

돌발상황으로 인한 고속도로 교통영향 예측 시스템 개발

Development of traffic impact prediction system by freeway incident

백승걸 박재범

(한국도로공사 도로교통기술원, 책임연구원)

장현호

(한국도로공사 도로교통기술원, 연구원)

Key Words : 고속도로 돌발상황, 교통영향 예측, 교통관리시스템

목 차

- I. 서 론
- II. 고속도로 돌발상황관리
- III. 돌발상황 교통영향 예측 시스템 개발
- IV. 고속도로 시뮬레이션 모형
- V. 결 론

I. 서 론

교통혼잡은 반복적 혼잡(recurrent congestion)과 비반복적 혼잡(nonrecurrent congestion)으로 구분할 수 있다. 반복적 혼잡은 교통수요가 도로의 용량을 초과하여 지체와 정체가 반복되는 혼잡으로, 도시부에서 오전, 오후 첨두시의 정체를 예로 들 수 있다. 비반복적 혼잡은 공사, 유지보수, 행사와 같이 예측할 수 있는 사건들과 교통사고, 차량의 고장, 급작스런 기후변화 등 예측할 수 없는 사건들에 의해서 발생하며, 이러한 비반복적 혼잡의 원인이 되는 상황들을 돌발상황(incident)이라고 한다. 미리 예측이 가능한 돌발상황의 경우는 사전정보를 제공하는 등 전략을 미리 구축할 수 있으나, 사고 등과 같이 갑작스레 발생하는 돌발상황의 경우는 돌발상황의 발생 및 그에 따른 영향 등을 사전에 예측할 수 없기 때문에 대응 전략을 구축하기가 매우 어렵다.

고속도로 교통관리시스템(FTMS; Freeway Traffic Management System)의 핵심적인 기능은 고속도로상에서 돌발상황 발생시 신속하고 효율적으로 대처함으로써 지체를 최소화하기 위한 돌발상황관리이다. 돌발상황 발생시 보다 정확하고 효과적인 대응을 하기 위해서는 현재 교통상황에 대한 파악뿐만 아니라, 돌발상황으로 인해 발생하는 파급효과까지 예측하여야 한다. 특히 고속도로와 같이 제한된 진·출입 시설을 가지고 있는 도로에서 돌발상황은 심각한 정체를 유발시킬 수 있기 때문에 교통류의 상태판정과 함께 혼잡상황이 앞으로 어떻게 전개될 것인지 또 어느 시점에 종료될 것인지를 예측하는 것은 매우 중요하다. 특히 통행상황이 불규칙하게 변화하는 여건하에서는 실시간 교통정보보다는 예측 교통정보가 필요하다.

그러나 현재 FTMS에서는 VDS(Vehicle Detection System), CCTV와 관련정보 등을 통해 돌발상황을 확인하고

있을 뿐, 돌발상황이 장래 어떻게 전개될 것인가는 운영자의 경험에 의존하고 있다. 따라서 돌발상황 발생시 돌발상황의 지속시간을 파악하고 우회정보 제공 또는 유출입 통제를 통해 추가적으로 발생할 수 있는 정체를 최소화하기 위해서는 장래 교통류 상황에 대한 예측이 필요하다. 돌발상황의 영향을 미리 예측할 수 있다면, 돌발상황 종료 시점에서 교통 영향권 및 정상류 회복시간을 산정할 수 있으며, 그에 따른 교통정보 제공범위 및 우회전략 등의 세부적인 교통관리전략을 수립할 수 있다.

본 연구는 돌발상황 발생시 진행될 정체상황을 미리 예측함으로써 보다 효과적으로 돌발상황에 대응할 수 있는 시스템의 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 TCS(Toll Collection System)와 VDS의 자료들을 이용하여 장래 교통류 상황을 실시간으로 구현하는 “고속도로 돌발상황 분석 시스템(FIAS; Freeway Incident Analysis System)”을 구축하였다.

II. 고속도로 돌발상황관리

돌발상황이란 한 지점에서 고속도로의 용량 또는 속도가 감소하는 것이라 정의할 수 있다. 돌발상황시에는 돌발상황지점 상류에서의 차량 밀도를 증가시키고 이에 따라 하류지점은 밀도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 돌발상황(Incidents)은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 이상 교통 상황을 직접적으로 유발시키는 돌발상황과 돌발상황으로 인하여 인접 지점에서 점차 발생하는 돌발상황 영향이다. 돌발상황의 경우 직접적으로 감지되는 경우보다 돌발상황에 의한 교통영향으로부터 감지되는 경우가 대부분이다.

