

도시고속도로 돌발상황 감지 알고리즘 개발에 관한 연구 및 평가

Study and Evaluation of an Incident Detection Algorithm for Urban Freeways

임성만
(경기개발연구원)

김영찬
(서울시립대학교, 교수)

서정호
(서울시립대학교, 석사과정)

Key Words : Incident, Detection Algorithm, Ramp

목 차

- I. 서 론
- II. 기존문헌 고찰
 - 1. 기존알고리즘 분류
 - 2. 기존 알고리즘의 돌발상황 판단변수
 - 3. 성능평가 기준
- III. 램프영향권 설정 및 교통특성 분석
 - 1. 램프영향권 설정
 - 2. 정상상황시 진출입부 교통특성 분석
- IV. 램프영향권 돌발상황 감지 알고리즘
 - 1. 감지기법 개발의 기본방향
 - 2. 돌발상황 감지 기법 개발
- V. 모형의 성능평가
- VI. 결론 및 향후 연구과제
 - 1. 결론
 - 2. 향후 연구과제

I. 서 론

고속도로에서의 정체는 크게 반복정체(recurrent congestion)와 비반복정체(nonrecurrent congestion)로 분류할 수 있으며, 반복정체란 병목지점과 같이 수요가 용량을 초과하는 지점 또는 구간에서 특정 시간대에 반복적으로 발생하는 정체로 예측이 가능하여 사전 교통류 관리 및 정보제공으로 혼잡을 완화시킬 수 있다. 그러나 각종 교통사고, 공사, 천재지변 등 비반복정체로 인한 혼잡은 불특정 시간대 및 불특정 장소에서 발생하므로 예측이 불가능하여 신속하고 정확한 감지와 적극적인 대응을 통해서만 정체를 해소할 수 있다. 도로에서 발생하는 비반복적이며 예측불가능한 일련의 사건을 돌발상황(incident)이라고 하며 이러한 돌발상황이 발생하게 되면 교통류의 정상 흐름이 와해되고 이로써 도로의 용량감소를 일으키며 교통혼잡과 대기오염 등 막대한 사회, 경제적 손실을 초래한다.

돌발상황으로 인한 피해를 최소화하고자 국내외 각종 교통관리센터에서는 자동 돌발감지 알고리즘에 의한 자동감지 방법을 활용하고 있다. 서울시의 경우에도 주요한 도시고속도로인 내부순환로, 강변북로, 올림픽대로 등에 체계적인 돌발상황관리시스템이 구축되어 운영중이다. 그러나 현재 운영중인 돌발상황 감지 알고리즘들은 어느정도의 감지율은 확보하고 있으나 오경보율이 높아 대체적인 성능은 낮은 것으로 판단된다. 이러한 잦은 오경보는 운영자로 하여금 돌발상황 자동감지 알고리즘에 대한 불신을 초래하여 시스템의 역효과를 일으키고 있다.

돌발상황중 상당수가 차량의 상충이 빈번하게 발생하는 진출입부 주변에서 발생하고 있다. 실제로 북부구간에서 일어난 돌발상황을 구간별로 살펴본 결과 과반수가 넘는 돌발상황이 진출입부 주변에서 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 기존의 알고리즘은 빈번한 교통변수의 변화로 돌발상황을 정확히 감지하지 못하고 있다. 진출부의 경우, 진출교통량 과다로 인해 대기행렬이 본선으로 역류하였을 때 실제 돌발상황과 구분이 불가능하며, 진입부의 경우에도 빈번한 차로변경 및 가감속으로 인해 교통변수가 변하게 되어 돌발상황 감지가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 혼잡상황 구분을 통한 고속도로 돌발상황 자동감지 알고리즘¹⁾(임성만, 2003)을 바탕으로 진출입 영향권내에 적용가능한 알고리즘을 개발하고 돌발상황 판단에 가장 중요한 임계변수를 구간별로 정산하여 신뢰성 있고 적용가능한 알고리즘 개발을 목적으로 한다. 이와 더불어 실제자료와 모의 실험(Paramics)을 통해 구축된 돌발상황 자료를 토대로 다양한 상황에서 모형의 성능을 검증하고 비교평가 한다.

