을 평가하기 위해서 시뮬

레이션을 이용했는데, 오차율이 2%미만으로 매우 좋은 수행결과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또 실제 주행 조사 결과도 오차율 5%정도를 나타내는 것을 알 수 있었다.

이 연구에서 개발한 구간 통행시간은 실시간 자료를 가지고 산출한 최근 정보일 뿐, 예측에 사용하기는 힘들다. 따라서 구간 통행시간을 예측하거나 최적 경로를 제공하는 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

### 참고문헌

1. 최기주(1998), "링크 통행시간 추정을 위한 데이터 퓨전 알고리즘의 개발," 대한교통학회지 16권 2호, pp.177~195.
2. 최기주, 신치현(1998), "GPS와 GIS를 이용한 링크통행시간 예측기법," 대한교통학회지, 16권 2호, pp.197~207.
3. May A. D.(1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J.
4. Nelson P. and Palacharla P.(1993), "A Neural Network for Data Fusion in ADVANCE," Presented at the 1993 Transtech Pacific Rim Conference Seattle, Washington, July 25.
5. Ran B., Roupail N., Tarko A., and Boyce D. E.(1992), "Toward a Set of Dynamic Link Travel Time Functions for Dynamic Traffic Assignment," Paper presented at the 39th Annual Meeting of the Regional Science Association International, Chicago, IL.
6. Roupail N. M. and Tarko A.(1997), "Intelligent Traffic Data Processing for ITS Application," Journal of Transportatoin Engineering, July/August.
7. Roupail N. M. and Tarko A.(1993), "Travel Time Data Fusion in ADVANCE," ADVANCE Working Paper Series, No. 28, Aug.
8. Sussman J. M., Wong H., and Miller R.(1974), "Estimating Travel Times on Highway Networks," ASCE Journal of Transportation, TEI, pp.13~26.
9. Tarko A.(1995), "Data Fusion Algoritnm for ADVANCE Release 2.0," ADVANCE Working Paper Series, No. 48, May 1995.

이 발생한다. 여기서 한 구간 내 샘플링 개수가 두 개이상인 경우는 구간 통행시간 산출이 비교적 쉽고 정확하다. 하지만 너무 자주 샘플링을 하는 경우 통신비용이 증가하므로 경제성을 고려하여 샘플링 간격을 조정해야 한다. 따라서 샘플링 자료에는 한 구간 내 샘플링 개수가 한 개 이하인 경우를 포함할 수 있는데 그 정보를 효과적으로 가공하여 실시간 구간 통행시간을 산출하는 것이 중요하다.

실시간 구간 통행시간 산출은 연속된 구간을 분석하므로 구간들 사이에 있는 교차로를 통과하는 시간(예를 들면, 신호 대기시간)을 구간통행시간에 어떻게 포함시킬지도 하나의 중요한 문제가 된다. 교차로 통과시간을 분할하는 방법은 다음과 같이 세 가지로 나눌 수 있다.

- 가. 교차로 통과시간을 양 구간에 동일하게 할당하는 방법
- 나. 교차로 통과시간을 한쪽 구간에 일방적으로 할당하는 경우
- 다. 교차로 통과시간을 구간의 속도에 반비례하여 할당하는 경우

실제로 구간통행 속도가 느릴수록 교차로에서 머무르는 시간은 길어지므로 이 연구에서 제시하는 알고리즘은 위의 경우 가운데 세 번째 방법으로 교차로 통과시간을 할당한다. 그리고 샘플링 자료가 불충분할 때, 자료가 연속적으로 여러 구간에 걸쳐있는 상황을 효과적으로 이용하기 위해 다음과 같은 가정을 바탕으로 알고리즘을 전개한다.

- 가정 1. 아주 짧은 시간동안 인접 구간의 교통흐름 변화는 선형관계이다.
- 가정 2. 따라서 현재의 인접 구간 통행 속도는 어느 정도의 시간이 지나지 않은 최근 자료를 이용하여 산출한 구간의 통행속도에 비례한다.

**(1) 구간 통행시간 산출**

이제 수정 실시간 자료를 이용하여 실시간 구간 통행시간을 구하는 알고리즘을 제시한다. 먼저 차량이 지나간 경로상의 연속 세 구간을 L1, L2, L3 라 하고 연속 세 구간의 샘플 패턴을 (L1의 샘플링 개수, L2의 샘플링 개수, L3의 샘플링 개수)라 하면 패턴을 <표 2>와 같이 27가지로 나눌 수 있다.

<표 2> 연속 세 구간 통행 자료패턴

패턴 1 : (2+, 2+, 2+)	패턴 10 : (1, 2+, 2+)	패턴 19 : (0, 2+, 2+)
패턴 2 : (2+, 2+, 1)	패턴 11 : (1, 2+, 1)	패턴 20 : (0, 2+, 1)
패턴 3 : (2+, 2+, 0)	패턴 12 : (1, 2+, 0)	패턴 21 : (0, 2+, 0)
패턴 4 : (2+, 1, 2+)	패턴 13 : (1, 1, 2+)	패턴 22 : (0, 1, 2+)
패턴 5 : (2+, 1, 1)	패턴 14 : (1, 1, 1)	패턴 23 : (0, 1, 1)
패턴 6 : (2+, 1, 0)	패턴 15 : (1, 1, 0)	패턴 24 : (0, 1, 0)
패턴 7 : (2+, 0, 2+)	패턴 16 : (1, 0, 2+)	패턴 25 : (0, 0, 2+)
패턴 8 : (2+, 0, 1)	패턴 17 : (1, 0, 1)	패턴 26 : (0, 0, 1)
패턴 9 : (2+, 0, 0)	패턴 18 : (1, 0, 0)	패턴 27 : (0, 0, 0)

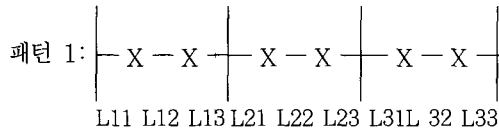
이 패턴에서 우리가 구간 통행시간을 산출하려고 하는 구간은 L2이다. 또한 2+는 샘플링 자료가 2개 이상인 경우를 한꺼번에 가리킨다. 이렇게 한 구간 샘플링 자료가 2개이상인 경우를 그냥 하나로 묶는 이유는 구간통행시간을 계산할 때 한 구간 샘플링 수가 세 개 이상이어도 그 구간의 가장 처음 자료와 마지막 자료 두 개만을 사용하기 때문이다.

