

■ 論 文 ■

# VMS의 과도반응과 통행집중 문제를 고려한 예측적인 운영전략

Predictive and Strategic VMS Control to Cope with Overreaction and Concentration Problem.

박 은 미

(목원대학교 건축도시공학부 부교수)

## 목 차

- I. VMS 운영의 과도반응과 통행집중 문제
  - II. 과도반응 및 통행집중 대응을 위한 요구사항
  - III. 예측적 피드백 제어 알고리즘
  - IV. 예시
  - V. 본 연구의 한계 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : VMS 운영, VMS 자동제어, 피드백제어, VMS 정보제공, 예측적 제어

## 요 약

VMS를 통한 정보제공에는 과도반응과 통행집중의 위험부담이 따른다. 즉 대안경로간에 이루어져야 할 통행배분을 정확히 유도할 수 있는 VMS 메시지란 존재치 않는다. VMS 메시지에 의해 특정 경로가 교통상황이 타 경로에 비해 좋다고 정보가 주어질 때, 그 정보에 대한 과도반응과 그 특정경로에 대한 통행집중 문제가 발생하여 정보제공에 의해 오히려 상황이 악화될 수 있다. 본 연구에서는 대안경로간의 물리적 특성 측면에서 우열이 있는 가상 네트워크를 대상으로 하여, 과도반응과 통행집중 문제를 극복하고 대안경로간의 적절한 통행배분을 달성하기 위한 VMS 운영알고리즘을 개발하는 것을 목표로 한다. VMS 정보제공 결과, 즉 VMS를 통해 상황이 좋다고 알려진 경로에 통행이 집중할 경우 문제가 될 것인가 여부를 미리 예측해 보고, 문제가 될 경우 정보제공 전략을 수정하도록 하는, 피드백 제어에 예측적 방식을 접목하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘의 주요 기능은 다음과 같다.

1. 교통량, 속도 등에 대한 실시간 모니터링 시스템이 구축되어 있음을 전제로 한다.
2. 실시간 제어에는 모니터링 결과와 이에 근거한 정보제공전략의 시행사이에는 시간차가 존재한다. 이러한 시간차 이로 인하여 단기예측이 필요하고, 이를 수행하는 모듈이 있다.
3. 정보제공 결과로 특정 경로에 과부하가 걸리는지 여부를 예측하기 위하여, 그 판단기준으로 그 경로의 실제 용량 산정이 필요하다. 이에 혼잡의 시공간적 전개에 따라 변하는 동적 용량을 산정하는 모듈이 있다.
4. 대안 경로간 통행배분 목표치를 수리적으로 산정할 수는 있으나, 이를 자동적으로 이루어 주는 메시지는 존재하지 않는다. 아울러 현실적으로 예측 불가능한 외란을 모형에 의존하여 예측하기 보다는, 지속적인 피드백 레귤레이터(Regulator) 작동에 의해 보정하여 목표를 달성해 가는 자동제어 기능을 갖고 있다.

## I. VMS운영의 과도반응과 통행집중 문제

네트워크 상에는 대안경로가 존재한다. 네트워크의 효율 제고를 위해서는, 정보제공이나 제어 등을 통해 대안경로간의 적절한 통행배분을 이루는 것이 필요하다. 운전자의 경로선택 경향은 네트워크 특성과 이에 대한 운전자의 경험과 지식에 영향을 받는다. 대안경로간의 물리적 특성이 비슷하다고 하면, 확률적 선택에 의해 어느 정도-최적은 아니더라도- 통행 배분이 이루어질 수 있다. 그러나 대안경로간의 물리적 상황이 물리적 병목존재나 경로길이 등에서 차별화되어 있을 때 물리적 상황이 우세한 경로에 통행이 집중되어, 경로간의 적절한 통행배분만 이루어진다면 문제가 없을 곳도 통행 집중으로 문제가 되기도 한다. 예컨대, 고속도로와 그 대안경로로서 신호가로, 고속도로 진출입이 있는 구간과 그에 대한 Bypass 등이 그 예인데, 이러한 곳은 교통상황에 따라 VMS를 활용한 적절한 통행배분이 요구된다.