<그림 1>과 <그림 2>는 2003년 5월 전국 고속도로에서 발생한 돌발상황 유형별 발생빈도 및 지체길이 빈도를 나타

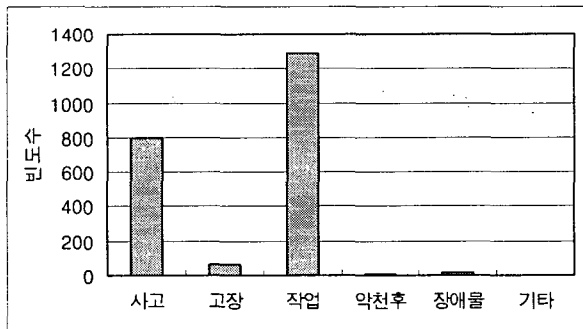
낸 것이다. 돌발상황의 발생빈도는 도로작업이 가장 많았지만, 5km 이상의 지체발생원인은 사고가 가장 많은 것으로 나타났다. 따라서 사고로 인한 지체발생이 가장 심각하며, 이에 대한 교통지정체를 효과적으로 파악하고 대응방안을 수립하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

돌발상황 시간은 검지시간, 확인시간, 대응시간, 처리시간으로 구성되며, 돌발상황 처리완료 이후 교통류의 정상회복까지의 시간이 있다. 검지는 운전자의 무선통신 이용률이 매우 높아 제보의 신속성이 높아지고 있으며, 확인시간은 CCTV 및 순찰차량에 의해 비교적 신속히 이루어지고 있다. 대응시간은 발생지점에 따라 다소 차이는 있으나 견인업체나 관련기관의 대응이 대체로 일정시간내에 이루어지고 있다.

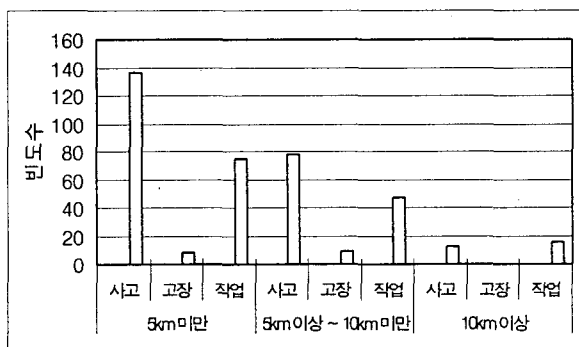
돌발상황시 고속도로 운영자들은 돌발상황으로 인한 장래 교통류 상황에 따라 대응방안 및 대응수준을 결정한다. 이때 중요한 요소는 돌발상황으로 인한 지체시간을 예측하는 것이며, 이를 위해서는 돌발상황의 교통류에 대한 영향을 분석하여야 한다.

유입량과 용량과의 관계로 돌발상황을 정의할 때 다음 두 가지로 구분된다.

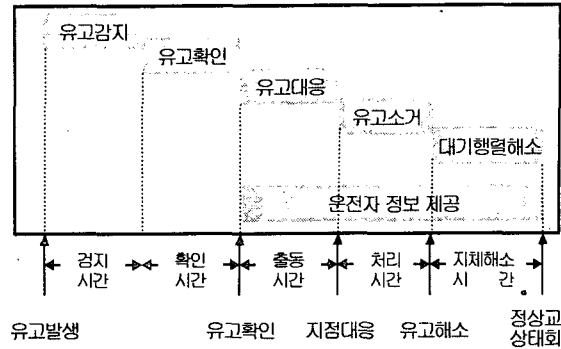
- 돌발상황으로 인해 감소된 용량보다도 적은 양의 교통량이 유입되는 경우로 돌발상황의 효과가 한정된 지점에만 영향을 끼치는 형태
- 돌발상황으로 인해 감소된 용량보다도 많은 양의 교통량이 유입되는 경우로 돌발상황에 인한 여파가 넓은 지역까지 끼치는 형태



<그림 1> 돌발상황유형별 발생빈도('03년 5월)



<그림 2> 돌발상황유형별 지체길이 빈도('03년 5월)



