

고속도로 돌발상황 감지를 위한 통합 알고리즘 구축에 관한 연구

(반복, 비 반복 정체 분리 감지를 중심으로)

A Study of Integrated Algorithm for Freeway Incident Detection

강 수 구

(한양대학교 교통공학과 석사과정)

도 철 응

(한양대학교 교통공학과 교수)

목 차

I. 서론

II. 문헌 및 이론적 고찰

III. 자료수집

IV. 모형 구축

V. 모형 검증 및 비교

VI. 결론 및 향후연구

I. 서론

교통혼잡관리(Congestion Management)는 FTMS(Freeway Transportation Management System)의 핵심분야로 이에 대한 중요성은 이미 오래 전부터 인식되었고, 강조되어져왔다.

도로상의 교통혼잡은 반복적 정체(Recurrent Congestion)와 비 반복적 정체(Non-recurrent Congestion) 또는 돌발상황 정체(Incident Congestion)로 나눌 수 있다. 이 돌발상황은 고속도로나 간선도로 상에 정체의 주요 요인으로 교통류의 정상흐름을 와해시켜 도로 유효용량 감소와 부가적인 수요의 증가를 초래한다. 이로 인한 교통 정체와 대기 오염, 이차적 사고 유발의 잠재력을 포함한 도로 안전 여건 저하 등의 사회 및 경제적 손실을 초래한다. 이러한 악영향을 제거하기 위해서 돌발상황의 영향을 최소화하고 돌발상황에 신속하게 대응할 수 있는 효율적인 자동돌발상황감지 시스템을 필요로 한다. 이러한 필요성과 관심의 결과로 지난 20여년 동안 다양한 고속도로 돌발상황 감지 알고리즘이 개발 및 제안되어 왔는데, 이는 도로상에 발생하는 교통 소통의 장애 요인의 위치 및 정보를 보다 신속하고 정확하게 감지하여 효율적인 교통류 관리 수행을 목적으로 한다고 할 수 있다. 다시 말하자면, 이들 알고리즘

들은 대부분 돌발상황 감지만에 초점이 맞추어져 있어 도로상에 발생하는 혼잡과 관련하여 운영자에게 정체 정보를 제공하지 못하고 있는 실정이라 혼잡의 원인에 따른 적절한 대응 방안을 조치해야하는 운영자에게 실질적인 도움을 주지 못하고 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 본 연구에서는 반복·비 반복 정체 분리감지를 위해 다른 처리 과정을 거치지 않고, 돌발상황 감지 및 정체 수반 여부로 돌발상황의 거시적 심각도 정보 제공과 함께, 정체를 원인별로 분리할 수 있는 알고리즘의 한 방향을 제시하고자한다.

II. 문헌 및 이론적 고찰

1. 돌발상황 정의

돌발상황은 정규적으로 일정시간에 나타나는 정체와는 달리 돌발적으로 나타나는 사건으로 비정규적 사건, 즉 교통사고(Accident)나 차량 고장(Breakdown)으로 인한 주행 차로의 차단, 도로상의 낙하물(Spilled load), 도로 유지 보수작업 및 기타 사건을 포함하는 것으로 도로의 용량감소나 도로의 교통수요가 비정상적인 증가를 초래하는 사건으로 정의할 수 있다. 반면, 반복적인 정체는 교통 수요가 도로 용량을 초과하여 발생된다. 따라서 교통 수요가 점차적으로 감소하면 자동적으로 정체가 해소

되지만, 돌발상황 정체는 돌발상황으로 인해 일부 차료가 차단되어 교통 수요를 소화하지 못하여 발생하므로 신속히 대처하지 않을 경우 혼잡이 장시간 지속되는 것이 일반적이다.

2. 돌발상황 검지 알고리즘

기존에 개발된 알고리즘을 크게 특성별 알고리즘을 5가지로 구분할 수 있고, 각각의 알고리즘에 대해 특징을 알아보면 다음과 같다.

