

☒ 응용논문

도시고속도로 유고가 교통혼잡에 미치는 영향  
- Effects of Urban Freeway Incidents  
on Traffic Congestion -

권희철\*

Kwon, Hee Chul

황상호\*\*

Hwang, Sang Ho

Abstract

Nonrecurring congestions are generally caused by random or less predictable events, such as accidents, spilled loads stalled or broken-down vehicles that, temporarily reduce the capacity of the freeway. The purpose of this paper is to present the effect of incidents on the traffic congestion on the urban freeway by simulation method.

The simulation scenario is composed of two level traffic conditions, two level incident severities, and eight level incident durations. After incident, the recovering duration to the normal traffic flow, increased by linear of incident duration. Total vehicles travel time increased and average travel speed decreased by squares curve of incident duration.

Considering incident impacts, incident management system is evaluated the major function of the urban freeway traffic management system. Also, necessary the related research to detect, verify, and develop effective response strategies for traffic incidents.

1. 서론

교통혼잡으로 인한 사회적 비용은 전국적으로 10조원을 상회하고 물류비가 제품원가에 미치는 정도가 16%에 달하고 있다[1]. 국가경쟁력 확보 차원에서 교통혼잡 관리에 대한 관심을 집중시켜야 할 당위성이 있다. 도시부 가로 중 많은 차량을 고속으로처리하는 도시고속도로의 교통혼잡은 일상적으로 교통량의 증가로 인한 반복적 혼잡(Recurring Congestion)과 예상할 수 없는 돌발사고(교통사고, 차량고장, 화물추락 등)로 인한 비반복적 혼잡(Nonrecurring Congestion)으로 구분된다.

교통분야에서 이러한 돌발사고를 유고(Incidents)라 하는데, 이들 유고로 인한 교통혼잡 발생이 약 60%를 상회하는 것으로 나타나 있다[4]. 서울시내 도시고속도로에서도 교통혼잡 원인의 69%가 이러한 유고에 기인하는 것으로 밝혀졌다[2]. 따라서 도시고속도로상의 교통혼잡 관리에서 유고관리는 매우 중요한 비중을 차지하고 있다.

외국에서는 이미 유고관리의 중요성을 인식하여 도시고속도로 교통관리시스템을 구축하고 각 차로별로 설치된 검지기에서 계측되는 교통변수를 통해 자동으로 유고를 검지하여 경고하는 시스템이 가동 중이며, 관련연구가 활발하게 진행되고 있다[6,7,8].

\* 경원전문대학 공업경영과 교수

\*\*도로교통안전협회 교통과학연구원 수석연구원

그러나 우리나라에서는 교통혼잡으로 인한 피해가 불특정 다수인에 있고, 이러한 악영향에 대한 구체적인 인식도 부족하여 체계적인 대응이 이루어지지 않으며 교통혼잡은 더욱 가중되는 양상을 빚고 있는 실정이다.

본 연구는 도시고속도로에서 유고 발생시 교통혼잡의 생성 및 소멸에 대하여 교통류적으로 분석하고 그 영향도를 평가하여 도시고속도로 교통관리자의 인식 제고와 교통체계에 새로운 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 유고관리 시스템

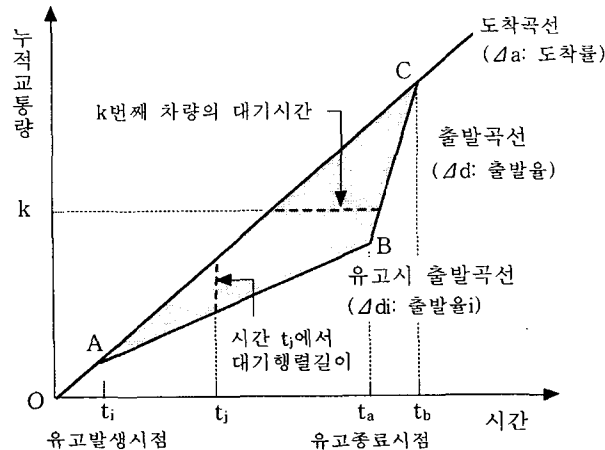
교통에서 대기행렬이론은 차량의 지체와 대기차량의 길이 등 도로의 서비스 수준(Level of Service : LOS)을 평가하는 방법으로 이용된다. 또한 교차로 접근로상 좌회전 베이(Bay)의 길이, 교차로 방향별 차로수 분할, 신호시간 결정 등과 같은 도로 설계, 교통운영 등의 최적화 모형으로도 활용된다.

