

# 고속도로 교통축에서의 교통우회시스템의 개발

## Development of Traffic Diversion System on Highway Corridor

김 상 신

노 정 현

(한양대학교 대학원 도시공학과) (한양대학교 도시공학과 교수)

### 목 차

- I. 서 론
    - 1. 연구의 배경 및 필요성
    - 2. 연구의 목적 및 범위
  - II. 돌발상황 관리
    - 1. 돌발상황관리의 개요
    - 2. 돌발상황관리
    - 3. 교통우회시스템
  - III. 교통우회시스템의 개발
    - 1. 시스템의 구조 및 가정
  - 2. 실시간 교통정보 수집/통행시간예측
  - 3. 돌발상황 검지/확인
  - 4. 우회여부 판단
  - 5. 지체 예측
  - 6. 경로탐색
  - 7. 우회교통량 산정
  - 8. 교통우회시스템 알고리즘
- IV. 결론 및 추후연구과제

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 필요성

심각해지는 교통문제를 효과적으로 해결할 수 있는 대안으로써, 기투자된 교통시설의 효율을 극대화하고 소규모의 재원투자로 단기간에 교통운영을 개선시키려는 지능형 교통체계(ITS)에 대한 연구가 현재 전 세계적으로 활발하다. 우리 나라 또한, "지능형 교통시스템(ITS) 국가 기본계획"을 수립하고 각계의 연구기관과 공동으로 연구를 활발히 진행하고 있다.

'97년에 확정된 우리나라의 ITS 국가기본계획에서는 국내 ITS를 5개 분야로 구분하고, 14개의 구축시스템을 제안하였는데, 이 중 대표적인 것이 ATMS(첨단교통관리시스템)의 한 분야인 FTMS(고속도로 교통관리시스템)이다.

일반적인 고속도로 교통관리전략의 유형은 고속도로의 진입교통량제어(Ramp Metering), 가변정보표시판(VMS)을 이용한 교통정보제공 등으로 분류되며, 이 중 핵심적인 관리전략은 혼잡 또는 돌발상황 발생시, 교통량을 우회시킴

으로써 혼잡구간의 확산을 방지하고 지체시간을 감소시킬 수 있는 우회전략이라 할 수 있다.

우회전략은 혼잡구간 상류부의 교통량 증적정량을 대안 노선에 우회시켜줌으로써 지체구간의 확산을 억제할뿐만 아니라, 교통망 전체의 지체시간을 감소시켜 교통시설의 효율성을 제고하고 사회적 비용을 절감시킬 수 있는 효과적인 고속도로 교통관리전략이다.

우회전략의 실행을 위해서는 교통관리센터에서 우회경로를 선정하고, 선정된 경로에 대해 우회 교통량을 산출하여야 하며, 제어기법을 결정하여야 한다. 그러나 현재 우리나라에서는 우회전략에 관한 연구가 미비한 실정이며, 실제 고속도로 운행상황에서도 단순히 하류부의 혼잡정보만을 제공하고 있는 실정이어서, 효과적인 교통관리전략을 위해 통합된 시스템이 구축되어야 한다.

### 2. 연구의 목적 및 범위

#### 1) 연구의 목적

본 연구는 돌발상황 발생시, 실시간 교통정보를 바탕으로 본선교통류와 대안경로의 지체도를 판단하고 대안경로 및 본선부의 우회 교통

량을 산출할 수 있는 통합시스템의 알고리즘 개발을 목적으로 한다.

본 연구에서 목표하는 바는 다음과 같은 기능의 교통우회시스템 구조를 구축하는 것이다.

- 단기간의 교통상황을 예측하고, 돌발상황의 검지 및 우회여부 판단.
- 시간대별 지체도 파악.
- 교통상황을 고려한 우회경로 탐색.
- 대안경로상의 우회교통량 산출.

## 2) 연구의 범위

본 연구는 고속도로상에서의 돌발상황(incident)에 의한 비반복적 혼잡(non-recurrent congestion)에 초점을 맞추어, 교통우회시스템을 구성하는 각 기능별 module들을 제시하고, 이들을 통합하여 교통우회시스템의 구조를 제시하는 것을 범위로 한다. 각 기능별 세부 module들은 새로운 모형의 개발보다는 개념의 정립과, 기존 모형의 수정, 적용 및 가정을 통하여 구현된다. 단, 우회교통량에 대한 제어기법은 범위에서 제외한다.