VMS를 통한 정보제공에는 과도반응과 통행집중의 위험부담이 따른다. 즉 대안경로간에 이루어져야 할 통행배분을 정확히 유도할 수 있는 VMS 메시지란 존재치 않는다. VMS 메시지에 의해 특정 경로가 교통상황이 타 경로에 비해 좋다고 정보가 주어질 때, 그 정보에 대한 과도반응과 그 특정경로에 대한 통행집중 문제가 발생하여 정보제공에 의해 오히려 상황이 악화될 수 있다. 이를 VMS 운영상에 발생할 수 있는 과도반응과 통행집중이라 하며, 이러한 문제를 정확히 인식하고 적절한 대응을 하는 것이 필요하다.

본 연구는 물리적 상황의 우열이 있는 대안도로가 있는 네트워크에서 적절한 통행배분을 달성하기 위한 VMS 운영알고리즘을 제시함을 그 목적으로 한다. 이때 VMS 운영상에 나타나는 과도반응과 통행집중 문제에 대응하기 위한 예측적 운영알고리즘을 제시한다.

## II. 과도반응 및 통행집중 대응을 위한 요구사항

VMS 운영에 있어, 현재의 교통상황을 그대로 알려주는 정보제공은 과도반응과 이에 따른 통행집중 문제를 일으킬 수 있고 이에 대한 적절한 대응이 필요함을 앞서 지적한 바 있다. Valdes-Diaz 등(2000년)은 유고 시나리오하에서 네트워크 상의 VMS를 통해 달성해야 할 최적 통행 배분량을 산정하였으나, VMS를 통해

이러한 통행배분량을 어떻게 달성할 지에 대한 방법론은 제시하지 못하였다. Oh and Jayakrishnan(2001년)은 VMS의 통행집중 문제에 대응하기 위하여 정보제공 갱신 시간을 조절할 것을 제안하였고, 이러한 제어의 잠재적 이득을 거시적으로 평가한 바 있다. 그러나 현장에서 구축 가능한 구체적 대안을 제시하지는 못했다.

본 연구의 선행연구에서는 VMS의 통행집중 문제를 인식하고 시스템 최적 통행배분을 달성하기 위한 피드백 자동제어 방식을 제안한 바 있으며, 피드백 자동제어 방식이 안고 있는 고유의 문제인 진동(Oscillation) 문제에 대응하기 위해 예측적 제어방식의 개발을 향후과제로 제시한 바 있다(박은미, 2002년, Park, 2003년). 피드백 자동제어 방식은 현실의 불확실성 즉 외란(Disturbances)에 효과적인 대응이 가능한 반면, 진동문제를 가지고 있다. 더욱이 VMS 제어의 경우에는, 정보제공 매체로서 VMS가 가진 한계인 통행집중 문제로 인하여, 이 진동문제는 더욱 첨예하게 나타날 것으로 판단된다. Sawaya 등(2000년)은 예측적 VMS 피드백 제어의 개념적 틀을 제시한 바 있다. 즉 온라인 시뮬레이터를 통하여 통행시간을 예측하고 대안경로간의 예측통행시간을 균등화하는 제어 방식을 제시하였다. 그러나 제안한 방식은 개념적 틀에 머물고 있어 구체화가 필요하다.