도착형태는 주어진 평균도착률에서 연속적으로 도착하는 차량의 시간분포에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. 즉 균일분포의 이산적(Deterministic)인 도착을 가정하는 균일형 시간간격(Equal Time Intervals)과 포아송분포의 도착을 가정한 지수형 시간간격(Exponentially Distributed Time Interval)이 그것이다. 균일도착과 균일출발 분포를 갖는 상황에서의 유고 발생시의 교통상황 변화를 도식으로 설명하면 [그림 1]과 같다.

$t_i$ 에 유고가 발생하여  $t_a$ 까지 유고가 지속된 후,  $t_b$ 에 대기행렬이 소멸되는 과정을 보여 주고 있다. 실제 도로상황에서 도착곡선은 해당 도로구간을 진입하는 차량대수로 설명할 수 있으며, 도착곡선의 기울기인 도착률( $\Delta a$ )은 단위시간당 도착교통량이 된다. 출발곡선은 유고가 발생된 구간을 통과하는 차량대수이므로 출발율( $\Delta d$ )은 단위시간당 출발교통량 된다. 유고발생시점인  $t_i$  이전의 출발율은 도착율보다 높기 때문에 대기행렬이 형성되지 않지만,  $t_i$  이후는 유고로 인해 출발율이  $\Delta d$ 에서  $\Delta d_i$ 로 감소하여 도착율이 출발율에 비해 상대적으로 높아지기 때문에 대기행렬이 형성되기 시작한다.

유고가 지속되다  $t_a$ 에서 유고상황이 종료되면 출발율은  $\Delta d_i$ 에서  $\Delta d$ 로 다시 회복하여 유고 시간동안 형성되었던 대기행렬이 점차 해소되기 시작하고  $t_b$ 에서 대기행렬이 완전 소멸된다. 여기서  $k$  번째 진입차량의 대기시간과  $t$ 시점에서의 대기행렬의 길이를 구할 수 있으며,  $\triangle ABC$ 의 면적으로 전체 차량의 총지체시간도 알 수 있다.

[그림 1]의 삼각형 면적이 유고로 인한 총차량 지체시간을 나타내므로 각 변의 기울기나 길이를 조정함으로써 총대기시간을 줄여나갈 수 있다. 유고관리기법 역시 이러한 원칙하에 다음과 같은 방안으로 나누어진다.



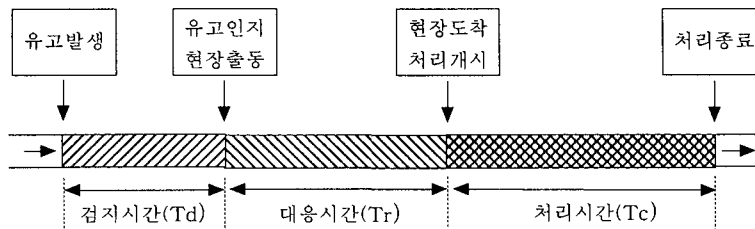
[그림 1] 유고발생시 대기행렬모형의 개념도

1. 용량감소분( $\Delta d - \Delta di$ ) 최소화
2. 도착율( $\Delta a$ ) 감소
3. 유고시간( $t_a - t_i$ ) 최소화

유고발생시 용량감소분을 줄이는 방안에는 도로계획 단계에서 고려되는 갓길을 확보하여 통과차량의 방해가 최소화되도록 문제차량을 갓길로 이동시키는 방안과 통과차량이 일시적으로 갓길을 이용토록 허용하는 방안 등이 있다. 교통수요를 줄이는 방안으로는 상류부에서 접근해 들어오는 차량이나 이 도로를 이용하려고 계획한 차량 운전자에게 유고발생 정보를 제공하여 다른 경로를 선택하게 하는 방안과 유입연결로에서 신호나 수신호를 통해 일시적으로 차량 유입을 억제하는 방안이 있을 수 있다. 총지체에 영향을 미치는 다른 한 요소는 고속도로에서 유고가 발생하여 완전히 처리될 때까지의 시간을 단축시키는 노력이 그것이다.

용량감소분 최소화 방안은 도로가 기하구조적으로 가용공간이 있을 경우 가능한 방법이며, 도착율 감소방안은 운전자에게 상당한 불편을 수반할 수 밖에 없다. 최근들어 유고관리체계는 주로 유고시간을 최소화하고 유고발생상황을 운전자에게 알려 스스로 다른 경로 선택을 유도하는 방안으로 접근하고 있다. 유고시간은 [그림 2]와 같은 시간으로 구성된다.