구간 통행시간을 산출하려는 구간 L2에 대한 샘플링 자료가 두 개 이상인 경우는 구간 통행시간 t2를 t21, t22, t23로 나누고, 한 개인 경우는 t2를 t21, t22의 두 개로 나누어 따로 계산한다. 따라서 위의 27가지는 연속하는 두 개의 구간 패턴이 (2+, 2+), (1, 1), (1, 0)인 경우만 분석하면 그 결과를 그대로 적용할 수 있다. 여기서 (2+, 2+), (1, 1)의 경향은 인접 두 구간에 샘플링 자료가 있는 경우이므로 그 구간에 대한 자료만을 가지고 구간 통행시간을 계산할 수 있다. 하지만 (1, 0)의 경향은 뒤의 구간 샘플링 자료가 없는 경우이므로 다른 구간을 고려하여 구간 통행시간을 계산한다. 또한 (2+, 2+) 인 경향은 두 구간의 구간에 관한 참조속력이 필요하지 않지만, (1, 1)의 경향은 구간 참조속력이 필요하다.

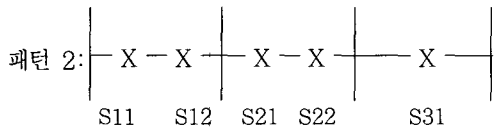
구간 참조속력이란 현 시점에서 그 구간 속력의 신뢰성있는 값이다. 이 구간 참조속력은 먼저 과거 5분 전 자료분석 결과를 이용하여 찾는다. 만일 이 결과가 없으면 과거 10분전 자료분석 결과를 이용하며, 그 결과도 없으면 인접구간 상관도를 이용한다. 이것도 불가능한 경우엔 마지막 방법으로 회귀분석 결과에서 해당 시간대, 해당 구간의 평균속력 값을 취한다. 위의 모든 경우에서 구간 참조속력이나 샘플에 의한 속력의 역수의 비를 이용하여 교차로를 포함하고 있는 연속된 샘플링 사이의 시간을 나누게 된다.

이것을 나타내기 위해서 위의 패턴 27가지 가운데 패턴 1, 2, 3, 4, 5의 구간 통행시간 계산 방법을 설명한다. 이 다섯 가지 패턴에 대한 산출 방법을 그대로 적용하면 나머지 패턴에 대해서도 구간 통행시간을 산출 할 수 있다. 각 경우별 샘플링 자료를 분석하여 구간 통행시간을 산출하는 알고리즘을 유도하기 위해서 다음을 정의한다.

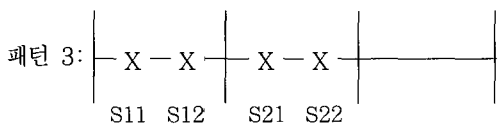
- $v_1$  : 구간 1의 속력
- $\bar{v}_1$  : 구간 1의 참조 속력
- L(1) : 구간 1의 길이



L13에서 L21까지 통행시간을  $t$ 라 할 때, L2의 통행시간  $t_2$ 를 계산하기 위해서  $t_{13} + t_{21} = t$ ,  $t_{13} : t_{21} = \frac{l_{13}}{v_1} : \frac{l_{21}}{v_2}$ 를 이용하여 방정식을 풀면  $t_{21} = \frac{v_1 l_{21} t}{v_2 l_{13} + v_1 l_{21}}$  이 된다.  $t_{23}$ 는 L2와 L3에 대해서 마찬가지로 구한다. 또  $t_{22}$ 는 자료에서 바로 나오는 값이므로,  $t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23}$ 가 된다.



여기서  $t_{21}$ 을 구하는 방법은 패턴 1에서  $t_{21}$ 을 구하는 방법과 동일하다. 따라서  $t_{23}$ 를 구하는 방법은  $t_{23} + t_{31} = t$ ,  $t_{23} : t_{31} = \frac{l_{23}}{v_2} : \frac{l_{31}}{v_3}$ 를 이용한다. 이것을 풀면,  $t_{31} = \frac{v_2 l_{31} t}{v_3 l_{23} + v_2 l_{31}}$  이 되므로,  $t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23}$ 가 된다.

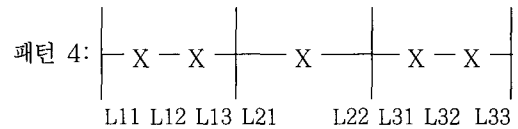


먼저  $t_{21}$ 은 패턴 1에서 구한 방법을 이용하여 구한다. 그리고  $t_{23}$ 를 구하기 위해서는 L3의 샘플링 자료가 없으므로 현재 분석중인 차량의 경로를 추적하여 이후에 미리 정한 값  $m$ 에 해당하는 개수만큼 구간을 살펴본다. 그리고 그  $m$ 개의 구간 가운데 샘플링 자료가 있는 구간이 있는지를 파악한다. 만일 그 구간이 없으면 L21의 구간 속도를 외삽(extrapolation)한다. 즉,  $t_{23} = \frac{l_{23}}{v_1}$  이 된다. 또 그 구간이 있는 경우는 그 구간이 Ln이라 하면 S22에서 다음 샘플링 지점인 Sn1 까지 시간  $t_m$ 에 대해서 다음 식을 세운다. 단 여기서  $k$ 는 비례상수를 나타낸다.

$$t_{23} + \sum_{i=3}^{n-1} t_i + t_{n1} = t_m, \quad t_2 = \frac{l_2}{v_2} k, \quad t_3 = \frac{l_3}{v_3} k,$$

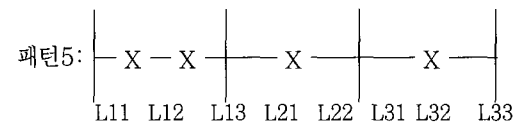
$$t_4 = \frac{l_4}{v_4} k, \dots, \quad t_{n1} = \frac{l_n}{v_n} k, \quad t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23}.$$

이것을 풀면  $t_{23} = \frac{\frac{l_2}{v_2} (t_m + t_{21} + t_{22})}{\sum_{i=2}^n \frac{l_i}{v_i}}$  이 된다.