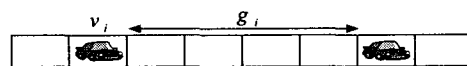
<그림 3> 고속도로 돌발상황관리과정

돌발상황후 대응대책은 돌발상황발생지점에 대한 지점관리(site management)와 돌발상황발생이 영향을 미치는 후방도로구간에 대한 교통관리(traffic management)로 구분할 수 있다. 돌발상황발생시 지점관리는 어느 정도 이루어지고 있으나 노선 및 네트워크측면에서의 교통관리 대응은 미흡한 실정이다. 고속도로 교통관리시스템에서는 VDS, CCTV, 기타 제보 등을 수집하여 현재의 교통상태를 판정하고 있으나, 이러한 자료들의 실시간 정보통합기능이 없다. 또한 돌발상황시 교통관리대책을 설정하기 위해 필요한 장래 교통류 상황 예측시스템이 구축되지 않고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 돌발상황시 장래 교통영향을 시뮬레이션하고, 그 파급효과를 분석할 수 있는 시스템을 개발하여 운영자의 교통관리전략 시행의 판단을 지원하고 돌발상황 대응 능력을 높이는 기법이 필요하다.

III. 고속도로 시뮬레이션 모형

1. CA차량모형의 고찰

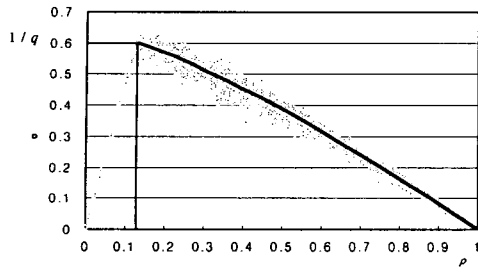
CA차량모형은 <그림 4>와 같이 연속적인 공간을 일정 길이의 Cell(이하 셀)로 나누어 이산적 공간을 구성하고, 시간은 시간간격(보통 1초)로 구분하여 이산적 시간을 구성한다. 차량은 이진구조[0,1]을 이용하여 표현되며 속성값으로 속도(셀/초)를 가지고, 속도갱신에는 추종차량간의 비점유된 셀의 개수인 g_i (셀)을 이용하게 된다. 그리고 차량의 가-감속은 확률(D_{noise})을 이용하여 확률적으로 설명한다.



<그림 4> CA모형의 공간적 구성

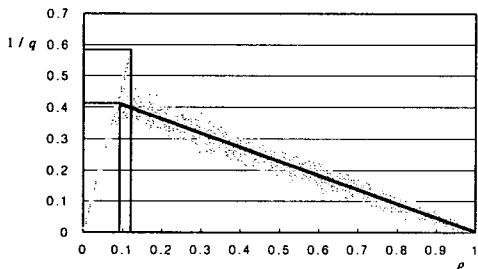
NaSch모형(1992)은 D_{noise} 을 이용하여 개별차량의 가감속을 설명하면서 <그림 5>와 같이 교통류의 거시적 관계를 설명한다. 그러나 정상상태에서의 용량(q_{max})과 혼잡(Jam)을 탈출하는 차량의 포화교통량(q_{min})을 설명하지 못한다. 이를 개선하기 위하여 STS(Slow To Start)규칙이 추가되었다

Schreckenberg, 1997). STS규칙은 정지한 차량의 감속확률 (p_0 , 단 $p_0 \gg p_{noise}$)을 이용하여 혼잡을 탈출하는 차량을 설명한다.



<그림 5> NaSch모형의 교통량(q)-밀도(k) 관계

<그림 6>은 수정된 NaSch모형의 거시적 교통량-밀도 관계를 보여주고 있다. $q_{max} \approx 1.5 * q_{min}$ 의 관계를 설명하면서 역 λ형태의 q-k관계를 설명하고 있으나, q_{max} 을 과소 평가하는 한계가 있다.



<그림 6> 수정된 NaSch모형의 q-k 관계

이상의 기존모형을 정리하면, NaSch모형은 첫째, g_i 만을 고려하여 감속하게 됨으로 최고속도(v_{max})로 주행 후 바로 정지한다. 둘째, 가속, 주행, 감속시 동일한 p_{noise} 을 적용한다. 수정된 NaSch모형의 경우 혼잡내의 정지차량과 혼잡을 탈출하는 차량의 감속확률(p_0)을 동일하게 적용한다. 따라서 혼잡 내에서 차량의 가-감속을 설명하는데 한계가 있다.