# II. 돌발상황관리

## 1. 돌발상황(Incident)의 개요

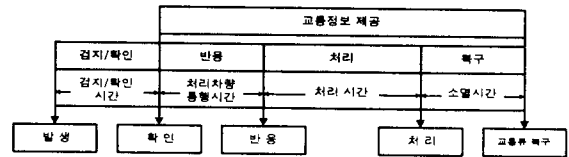
교통혼잡은 첨두시의 집중과 같은 반복적 혼잡(recurrent congestion)과 돌발상황에 의한 비반복적 혼잡(nonrecurrent congestion)으로 분류된다. 반복적 혼잡은 첨두시의 교통집중에 의한 정체를 예로 들 수 있으며, 비반복적 혼잡은 차량의 고장, 사고, 공사 등 돌발적으로 발생한 여러 상황에 의해 유발되는 혼잡을 의미한다. 이러한 비반복적 혼잡의 원인이 되는 상황들을 돌발상황(incident)이라고 한다.

교통혼잡은 추가적 사고를 유발할 수 있으며, 추가적으로 발생한 사고는, 혼잡을 가중시켜 악순환을 거듭한다. 따라서, 교통혼잡에 신속하고 효과적으로 대처하는 것은 도로의 교통관리에서 매우 중요한 과정이다. 그러나, 사고등과 같이 급작스레 발생하는 돌발상황에 대한 전략을 미리 구축해놓는 것은 매우 어려운 문제이다. 이러한 전략에 관한 연구는 복잡한 교통망과 신호체계로 구성된 도심부에 비해 주로 고

속도로를 중심으로 이루어지고 있다.

## 2. 돌발상황관리(Incident Management)

돌발상황관리는 교통의 흐름을 돌발상황 이전의 수준으로 신속히 회복시켜, 지체에 의한 혼잡비용을 최소화하기 위한 교통관리전략으로써, 검지, 반응, 처리, 복구의 네 가지의 단계로 구성된다. 다음 <그림 1>은 돌발상황관리의 일련의 과정을 나타낸 것이다.

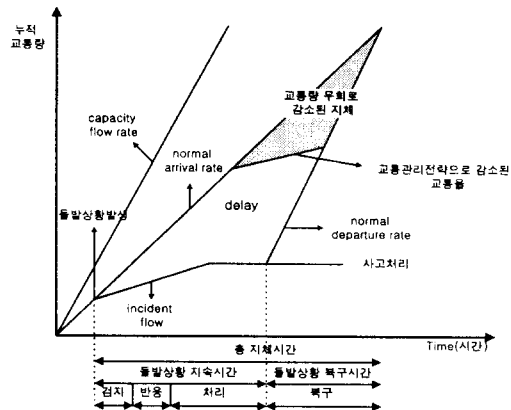


<그림 1> 돌발상황 관리의 과정

- 검지/확인(detection/verification)  
검지 : 돌발상황의 발생유무 결정  
확인 : 유형 및 발생위치 확인.
- 반응(response) : 검지/ 확인 후, 교통류를 정상으로 회복시키기 위해 유형에 적합한 처리방안을 모색하는 과정.
- 처리(clearance) : 돌발상황 및 혼잡상황을 안전하고 신속하게 제거하는 과정.
- 복구(recovery) : 혼잡의 확산·전이 방지를 위해, 교통류를 정상 상태에 되돌려 놓는 과정.

## 3. 교통우회시스템

교통우회시스템은 <그림 2>에서처럼 혼잡구간에 진입하는 도착교통량을 감소시킴으로써 지체를 완화시키는 효과적인 교통관리전략이다.