II. 기존문헌 고찰

자동 돌발상황 감지(AID, Automatic Incident Detection) 알고리즘은 1960년대 후반부터 미국의 고속도로에 사용하기 위

1) 임성만, "도시고속도로 돌발상황 감지 알고리즘 개발에 관한 연구", 2003, 서울시립대학교 박사학위 논문

해 개발된 California 알고리즘을 시작으로 지난 30여년 동안 수많은 알고리즘이 개발되었다. 이러한 알고리즘은 그 특성에 따라 크게 4가지 범주로 구분할 수 있다.

1. 기존 알고리즘의 분류

돌발상황 자동감지 알고리즘은 그 특성에 따라 크게 4가지 범주로 구분할 수 있다. 첫째, 패턴인식(Pattern-recognition) 기법은 상,하류부 검지기 자료에서 수집되는 교통패턴을 인식하여 미리 설정한 임계값과 비교하여 비정상적인 교통패턴을 자동으로 인식하는 구간 감지기법이다. 현장 적용이 쉽고 모형의 성능이 검증되어 있지만, 비혼잡시에는 모형의 성능이 떨어지며 개개 지점마다 설정해야 하는 많은 임계값으로 인해 모형 정산에 어려움이 있다. 대표적인 알고리즘으로 California, APID 알고리즘 등이 있다.

둘째, 통계적(Statistical) 기법은 관측된 검지기 자료에서 비정상적인 변동을 구분하기 위해 수집된 자료와 추정 또는 예측된 값과 유의한 차이를 가지는가를 판단하여 돌발상황을 감지하는 기법이다. 주로 하나의 검지점에서 수집되는 교통자료를 이용하여 돌발상황을 감지하는 감지기법을 적용하기 때문에 사용하는 자료의 양이 적다는 장점이 있지만, 진출입램프가 접속되어 있는 구간과 같은 병목구간에서는 그 성능이 떨어진다. 대표적인 알고리즘으로 SND, Bayesian, ARIMA, HIOCC, DES 알고리즘 등이 있다.

셋째, 교통류 모형 적용(Traffic Model and Theoretical)기법은 교통류 이론을 토대로 돌발상황 발생시의 교통류 행태와 정상상태에서의 교통류 행태를 비교하여 돌발상황을 감지하는 기법이다. 대표적인 알고리즘으로는 Dynamic, McMaster 알고리즘 등이 있다.

넷째, 인공지능(Artificial Intelligence)기법은 인간의 학습능력과 추론능력을 돌발감지에 이용한 것으로 퍼지이론의 퍼지 추론이나 신경망이론을 통하여 교통자료의 비정상적인 패턴을 구분하여 돌발상황을 감지하는 기법이다. 최근에 이러한 인공지능 기법을 이용한 돌발감지 알고리즘 개발이 활발하게 연구되고 있는 추세이다. 대표적인 알고리즘으로는 신경망 알고리즘과 퍼지셀 알고리즘 등이 있다.

2. 기존 알고리즘의 돌발상황 판단변수

앞서 살펴본 알고리즘은 주로 상, 하류부 검지점간의 평균 점유율 차이값을 이용하여 돌발상황을 감지하고 있다. 즉, 검지점의 모든 차로의 평균값을 이용하여 돌발상황을 감지함으로써 비혼잡시나 진출입구간과 같은 병목구간에는 자동감지가 어렵다는 문제를 안고 있다. 기존의 알고리즘에서 요구되는 입력자료들을 정리해 보면 아래표와 같다.

<표 1> 기존 돌발상황 감지 알고리즘의 입력자료

구분	점유율	교통량	속도
California	○		
APID	○	○	
SND	○	○	
Bayesian	○		
ARIMA	○		
McMaster	○	○	
Neural Network	○	○	○
Fuzzy Set	○	○	○

3. 성능평가 기준

돌발상황 감지 알고리즘의 성능을 평가하는 효과척도로는 감지율(DR, Detection Rate), 오경보율(FAR, False Alarm Rate), 평균 감지시간(TTD, Time to Detection)등이 있다. 이들 3가지 효과척도는 알고리즘이 얼마나 효율적인가를 검증하는 지표로 사용할 수 있다.