유고시간은 검지시간( $T_d$ ), 대응시간( $T_r$ ) 및 처리시간( $T_c$ )으로 구성되며, 각 구성시간을 줄이는 노력이 필요하다. 즉 유고가 발생되면 즉각적으로 유고를 인지·확인하고, 유고관리팀을 현장에 급파하여 신속한 조치를 취하는 일련의 조기적인 체계가 요구된다. 외국에서는 자동 유고검지체계를 구축하여 조기에 유고를 검지·확인할 수 있도록 하고 있으며, 현장도착시간을 축소하기 위한 전담팀 위치 최적화, 경로선택의 최적화를 도모하고 있을 뿐만 아니라 처리시간을 줄이기 위한 조직과 운영체계를 갖추고 있다.



[그림 2] 유고시간 구성

### 3. 유고상황 시뮬레이션

#### 3.1 시뮬레이션 개요

유고의 성격상 발생시각과 심각도에 대한 인위적인 통제가 불가능하고, 현재의 교통류 자료 수집체계로는 유고발생 당시의 교통상황을 정확히 수집하기 어려워 과거의 자료를 토대로 유고의 심각도나 지속시간에 따른 교통류의 분석이 어려운 실정이다. 한편 실제 도로를 대상으로 유고의 심각도와 그 지속시간에 따른 교통류의 상황을 실험한다는 것도 도로이용자로 부터의 비난과 그 사회적인 비용을 고려할 때 채택할 수 없는 접근 방법이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 연속류의 교통상황을 현실에 가깝게 구현할 수 있는 교통류 시뮬레이션 방법을 이용하여 서로 다른 교통수요에서 유고의 심각도와 지속시간의 변화에 따른 교통류의 변화를 분석하였다.

기존의 교통류 시뮬레이션 방법에는 연속류모형, 단속류모형과 이를 통합하는 통합모형이 있다. 본 연구에서는 통합시뮬레이션 모형 중에서 교통량의 동적배분 및 개별차량의 추적이 가능

하고 이를 시공간적으로 적절히 표현할 수 있는 시뮬레이션 도구를 선정하였다[5]. 특히 본 연구는 도로상에서 유고가 발생했을 때 차량의 흐름이 변화하는 과정을 시각적으로 묘사할 수 있을 뿐만 아니라 이용자가 교통류의 모니터링을 위해 원하는 위치에 검지기를 설치할 수 있어 교통류변화의 정보를 시공간적으로 계량화하여 출력할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

### 3.2 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 편도 3차로 도시고속도로의 직선 5km 구간을 대상으로 하여 서비스 수준 C 및 D 상태에서 각기 다른 유고상황 발생시 교통류의 변화를 시뮬레이션하여 분석하였다. 도로의 용량은 실제 일반적인 고속도로의 용량인 단위시간 차로당 2,200대를 기준으로 6,600대/시간으로 설정하였다. 유고의 상황은 4km 지점에서 차로별로 바깥쪽 차로부터 각각 1개 차로와 2개 차로가 1, 3, 5, ..., 13, 15분 동안 유고로 인하여 막히는(Blocking) 상황을 설정하여 총 32가지 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 시뮬레이션은 시각적인 애니메이션과 함께 2시간 동안 유고발생 전후의 교통류의 변화를 시간적 공간적으로 출력파일을 형성하여 분석하였다.

[표 1] 시뮬레이션 시나리오

유고변수	시나리오	내 용
교통량 수준	2 수준	LOS C (v/c 0.70 : 1,540대/시,차로) LOS D (v/c 0.86 : 1,982대/시,차로)
유고 지속시간	8 수준	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 분
유고 심각도	2 수준	1개 차로막힘, 2개 차로막힘