$t_{13} + t_{21} = \bar{t}_{12}$ ,  $t_{13} : t_{21} = \frac{l_{13}}{v_1} : \frac{l_{21}}{v_2}$ 를 풀면  $t_{21} = \frac{\bar{v}_1 l_{21} \bar{t}_{12}}{v_2 l_{13} + \bar{v}_1 l_{21}}$ 가 된다.

마찬가지 방법으로  $t_{22} + t_{31} = \bar{t}_{23}$ ,  $t_{22} : t_{31} = \frac{l_{22}}{v_2} : \frac{l_{31}}{v_3}$ 를 풀면  $t_{22} = \frac{\bar{v}_2 l_{22} \bar{t}_{23}}{v_3 l_{22} + \bar{v}_2 l_{31}}$  이므로  $t_2 = t_{21} + t_{22}$ 가 된다.



$t_{12} + t_{21} = \bar{t}_{12}$ ,  $t_{12} : t_{21} = \frac{l_{12}}{v_1} : \frac{l_{21}}{v_2}$ 를 풀면  $t_{21} = \frac{\bar{v}_1 l_{21} \bar{t}_{12}}{v_2 l_{12} + \bar{v}_1 l_{21}}$ 가 된다. 마찬가지로  $t_{22} + t_{31} = \bar{t}_{23}$ ,  $t_{22} : t_{31} = \frac{l_{22}}{v_2} : \frac{l_{31}}{v_3}$

〈표 3〉 통행시간 산출을 위해 필요한 샘플링 자료의 패턴연관성

패턴 번호	패턴	왼쪽 방향 경향	오른쪽 방향 경향	관련된 패턴
1	(2+, 2+, 2+)	(2+, 2+)	(2+, 2+)	산출식제시
2	(2+, 2+, 1)	(2+, 2+)	(1, 1)	산출식제시
3	(2+, 2+, 0)	(2+, 2+)	(1, 0)	산출식제시
4	(2+, 1, 2+)	(1, 1)	(1, 1)	산출식제시
5	(2+, 1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	산출식제시
6	(2+, 1, 0)	(1, 1)	(1, 0)	3, 5
7	(2+, 0, 2+)	(1, 0)	(1, 0)	3
8	(2+, 0, 1)	(1, 0)	(1, 0)	3
9	(2+, 0, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
10	(1, 2+, 2+)	(1, 1)	(2+, 2+)	1, 4
11	(1, 2+, 1)	(1, 1)	(1, 1)	5
12	(1, 2+, 0)	(1, 1)	(1, 0)	3, 4
13	(1, 1, 2+)	(1, 1)	(1, 1)	4
14	(1, 1, 1)	(1, 1)	(1, 1)	4
15	(1, 1, 0)	(1, 1)	(1, 0)	3, 4
16	(1, 0, 2+)	(1, 0)	(1, 0)	3
17	(1, 0, 1)	(1, 0)	(1, 0)	3
18	(1, 0, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
19	(0, 2+, 2+)	(1, 0)	(2+, 2+)	1, 3
20	(0, 2+, 1)	(1, 0)	(1, 1)	3, 4
21	(0, 2+, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
22	(0, 1, 2+)	(1, 0)	(1, 1)	3, 4
23	(0, 1, 1)	(1, 0)	(1, 1)	3, 4
24	(0, 1, 0)	(1, 0)	(1, 0)	3
25	(0, 0, 2+)	(1, 0)	(1, 0)	3
26	(0, 0, 1)	(1, 0)	(1, 0)	3
27	(0, 0, 0)	GDB 이용	GDB 이용	없음

를 풀면  $t_{22} = \frac{v_3 t_{22} + v_2 t_{31}}{v_3 t_{22} + v_2 t_{31}}$  이므로  $t_2 = t_{21} + t_{22}$ 가 된다.

나머지 22개의 패턴 중에서 (0, 0, 0) 인 경우를 제외한 모든 패턴은 위의 5가지 패턴에서 사용한 계산 방법을 해당사항에 맞게 선택하여 사용한다. 〈표 3〉는 이것을 나타낸 것이다.

이제 마지막으로 샘플링 자료가 없는 패턴 27의 경우는 분석기간 자료만으로 실시간 구간 통행시간을 산출할 수 없는 경우이므로 실시간 자료융합방법을 이용해서 실시간 구간통행시간을 산출한다.

(2) 평균분산 산출

각 차량이 구간을 통행한 자료를 가지고 위 알고리

즘을 이용해서 산출한 결과물은 한 차량에 대한 구간 통행시간 정보이다. 이제 한 개 구간에서 여러 대 차량을 가지고 산출한 실시간 구간통행시간의 평균, 분산을 산출한다. 평균치를 산출하는 방법은 단지 산술적인 평균이 아니라, 가중치를 넣은 평균을 산출한다. 가중치는 한 구간에 대한 총 샘플링 횟수에 대한 차량의 샘플링 횟수 비율이다.

(3) 상관도를 이용한 통행시간 산출

5분동안 모은 자료를 가지고 실시간 분석통계모듈을 이용할 때, 모든 구간에 대한 실시간 구간 통행을 구하지 못할 수도 있다. 이 경우 상관도가 있는 인접구간의 실시간 분석통계 결과를 이용하여 통행시간을 산출한다.