감지율은 일정시간 동안 발생한 총 돌발상황 발생건수 중에서 돌발상황 감지 알고리즘에 의해 감지된 건수의 비율이다.

$$DR = \frac{\text{감지건수}}{\text{총 발생건수}} \times 100 (\%)$$

오경보율은 알고리즘 총 수행횟수 중에서 오경보 수행횟수의 비율로 나타내는 방법(FAR1)과 총 경보건수 중에서 오경보된 건수의 비율로 나타내는 방법(FAR2)으로 구분할 수 있다. 전자의 오경보율(FAR1)은 교통관리센터에서 모형 평가시 널리 사용되지만 값이 작아 오경보율의 수준을 판단하기 어려운 반면, 후자의 오경보율(FAR2)은 분석자가 오경보의 수준을 쉽게 이해할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 오경보를 평가시 후자의 오경보율(FAR2)을 사용하기로 한다.

$$FAR_1 = \frac{\text{오경보 수행회수}}{\text{총 알고리즘 수행회수}} \times 100 (\%)$$

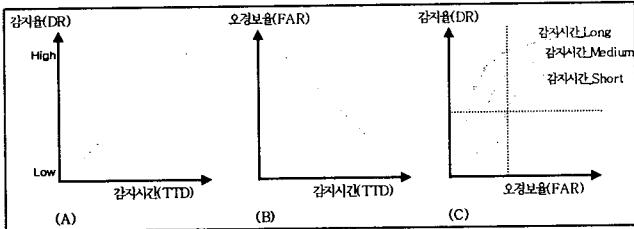
$$FAR_2 = \frac{\text{오경보 건수}}{\text{총 경보 건수}} \times 100 (\%)$$

평균감지시간은 돌발상황이 발생한 시간으로부터 알고리즘에 의해 돌발이 감지되는데 걸리는 시간을 의미한다. 정확한 평균감지시간을 구하기 위해서는 돌발상황이 일어난 정확한 시간을 파악해야 하나 실제로 현장에서 발생하는 돌발상황은 정확한 발생시간을 알기 어렵기 때문에 효과척도로 사용하기 힘든 단점이 있다. 돌발상황의 정확한 발생시간을 파악할 수 있는 모의실험시에는 효과척도로 사용이 가능하다.

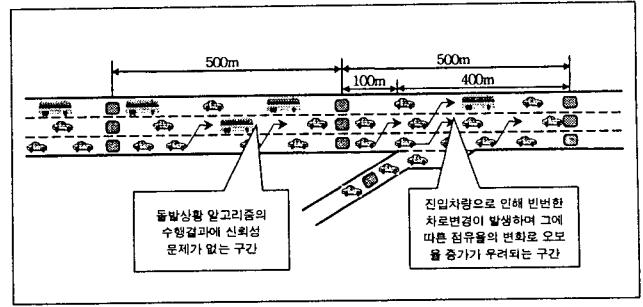
$$TTD = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{\text{경보},i} - T_{\text{발생},i})}{N}$$

아래 <그림 1>은 앞서 살펴본 3가지 효과척도들 간의 관계를 보여주고 있다. 감지율이 올라가면 평균 감지시간이 길어지

고, 평균 감지시간이 길어질수록 오경보율이 높아지게 됨을 알 수 있다. 또, 감지율이 올라갈수록 오경보율이 올라가게 됨을 알 수 있다. 즉, 3가지 척도 모두 서로 상호상쇄(trade-off) 관계에 있기 때문에 어느 한가지 효과척도를 높게 되면 다른 효과척도가 떨어지게 된다. 따라서 효과척도간 적절한 수준의 배분이 중요하다고 할 수 있다.



<그림 1> 감지율, 오경보율, 평균 감지시간 간의 관계



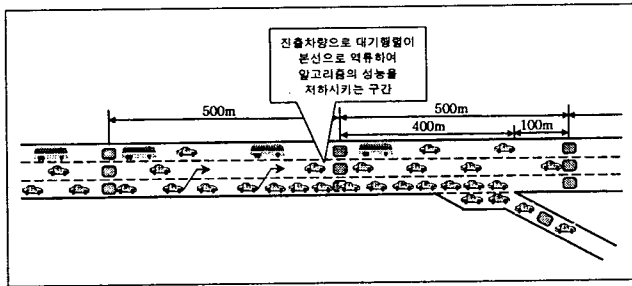
<그림 3> 합류구간 램프영향권 설정

III. 램프영향권 설정 및 교통특성 분석

1. 램프영향권 설정

본 연구의 범위의 램프영향권은 내부순환로 실시 설계보고서(2)상의 실제 교통상황을 반영하여 분류구간과 합류구간을 다르게 설정한다.