## 4. 결과 분석

### 4.1 시공간적 교통류의 변화

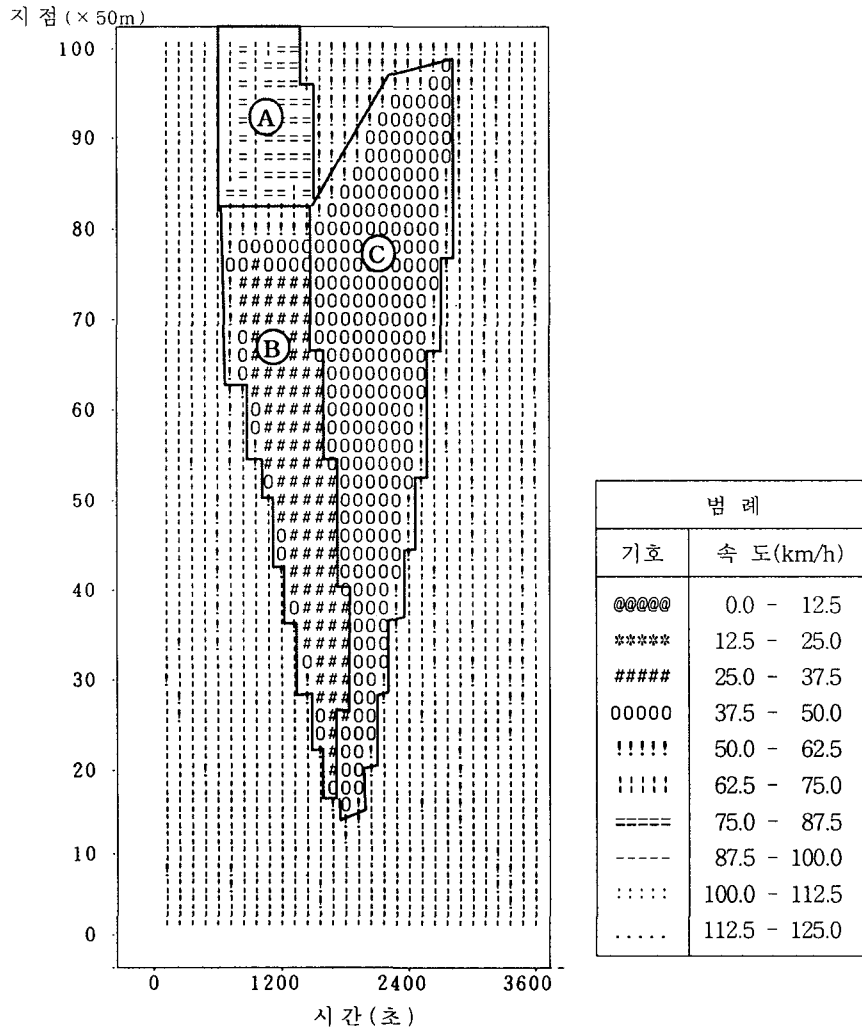
유고의 발생시 교통류는 유고발생지점에서의 병목현상으로 인하여 속도의 감소와 대기행렬의 증가 및 하류부에서의 교통류의 와해현상을 발생시킨다. [그림 3]은 LOS C의 교통량수준에서 1개 차로에 600초 시점부터 유고가 발생하여 13분 동안 지속되고 이후 해소되는 현상을 속도를 지표로 계량화하여 시간과 공간을 축으로 2차원으로 표현한 것이다.

그림에서 ㉠영역은 80번 지점(상류부로부터 4km 지점)에 발생한 유고가 용량의 감소를 유발하여 대기행렬이 점차 증가하는 현상을 보여주고 있다. 13분 동안 유고가 지속됨으로써 교통혼잡상황이라고 할 수 있는 50km/h 이하인 구간은 상류부로 3.2km까지 전파되고, 이러한 악화는 약 1,800초까지 진행된다. ㉡영역은 유고발생지점에서 발생한 병목이 하류부로 유출되는 교통량을 감소시켜 상대적으로 밀도가 저하됨에 따라 속도가 오히려 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이러한 유고발생지점 하류부의 속도증가현상은 유고가 계속되는 동안 지속되다가 유고가 종료되면 원상태로 복귀된다. 마지막으로 ㉢부분은 600초에 발생한 유고가 1,380초에 완전히 처리됨에 따라 유고의 지속시간 동안 대기하고 있던 차량들이 점차 앞쪽(하류부)으로 전진하면서 대기행렬이 해소되는 현상을 보여주고 있다.

[그림 4]는 시뮬레이션의 결과를 입체적으로 나타낸 것인데 이를 더욱 쉽게 파악할 수 있다. [그림 4]는 LOS D의 교통량 수준에서 80번 지점의 2개 차로에 600초 시점부터 유고가 발생하여 15분 동안 지속되고 이후 해소되는 현상을 3차원으로 표현한 것이다. 그림에서 ㉣으로 표시

된 부분은 정상상태의 교통류 속도를 나타내며, ㉠는 유고가 발생하여 그 대기행렬이 상류부로 전과되면서 속도가 급격히 감소함을 보여준다. ㉡부분은 유고발생 이후의 하류부 속도분포로 도로의 용량에 비해 교통량이 감소함으로써 속도가 정상상태의 교통류보다 오히려 증가함을 보여준다.