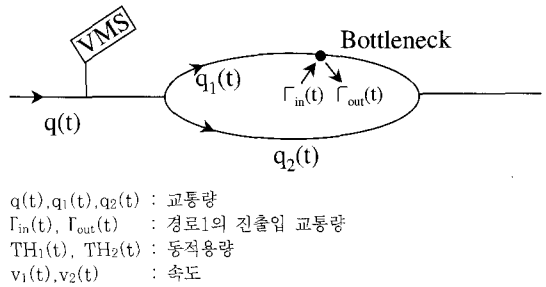
본 연구에서는 VMS 운영상의 과도반응과 통행집중 문제에 대응하기 위한 알고리즘으로, 본 연구의 선행연구에서 제안한 피드백 방식을 고수한다. 피드백 제어는 외란의 영향이 Output에 반영되었다는 가정 하에, 관측 가능한 Output 값을 Regulator로 피드백하여 Input 값을 결정하는 방식이다. 이 방식은 외란의 불확실성이나 모형의 정확도에 상대적으로 덜 민감하다(Y. Pavlis and M. Papageorgiou, 1999, A. Messmer & M. Papageorgiou, 1994). 교통류의 특성상 정확한 모델링이 이루어지기 어렵고, 또한 현실을 상대적으로 정확히 묘사한 모형의 경우는 데이터의 요구량과 계산의 복잡성으로 인하여 실시간 제어에는 적합하지 않다(박은미, 2002년). 이러한 맥락에서 본 논문에서는 VMS 제어에 모형의 정확도에 의존도가 높고 관측 불가능하고 불확실성이 큰 외란의 값이 요구되는 피드포워드 방식보다는 피드백제어방식을 택하고, 여기에 예측적 방식을 접목하는 접근방식을 제안한다. 즉 VMS 정보제공 결과, 즉 VMS를 통해 상황이 좋다고 알려준 경로에 통행이 집중할 경우 문제가 될 것인가 여부를 미리 예측해 보고, 문제가 될 경우 정보제공 전략을 수정하도록 하는 방식

을 택한다. 이러한 예측을 위하여는 다음과 같은 구체적인 요구사항이 도출된다.

1. 교통량, 속도 등에 대한 실시간 모니터링 결과가 필요하다.
2. 실시간 제어에는 모니터링 결과와 이에 근거한 정보제공전략의 시행사이에는 시간차가 존재하여, 이러한 시간차이로 인한 단기예측이 필요하고 따라서 단기예측을 수행하는 모듈이 필요하다.
3. 정보제공 결과로 특정 경로에 과부하가 걸리는지 여부를 예측하기 위하여, 그 판단기준으로 그 경로의 실제 용량 산정이 필요하다. 이때의 용량은, 도로용량편람 상에서 제시하고 있는 용량이 아닌, 혼잡의 시공간적 전개에 따라 변하는 동적용량이어야 한다(박은미, 2004년). 이러한 동적용량의 산정방법은 다음 장에서 구체적으로 논하도록 한다.
4. 앞서도 언급한 바 있듯이, 대안 경로간 통행배분 목표치를 수리적으로 산정할 수는 있으나, 이를 자동적으로 이루어 주는 메시지는 존재하지 않는다. 아울러 현실의 불확실성이 존재하고, 이러한 외란을 모형에 의존하여 예측하고 처리하는 방식은 VMS 제어에는 적합하지 않다. 이러한 맥락에서, 지속적인 피드백 레귤레이터(Regulator) 작동에 의해 보정하여 목표를 달성해가는 자동제어 방식이 요구된다.