분류구간의 경우, 진출차량의 과다 및 램프 하류부 교차로의 신호 불합리등의 문제로 인해 첨두시 대기행렬이 본선으로 역류하는 현상이 자주 발생한다. 따라서 합류구간에 비해 램프가 본선에 미치는 영향이 높다. 본 연구에서는 아래 <그림 2>와 같이 램프접속부에서 상류부 2번째 검지기로부터 하류부 1번째 검지기 까지를 분류구간 램프 영향권으로 설정한다.



<그림 2> 분류구간 램프영향권 설정

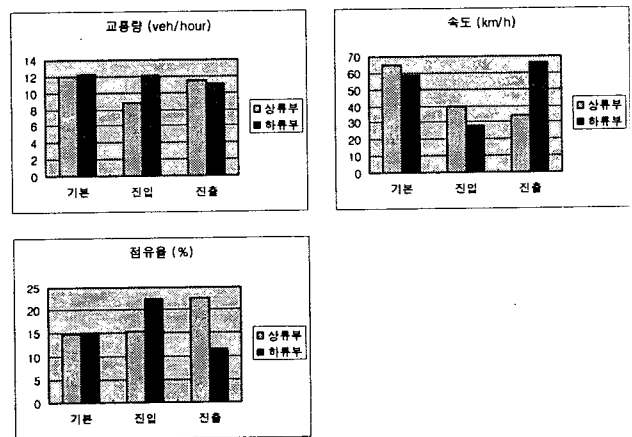
합류구간의 경우, 분류구간과 달리 램프에 의해 직접적인 대기행렬이 발생하지 않는다. 단, 진입교통량이 높아질 경우 차로 변경으로 인한 차량간 상충이 발생하며 이로인해 교통변수의 변화를 초래한다. 본 연구에서는 아래 <그림 3>과 같이 램프 접속부에서 상류부 1번째 검지기로부터 하류부 1번째 검지기 까지를 합류구간 램프 영향권으로 설정한다.

2. 정상상황시 진출입부 교통특성 분석

진출입램프가 인접한 구간의 교통특성은 기본구간과 다음을 알아보기 위해 실제 내부순환로 북부구간의 자료중 돌발상황이 발생하지 않은 정상상황시의 교통변수 변화를 살펴보았다. 첨두시 3차로 검지기 자료의 평균값 비교하였다. 아울러 모의 실험(Paramics)를 이용한 정상상황시 진출입구간 자료를 구축하고 특성 분석을 실시하였다.

1) 실제자료를 이용한 정상상황시 교통특성 분석

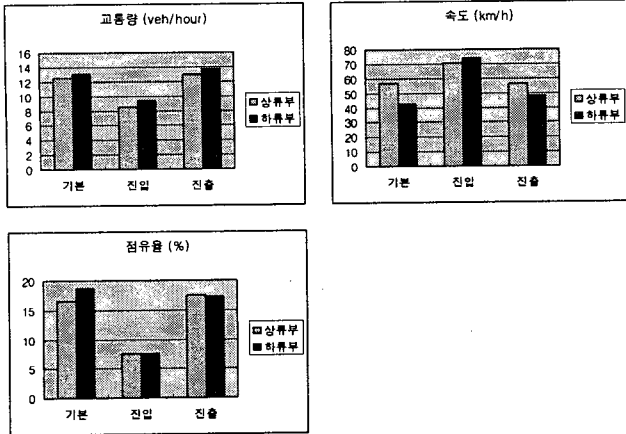
아래 <그림 4>는 첨두시 1시간동안의 구간별 교통변수의 변화를 살펴본 그래프이다. 기본구간의 경우 교통량, 속도, 점유율 3가지 교통변수 모두 정상상황시 상,하류부간 변동이 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 진출입부가 인접한 램프영향권의 경우, 정상상황시에도 불구하고 상,하류부간 속도와 점유율이 상이하게 나타난다. 이는 램프를 이용하는 차량으로 인해 차량간 상충 및 대기행렬이 발생하는데서 그 원인을 찾을 수 있다. 따라서 램프 영향권내의 돌발상황을 판정할 경우 검지지점의 모든 차로 평균값을 사용한다면 잘못된 값을 도출할 수 있다.