- Comparative/Pattern Recognition
- Statistical Algorithms
- Time Series and Smoothing / Filtering
- Traffic Model & Theoretical Algorithms
- Advanced Incident Detection Algorithms

< 표 1 > 패턴별 알고리즘의 분류와 특징

Category	Algorithm	특징
Comparative or Pattern Recognition Algorithms	basic	교통변수의 관측값을 미리 설정된 임계값과 비교하여 돌발상황 검지
	California #7	
	#8	
	APID	
	PATREG	
	Monica	
	Wave Analysis	
Statistical Algorithms	Bayesian	관측치와 통계적 방법을 이용한 예측된 값을 비교
	SND	
Time Series and Smoothing / Filtering Algorithms	Time Series ARIMA	관측값과 시계열분석에 의한 예측치 간에 큰 오차가 나면 돌발상황 발생으로 판단
	Exponential Smoothing	
	Low-pass Filer	
	Dutch	
Traffic Model & Theoretical Algorithms	Dynamic	비선형 미분방정식을 이용하여 정상시와 돌발상황을 분석
	Modified McMaster	
Advanced Algorithms	Neural Network	임계값의 한계를 극복
	Fuzzy Set	

3. 돌발상황 검지 알고리즘 성능 지표

돌발상황 검지 모형이 얼마만큼 빠르고 정확하게 돌발상황을 검지 할 수 있는 성능 지표(Performance Index)로는 비정상적인 교통상황을 구분할 수 있는 가를 보는 검지율(DR)과 오검지율(FAR), 돌발상황 검지에 걸리는 시간인 평균 검지 시간(MTTD)에 따라서 돌발

상황 검지 모형의 성능이 측정되어진다.

1) 검지율 (Detection Rate : DR)

알고리즘에 의해 검지된 돌발상황 건수와 총 돌발상황 건수의 비율, 또는 모형에 의해 검지된 돌발상황 건수를 기록시간동안 실제 발생한 것으로 나타난 총 돌발상황 건수로 나눈 값이다. 검지율은 돌발상황 검지 모형의 가장 핵심적인 성능 지표가 된다.

2) 오검지율 (False-Alarm Rate : FAR)

오검지율은 검지율과 더불어 중요한 효과 평가 지표가 된다. 검지율이 비록 높다고 하더라도 오검지율이 비례한다면 돌발상황 검지 모형의 효율성은 떨어지는 것을 의미한다. 시스템이 off-line 혹은 on-line 상태인가에 따라 각각 다르게 정의한다. 본 연구에서는 오프-라인 오검지율(Off-line FAR) 즉, 허위 경보를 울린 비돌발상황 시간 간격의 개수를 비 돌발상황 시간 간격의 총 개수로 나눈 값을 이용한다.

3) 평균검지시간 (Mean Time to Detect)

실제돌발상황 발생으로부터 알고리즘으로 의해 돌발상황이 검지될 때까지 걸린 시간을 말하며, 실시간 운영 및 관리 체계에 있어서는 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 돌발상황 발생시간상의 오차가 있어 알고리즘의 성능 평가 항목에서는 제거하기로 한다.

III. 자료 수집

모형 구축과 검증을 위한 돌발상황 자료로는 비교적 다양하고 돌발상황에 대한 기본적인 정보가 있는 I-880 고속도로의 자료를 이용한다. 그 이유는 국내 고속도로 경우, 돌발상황에 대한 데이터베이스구축이 미비한 상태이고, 검지기 간격이 먼 관계로 돌발상황으로 인한 정체를 판단하는데 어려움과 검지기 자료 수집에도 애로사항이 많다. 반면, I-880 고속도로의 자료는 루프 검지기 자료와 탐지차량(Probe Vehicle)정보를 조합하여 루프 검지기 자료와 돌발상황 자료 오류를 보정해 주는 프로그램과 다양한 돌발상황 자료가 제공되기 때문이다.