2. 수정 CA차량모형

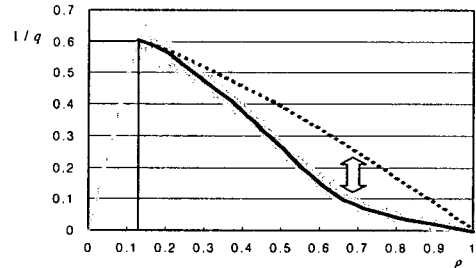
본 연구에서는 기존 CA모형의 한계를 극복하고자 다음의 SMR(Stopping Maneuver Rule), LAR(Low Acceleration Rule)을 추가하였다.

혼잡의 후미에 도착하는 차량은 강압적인 감속과정을 통하여 혼잡의 후미에 도달하게 된다. SMR규칙은 이러한 감속과정을 설명하게 되며, 0.9이상의 확률값(p_{smr})을 이용한다.

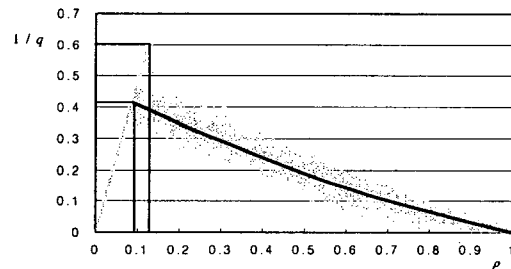
정지한 차량의 혼잡 내에서의 가속정도와 혼잡을 탈출하는 경우의 가속정도는 다르게 나타난다. LAR규칙은 혼잡내에서 정지한 차량의 낮은 가속을 설명하기 위해 NaSch모형 또는 수정된 NaSch모형과 결합하여 높은 확률값($p_{lar}, p_{lar} > p_0$)

을 이용한다.

<그림 7>은 NaSch모형과 추가규칙이 결합된 CA모형에서의 거시적 q-k관계를 보여주고 있으며, 임계밀도 이상의 밀도에서 p_{smr} 과 p_{lar} 을 이용하여 혼잡교통류를 다양하게 설명할 수 있음을 나타내고 있다. <그림 8>은 수정된 NaSch모형과 추가규칙이 결합된 CA모형의 거시적 q-k관계를 보여주고 있는데, q_{max} 를 과소 평가하지 않으면서, $q_{max} \approx 1.5 * q_{min}$ 의 관계와 역 λ형태의 q-k관계를 설명하고 있다.



<그림 7> NaSch모형+추가규칙의 q-k 관계

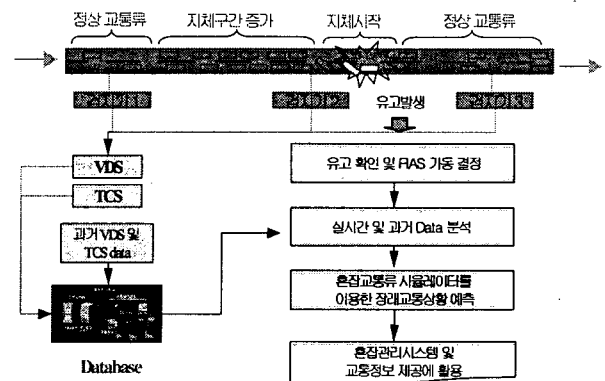


<그림 8> 수정된 NaSch모형+추가규칙의 q-k 관계

IV. 돌발상황 교통영향 예측 시스템 개발

1. 예측 시스템의 역할

본 연구에서 개발하고자 하는 고속도로 돌발상황구간 정체길이 분석모형 주요 수행과정은 <그림 9>에 나타내었다.