### III. 예측적 피드백 제어 알고리즘

본 연구에서는 대안경로간의 물리적 특성 측면에서

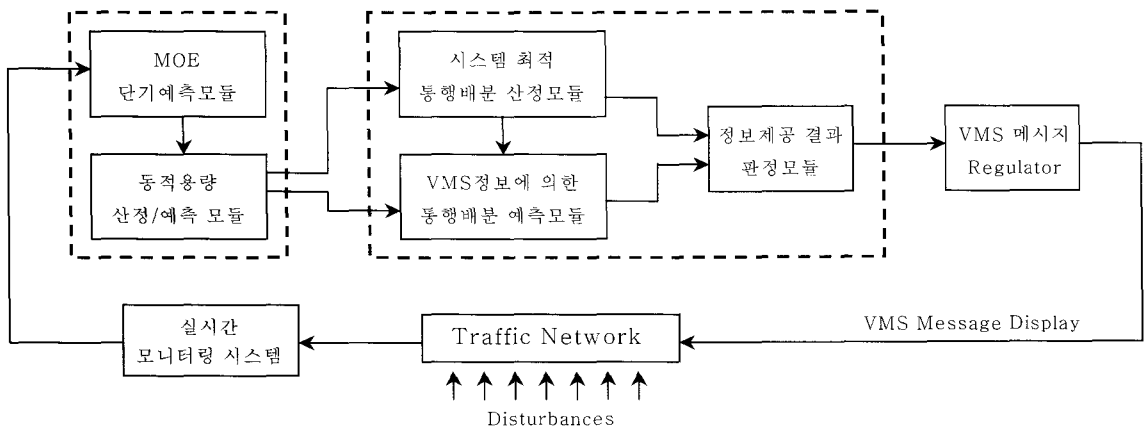


〈그림 1〉 분석대상 네트워크

우열이 있는 가상의 고속도로네트워크를 대상으로 하여 알고리즘을 개발 한다. 〈그림 1〉에서 제시된 바와 같이, 가상 네트워크에는 두 개의 대안 경로가 존재하며 분기점 전방에 VMS가 위치한다. 경로 1에는 진출입구가 있어 물리적 병목이 존재하고, 경로 2는 물리적 병목이 없이 Bypass로 되어 있다. 경로 1에 존재하는 진출입구의 진출입은 한 점에서 이루어지고, 두 대안경로의 물리적 길이는 같다고 가정한다.

앞장에서 도출한 알고리즘 요구사항을 기본으로 한 예측적 피드백 제어 알고리즘은 다음과 같은 모듈로 구성되며, 이하에서는 이들 각각의 모듈에 대하여 구체적으로 설명하도록 한다 (〈그림 2〉 참고).

1. 실시간 모니터링 시스템 자료에 의한 MOE 단기 예측 모듈
2. 동적용량 산정/예측 모듈
3. 시스템 최적 통행배분 산정 모듈
4. VMS 정보제공에 의한 통행배분 예측 모듈
5. 정보제공 결과판정 모듈
6. VMS 메시지 레귤레이터 모듈



〈그림 2〉 VMS예측적 피드백제어 알고리즘 개념

### 1. 실시간 모니터링 시스템 및 단기예측 모듈

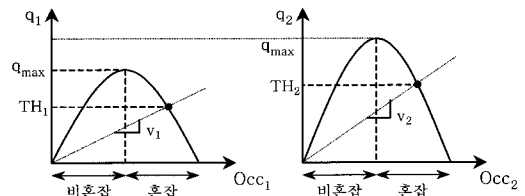
본 연구에서 제안하는 알고리즘은 네트워크에 실시간 모니터링 시스템이 있음을 전제로 한다. 실시간 모니터링 시스템으로부터 수집된 자료들은 이미 과거 자료이며, 다음 시간대 제어전략 수립에는 이를 근간으로 단기 예측한 자료를 쓴다. 단기예측 모듈은 이러한 역할을 수행하며, 본 알고리즘에서 필요로 하는 단기예측 자료는 평균속도, 교통량 등이다. 실시간 모니터링 자료에 대한 단기예측 방법에 대하여는 많은 선행 연구들이 있으며, 이들 방법에 대한 비교분석 및 선택은 본 연구의 범위에서 제외하고 향후과제로 남겨둔다.