1. 연구대상 구간의 환경

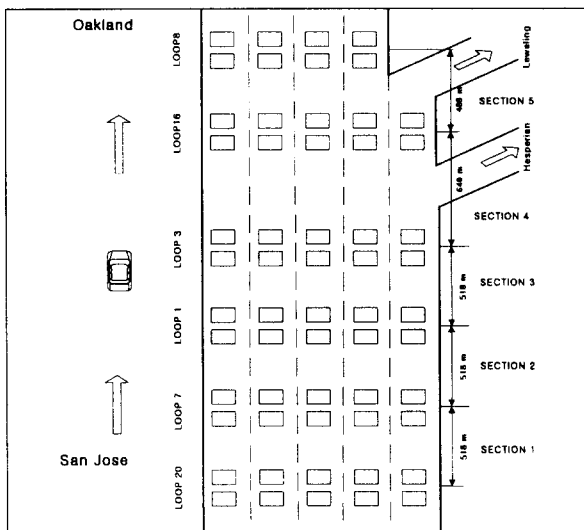
캘리포니아 Alameda County Hayward시에 위치한 I-880 고속도로 14.8km구간에서 자료가 수집되었으며, 이 구간은 샌프란시스코 해안 지역 중에서 사고 다발 지역중 하나이다. 이 구간 중에서 돌발상황의 발생빈도가 높은 2.68km구간을 선정하여 자료를 이용한다. 대상구간 교통 조건은 AADT가 160,000 - 200,000 vpd이며, 첨두시 교통량은 1,400 -1,800 vphpl(vehicles per hour per lane)이다. 기하구조는 <그림1>에서 보는바와 같이 Section 5를 제외한 구간에서 5차로이며, 검지기 설치간격은 평균 536m이다. 다인승 전용차로가 있고, Section 4,5에는 유출 램프가 있다.

2. 자료 처리 및 분석

1) 탐지(Probe-Vehicle)차량 자료수집

첨두시간 오전 6시 30분~9시 30분, 오후 15시 30분~18시 30분까지, 총 6시간동안 다음 정보가 수집되었다.

- 돌발상황의 종류 (즉, 사고 ,고장, ...)
- 돌발상황의 심각도 (영향을 받는 차로수)
- 돌발상황과 관련된 차량 종류
- 돌발상황의 위치
- 처음 관측된 돌발상황의 시간



<그림 1> 자료 수집 대상 고속도로 기하구조

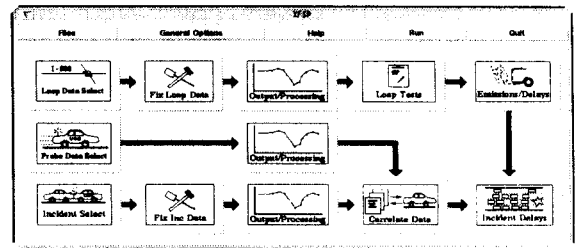
2) 루프 검지기 자료

오전 5:00~10:00, 오후 14:00~20:00까지 수집되었다. 첨두 시간을 포함한 오전 5시간과 오후 6시간의 총 11시간동안 30초 간격으로 교통량,

점유율, 속도자료가 수집되었다.

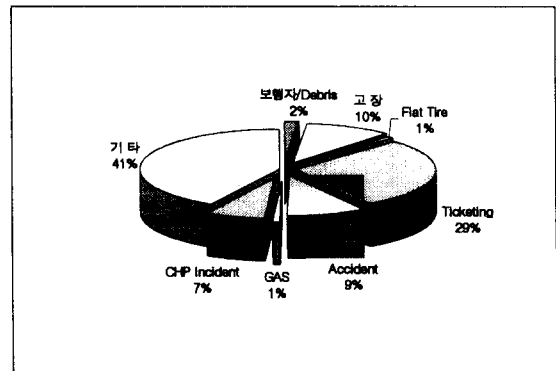
3) 돌발상황 자료

돌발상황 자료는 탐지차량 운전자 관측자료, 견인차량 회사의 기록, CAD 시스템(Computer -Aided Dispatch System)과 FSP(Freeway Service Patrol)기록으로부터 취합되어진다. 이 자료에서 루프 검지기의 오작동이나 돌발상황의 기록상의 오류를 Filtering과 Smoothing한다. 여기서 각 루프 검지기에서 제공되는 교통량, 점유율, 속도는 전 차로의 평균값으로만 제공된다. 이 작업을 수행하는 프로그램의 Main 화면은 <그림 2>과 같다. 루프 검지기 자료, 탐지차량 자료와 돌발상황 기록자료가 입력되어 최종적으로 돌발상황으로 인한 지체와 오류가 보정된다.