<그림 2> 교통량 우회로인한 지체감소

결국, 교통우회시스템의 목표는 지체의 감소

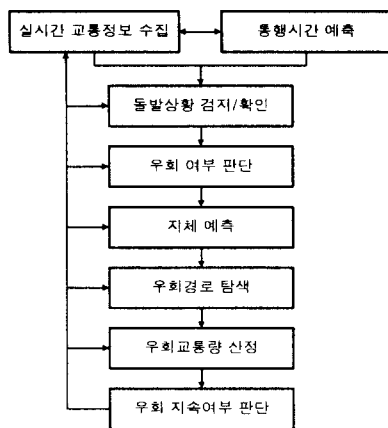
를 극대화할 수 있는 최적의 우회교통량의 산정 및 제어라 할 수 있다. 지금까지 이를 위해 전문가 시스템, mathematical programming models, feedback control 등이 이용되고 있다.

### III. 교통우회시스템의 개발

#### 1. 시스템의 구조 및 가정

본 연구에서 개발한 시스템은 5분 단위로 업데이트되는 교통정보를 이용하여, 돌발상황 상류부에서 출발하는 단위시간대의 교통량에 대한 우회교통량을 산정한다. 이를 위해서 교통정보수집, 통행시간(교통량)예측, 돌발상황 검지/확인, 우회여부 판단, 지체 예측, 경로탐색, 우회교통량 산정의 7개 module로 구성된다.

본 시스템의 개념적 구조는 다음 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 시스템의 개념적 구조

본 연구에서 제시하는 각 module들은 다음과 같은 과정으로 교통우회시스템을 구성한다.

- 도로상의 각종 검지기를 통해서 수집되는 실측 교통자료가 입력 테이블에 기록된다.
- 실측 교통정보의 입력이라는 사건(event)이 발생하면 통행시간 예측기가 활성화되어, 과거와 현재 교통자료를 바탕으로 통행시간을 예측한다.
- time-series 분석에 의해 각 구간별 현재 교통자료와 예측교통자료를 지속적으로 비교하여 돌발상황을 검지한다.
- 돌발상황이 용량에 미치는 영향과 지속시간 등 돌발상황의 유형을 확인·입력한다.
- 다음은 우회전략의 실행여부를 판단한다.

- 각 시간대별로 기점에서 출발하는 교통량 충격파와 만나게 되는 지점을 계산한다. 즉, 각 시간대별 출발교통량이 경험하는 혼잡구간을 예측한다.
- 대안경로의 존재여부 및 이용가능 우회경로를 탐색한다.
- 통행배정모형을 이용하여 이용가능한 우회 경로에 교통량을 배정함으로써, 우회교통량을 산정한다.
- 우회전략의 지속여부를 판단한다.

이를 위해, 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 포함한다.

- 고속도로 교통축과 주변 간선도로의 실시간 교통자료가 5분 단위로 구축된다.
- 기점과 종점간의 시간대별 출발 교통량이 구축되어 있다.
- 지체의 확산에 의한 시간대별 혼잡구간은 모두 동일한 속성을 갖는다.
- 충격파의 속도는 발생시점의 속도로 일정하다.

#### 2. 실시간 교통정보 수집/통행시간예측

통행시간 예측을 위해서는 신경망 모형(neural network model)을 이용한다. 검지기로부터 수집된 도로구간별 통행량 정보 중 일정분량의 자료를 이용하여 신경망 모형을 학습시켜 가중치값을 구한 후 배열에 저장하여 구간별 통행량을 예측하고, 예측된 통행량과 BPR 함수를 이용하여 통행시간을 예측한다.

이 과정은 검지기에서 수집된 현재의 교통정보가 새로이 업데이트되면, 통행시간 예측 module은 새로운 정보의 학습을 통하여 다시 업데이트되고, 새로운 정보가 수집될 때마다 위의 과정이 반복됨으로써 지속적으로 통행시간을 예측한다.

#### 3. 돌발상황 검지/확인

##### 1) 돌발상황 검지

돌발상황을 검지하기 위한 알고리즘으로는 <표 1>과 같이 여러 알고리즘들이 있다.