### 2. 동적용량 산정/예측 모듈

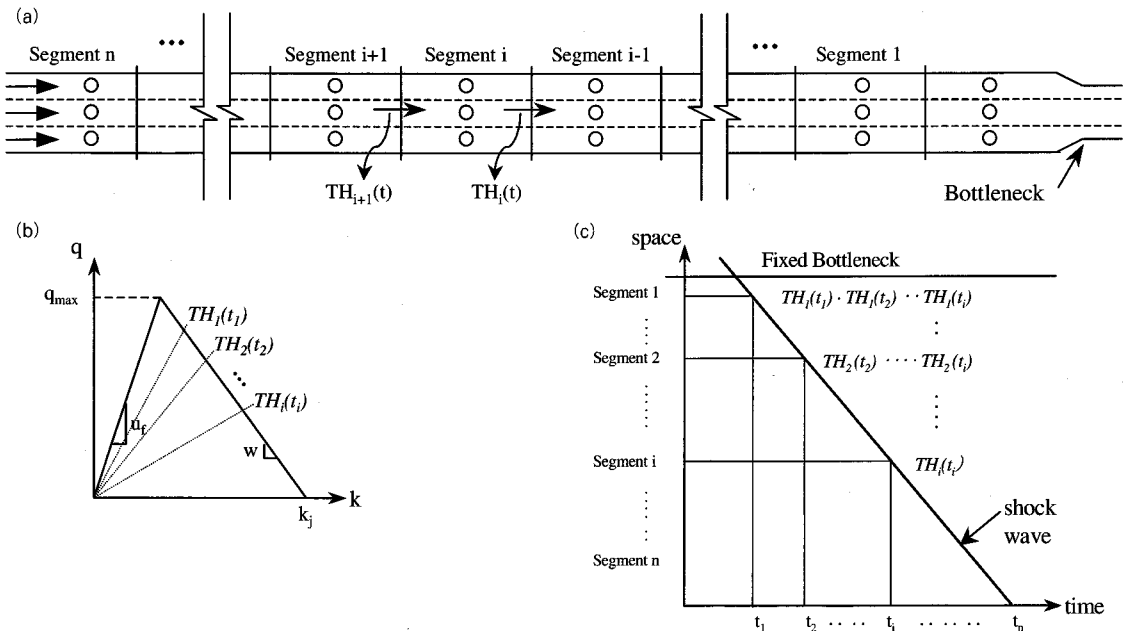
이 모듈에서는 실시간 교통상황에 따라, 특히 혼잡 교통류에서 혼잡의 시공간적 전개에 따라 발생하는 통과가능량(Throughput)의 감소를 반영한 동적 용량 산정/예측을 수행한다. 대안경로에서 어느 정도의 교통량을 수용할 수 있는가를 정확히 예측하는 것이, VMS

정보제공 결과로 인해 문제가 발생할 것인가 여부를 판단하는데 중요하다. 따라서 기존의 도로용량편람 상의 용량이 아닌 새로운 개념의 동적용량 사용을 제안하였고, 박은미(2004년)는 이러한 동적용량을 최대가능처리량(Maximum Sustainable Throughput)로 정의하고 Kinematic Wave Theory에 의한 산정방식을 제시한 바 있다. <그림 3>은 Newell의 단순화된 q-k 모형에 의해 동적용량을 산정하는 개념을 나타낸다.

실제 동적용량 산정은 하류부의 혼잡의 영향이 상류부로 전파되는 것의 함수로 산정하나, 본 연구에서 대상으로 하는 단순 네트워크의 동적용량은 간단히 다음



(a) 경로1 (b) 경로2  
<그림 4> 가상네트워크의 동적용량 산정



$t_i$  : 충격파가 Segment i에 도달하는 시간  
 $q_i(t)$  : Segment i의 검지기에서 수집된 교통량  
 $TH_i(t)$  : Segment i 하류부 끝의 최대가능처리량(Maximum Sustainable Throughput)

출처 : 박은미(2004년), "혼잡교통류관리를 위한 동적용량의 개념 및 산정방법", 대한교통학회지 제22권 제3호

<그림 3> 혼잡교통류의 동적용량 변화

과 같은 과정을 거쳐 산정한다.

단계1: <그림 4>와 같이, 실시간 수집자료 DB로부터 경로 1과 경로 2의 교통량 vs. 점유율 산포도를 그려 관계식을 도출한다.

단계2: 실시간 모니터링시스템과 단기에측 모듈로부터 나온 속도 예측자료를 이용하여, <그림 4>에서와 같이, 교통량-점유율 곡선과 속도를 기울기로 하며 원점을 지나는 직선과의 교점을 구한다

단계3: 이 교점이 혼잡영역에 있는지, 비 혼잡영역에 있는지 판단한다.

단계4: 이 교점이 비혼잡 영역에 있을 때에는 교통량-점유율 곡선의 꼭지점, 즉  $Q_{max}$ 을 용량으로 하고, 혼잡영역에 있을 때에는 이 교점의  $y$ 좌표값 TH를 용량으로 한다.