여기서 주목할 점은 대기행렬내에 있던 운전자가 상대적으로 속도가 높은 ㉢지역으로 진입하면

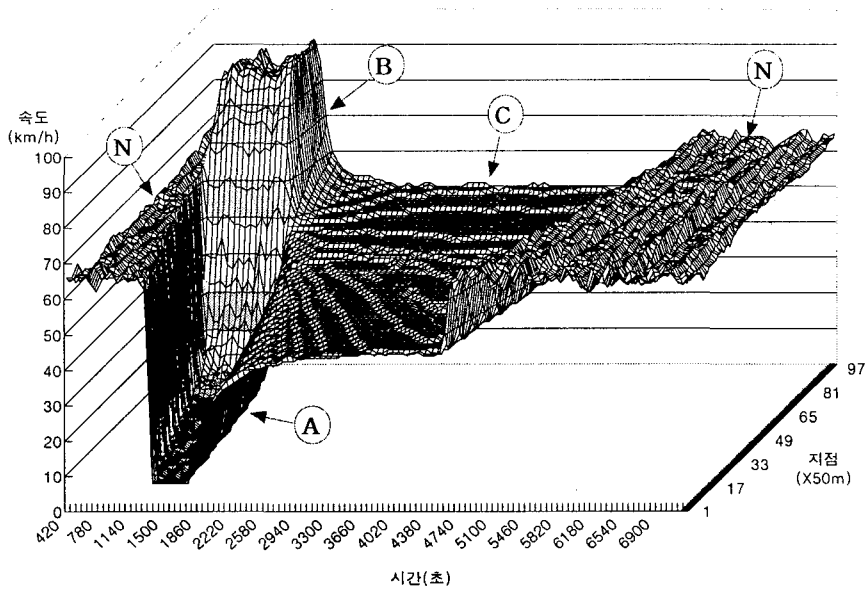


[그림 3] 유고발생시 속도의 2차원 시공간도

대기행렬내에서 지체했던 시간을 보상하기 위하여 과속을 할 우려가 있다는 것이다. 따라서 유고로 인한 병목지점 이후에서 과속으로 인한 부차적인 사고가 발생하지 않도록 하는 방안이 요구된다. 마지막으로 ㉢지점은 유고가 처리된 이후에 대기행렬이 하류부 방향으로 전진하면서 해소가 되는 과정에서 속도가 점차 증가하는 현상을 보여주고 있다. [그림 4]에서 정상류의 교통류 ㉣이하의 속도로 주행하는 부분의 체적 축, ㉠와 ㉢부분의 적분값은 유고발생으로 인한 총지체를 의미한다.

### 4.2 지점별 속도변화

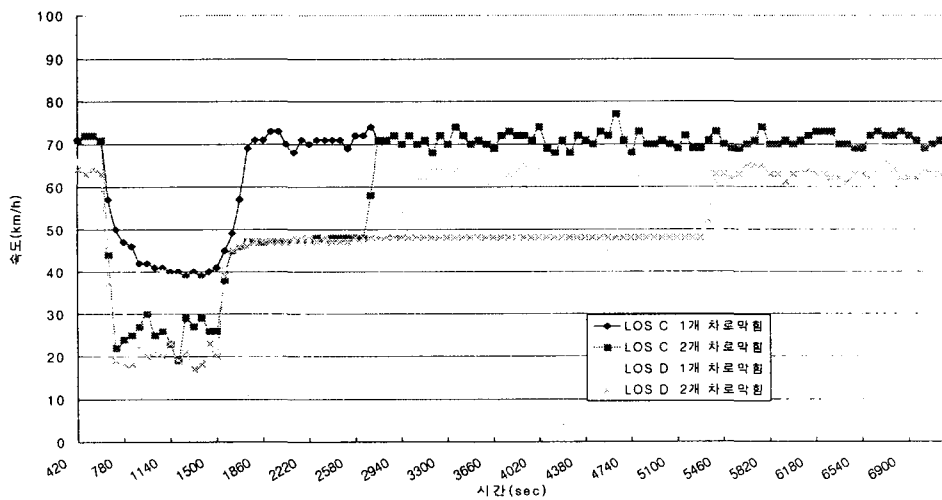
[그림 5]와 [그림 6]은 15분 동안 유고가 지속될 때 유고발생지점으로부터 250m 상·하류지점에서의 시간에 따른 속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면 유고상황 진행시 하류부에서는 속도가 급격히 증가하게 되어 교통류의 와해가 발생하며 반대로 상류부에서는 급격한 속도의 감소를 보임을 알 수 있다. 이러한 속도증감의 추세는 유고의 상황변수 중 유고의 강도, 즉, 막히는