<표 1> 돌발상황 감지 알고리즘

알 고 리 즈 명	감지율 (%)	오보율 (%)	평균감지 시간(분)
캘리포니아 알고리즘	82	1.73	0.85
All Purpose 알고리즘	86	0.05	2.5
정규분포 알고리즘	92	1.3	1.1
Bayesian 알고리즘	100	0	3.9
Time-Series ARIMA	100	1.5	0.4
Exponential Smoothing	92	1.87	0.7
Low-Pass Filter	80	0.3	4.0
McMaster	68	0.0018	2.2

자료 : An Evaluation of Existing Incident Detection Algorithms, Texas DOT, 1993

본 연구에서는 현재의 교통자료와 예측된 자료의 지속적인 모니터링을 통하여 돌발상황을 검지하는 Time-series 분석방법을 이용하여 돌발상황을 검지하는 구조를 갖는다.

$$\text{즉, If } \frac{t_a^n}{t_a^b + 5} > \epsilon$$

- $t_a^n$  : 구간 a의 실측 현재 통행시간
- $t_a^b + 5$  : 업데이트 되기 이전의 예측통행시간
- $\epsilon$  : 임계치

이때 돌발상황 발생이 발생한 것으로 검지한다.

2) 돌발상황 확인

다음으로는 돌발상황의 유형 특성을 파악하고 지속시간을 예측하여야 한다. 그러나, 도로의 용량에 미치는 영향 및 지속시간 등 돌발상황의 특성을 예측하기란 어려운 문제이다.

<표 2> 돌발상황(고장)의 유형별 분류

유형	차선수	type	용량 감소율(%)	지속시간 (min)
1	2	갓길	5	30
2	2	1개 차로 차단	65	40
3	2	2개 차로 차단	100	45
4	2	3개 차로 차단	N/A	60
5	3	갓길	1	30
6	3	1개 차로 차단	51	40
7	3	2개 차로 차단	83	45
8	3	3개 차로 차단	100	60
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
25	8	갓길	1	30
26	8	1개 차로 차단	22	40
27	8	2개 차로 차단	27	45
28	8	3개 차로 차단	59	60

본 시스템에서는 Lindley의 연구<sup>1)</sup>를 기초로 사고, 고장 유형별로 각각 28개씩, 총 56개의 유형을 구축하였다. 즉, 관리자는 유형을 확인하고 code를 입력하는 방법으로 돌발상황의 특성을 시스템에 입력시킨다.

위의 <표 2>는 본 시스템에서 구축해놓은 고장유형의 특성별 분류이다.

4. 우회여부 판단

돌발상황은 유형에 따라 교통상황에 미치는 영향이 다르므로, 모든 돌발상황에 대해 우회전략을 실행하는 것은 비효율적일 수가 있다. 따라서, 우회전략을 필요로 하는 돌발상황인지를 판단하여야 한다. 실제로는 유형별 과급효과를 분석하여 우회여부 판단 기준을 설정하여야 하나, 본 시스템에서는 돌발상황 발생구간의 서비스 수준이 LOS E 이하일 때 우회전략을 실행하는 것으로 구성하였다.

$$\text{즉, } \frac{x_a^{t+5n}}{c_a} \leq LOS E, \forall n$$

이때 우회전략을 실행한다. 이 때,  $x_a^{t+5n}$  ( $n=0, 1, \dots, n$ )은 예측된 돌발상황 지속시간 동안 구간 a의 시간대별 교통량이고  $c_a$ 는 구간 a의 감소된 용량이다.

5. 지체 예측

돌발상황이 발생하면 지체는 교통축을 따라 상류부로 계속해서 확산되어 가며, 돌발상황이 완전히 처리될때까지 계속되다가 소멸된다. 따라서, 돌발상황이 발생 후 기점을 출발한 교통량은 어느 지점에 다다르면 혼잡구간에 진입하게 된다.

본 시스템에서는 출발교통량과 혼잡구간이 만나는 지점을 예측하기 위해 충격파 이론을 사용한다. 즉, t시점에 돌발상황이 발생하였다고 하면, t시점부터 충격파는 발생지점 상류부로 진행하게 되고, 또한 t시점에서 기점을 출발한 교통량은 어느 지점에 다다르면 충격파와 만나게 되어, 그 지점에서부터 혼잡구간에 진입하게

1) Lindley, J. A. " A Methodology for Quantifying Urban Freeway Congestion," Transportation Research Record 1132, Washington, D.C.

된다. 이 때, 충격파와 교통량이 만나는 지점을 계산할 때는 동적인 구간별 교통자료가 이용된다.