### 3. 시스템 최적 통행배분 산정 모듈

박은미(2002년)는 시스템 최적은 대안경로간의 여유용량이 균등해 지는 통행배분으로 정의한 바 있다. 본 연구에서도 대안경로간 여유용량이 균등해 지는 통행배분을 시스템 최적 통행배분으로 정의하도록 한다. 이때 여유용량은 위에서 제시한 동적용량을 기본으로 하여 산정한다. 본 연구의 선행연구에서는, 신호가로망을 대상으로 대안경로간의 시스템 최적 통행배분량을 구하기 위해 레플레이터를 설계한 바 있다. 신호가로망을 대상으로 한 경우, 다양한 O-D 존재, 회전교통량 등 불확실성 때문에 수리적으로 통행배분을 구하는 것보다 레플레이터에 의한 피드백 방식을 택한 바 있다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하는 단순한 고속도로 네트워크에서는 간단한 수식에 의해 구하는 방식을 택한다. 구체적인 시스템 최적 통행배분 산정은 제IV장에서 제시하도록 하겠다.

### 4. VMS 정보제공에 의한 통행배분 예측 모듈

이 모듈에서는 실시간 모니터링 시스템에서 얻어진 속도 등 경로 MOE를 토대로, 경로의 교통상황에 대한 VMS 메시지가 제공되었을 때, 어떠한 통행배분이 나타날 것인가 예측하는 작업을 수행한다. 이 통행배분 예측 모듈은 다음과 같은 가정을 바탕으로 통행배분량을 예측한다.

가정1: 경로선택이 가능한 교통량과 그렇지 못한 교

통량을 분리 예측할 수 있다.

가정2: 경로선택이 가능한 교통량의 경우, VMS 메시지를 통해 교통상황이 우세하다고 알려진 경로에 집중된다.

가정3: 경로상황에 대한 정보가 주어지지 않는 경우, 경로선택이 가능한 교통량은 물리적으로 우세한 경로에 집중된다.

본 연구에서 대상으로 하는 네트워크에서 경로선택이 가능한 교통량은, 총 교통량에서 경로 1의 진출부를 통해 나가는 교통량을 뺀 값이 된다. 경로 1의 진출부를 통해 나가는 교통량은 위의 실시간 모니터링 및 단계예측 모듈을 통해 예측할 수 있다고 가정한다. 이 모듈에서는 우세한 경로에 모든 통행이 집중한다는 가정에 입각하여, VMS 정보제공의 결과로 나타날 통행배분을 예측한다. 물론 상황이 우세한(혹은 우세하다고 알려진) 경로에 통행이 집중하는 정도는, 운전자의 경험 등 제반 요소에 따라 달라진다. 이 모듈의 목적은, 현실의 불확실성내지 운전자의 행태를 반영한 정확한 통행배분량 산정 그 자체보다는, VMS 정보제공으로 인해 통행이 집중되는 최악의 경우에 얼마나 문제가 될지를 판단하고 정보제공전략을 수정하는 데에 있다. 이러한 맥락에서 경로 선택이 가능한 모든 통행은 우세한 경로에 집중한다고 가정하였다. 그러나 운전자의 경로 선택 경향에 대한 객관적 수치 도출이 가능하다고 할 때 그 값을 본 연구에서 제안하는 알고리즘에 적용해도 무방하다. VMS 정보제공에 의해 이루어지는 통행배분의 구체적 산정 방법은 제IV장에 제시하도록 한다.

### 5. 정보제공 결과판정 모듈

이 정보제공 결과판정 모듈에서는, 위의 시스템 최적 통행배분 산정 모듈과 VMS 정보제공에 의한 통행배분 예측 모듈에서 산출된 결과를 비교한다. 이 비교를 통하여 VMS 정보제공으로 인해 각 대안경로에 과다 혹은 과소 통행부하 문제가 있는가 여부를 판단하도록 한다. 그리고 이러한 판단여부에 따라 다음의 VMS 메시지 레플레이터 모듈에서 메시지 표출 전략을 수정하여 만들어 내게 된다.