<그림 4> 정상상황시 교통변수 변화(3개차로 모두 포함)

아래 <그림 5>는 <그림 4>와 같은 조건에서 램프에 인접한 본선 1개차로를 제외한 나머지 차로의 평균값을 나타낸 그래프이다. <그림 4>에서 나타난 정상상황시 상,하류부간 교통변수의 차이가 확연하게 줄어들었음을 알 수 있다.

2) 내부순환로 교통관리시스템 설치공사 실시설계 보고서, SK씨앤씨(주) 콘소시업, 4-2-15,16

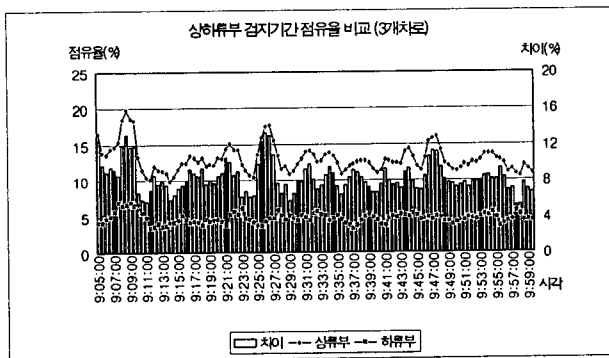


<그림 5> 정상상황시 교통변수 변화(본선 1개차로 제외)

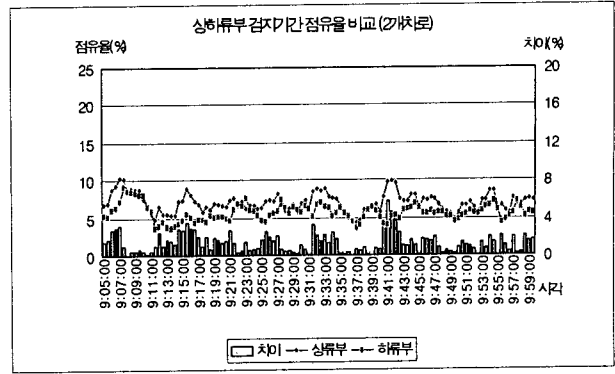
비침두시에도 위의 과정을 거쳐 교통변수의 변화를 살펴보았으나 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, 비침두시에는 모든차로의 평균값을 이용하여 돌발상황을 판단하여도 램프의 영향으로 인한 오경보율이 크게 상승하지 않을 것으로 판단된다.

2) 모의실험자료를 이용한 정상상황시 교통특성 분석

정상상황시에 발생하는 진출입영향권내 교통변수의 변화를 알아보기 위해 Paramics를 이용하여 모의실험을 실시하였다. 아래 <그림 6>, <그림 7>은 진출램프 영향권내 30초 단위 점유율의 변화를 나타내고 있다. 위의 그래프는 본선 3개차로를 평균한 값이며, 아래 그래프는 진출램프에 인접한 1개차로를 제외한 나머지 2개차로의 점유율을 평균한 값이다. 3개차로를 평균하였을 경우 돌발상황이 일어나지 않은 정상상황임에도 불구하고 점유율의 차이가 확연하게 나타남을 알 수 있으며, 이런 점유율의 차이가 진출램프에 의한 차량의 가감속, 차로변경, 대기행렬등에 의해 발생함을 확인할 수 있었다. 반면 램프에 인접한 본선 1개차로를 제외한 나머지 2개차로만 평균한 점유율은 아래 그래프에서 보는 바와 같이 그 차이가 일정수준 이하로 줄어들었음을 알 수 있다.



<그림 6> 정상상황시 점유율 변화(3차로 평균, 모의실험)



<그림 7> 정상상황시 점유율 변화(1개차로 제외, 모의실험)

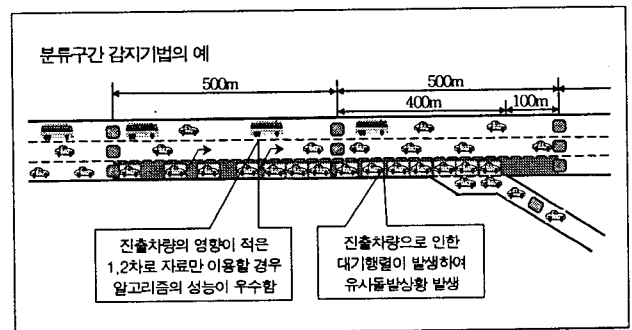
진입램프 영향권의 경우에도 값의 차이는 있으나 진출램프 영향권과 비슷한 결과값을 나타내었다.