구간 A와 B가 상관관계가 존재하고 구간A에서는 실시간 분석에서 샘플링 자료가 있어 실시간 통행시간을 산출했고 구간 B에서는 샘플링이 없는 경우가 있다. 이 때 구간 B의 통행시간을 인접구간 상관관계를 이용해서 구하면 다음과 같다. 우선 구간A의 실시간 통행시간을  $RT_A$ , 과거 평균통행시간을  $\mu_A$ , 표준편차를  $\sigma_A$ 라고 하자. 그리고 구간B의 실시간 통행시간을  $RT_B$ , 과거 평균통행시간을  $\mu_B$ , 표준편차를  $\sigma_B$  라고 하자. 구간 A와 구간B의 통행시간이 정규분포를 따른다고 가정하면  $RT_B$ 는 규모 조정(scaling)을 통해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{RT_A - \mu_A}{\sigma_A} = \frac{RT_B - \mu_B}{\sigma_B}$$

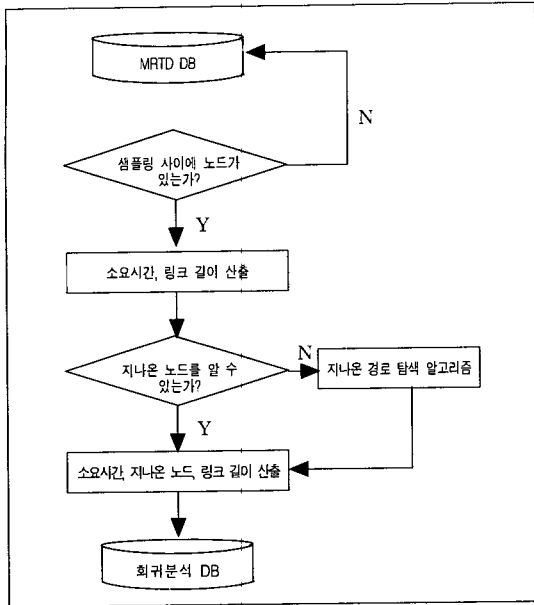
$$RT_B = \mu_B + \sigma_B \frac{RT_A - \mu_A}{\sigma_A}$$

3. 과거자료 분석 알고리즘

1) 목적

이 알고리즘은 과거 누적 자료를 가지고 회귀분석하여 구간 통행시간을 산출하는 것과 상관도가 있는 인접구간을 구하는 것이 목적이다.





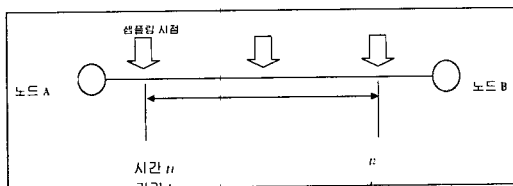
〈그림 3〉 O-D 분석 모듈 흐름도

2) O-D 분석 모듈

AVL시스템을 이용한 차량의 위치와 시각 자료는 조사차량이 일정 시간 주기로 샘플링한다. 따라서 샘플링 간격에 따라 어떤 경우는 차량이 지나온 구간을 샘플링하지 않고 그냥 지나칠 수도 있다. 따라서 O-D 경로를 추적하는 단계가 필요하다. O-D 분석 모듈에서 소요시간과 지나간 노드, 구간을 파악하는 흐름도는 〈그림 3〉과 같다. 세부 단계를 설명하면 다음과 같다.

단계 1. 연속 두 자료간에 노드 존재 여부 확인

수정 실시간 자료 데이터베이스에서 수집한 자료(수정실시간 일련번호, 시각, x 좌표, y 좌표, 차량\_ID, 구간\_ID)를 이용하여 조사 차량이 노드를 통과했는지를 파악한다. 아직 노드를 통과하지 않았으면 시점이 앞인 자료를 버리고 다음 시점 샘플링 자료가 노드를 통과했는지를 계속 확인한다. 노드를 통과했다면 소요시간, 구간길이를 산출한다.



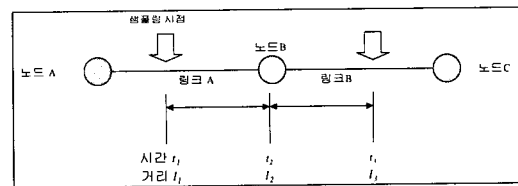
〈그림 4〉 샘플링 사이에 노드가 없는 경우

소요시간 =  $t_2 - t_1$

지나간 구간 길이 =  $l_2 - l_1$

단계 2. 지나온 노드를 아는 경우

샘플링 자료를 통해 차량별로 지나온 구간을 추적하여 지나온 노드를 알 수 있는 경우는 〈그림 5〉과 같이 소요시간과 구간길이를 산출하고 지나온 노드에 1값을 넣는다.



〈그림 5〉 지나온 노드를 아는 경우

소요시간 =  $t_3 - t_1$

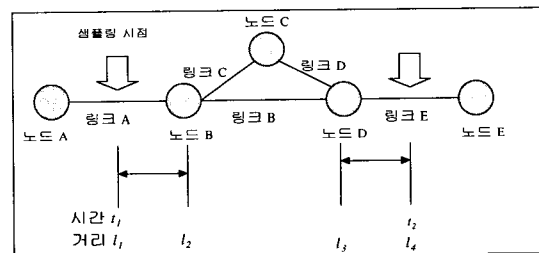
구간 A 길이 =  $l_2 - l_1$

구간 B 길이 =  $l_3 - l_2$

지나간 노드 B = 1

단계 3. 지나온 노드를 알 수 없는 경우

샘플링 자료 사이에 노드가 두개 이상이어서 지나온 노드를 알 수 없는 경우는 경로 탐색 알고리즘을 통하여 지나온 구간을 추적한다. 〈그림 6〉을 이용하여 산출정보를 표현하면 다음과 같다.