즉, 다음 구간의 통행시간은 확장기반 노드까지의 통행시간에 의해 결정되는데, 예를들어, 5번 노드가 확장기반 노드이고 여기까지의 통행비용이  $m_5$ 라면, 5번 노드를 기반으로 노드를 확장할 때, 다음 노드  $j$ 까지의 통행비용은 다음과 같다.

$$m_j^* = m_5 + c_{5j}^{m_5}$$

여기서,  $m_j^*$  = 출발노드  $h$ 에서 노드  $j$ 까지의 최단 경로비용

$$c_{5j}^{m_5} = m_5 \text{분 후의 구간}(5,j) \text{의 비용}$$

만약,  $m_5 = 18$ 분 이라면 다음 구간의 통행시간은 18분후의 것이 되나, 통행시간이 5분 단위로 예측되므로 15분후의 통행시간을 사용한다.

## 6. 경로탐색

교통량을 대안경로로 우회시킬때는 대안경로의 교통상황을 고려하여야 한다. 이미 혼잡한 대안경로로 교통량을 우회시키는 것은 혼잡을 가중시킬 뿐만 아니라 본선부의 혼잡을 대안경로로 전이시키는 결과만을 초래할 수 있기 때문이다. 따라서, 교통량을 우회시킬때는 우선 이용가능한 경로를 탐색하여야 하며, 이 때는 앞에서 설명한 동적 경로탐색이 되어야 한다.

이용가능한 경로를 탐색할때에는 구간제거<sup>2)</sup>에 의한 방법을 사용할 수 있다. 그러나, 현실적으로는 고속도로상의 대안경로의 수가 많지 않음을 감안하면, 한 두개의 구간으로 인해서 경로가 대안경로에서 제외되는 경우가 발생하여, 대안경로가 존재하지 않는 경우가 발생할 수 있다.

따라서, 본 시스템에서는 돌발상황이 발생한 본선부와 대안경로들의 통행시간을 비교하여, 임계치를 벗어나는 경로는 제외시키는 방법을 사용한다.

2) 구간제거에 의한 경로탐색 방법은 각 구간의 시간대별 서비스 수준을 미리 설정된 임계치와 비교하여, 임계치를 벗어나는 도로구간은 교통망상에서 가상으로 제거한 다음, 나머지 도로구간만으로 이용가능한 경로를 구성하는 구간제거 방법이다.

## 7. 우회교통량 산정

일반적인 통행배정 기법에서는 자유류의 상태를 가정하므로 실제의 교통상황을 잘 반영하지 못한다. 따라서, 현실적인 시스템을 구축하기 위해서는 경로상에 존재하는 교통량을 고려하여야 한다. 본 시스템에서는 BPR 함수식의 입력변수인 구간의 교통량에 각 구간에 이미 존재하는 교통량을 고정해 놓음으로써 이를 구현하고자 하였다.

$$\text{즉, BPR function} = t_0 \left\{ 1 + 0.15 \left( \frac{v + v^{pre}}{c} \right)^4 \right\}$$

$v$  : 배정 교통량

$v^{pre}$  : 각구간에 존재하는 교통량

으로 수정할 수 있다.

그러나, 이 함수식은 한 시점의 교통량을 고정시켜놓음으로써, 교통량의 진입, 진출을 고려하지 못한다. 따라서, 보조해를 찾기위한 경로탐색시에 통행시간의 변화의 time-series에 해당하는 예측 교통량을 입력하는 방법으로 다음과 같이 다시 한번 수정된다.

$$\text{BPR function} = t_0 \left\{ 1 + 0.15 \left( \frac{v_a^{t+5n} + v}{c} \right)^4 \right\}$$