본 연구에서 대상으로 하는 가상네트워크상의 두 경로 1과 2는, 교통상황의 우열에 따라 상황이 우위에 있는 경로  $f$ 와 열세인 경로  $uf$ 로 다시 구분한다. 각 대안경로들의 시스템최적 통행배분량과 예측된 통행배분

〈표 1〉 정보제공 결과 판정 유형

수요 vs. 용량	통행배분		
	$\epsilon_f = \epsilon_f^o$	$\epsilon_f > \epsilon_f^o$	$\epsilon_f < \epsilon_f^o$
$q(t) < TH(t)$	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3
$q(t) > TH(t)$	Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3

$TH(t) = TH_f(t) + TH_{uf}(t) - \Gamma_m(t)$   
 $TH_f(t), TH_{uf}(t)$  = 경로  $f$ 와 경로  $uf$ 의 동적용량  
 $\Gamma_m(t)$  = 경로  $l$ 의 진입교통량(〈그림 1〉의 가상 네트워크 참고)  
 $q(t)$  = 네트워크 상류부 총 교통량  
 $\epsilon_f$  = VMS정보제공에 의한 경로  $f$ 의 선택비율  
 $\epsilon_f^o$  = 시스템 최적 경로  $f$  선택비율

량을 비교할 때, VMS 정보제공 결과는 〈표 1〉과 같은 경우로 나뉘어 진다. 〈표 1〉에서 Case 2-1, 2-2, 2-3의 경우는 근본적으로 네트워크의 수요가 용량을 초과하는 경우로, VMS 정보제공만으로 교통상황의 개선을 기대하기 어려운 경우이다. 반면, Case 1-1, 1-2, 1-3의 경우는 대안경로간의 적절한 통행배분을 통해, 교통상황의 악화 내지 혼잡교통류로의 전이를 막을 수 있는 경우에 해당된다. 이 중 Case 1-2는 VMS 정보제공으로 인하여 경로  $f$ 에 통행이 과다하게 집중된 상황을 나타내며, Case 1-3은 정보제공으로도 경로  $f$ 에 충분히 통행이 배분되고 있지 못함을 나타낸다. Case 1-1은 수요측면에서도 통행배분 측면에서도 문제가 없는 상황이다.

**6. VMS 메시지 레귤레이터 모듈**

본 VMS 메시지 레귤레이터 모듈에서는, 위에서 설명한 정보제공 결과 판정에 따라 적절한 통행 재배분을 이루기 위하여 제공될 VMS 메시지를 조절하는 작업을 수행한다. 〈표 1〉에서 제시한 각 경우에 대하여 다음과 같은 논리에 의해 레귤레이터가 작동된다.

전체적인 통행수요가 대안경로간의 총 용량을 초과하지 않는 Case 1-1, 1-2, 1-3의 경우 VMS 메시지 수정은 다음과 같이 한다.

Case 1-1: VMS 정보제공으로 특별한 문제가 발생하지 않는 경우로, 현재상태에서 상황에 변하는 가에 계속 모니터링을 수행하도록 한다.

Case 1-2: VMS 정보제공으로 경로  $f$ 에 통행이 과다하게 집중하여, 정보제공에 의해 교통상황이 악화될 수도 있는 경우이다. VMS 정보제공으로 발생할 수 있는 최악의 경우로서, 경로  $f$ 에 대한 정보를 주는 것을 보류하거나 정보제공시간을 단축해야 한다.

Case 1-3: VMS 정보제공으로도 경로  $f$ 가 충분한

통행을 흡수하지 못하여, 경로  $uf$ 에 통행이 과다하게 배분된 경우이다. 경로  $f$ 에 보다 적극적으로 통행을 유도하는 전략으로 수정한다.

전체적인 통행수요가 대안경로간의 총 용량을 초과하는 Case 2-1, 2-2, 2-3의 경우는, 어떠한 통행재배분을 통하여도 수요가 용량을 초과하는 것을 막을 수는 없다. 다만 초과된 수요의 부하가 어느 경로에 얼마큼 가도록 제어할 것인가는 가치판단의 문제로서 운영자의 선택이 필요하다. 운영자가 선택할 수 있는 운영목표의 대안으로는 다음과 같은 것이 있다.

목표 1: 초과용량이 균등화 되도록 한다.

목표 2: 특정 경로는 되도록 용량을 초과하지 않도록 유지한다.