실제자료와 모의 실험자료에서 살펴본 바와 같이 램프영향권에서는 정상상황시에도 램프의 영향으로 교통변수의 변화가 발생함을 알 수 있었다. 즉, 램프영향권내 돌발상황 판단시에는 기존의 돌발판정 방식의 변화가 필요하다.

IV. 램프영향권 돌발상황 감지 알고리즘

1. 감지기법 개발의 기본방향

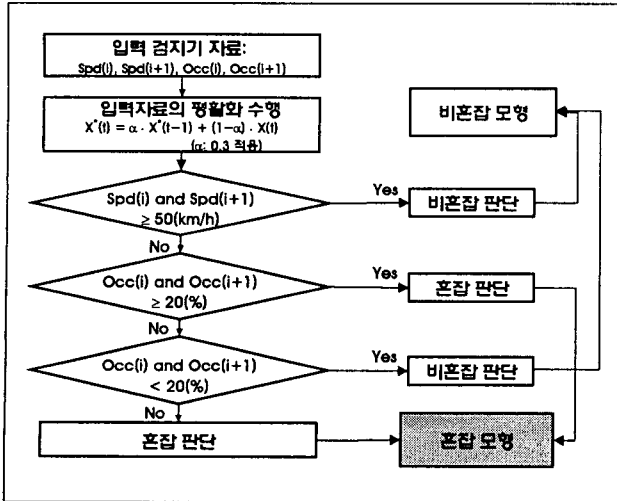
앞절에서 살펴본 바와 같이 기본구간과 달리 램프영향권내에는 모든차로의 자료를 이용할 경우 정상상황시에도 돌발상황으로 판정할 수 있다. 램프구간 교통량 증가로 인해 혼잡이 발생할 경우 즉, 램프에 설치된 검지기를 통해 속도 및 점유율이 임계값 이하로 떨어지는 혼잡상황이 발생할 경우에는 램프의 직접적인 영향을 받는 1개차로의 자료를 제외한 나머지 본선 차로의 검지기 자료만을 이용하여 돌발상황을 판정한다.



<그림 8> 램프영향권내 돌발상황 감지기법의 기본방향

2. 돌발상황 감지 기법 개발

본 연구에서는 돌발상황시 교통상황을 교통류 이론 관점에서 구분하고 도로의 혼잡상태에 따라 돌발상황 판단 모듈을 다르게 하여 돌발상황을 판정하는 임성만(2003)의 연구에서 혼잡시 모형을 변형하여 적용한다.



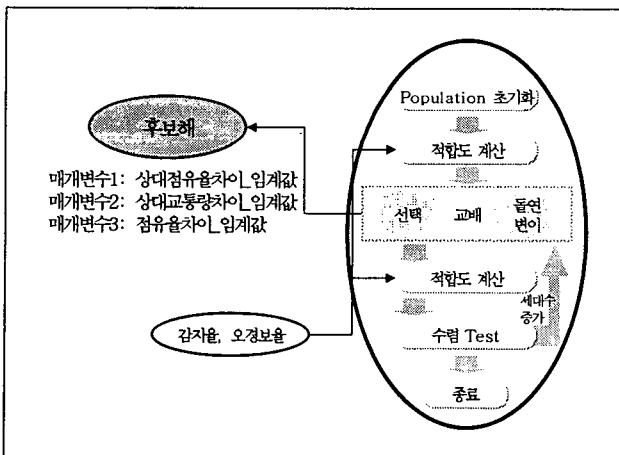
<그림 9> 혼잡상태 구분을 통한 돌발상황 판단

혼잡모형은 돌발상황으로 인해 상류부는 혼잡이 가중되지만 하류부는 소통원활인 교통상황시 판단모듈과 돌발상황이 발생하여도 상,하류부 모두 혼잡한 교통상황시 판단모듈이 있다. 전자의 경우 상,하류부 상대점유율차이^(식1)를 이용하여 돌발상황 판단변수로 활용하며 후자의 경우 돌발상황시 점유율 차이값이 그리 크지 않기 때문에 혼잡에 증가에 상관없이 돌발상황으로 인한 점유율 차이가 큰 값을 가지게 하기 위해 상,하류부 점유율 차이 절대값을 용량비로 나눈값^(식2)을 판단변수로 활용한다.