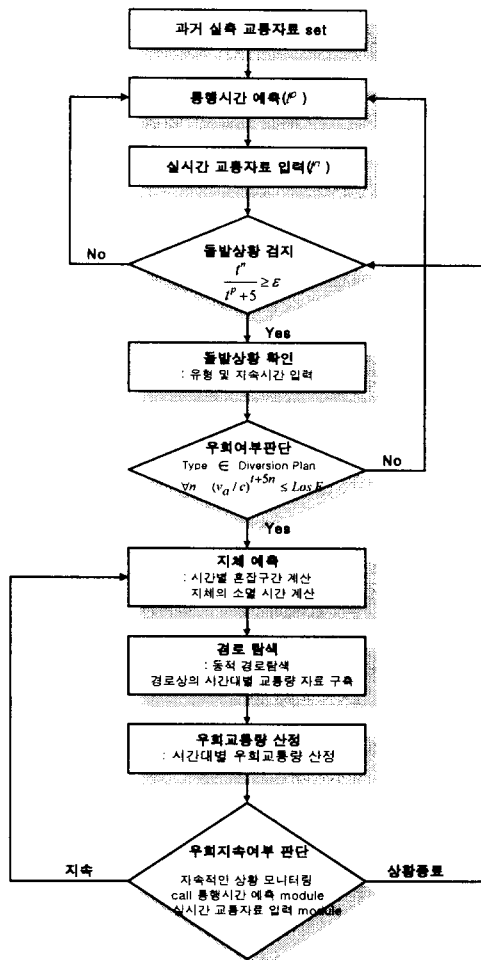
$v$  : 배정 교통량

$v_a^{t+5n}$  :  $a$ 구간의  $t+5n$ 시점에서의 예측 교통량 ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )

위의 수정된 BPR 함수를 이용자평형 모형에 이용하여, 각 시간대별로 목적함수를 최소화하는 대안경로상의 교통량을 산출한다.

## 8. 교통우회시스템 알고리즘

본 연구에서 개발한 교통우회시스템은 앞에서 제시한 각 module들에 의해서 구성이 된다. 다음 <그림 4>는 교통회시스템의 알고리즘을 도식화한 것이다.



<그림 4> 교통우회시스템 알고리즘

#### IV. 결론 및 추후 연구과제

지금까지 교통우회시스템의 필요성을 제시하고, 혼잡을 유발하는 돌발상황을 고찰하였으며, 각 기능별 module들로 구성된 교통우회시스템의 구조를 제시하였다.

돌발상황이 발생하였을 경우 혼잡구간 상류부의 교통량을 대안경로로 우회시킴으로써, 사회적비용을 절감시키고 교통시설의 효율을 증대시킬 수 있다. 그러나, 현재 고속도로 상황은 막대한 재원을 투자하여 첨단교통시설을 구축하였음에도 불구하고, 단순히 하류부의 혼잡정보만을 제공하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 실시간 교통자료를 바탕으로 하는 기능별 module들을 제시하였으며, 이를 결합하여 돌발상황에 능동적이고 신속하게 대응할 수 있는 교통우회시스템의 알고리즘 구조를 제시하였다. 이 시스템의 구현과 실제적인 적

용을 위해서는 각 세부 module들에 대해 보다 세부적인 모형의 정립이 이루어져야 한다. 특히, 모든 module들의 입력변수가 되는 교통상황의 예측에 대해서는 더욱 정확한 모형의 정립이 필요하며, 산출된 우회교통량에 대한 제어 기법에 관한 연구가 수반되어야 한다.

#### 참고문헌

1. 노정현, 교통계획 -통행수요이론과 모형-, 나남출판, 1999
2. 원제무, 도시교통론, 박영사, 1996
3. 김동욱, "혼잡한 고속도로교통축의 실시간 교통우회전략에 관한 연구", 한양대 환경대학원 석사학위 논문, 1998
4. 박형준, "블랙보드 시스템을 이용한 동적 경로안내 시스템(SHARP)의 개발", 한양대 석사학위 논문, 1998
5. 손봉수, "두 연속류 분석방법의 교통혼잡영향 평가 결과의 일치성 검증", 대한교통학회지, 제 15권 제 1호, 1997
6. Kann Ozbay., Pushkin Kachroo, Incident Management in Intelligent Transportation Systems, Artech House, Boston · London
7. Y Sheffi, Urban Transportation Networks : equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice Hall, New Jersey, 1985
8. A. J. Khattak., J. L. Schofer and F. S. Koppelman, "Commuters' enroute diversion and return decisions : Analysis and Implications for advanced traveler information systems, Transp. Res.-A, vol. 27A. No. 2, pp 101-111,
9. Takamasa Akiyama, Koji Yasuda, "Descriptive Models of a Transfer System for Urban Expressway Networks, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol 2. 19971993
10. A. G. Hobeika, "Real-Time Traffic Diversion Model : Conceptual Approach", Journal of Transportation Engineering. Vol. 119, 1993