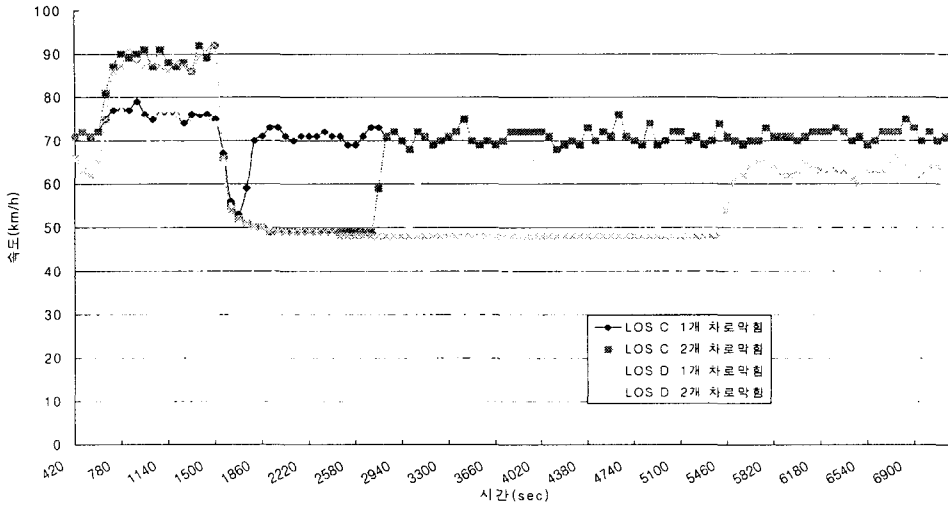
[그림 4] 유고발생시 속도의 3차원 시공간도

차로의 수에 직접적으로 영향을 받음을 알 수 있다.

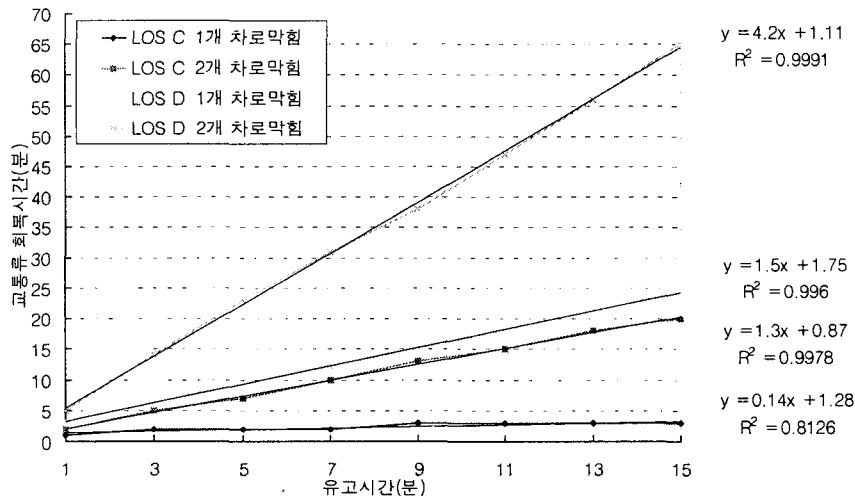
또한 유고의 처리 후 정상교통류로 회복되기까지의 속도를 보면 유고발생 전후지점 즉 [그림 5]와 [그림 6]은 서로 유사함을 알 수 있는데 이는 대기행렬이 전체적으로 하류부 방향으로 진행하기 때문이며, 회복 시까지 소요되는 시간은 교통량수준에 직접 적인 영향을 받게 됨을 알 수 있다.



[그림 5] 유고발생지점 상류 250m 지점에서의 시간대별 속도분포



[그림 6] 유고발생지점 하류 250m 지점에서의 시간대별 속도분포



[그림 7] 유고지속시간별 회복시간

도로상에 차량검지기가 설치되어 있을 경우 유고발생 상류지점과 하류지점에서의 속도, 교통량, 밀도 변화로 인해 유고발생 유무를 판단할 수 있다. 일반적으로 유고발생 전에 교통량/용량비가 높을수록 그 차이는 현격하여 낮을수록 변화폭은 적어진다. 도로상에 일정간격으로 차량검지기를 설치하여 아주 짧은 시간(20~30초) 동안의 계측된 교통변수를 인접 검지기와 비교함으로써 유고발생유무를 판단할 수 있다.