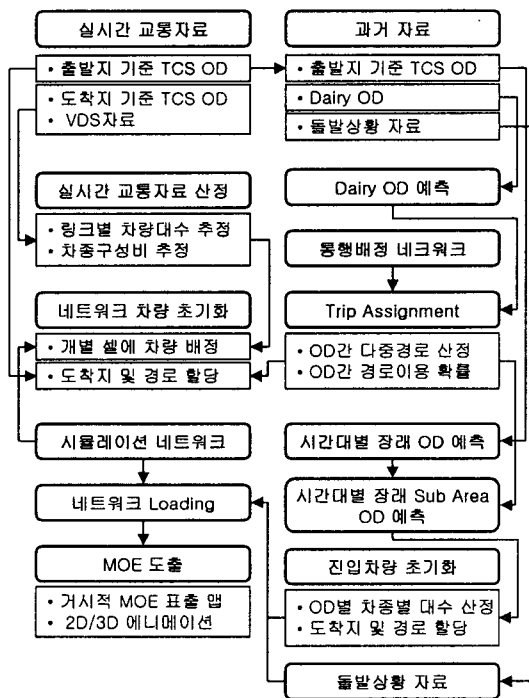


<그림 9> 고속도로 돌발상황 교통영향예측시스템 수행과정

- 돌발상황 발생시 돌발상황확인을 통해 FIAS의 가동 결정이 내려지면 FTMS 운영자가 돌발상황의 발생지점, 돌발상황 형태 등을 시스템에 입력
- 시스템은 입력된 사항을 근거로 교통DB로부터 돌발상황 발생지점의 TCS, VDS 자료를 추출 후 장래 교통상황에 대한 시뮬레이션 수행
- 시뮬레이션 완료시 예상되는 정체길이 및 정체종료시간 등의 정보를 2차원, 3차원 시각정보 등으로 FTMS 운영자에게 제공

2. 돌발상황 교통영향 분석 시뮬레이션 수행과정

<그림 10>은 돌발상황 분석 시뮬레이션 과정을 보여주고 있으며, 이는 다음의 9단계로 구분할 수 있다.



<그림 10> 돌발상황 교통영향분석 시뮬레이션 수행 과정도

1) 실시간 교통자료 수집 및 과거자료 구축

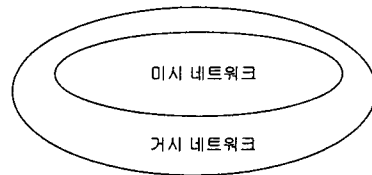
VDS(Vehicle Detection System)과 TCS(Toll Collecting System)를 통해 실시간 자료를 On-Line으로 수집한다. VDS 자료는 교통량, 속도, 점유율이며, TCS자료는 출발지 기준 OD와 도착지 기준 OD이다. 출발지 기준 OD는 과거자료 DB에 저장되어 시간대별 OD와 Daily OD 패턴자료를 구축한다.

2) 네트워크 구축

HGIS(Highway GIS)의 위치정보, Tollgate ID 및 위치정보, VDS ID 및 위치정보 자료를 이용하여 네트워크를 자동 생성한다.

네트워크는 <그림 11>과 같이 통행배정을 위한 거시 네트워크와 개별차량 시뮬레이션을 수행하기 위한 미시 네트워크

로 구분되며, 거시 네트워크는 미시 네트워크를 포함한다. 거시 및 미시 네트워크의 존은 TG의 ID를 이용하게 되며, 미시 네트워크의 개별링크는 VDS의 ID정보를 속성값으로 가진다.



<그림 11> 네트워크 구성체계

3) 돌발상황 자료입력

돌발상황 발생시각, 위치, 점유차로수, 돌발상황 형태의 자료를 운영자가 입력한다.

4) OD 교통량 예측

TG간 OD 교통량은 과거자료 DB를 이용하여 Daily OD와 시간대별 차종별 OD로 예측되며, OD 교통량의 예측에는 Daily 패턴 및 시간대별 패턴을 이용한다.

5) OD간 경로 및 경로이용확률 산정

예측된 Daily OD를 거시 네트워크상에 통행배정 과정을 통하여 OD간 경로 및 경로이용확률을 산정하게 된다. 산정된 경로 및 경로 이용확률과 예측된 시간대별 OD를 이용하여 미시 네트워크에 개별차량 기반으로 부하될 시간대별 Sub Area OD를 산정한다.

6) 진입차량 초기화

예측된 시간대별 차종별 Sub Area OD를 이용하여 차량을 발생시켜 가상링크(Virtual Link)에 축적한 후 모든 OD쌍간의 차량객체에 OD간 경로 및 경로이용확률을 이용하여 출발시각, 도착지 및 경로를 배정한다.