<그림 2> FSP1.1 프로그램

본 연구에서는 FSP(Freeway Service Patrol) 프로젝트 시행전(Before Period)인 1993년 2월16일부터 3월19일까지 24일 동안 평일 자료를 프로그램을 통해 제공되는 보정된 교통변수 -교통량, 속도, 점유율-과 사고 12건, 차량고장 13건, 단속 37건, Flat Tire 1건, GAS 1건, 기타 54건, 보행자/도로상의 장애물과 관련된 2건, CHP(California Highway Patrol) 돌발상황 9건으로 총 129건의 돌발상황 자료를 이용하여 제안한 모형을 평가한다.



< 그림 3 > 돌발상황 발생 비율

IV. 모형 구축

1. 임계값 도출

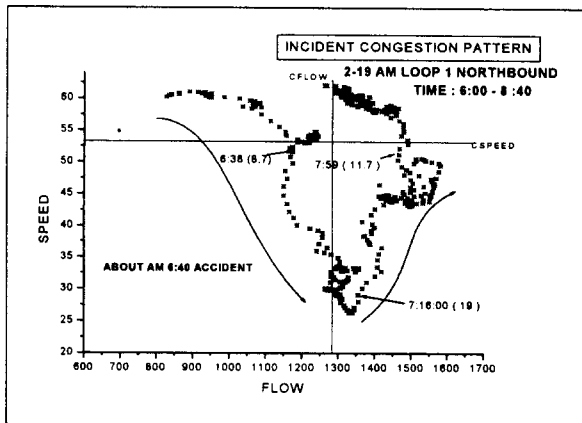
정체와 비정체의 구분을 위해 각 교통변수의 임계값들을 도출한다. 먼저 수집된 교통변수들의 평균과 표준편차를 도출하고, 표준편차의 3 배수 이하의 교통변수를 제거한 뒤, 다시 평균과 표준편차를 구하는 방법을 계속 반복 수행한다. 반복 수행 과정 중 연속된 평균값이 동일할 때, 수행과정을 중단하게 된다. 이 값을 각 교통 변수의 임계값으로 결정한다. <표2>에서 각 지점별 임계값을 제시한다.

<표 2> 지점별 임계값

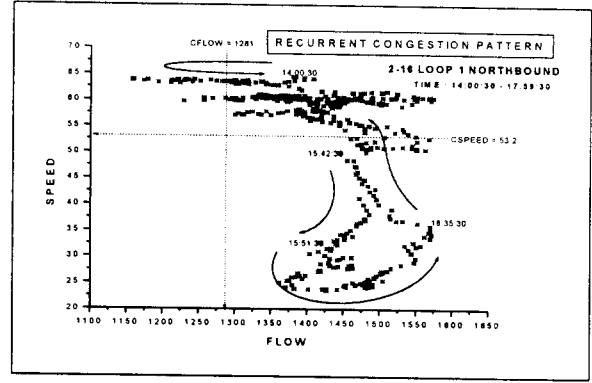
지점 임계값	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5
임계교통량 (vph)	1322	1255	1281	1317	1281
임계속도 (mph)	56.1	55.1	53.2	50.04	47.5
임계 점유율	11.21	11.46	16.97	12.01	14.97

2. 돌발상황 검지 알고리즘 구축

교통량과 속도의 관계에서 반복정체 경우는 임계 교통량 이후에서 임계 속도 이하로 떨어지면서 정체가 가중되는 반면, 돌발상황 정체의 경우는 임계 교통량 이전에서 임계속도 이하로 떨어지는 것을 관측할 수 있고, 과거의 교통량, 속도 추세와는 다르게 움직이는 것을 <그림 3>과 <그림 4>에서 알 수 있다. 일반적인 돌발상황 정체와 반복적 정체의 특성은 위의 대상 구간간의 예처럼, 교통량과 속도의 관계에서 돌발상황 정체와 반복적 정체를 구별하기가 용이할 것으로 판단된다.