#### 4.3 정상상태로의 회복시간

유고발생 후 발생 전 상태로 완전히 회복하는 데 소요되는 시간은 유고발생 직전의 교통상태, 유고심각도, 유고지속시간에 영향을 받는다. 즉 유고발생 직전의 교통상태가 나쁠수록, 유고심각도가 클수록 그리고 유고지속시간이 길수록 회복시간은 길어진다. [그림 7]은 교통상황, 유고심각도, 유고시간에 따른 회복시간의 시뮬레이션 결과이다.

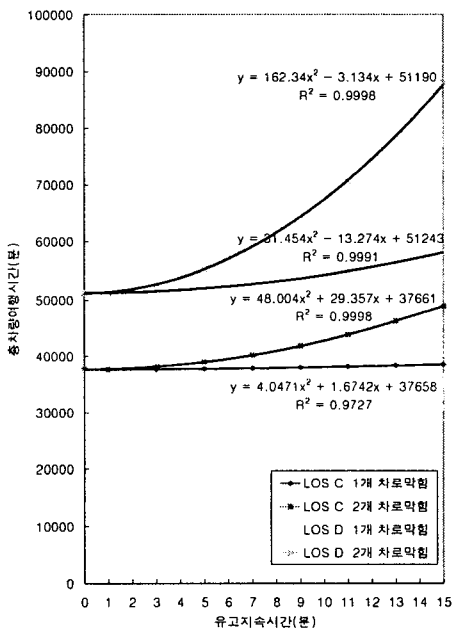
회복시간은 교통상황 수준이나 유고심각도 및 시간과 직선으로 설명되며, 교통상태 C수준에

서 1개 차로가 막히는 유고가 발생되었을 시는 회복시간은 유고시간에 별로 영향을 받지 않으나 2개 차로가 막혔을 경우 회복시간은 유고시간의 약 1.3배를 요구하고 있음을 보여주고 있다. 교통상황이 다소 복잡한 D수준에서는 1개 차로가 막히는 유고가 발생되었을 시는 회복시간은 유고시간의 1.5배, 2개 차로가 막혔을 경우 회복시간은 유고시간의 약 4.2배가 필요하다.

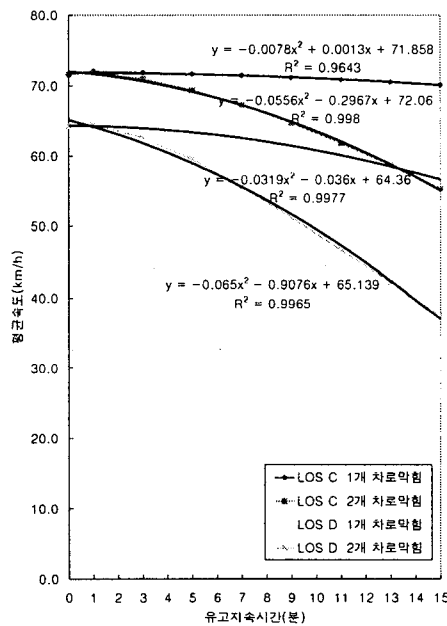
현재 서울시 올림픽대로 경우 주간시간대에는 정상상태임에도 교통상황 수준이 D이하로 용량상태를 거의 육박하고 있는 상황에서 만약 교통사고가 발생하여 2개 차로를 30분간 차단한다면 교통사고처리 이후 정상상태로 교통류가 회복할 때 까지 소요되는 시간은 2시간을 넘을 가능성이 많다. 따라서 조기에 유고를 발견하여 신속한 조치가 얼마나 시급한지를 알 수 있다.