7) 실시간 교통류 모사

미시 네트워크를 구성하는 개별링크의 실시간 교통류는 개별 링크의 속성값으로 연결된 VDS정보, 도착지 기준 실시간 OD, OD쌍간의 경로 및 경로이용확률을 이용하여 구현하게 되며 다음과 같다.

① 링크밀도 산정

VDS를 통해 실시간으로 수집되는 교통량(대/5분), 속도(kph), 시간점유율(%)을 이용하여 링크밀도(대/km)를 추정한다. 링크밀도는 다음 식과 같이 추정 가능하며, 속도-밀도관계에서 이상치를 보정하여 적용하였다.

$$\text{추정 링크밀도} = 12 * \text{교통량} / \text{속도}$$

② 차종별 차량대수 산정

링크상의 차량대수는 링크밀도(대/km)*링크거리(km)를 이용하여 산정되며, 도착지 기준 TCS OD와 OD간 경로 및 경로이용확률을 이용하여 링크의 차종별 차량대수를 산정한다.

③ 차량의 차로배분 및 셀 배정

- 차종별 차로 배분
 차종별 차로 배분은 “링크 상의 모든 차간거리는 같다”고 가정한다. 산정된 차종별 차량대수와 차종별 차로이용률을 이용하여 차로에 차종별로 1차 차량배분을 수행한다. 차로별로 비점유된 셀의 총개수가 오차범위안에서 평형상태(Equilibrium)에 이를때까지 보정을 수행한다.

- 차종별 셀 배정
 차간거리가 동일하도록 차로별 차종별 대수를 하류부에서 상류부로 전파시키면서 차량을 셀에 배정한다. 차간거리(m)는 다음과 같이 산정된다.

$$\text{차로별 차간거리} = \text{총 비점유된 셀개수} / \text{총 차량대수}$$

④ 도착지 및 경로할당

실시간으로 수집되는 도착지 기준 OD와 OD간 경로 및 경로이용확률을 이용하여 개별 셀에 배정된 차량에 대하여 도착지 및 경로를 배정한다.

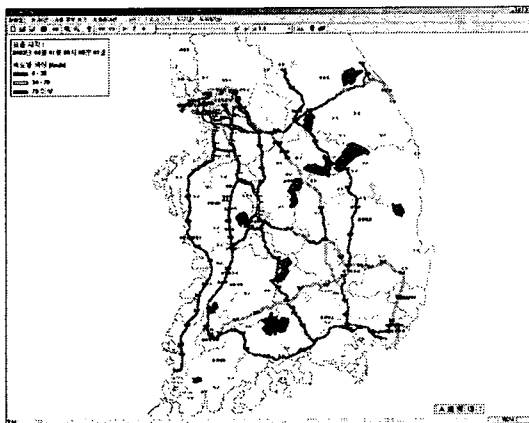
7) 네트워크 부하(Loading)

가상링크에 누적된 차량이 진입조건 및 출발시각 조건을 수렴하면 유입링크에 차량을 유입시키면서 시뮬레이션을 수행한다.

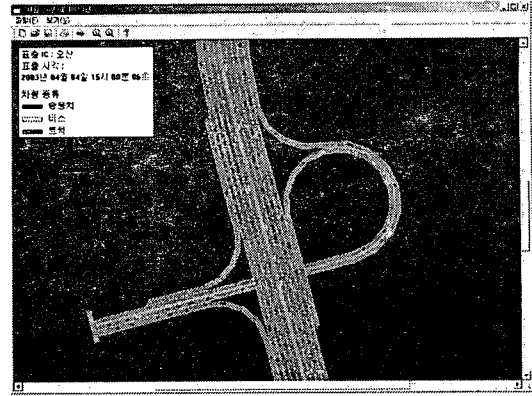
8) MOE 표출 및 시각화

시뮬레이션을 통하여 획득한 MOE는 링크별 속도, 밀도, 교통량을 색상표출 맵을 통하여 표출하며, 개별 차량 정보를 이용하여 2D/3D 애니메이션으로 표출한다.