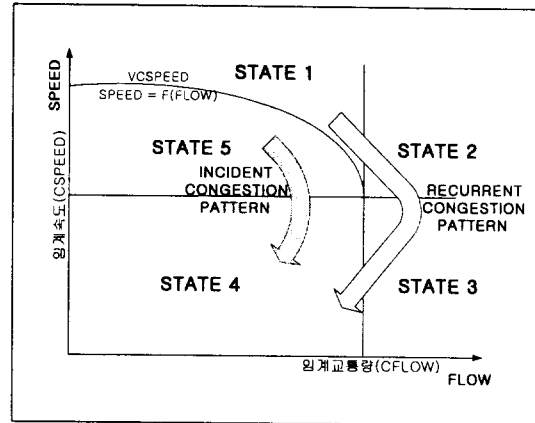
<그림 3> 돌발상황 정체 발생 패턴



<그림 4> 반복적 정체 발생 패턴

돌발상황 정체는 전 영역에 걸쳐 일어나지만, 일반적으로 <그림5>에서처럼 돌발상황 정체는 STATE 5에서 STATE 4로 이동하고, 반복적 정체의 경우는 STATE 1에서 STATE 3을 통과하여 STATE 4로 이동하거나 STATE 3에서 STATE 2로 해소된다. 이런 사항을 기반으로 본 연구에서 제안되는 알고리즘이 출발된다.

먼저, 교통량-속도 관계에서 선행된 임계교통량과 임계 속도를 이용하여 교통상태를 각 STATE별로 구분한다



<그림 5> STATE구분과 정체 발생 패턴

돌발상황 검지 알고리즘은 두 부분으로 나누어진다. 첫째, 교통상태에 따라 변화하는 임계 속도값과 관측된 속도를 비교하는 방법이다. 변화하는 임계속도를 구하는 방법은 MacMaster 알고리즘에서 임계교통량을 구하는 방식을 응용한다. 각 시간 간격에서 보정값(R_{now})과 <표3>에서 제시한 각 지점별 상수 값(CONST)과 교통량-속도 함수를 이용하여 얻어진 속도값(RSPEED)으로부터 새로운 변화 임계속도값(VCSPEED)을 구한다.

$$VCSPEED = R_{now} * (RSPEED - CONST)$$

R_{now}의 초기값은 1로 설정한다.

만약 관측 속도값과 교통량-속도 함수를 이용하여 얻어진 속도 값(RSPEED)의 절대값 차이가 상수값(CONST)보다 작을 경우 다음 식에서 R_{new}로 보정되어 진다. 여기서 Z는 가중치로 0.1로 설정한다.

$$R_{new} = (1-Z) \cdot R_{now} + Z \cdot (SPEED/RSPEED)$$

R_{new} 값은 다음 시간간격에서 쓰여지게 되며, 만약 돌발상황의 경보가 보고될 경우는 더 이상 보정하지 않게 된다. 만약 VCSPEED 보다 RSPEED가 작고, 관측 속도가 임계속도보다 작으며, 관측 점유율이 임계 점유율보다 큰 상태가 1분이상 지속될 경우, 돌발상황 발생 가능성이 존재한다고 판단한다.

<표 3> 지점별 교통량-속도 함수

지 점	교통량 - 속도 함수	CONST
지점1	$64.42439 - 0.00309FLOW + 9.78617e-8FLOW^2$	2.0
지점2	$61.82893 + 0.00395FLOW - 3.16056e-6FLOW^2$	1.98
지점3	$63.15421 + 0.00151FLOW - 2.27811e-6FLOW^2$	2.12
지점4	$63.6458 + 0.00323FLOW - 4.49272e-6FLOW^2$	3.24
지점5	$56.438 + 0.00725FLOW - 6.77011e-6FLOW^2$	2.0

둘째, 과거 3분 동안의 점유율과 속도 평균과 표준편차를 이용한 방법으로, 관측된 속도, 점유율이 표준편차의 1.95배수범위를 벗어나는 상태가 1분 이상 지속될 경우 돌발상황 발생 가능성이 존재한다고 판단한다.

위의 두 접근방법에서 모두 돌발상황 가능성이 존재하는 경우 돌발상황으로 판단한다.