〈그림 6〉 지나온 노드를 알 수 없는 경우

소요시간 =  $t_2 - t_1$

구간 A 길이 =  $l_2 - l_1$

구간 B 길이 = 구간 전체 길이

구간 E 길이 =  $l_4 - l_3$

지나간 노드 B = 1

지나간 노드 D = 1

우선 경로 탐색 알고리즘은 노드 B와 노드 D만 통과했는지 아니면 노드 B, 노드 C, 노드 D를 통과했는지를 파악한다. 만약 노드 B와 노드 D만을 통과했다면 <그림 6>과 같이 정보를 생성한다.

단계 4. 생성한 정보를 회귀분석 DB에 저장한다.

3) 회귀분석 모듈

(1) 입력정보

회귀분석은 회귀분석 데이터베이스에 저장한 자료를 이용한다. 그 내용은 회귀분석 일련번호, 차량\_ID, O-D구간 내 소요시간, 지나간 구간, P/V 일련번호, 날씨 대한 자료이다.

(2) 출력정보

회귀분석 이후에 출력되는 정보는 구간\_ID, 차량\_ID, 날씨, 통행시간평균, 통행시간분산, 혼잡도 등급, 통행속도이다. 회귀분석을 통해 구한 정보는 과거 자료 분석 데이터베이스에 저장한다.

(3) 종속 변수

종속 변수  $Y_i$ 는 O-D 구간 내 소요시간을 나타낸다.

(4) 독립 변수

- 구간 변수는 구간 개수 n개이다.
- 월 변수는 11개이고 요일 변수는 6개이며 러시아워 변수를 따로 구분한다.
- 사고 변수는 사고가 발생한 경우를 나타내는 변수이다.
- 날씨 변수는 날씨가 통행속도에 영향을 미치는 상황을 반영하는 변수이다.

(5) 회귀모형

$$\begin{aligned}
 Y_i &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n && \text{(구간)} \\
 &+ \beta_{m1} X_{m1} X_1 + \dots + \beta_{m1n} X_{m1} X_n && \text{(월)} \\
 &: && : \\
 &+ \beta_{m11} X_{m11} X_1 + \dots + \beta_{m11n} X_{m11} X_n \\
 &+ \beta_{a1} X_{a1} X_1 + \dots + \beta_{a1} X_{a1} X_n && \text{(요일)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &: && : \\
 &+ \beta_{a6} X_{a6} X_1 + \dots + \beta_{a6} X_{a6} X_n \\
 &+ \beta_{r1} X_r X_1 + \dots + \beta_{r1n} X_r X_n && \text{(러시아워)} \\
 &+ \beta_{a1} X_a X_1 + \dots + \beta_{an} X_a X_n && \text{(사고)} \\
 &+ \beta_{w1} X_w X_1 + \dots + \beta_{wn} X_w X_n && \text{(날씨)} \\
 &+ \epsilon_i
 \end{aligned}$$

- $Y_i$  : 소요시간
- $\beta$  : 회귀분석을 통해 구하고자 하는 파라미터 값
- $X_i$  : 구간 l을 지나간 경우. 구간 l의길이
- $X_{mk}$  : k월 자료이면 1, 아니면 0인 지시변수, 단, 12월은 모든 변수값이 0인 경우이다.
- $X_{dj}$  : j요일 자료면 1,아니면 0인 지시변수, 단, 일요일은 모든 변수값이 0인 경우이다.
- $X_r$  : 침두, 비침두를 나타내는 지시변수, 러시아워 이면 1 아니면0
- $X_a$  : 유고사항을 나타내는 지시변수, 사고가 발생한 경우는 1 아니면 0
- $X_w$  : 날씨에 관한 지시변수, 날씨가 소통상태에 영향을 주면 1 아니면 0

4. 자료융합 알고리즘

1) 목적

이 알고리즘은 구간통행시간의 신뢰성을 높이기 위해서 여러 자료원으로 산출한 구간 통행시간을 비교하고 그 패턴에 따라 신뢰도를 구해서 융합한 구간통행시간을 구한다.

2) 입력정보

자료융합 알고리즘 입력자료 가운데 실시간 정보 데이터베이스에서 넘어오는 것은 세 가지이다. 첫째, 최근 5분 동안 자료를 가지고 구한 실시간 구간 통행시간, 둘째, 과거 10분에서 5분까지 자료를 가지고 구한 구간통행시간, 셋째, 과거 15분에서 10분까지 자료를 가지고 구한 구간통행시간이다. 그리고 인접구간 상관도 데이터베이스에서 들어온 인접구간 상관도 정보, 실시간 구간 통행시간 정보, 회귀분석결과가 결합해서 인접구간을 이용한 실시간 구간통행시간을 구한 것도 다른 입력자료가 된다. 마지막으로 회귀분석결과도 자료융합 알고리즘의 입력자료이다.

3) 출력정보

자료융합 알고리즘을 수행한 결과, 출력 정보는 전체 구간의 믿을만한 구간통행시간이다.

4) 알고리즘

자료융합 알고리즘은 신뢰성있는 구간통행시간을 산출하기 위해서 자료융합을 하는 데 전문가 시스템을 이용한다. 다시 말하면 구간통행시간을 산출하기 위한 자료융합을 할 때, 입력 자료원 패턴을 몇 가지로 나누고 그 패턴을 바탕으로 자료융합을 한다. 여기서 자료융합은 크게 두 가지 모듈로 나눈다. 첫 번째는 실시간에 가까운 자료들을 융합하는 실시간 자료융합모듈이고 둘째는 실시간 자료융합결과와 회귀분석 결과를 융합하는 최종 자료융합모듈이다.

(1) 실시간 자료융합 모듈

① 자료원

실시간 자료융합을 할 때, 고려하는 자료원은 다음과 같이 크게 4가지이다.