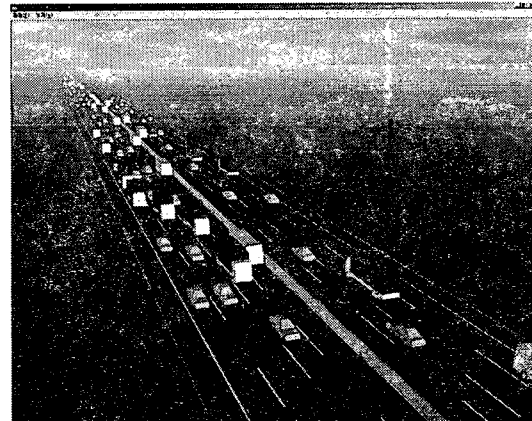
현재의 돌발상황관리에서는 검지기와 고속도로 이용자로부터의 돌발상황 검지 및 첩보, CCTV와 순찰차를 이용한 돌발상황 확인이 이루어지고 있다. 본 연구에서 개발한 고속도로 돌발상황 교통영향 예측시스템은 돌발상황 지속시간 예측모형, 교통량 예측모형, 시뮬레이션 모형으로 구성되어 장래 교통상황에 대한 예측이 가능하다. 시스템 개발을 통해 고속도로 돌발상황에 대한 교통관리 능력의 재고뿐만 아니라, 이동식 도로작업의 교통영향분석, 향후에는 고속도로 교통정보 시스템 기능 향상이 가능해질 것으로 판단된다.



<그림 12> 색상 표출맵을 통한 MOE 표출



<그림 13> 2D 애니메이션을 통한 시각화



<그림 14> 3D 애니메이션을 통한 MOE 표출

V. 결 론

본 연구에서는 돌발상황 발생시 고속도로 관리자들이 장래 교통상황에 대해 효과적인 돌발상황대응전략을 시행할 수 있도록 하기 위해 돌발상황으로 인한 교통영향을 예측할 수 있는 “고속도로 돌발상황으로 인한 교통영향 분석 시스템 (FIAS:Freeway Incident Analysis System)”을 개발하였다. FIAS는 장래 교통류 예측을 위한 시뮬레이션 모형과 시뮬레이션 입력자료 및 표출을 위한 기타 기능 등으로 구분된다.

시뮬레이션 모형은 기존 CA모형의 현실적인 한계를 수정하여 개발하였으며, 입력과 출력은 VDS 및 TCS 데이터 등 실시간 교통정보 DB에 대한 접근 모듈, 시뮬레이션용 맵, 시뮬레이션 결과 2차원 및 3차원 표출로 이루어졌다.

본 연구는 돌발상황시 운영자의 의사결정을 지원하는 수단제공을 하기 때문에, 운전자들을 대상으로 한 경로정보제공 등 다양한 기능들이 추후 지속적인 연구를 통해 추가되어야 한다. 또한 돌발상황시 교통영향에 가장 중요한 요소인 돌발상황 지속시간에 대한 보다 상세한 연구가 필요하며, 돌발상황 발생시 첩보체계에 대한 개선방안 등 FIAS 시스템의 지속적인 운영과 관련한 다양한 대책들에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

1. 장현호(2003), "CA모형을 단기 구간통행시간 예측에 관한 연구", 대한교통학회지 통권 66호
2. 조중래(2001), "CA모형을 이용한 미시적교통류 시뮬레이션 시스템개발에 관한 연구", 대한교통학회지 통권 55호
3. 노정현(2001), "CA모형을 이용한 고속도로 돌발상황 영향 분석 교통 시뮬레이션 모형 개발", 대한교통학회지 통권 58호
4. 한국도로공사(1998), "고속도로 톨게이트 운영 시뮬레이션 모형 개발" 1998
5. Helbing D. Herrmann H. J., Schreckenberg M., D. E. Wolf(1999), "Traffic and Granular Flow 99", Springer.
6. Nagel K., and M. Schreckenberg(1992), "A cellular automaton model for freeway traffic", J. Phys. I France 2:2221.
7. Schreckenberg M. and D. E. Wolf(1997), "Traffic and Granular Flow 97", Springer.
8. Schreckenberg M.(2002), "Simulation of the Autobahn Traffic in North Rhine-West phalia", International Symposium on Transport Simulation.
9. Seungkil Baek, Jaebeom Park, Hyunho Jang(2003), Development dynamic highway simulation model for incident management, EASTS
10. Simon P. M., Nagel(1998) K, "Simplified cellular automaton model for city traffic", Physical Review E. Copyright by The American Physical Society
11. TRANSIMS, "The TRansportation ANalysis and SIMulation System project", the Los Alamos National Laboratory.