#### 4.4 총차량여행시간 및 평균속도 변화

[그림 8]은 유고발생시 전체 가로상의 총차량여행시간은 지체로 인해 증가하며, 그 정도는 유고회복시간과 같이 직선으로 증가하는 것이 아니라 유고지속시간의 2승으로 증가함을 보여주고 있다. 즉 공간적, 시간적 속도감소가 영향을 미친 결과로 C 수준에서 발생된 유고보다 D 수준에서 발생된 경우와 유고로 인해 막힌 차로수가 많은 유고 그리고 유고시간이 많이 경과된 유고가 총차량여행시간이 급증함을 보여주고 있다. 그 관계는 D 수준 2개 차로가 막히는 유고는 1개 차로가 막히는 유고에 비해 약 2.3배 이상의 증분을 보이고 있다. 한편 차량 평균속도는 총여행시간의 역관계로 [그림 9]와 같다. 수준 D에서 유고가 발생되지 않을 때에는 평균 약 65km/h로 주행하던 차량이 유고가 발생하면 속도는 점차 저하되어 유고가 15분간 지속되었을 경우 평균 약 40km/h로 저하됨을 보여준다. 그러나 시뮬레이션시간이 2시간으로인 관계로 유고발생전과 유고발생후의 정상상태에서의 결과도 반영되어 있으므로 실제 운전자가 느끼는 속도 저하는 더욱 심각할 것이다.



[그림 8] 총차량여행시간의 변화



[그림 9] 차량별 평균속도



## 5. 결론 및 제언

교통사고, 차량고장 등의 유고로 인한 도시고속도로상의 교통혼잡 발생과정과 소멸과정을 교통측면에서 살펴봄으로써 유고관리의 중요성을 부각시키기 위해 시뮬레이션을 시도하였다. 시뮬레이션 결과 유고 상류지점과 하류지점의 속도의 변화가 극심하게 나타났으며 유고가 해소된 후의 정상태로의 회복시간은 유고시간에 비례해서 단순히 증가하나, 총여행시간은 유고시간의 2승배로 증가하였다. 도로설계시 목표 서비스 수준인 D 수준에서 2개 차로가 막히는 유고가 발생했을 때 회복시간은 유고지속시간의 4.2배에 달하고 총여행시간은 1개 차로가 막히는 유고보다 약 2.3배 이상 증가하는 것으로 분석되었다. 이 결과는 주어진 시뮬레이션 환경상에서 도출된 결과이므로 일반적으로 해석할 수는 없다.

우리나라 도시고속도로의 경우 통상 침두시 교통상황은 D 수준이하여서 사소한 용량감소 요인만 발생하여도 그 영향은 시뮬레이션 결과보다 더욱 심각할 것으로 판단된다. 따라서 도시고속도로 뿐만 아니라 고속도로, 일반국도상의 유고관리는 대단히 중요한 교통관리의 하나로 평가되어야 한다. 결과적으로 유고관리체계를 구축하기 위해서는 먼저 시스템상의 유고관리 목표와 목적을 정의하고, 이들 관리상태를 평가할 수 있는 지표를 설정해야 한다. 즉, 평균 유고검지시간, 평균 대응시간 등이 그 한 예이다. 또 유고기능의 요구분석을 시도하여 시스템 각 기능과의 연계성, 요구되는 정보 및 정보흐름을 검토하는 단계가 필요하다. 이와 아울러 우리나라 유고의 특성에 맞는 유고 관련 연구를 통해 유고관리시스템 구축의 기초자료를 확보할 필요도 있다.

구체적인 분야로는 유고관리를 위한 검지기체계 정립, 자동유고검지 알고리즘 개발, 조직적 대응체계 수립 및 교통정보 제공 등에 대한 연구가 본격화되어야 하고, 이를 위한 다학제적인 접근도 요구된다. 도시고속도로 교통관리시스템에 대한 연구·개발은 최근 국가차원에서 추진되고 있는 지능형교통체계(ITS: Intelligent Transport System)중에서도 우선적으로 추진되어야 할 분야로 인정되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] 건설교통부, 국가경쟁력 강화 방안, 1996.
- [2] 도로교통안전협회, 도시고속도로 안전관리 종합대책, 1997
- [3] FHWA, "Freeway Incident Management Handbook", Report No. FHWA-SA-91-056, Federal Highway Administration, Department of Transportation, USA, 1991.
- [4] FHWA, Traffic Control Systems Handbook, FHWA-SA-95-032, 1996.
- [5] M. Van Aerde, INTEGRATION RELEASE 2: User's Guide, Transportation systems Research Group, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, December, 1995.
- [6] N. Bhandari, F.S.Koppelman, V Sethi, and J.L. Schofer, "Incident Detection Algorithms for Release 2.0", ADVANCE Project Technical Report, TRF-ID-206, The Transportation Center, Northwestern University Evanston, June 2 1995.
- [7] Stephen G. Ritchie and Neil A. Prosser, "Real-Time Expert System approach to Freeway Incident Management", TRR 1320, 1991, pp7-16.
- [8] Vaneet, et al, "Duration and Travel Time Impacts of Incidents", ADVANCE Project Technical Report TRF-ID-202, 1994.