- a. 최근 5분동안 자료를 이용해서 실시간 구간 통행시간을 구한 결과(최근 5분 자료)
- b. 과거 10분부터 과거 5분까지 자료를 이용해서 구간통행시간을 구한 결과(과거 5분 자료)
- c. 과거 15분부터 과거 10분까지 자료를 이용해서 구간통행시간을 구한 결과(과거 10분 자료)
- d. 인접구간 상관도를 이용해서 상관도가 있는 구간의 실시간 자료를 참조하여 구간통행시간을 구한 결과(인접구간 자료)

② 자료융합 절차

- a. 각 구간에 대해서, 앞에서 설명한 ① 자료원에서 최근 5분 자료를 입력 한다.
- b. 각 구간에 대해서, 구간 통행시간평균을 구하고 평균의 30% 이내에 속하지 않는 자료는 버린다. 그리고, 남은 자료가 차량 세 대 이상에 해당하지 않으면 자료를 모두 버린다.
- c. 남은 자료가 차량 세 대 이상에 해당하는 구간에 대해서, 평균하여 실시간 구간 통행시간을 계산해서 라벨을 붙인다.

〈표 4〉 실시간 자료융합을 해야하는 구간

구간	최근 5분 자료	과거 5분 자료	과거 10분 자료	인접구간 자료
1	1			
2	0	1	0	1
3	1			
4	1			
	0	0	1	1
	1			
	1			
	0	1	1	0

이 때, 단계 b를 이용하면 실시간 통행시간을 산출하지 못한 구간이 생길 수 있다. .

- d. 우선 단계 c에서 라벨이 붙은 구간은 신뢰도를 1로 준다.
- e. 라벨이 붙지 않은 구간은 실시간 자료융합을 한다. 다시 말하면 실시간 자료융합을 해야 하는 구간은 〈표 4〉에 음영으로 나타나는 바와 같이 최근 5분 자료가 부족하여 라벨이 붙지 않은 구간이다. 이때 실시간 자료융합은 앞에서 설명한 네 가지 자료원 가운데 최근 5분 자료를 제외한 세 가지 분석결과를 이용한다. 〈표 4〉는 라벨을 1로 표시하였다.
- f. 자료의 라벨패턴에 따라 실시간 자료융합하는 방법은 〈표 5〉에 나타나 있다.

각 자료원 가운데 과거 5분 자료와 과거 10분 자료에서 1에 해당하는 값은 최근 5분 자료에 대해 라벨을 붙이는 방법과 마찬가지로 라벨을 붙인 것이고, 인접구간 자료에 해당하는 라벨은 상관도가 있는 인접구간에 대한 최근 5분 자료의 라벨과 같다.

〈표 5〉 라벨패턴에 따른 실시간 자료융합방법

최근 5분	과거 5분	과거 10분	인접구간	자료융합방법
0	1	1	1	시계열 방법
0	1	1	0	
0	1	0	1	가중치 평균법
0	0	1	1	
0	1	0	0	상관도 계수 이용
0	0	1	0	
0	0	0	1	
0	0	0	0	산출할 수 없음

〈표 5〉를 보면 라벨 패턴에 따라 크게 세 가지 실시간 자료 융합방법을 이용하는데, 먼저 시계열 방법을 이용해서 구간통행시간을 구하는 식은 다음과 같다.

$$RT_0 = 2RT_5 - RT_{10}$$

단, 여기서  $RT_0$ 는 최근 5분 자료평균,  $RT_5$ 는 과거 5분 자료평균이고,  $RT_{10}$ 은 과거 10분 자료평균이다.

또 가중치 평균법을 이용하는 경우는 과거 5분 자료와 인접구간 자료에 라벨이 있으면,

$$RT_0 = \frac{(1 + \rho_{LB})RT_5 + 2\rho_{LB}RTN}{1 + 3\rho_{LB}}$$

이다. 만일 과거 10분 자료와 인접구간 자료에 라벨이 있으면,

$$RT_0 = \frac{(1 + 3\rho_{LB})RT_{10} + 4\rho_{LB}RTN}{1 + 7\rho_{LB}}$$

가 된다. 여기서  $RTN$ 는 인접구간 자료 평균이고,  $\rho_{LB}$ 는 인접구간 상관도를 평가할 때 상관도가 있다고 판정한 하한치 기준이다.

여기까지 구한 결과는 신뢰도를 1이 되어 최종 자료 융합에서 회귀분석결과를 포함하지 않고 그대로 이 결과가 최종 구간 통행시간이 된다.

한편, 상관도 계수를 이용하는 경우는 과거 5분 자료, 과거 10분 자료, 인접구간 자료 가운데 한 가지만 라벨이 붙은 경우로 그 결과가 그대로 실시간 자료 융합 결과이다. 하지만 이 경우는 신뢰값이 1보다 작아서 회귀분석결과를 이용하여 최종 자료융합을 한다. 먼저 과거 5분 자료에 라벨이 붙은 경우는

$$RT_0 = RT_5(\text{신뢰도: } \frac{1 + \rho_{LB}}{2})$$

이다. 그리고 과거 10분 자료만 라벨이 붙은 경우는

$$RT_0 = RT_{10}(\text{신뢰도: } \frac{1 + 3\rho_{LB}}{4})$$

이다. 또 인접구간 자료만 라벨이 붙은 경우는

$$RT_0 = RTN(\text{신뢰도: } \rho_{LB})$$

이다.