$$\text{판단변수} = \frac{\text{Occupancy}(i, t) - \text{Occupancy}(i+1, t)}{\text{Occupancy}(i, t)} \quad 1)$$

$$\text{판단변수} = \frac{\left| \frac{\text{Occ}(i, t) - \text{Occ}(i+1, t)}{100} \right|}{(\text{Vol}(i, t) / \text{Capacity})} \quad 2)$$

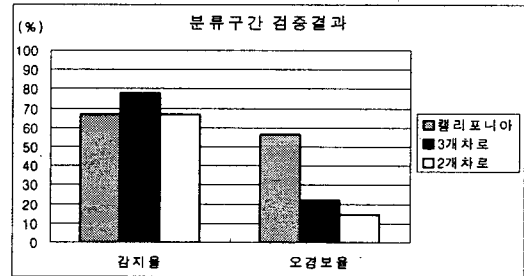
모형의 검증에 필요한 매개변수값은 유전자 알고리즘을 이용하여 산출하였다. 동질의 구간별로 세분하여 정산을 실시하여 보다 정확한 매개변수 값을 도출하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 정산 과정은 아래 <그림 10>와 같다.



<그림 10> 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 자동정산

V. 모형의 성능평가

앞절에서 구축된 모형을 실제 자료를 이용하여 검증하였다. 검증에 사용한 자료는 2003년 2월 5일~11일간 실제 내부순환로 진출입 영향권내에서 발생한 20건의 돌발상황을 이용하였으며 기존의 돌발상황 자동감지 알고리즘 중 가장 널리 이용되고 있는 캘리포니아 알고리즘과 비교 평가 하였다. 아래 <그림 11>은 분류구간의 실제자료 검증결과를 보여준다.



<그림 11> 실제자료를 이용한 모형의 성능평가

캘리포니아 알고리즘과 비교하여 볼때 감지율을 비슷한 수준을 보이나 오경보율이 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 이는 검증에 필요한 임계값을 유전자 알고리즘을 이용하여 동질의 구간별로 정산하였기 때문이다. 3개차로를 모두 포함하여 검증한 결과와 2개차로의 자료만 이용하여 검증한 결과는 2개차로의 경우 조금 더 우수하다고 판단된다. 합류구간의 경우에도 분류구간과 비슷한 결과값을 도출하였다.

VI. 결론 및 향후 연구과제

기존의 돌발상황 감지 알고리즘들은 주로 지점평균 점유율을 이용하여 돌발상황을 판정하므로 진출입구간이 인접한 구간과 같은 병목구간에서 발생하는 유사 돌발상황과 실제 돌발상황을 구분하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구는 돌발상황시 혼잡상황 구분을 통한 자동감지 알고리즘을 바탕으로 정상상황시에도 차로변경이 빈번하게 발생하는 고속도로 램프 영향권내에 적용가능한 돌발상황 감지 알고리즘을 개발하고 모형의 성능을 평가하였다. 램프 영향권내 혼잡 발생시 기존의 알고리즘의 성능이 저하시키는 주요인인 램프에 인접한 본선 차로의 자료를 판단 모듈에서 제외함으로써 오경보율을 상당히 줄일 수 있었다. 검증에 필요한 매개변수의 정산시 기존의 연구에서는 혼잡구분을 통한 정산만을 실시하였으나 동질의 도로구간별로 세분화하여 정산함으로써 모형의 성능을 향상시킬 수 있었다.

본 연구에서는 실제 돌발상황 자료를 이용하여 모형을 검증하였으나 향후 보다 광범위하고 다양한 돌발상황에 적용 가능성을 검증하여야 한다.

참고문헌

1. 임성만(2003), 도시고속도로 돌발상황 감지 알고리즘 개발에 관한 연구, 서울시립대학교 박사학위 논문
2. SK 씨엔씨(주), 내부순환로 교통관리시스템 실시설계보고서