3. 정체 검지 알고리즘

1분30초 이상 속도가 임계속도보다 작게되는 시점을 정체의 시작 시점으로 정의한다. 이때 정체 시작이 교통량-속도 관계에서 STATE 위치하는가를 확인한다. 만약 정체의 시작 시점의 STATE 위치가 STATE 2나 3인 경우는 반복적 정체일 확률이 크고, STATE 5나 STATE 4에서 발생할 경우는 돌발상황 정체일 확률이

크다고 할 수 있다. 결론적으로 돌발상황의 거시적 심각도와 정체 발생 정보를 제공한다.

4. 통합 알고리즘 적용

두 알고리즘의 결과를 여건에 따라 조합하거나 분리하여 돌발상황 검지와 정체원인을 파악한다. 혼잡이 없는 교통류 상태에서 돌발상황 검지 알고리즘에서 돌발상황 경보와 함께, 가까운 미래에 정체 검지 알고리즘에서 돌발상황 정체의 경보가 있다면, 돌발상황의 발생 확인과 함께 정체를 유발하는 심각도가 높은 돌발상황이 발생한 것이다. 또한 돌발상황의 경보 후 가까운 미래에 정체 경보가 없다면, 상대적으로 심각도가 낮은 돌발상황이 발생한 것이다. 반복적 혼잡 상태가 진행중에는 돌발상황 검지 알고리즘 경보로서 정체중의 돌발상황을 검지하게 되고, 반복적 정체가 돌발상황으로 인한 정체로 변환되는 것을 알 수 있다. 돌발상황 영향이 종료되는 시점은 STATE 2로 전환되는 시점이다.

가. 돌발상황과 돌발상황 정체 발생

- 교통량-속도 함수식과 속도, 점유율의 평균과 표준편차를 이용한 알고리즘에서 돌발상황이 확인된 경우.
- 돌발상황 경보후, 가까운 미래의 정체가 발생한 경우. - 심각한 돌발상황발생
- 정체검지 알고리즘에서 정체의 발생 시점이 STATE 4,5이고, 하류부 교통량-속도 상태가 STATE 3이나 4가 아닐 경우.

나. 반복적 정체 발생

- 시간의 흐름에 따라 순차적으로 STATE를 이동하는 경우.
- 정체 발생 시점이 STATE 1과 STATE 5를 제외한 곳에서 발생할 경우.
- 가까운 과거 시간대에서 돌발상황의 경보가 없을 경우 STATE 5에서 정체 발생이 검지 되더라도, 상·하류 교통량-속도 상태가 STATE 3이나 STATE 4일 경우.

V. 모형 검증 및 비교

대상지역 교통자료와 돌발상황 자료를 이용한 모형을 수행한 결과는 <표 4>과 같다.

<표 4> 돌발상황 검지 결과

발생 현황 돌발상황 종류	발생 건수	검지 건수	누락 건수
보행자 / Debris	2	1	1
차량 고장	13	11	2
Flat Tire	1	0	1
GAS	1	0	1
사 고	12	12	0
Ticketing	37	29	8
CHP 돌발상황	9	7	2
기타/긴급전화로 접수	54	34	20
총 계	129	94	35
검 지 율	72.87 %		
오검지율	0.27 %		

기본적으로 돌발상황 검지 알고리즘이 갖추어야 할 조건인 사고 검지 경우는 모두 검지가 되었다. 단속과 기타/긴급전화로 접수된 돌발상황 경우에는 교통류에 미치는 영향에 따라 검지여부가 결정되는 것으로 보인다. 캘리포니아 기본 알고리즘 적용¹⁾시 검지율은 35.2%, 오보율이 0.65%이며 캘리포니아 #7 알고리즘 적용시²⁾ 검지율 5%, 오보율 0.26%로 제안한 모형이 우수한 것으로 검증되었다.