## (2) 최종 자료융합 모듈

최종자료융합은 실시간 자료융합 결과와 회귀분석 결과를 융합하는 과정이다. 먼저 실시간 자료융합에서 신뢰값이 1인 경우는 회귀분석결과를 이용할 필요가 없이 그대로 실시간 자료융합결과를 이용한다. 또

실시간 자료융합 결과, 신뢰값이 1이 아닌 경우는 회귀분석 결과를 이용하는데 이 경우 회귀분석 결과의 신뢰값은 다음과 같이 구한다.

$$R_h = 0.5 + \phi\left(\left|\frac{RT - \mu}{\sigma}\right|\right)$$

여기서  $R_h$ 는 회귀분석 결과의 신뢰값이고,  $RT$ 는 〈표 5〉에서 상관도 계수를 이용하는 경우, 라벨이 붙은 자료원의 구간통행시간이다. 또  $\phi(z)$ 는 표준정규 분포를 따르는 확률변수가  $z$ 이상일 확률을 가리킨다. 이제 이 신뢰값을 가지고 두 자료를 베이지안 방법으로 융합하여 구한 결과가 최종 자료융합 결과이다.

$$t_{jj} = \frac{t_{j'}RT_0 + t_{j''}R_h}{RT_0 + R_h}$$

여기서,  $t_{jj}$ 는 최종 자료융합한 결과로 구간  $j$ 의 통행시간 산출값이다. 또  $t_{j'}$ 는 실시간 융합 결과로 계산한 구간  $j$ 의 통행시간 산출값이고,  $t_{j''}$ 는 회귀분석 결과로 나온 구간  $j$ 의 통행시간 산출값이다.

한편, 실시간 자료 가운데 라벨이 붙은 자료원이 하나도 없는 경우는 회귀분석 결과를 그대로 구간 통행시간으로 사용한다.

이 연구에서 개발한 자료융합방법은 자료원별 산출 결과 패턴을 이용해서 경우별로 다른 신뢰값을 가지고 융합하는 방법이다. 따라서 이 방법을 이용하면 차량 운전자나 교통 방송국의 상황 정보를 보조자료로 이용하는 경우에 대해서도 신뢰값을 매겨서 추가로 융합할 수 있다. 그 경우, 실시간 융합 결과가 없어서 회귀분석결과만을 이용하는 구간에 대한 통행시간 산출결과와는 훨씬 더 정확해진다.

## IV. 알고리즘 수행 결과와 분석

### 1. 시뮬레이션 결과와 분석

이 연구에서 개발한 구간통행시간 산출 알고리즘 수행도를 평가하기 위해서 시뮬레이션을 통해서 실제 값과 산출값을 비교하였다. 이를 위해서 먼저 서울 성북구 일대 지도를 비주얼 베이직으로 그리고 그 위에서 조사차량의 이동을 발생시켜 각 조사차량별로

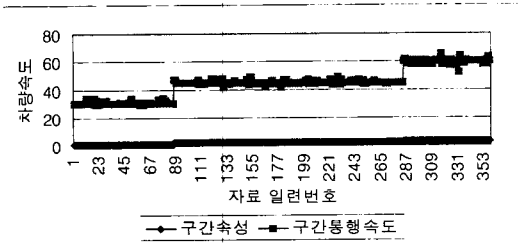
미리 정한 샘플링 시점이 되면 그 때의 차량 위치, 시각, 좌표를 얻어서 그 자료를 이 연구에서 개발한 알고리즘에 적용하였다. 이 때 차량의 이동은 미리 정한 세 가지 속도를 바탕으로 움직인다고 가정하였으며 자료를 이용해서 알고리즘을 수행해서 나오는 구간 통행시간과 실제 발생시킨 속도로 얻을 수 있는 구간통행시간을 비교하였다.

시뮬레이션 대상 지역은 노드가 54개, 구간이 174개이다. 또 조사 차량은 총 50대를 운행한다. 각 구간에 대해서 시간대에 따라 조사차량이 지나가는 속도를 미리 정하는데, 이 속도값은 30km/시, 45km/시, 60km/시 세 가지 가운데 하나이다. 차량이 노드에 도착하면, 운행 구간속도를 받아서 차량을 운행한다. 차량을 운행하면서 계속 좌표값을 갱신하는데, 미리 정한 샘플링 시점이 되면 시각의 차량 좌표를 실시간 자료 데이터베이스로 보내서 그 좌표가 속한 구간을 정하고 알고리즘을 수행하는 과정을 거치게 된다.

〈그림 7〉은 구간통행시간을 산출해서 나온 결과들을 실제 속도와 비교한 것이다. 알고리즘 수행으로 나오는 것은 구간 통행시간이지만 실제값과 쉽게 비교하기 위하여 이 연구는 각 출력값을 속도로 환산하여 비교한다. 그림에 나타난 바와 같이 알고리즘 수행결과는 실제 속도에 적은 오차를 가지고 구간 통행시간을 산출하는 것을 알 수 있다. 여기서 오차율을 이용해서 알고리즘 수행도를 정량적인 수치로 평가한다. 오차율은 다음 식으로 구한 값이다.

$$\frac{\sum_{j \in L} |RV_{ij} - \widehat{RV}_{ij}|}{\sum_{j \in L} RV_{ij}} \times 100(\%)$$

여기서  $RV_{ij}$ 는 조사차량  $i$ 가 구간  $j(j \in L)$ 을 통행한 실제 속도이고,  $\widehat{RV}_{ij}$ 는 그 때 알고리즘으로 산

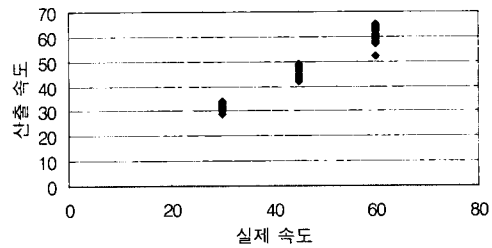


〈그림 7〉 알고리즘 수행결과

출한 산출속도이다.

〈그림 7〉의 결과에 대한 오차율은 1.48%이다. 이 결과는 이 연구에서 개발한 세 가지 알고리즘을 수행하여 최종 결과인 자료융합 알고리즘 수행결과와 실제 시뮬레이션을 발생시킨 값을 비교한 것이다. 따라서 알고리즘은 매우 정확한 구간 소통 정보를 산출한다는 것을 알 수 있다.

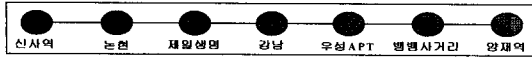
한편 각 속도별로 산출값이 실제값과 얼마나 떨어져서 나타나는지를 알기 위해 나타낸 것이 〈그림 8〉이다. 그림을 통해서 알 수 있는 바와 같이 알고리즘 산출 결과는 실제 속도에 상관없이 실제속도 주위에 밀집하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서 개발한 알고리즘은 어떤 경우에도 오차가 작은 교통소통 정보를 산출한다.



〈그림 8〉 산출 결과의 속도별 분포

## 2. 주행 조사와 분석

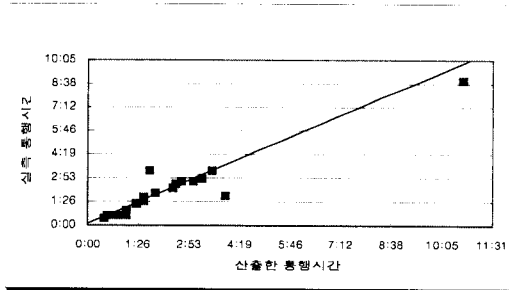
알고리즘 정확성을 검증하기 위해서 실제 조사차량을 이용해서 주행하고 주행을 통해서 얻은 위치와 시각 자료를 가지고 알고리즘을 수행하였다. 조사를 수행하기 위해서 (주)인테크산업에서 제조한 GPS1000 장비를 대우 프린스 승용차에 탑재하고 조사하였다. (주)ITS 인테크의 협조를 얻어 수집한 자료는 교통센터로 전송하였으며, 교통센터에서 맵 매칭(map matching)시킨 자료를 받아서 조사분석에 이용하였다. 조사 일시는 1998년 11월 20일이며 조사구간은 강남대로(신사동~양재역 구간)이다. 〈그림 9〉은 조사 구간을 나타낸다. 주행 조사는 차량 한 대를 이용하였기 때문에 이 연구에서 개발한 알고리즘 가운데, 실시간 분석통계 알고리즘에 대한 정확도만을 평가하였다.



〈그림 9〉 주행 조사 구간

실제 주행구간은 6개 도로(12개 구간)이지만 실시간 분석통계 모듈은 연속한 세 구간 주행 자료를 이용해서 가운데 구간 통행시간을 산출하는 모듈이므로 양 끝구간 네 개를 제외하여 총 8개 구간에 대해서 분석하였다. 또 얻은 자료를 분석하기 위해서 주행조사 대상의 노드와 링크 좌표정보를 (주)ITS 인테크에서 받아서 이용하였다.

이 알고리즘 수행결과는 〈그림 10〉과 같다. 알고리즘 수행 결과에 대한 수행도를 측정하기 위해서 시뮬레이션 검증과 마찬가지로 오차율을 이용하였는데, 그림에서 45도 방향의 직선이 오차율 0%인 직선이다. 실제 주행조사 결과 오차율은 5.4%였다. 따라서 매우 정확한 결과를 산출할 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 10〉 주행조사 결과

### V. 결론 및 향후 연구과제

이 연구는 지능형 교통시스템에서 AVL기법을 이용해서 얻은 자료를 분석하여 구간통행시간을 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 교통소통시간을 산출하는 문제는 정보를 산출하는 지역 범위가 넓고, 이용할 자료가 많을 뿐 아니라 실시간으로 정보를 산출할 수 있어야 하기 때문에 해결하는 것이 매우 어려운 문제이다.

이 연구에서 개발한 알고리즘은 과거자료를 오프라인으로 분석하고, 온라인으로는 실시간 정보를 시간대별로 나누어 분석한다. 이러한 실시간 분석결과는 최근 몇 개의 결과를 가지고 실시간 융합하여 오프라인으로 분석한 결과와 최종융합하는 단계를 거친다. 이러한 과정을 통해서 구간통행시간을 산출하는 것이 이 연구에서 개발한 연구 내용이다.

이 연구에서 개발한 알고리즘을 평가하기 위해서 시뮬

레이션을 이용했는데, 오차율이 2%미만으로 매우 좋은 수행결과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또 실제 주행 조사 결과도 오차율 5%정도를 나타내는 것을 알 수 있었다.

이 연구에서 개발한 구간 통행시간은 실시간 자료를 가지고 산출한 최근 정보일 뿐, 예측에 사용하기는 힘들다. 따라서 구간 통행시간을 예측하거나 최적 경로를 제공하는 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

### 참고문헌

1. 최기주(1998), "링크 통행시간 추정을 위한 데이터 퓨전 알고리즘의 개발," 대한교통학회지 16권 2호, pp.177~195.
2. 최기주, 신치현(1998), "GPS와 GIS를 이용한 링크통행시간 예측기법," 대한교통학회지, 16권 2호, pp.197~207.
3. May A. D.(1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J.
4. Nelson P. and Palacharla P.(1993), "A Neural Network for Data Fusion in ADVANCE," Presented at the 1993 Transtech Pacific Rim Conference Seattle, Washington, July 25.
5. Ran B., Roupail N., Tarko A., and Boyce D. E.(1992), "Toward a Set of Dynamic Link Travel Time Functions for Dynamic Traffic Assignment," Paper presented at the 39th Annual Meeting of the Regional Science Association International, Chicago, IL.
6. Roupail N. M. and Tarko A.(1997), "Intelligent Traffic Data Processing for ITS Application," Journal of Transportatoin Engineering, July/August.
7. Roupail N. M. and Tarko A.(1993), "Travel Time Data Fusion in ADVANCE," ADVANCE Working Paper Series, No. 28, Aug.
8. Sussman J. M., Wong H., and Miller R.(1974), "Estimating Travel Times on Highway Networks," ASCE Journal of Transportation, TEI, pp.13~26.
9. Tarko A.(1995), "Data Fusion Algoritnm for ADVANCE Release 2.0," ADVANCE Working Paper Series, No. 48, May 1995.