VI. 결론 및 향후연구

위의 결과와 같이 교통류에 영향이 큰 사고의 경우는 완벽한 검지가 가능하나, 상대적으로 영향이 적거나 지속시간이 짧을 경우에는 돌발상황은 검지가 불안정함을 보이고 있다. 돌발상황 검지에 있어서, 검지율은 72.87%, 오보율 0.27%이므로 개선의 여지가 있지만, 캘리포니아 기본, #7알고리즘과 비교시는 우수한 것으로 판정할 수 있다. 또한 임계값 선정에 있어서도 임계 속도, 임계 교통량, 임계 점유율을 산정하는 방법과 점유율과 속도 평균과 표준편차를 이용하는 알고리즘에서는 표준편차의 배수만을 결정하면 되므로 타 알고리즘에 비해 용이하다.

따라서, '모형이 다른 지점으로의 전의 적용도 그 만큼 용이할 것으로 예상된다.

자료 수집 기간이 침투시간을 포함되어 있어 대부분의 돌발상황 발생이 정체중에 일어난 것으로 확인되었다. 3월9일 돌발상황 경보(AM 7:41:00)후에 정체 경보(AM 7:42:30)인 경우가

있을 뿐이다. 따라서 연구의 도입 단계에서 정체 수반 여부에 따라 거시적 돌발상황 심각도 정보 제공의 검증은 하지 못하였지만, 현실 적용은 가능할 것으로 예상된다.

연구 대상 지역의 교통량, 점유율, 속도자료는 각 차선별 자료가 아닌 전 차선의 평균값만이 제공되기 때문에, 돌발상황의 발생 이후, 전 차선으로 영향이 미치기 전까지는 돌발상황 및 정체 검지 알고리즘이 비정상적인 교통류를 신속한 검지에 한계가 있다. 특히, 모형 검증에 핵심이 되는 돌발상황 발생시간과 지속시간 자료가 보정 프로그램을 통해 보정 작업이 이루어졌지만, 직접 교통자료의 관계를 볼 때, 인력에 의존한 기본자료(Raw Data)에서의 오차를 줄이는 데에는 한계가 있는 것 같다. 돌발상황 발생 시간, 종료 시점 오차가 존재함이 확인되어 검지율과 오보율 산정의 어려움이 있었다. 분석과정에서는 돌발상황 시작 시간에서 5~8분의 오차는 수용했으며, 종료시간의 경우는 기존의 자료에 충실하게 분석하였다.

제안한 알고리즘 또한 임계값을 사용하므로, 이 값을 결정하는 방법에 있어서, 제한된 자료로는 정확한 임계값과 속도-교통량 함수의 도출이 어렵다. 더욱이 외국 자료이기 때문에 실제 현장의 교통류 특성과 기하구조 특성에 대한 정보 부재로 돌발상황 검지 알고리즘의 구현에 있어서 오보율의 원인이 되는 것으로 추정되며, 정체 검지 알고리즘 단독으로는 돌발상황 검지가 효율적이지 못한 결과가 도출되었다. 캘리포니아 알고리즘에 쓰이는 임계값 선정에 어려움으로, 기존 돌발상황 검지 알고리즘과 비교 연구가 완료되지 않은 상태여서 모형의 객관적 검증은 이루어지지 않은 상태이다.

제안한 모형은 한 지점에서 교통량, 점유율, 속도를 이용하여 돌발상황을 검지하도록 구현되었다. 각 차선별 자료로는 어떻게 운영할 때의 알고리즘 적용방안과 인접 지점과 연관성, 교통량, 점유율, 속도 자료가 모두 제공되지 않을 경우는 어떻게 운영되어야 신뢰성 있는 돌발상황 검지가 가능할 것인지, 또한 정체중에 돌발상황 발생을 더욱 신속하고 정밀하게 감지하기 위한 방법 모색과 돌발상황의 유형에 따라 돌발상황 발생이후 교통량-속도 변화 폭이 상이한 것을 파악할 수 있는데, 이 변화화도를 이용하여 돌발상황 심각도 즉, 몇 차로에 영향을 주는 돌발상황 인지를 추정할 수 있는 방법과 국내의 자료로의 검증은 향후연구과제이다.

1) 적용 임계값 T1 : 2.2, T2 : 0.22, T3 : 0.049

2) 적용 임계값 T1 : 10, T2 : 0.31, T3 : 17