목표 1은 대안경로의 위계가 같은 경우에, 목표 2는 대안경로간의 위계가 있는 경우 위계가 높은 도로의 기능을 보호하기 위해 선택할 수 있는 대안이다. 목표 1을 선택하였을 때의 초과용량은 여유용량과 같은 개념으로 부호만 반대가 되는 값이다. 즉 수요가 용량을 넘지 않을 때에는 여유용량이 넘을 때에는 초과용량이 발생한다.

**1) 목표 1을 선택한 경우:**

Case 2-1: 메시지 수정 없이 교통상황이 변하는 가 계속 모니터링 한다.

Case 2-2: 경로  $uf$ 로 보다 많은 통행을 유도하는 메시지로 수정한다.

Case 2-3: 경로  $f$ 로 보다 많은 통행을 유도하는 메시지로 수정한다.

**2) 목표 2를 선택한 경우:**

본 논문에서 대상으로 하는 가상네트워크 경우는 Bypass가 되는 경로 2가 용량을 초과하지 않도록 운영한다고 가정한다. Case 2-1, 2-2, 2-3에 상관없이,  $q_2(t)$ 가  $TH_2(t)$ 에 근접하게 운영될 수 있도록 메시지를 조절해 준다.

**IV. 예시**

앞장에서 제안한 알고리즘을 〈그림 1〉의 가상 고속

도로네트워크를 대상으로 재현하면 다음과 같다. 가상 네트워크는 두 개의 대안경로로 구성되어 있는데, 경로 1에는 진출입구에 의한 물리적 병목이 존재하고 경로 2는 Bypass 역할을 한다. 경로 1과 2가 분기되는 지점 상류부에 VMS가 설치되어 있어 운전자의 경로선택을 돕도록 되어 있다고 가정한다. 이러한 형태의 네트워크에서는, VMS 정보제공에 대한 과도반응과 통행집중 문제가 아울러 정보가 주어지지 않았을 때 경로 2에 통행이 집중되는 문제도 함께 고려해야 한다.

시간  $t$ 에 가상네트워크에 진입하는 교통량을  $q(t)$ 라고 하고, 경로 1에서 진출입하는 교통량을  $\Gamma_{out}(t)$   $\Gamma_{in}(t)$ 라 하면, 경로 1과 2의 통행배분량  $q_1(t)$ ,  $q_2(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q_1(t) &= \Gamma_{out}(t) + (q(t) - \Gamma_{out}(t)) * (1 - \varepsilon) \\ q_2(t) &= (q(t) - \Gamma_{out}(t)) * \varepsilon \\ \text{where, } \varepsilon &= \text{경로 2를 선택하는 비율} \end{aligned}$$

VMS 정보제공에 의해, 달성되리라고 예측되는  $\varepsilon$  값과 이에 따른  $q_1(t)$ 과  $q_2(t)$  값을 산정하기로 한다. 이러한 예측은 다음과 같은 가정에 기초한다.

*가정 1:* 경로상황에 대한 정보가 제공되지 않거나, 두 경로의 상황이 같다는 정보가 제공되면, 통행은 경로 2에 집중된다.

*가정 2:* 어느 한 경로의 상황이 우세하다는 정보가 제공될 경우, 통행은 그 경로에 집중된다.

*가정 3:* 경로 2의 선택비율  $\varepsilon$ 는 0 아니면 1이 된다. (만일 실제  $\varepsilon$  값을 적절히 선택할 수 있다고 하면 0과 1사이의 값을 사용해도 무방하며, 이하에서 제시할 분석절차를 그대로 적용하는 것이 가능하다.)

$\varepsilon = 1$ 이 되는 VMS 메시지 유형은 다음과 같고, 이때 통행배분량은 식(1)과 식(2)와 같다.

- 메시지 1. 정보가 주어지지 않음.
- 메시지 2. 경로 2의 상황은 좋으나 경로 1은 나쁘다
- 메시지 3. 경로 2과 경로 1의 상황이 모두 좋다

$$\begin{aligned} q_1(t) &= \Gamma_{out}(t) & (1) \\ q_2(t) &= q(t) - \Gamma_{out}(t) & (2) \end{aligned}$$

$\varepsilon = 0$ 이 되는 VMS 메시지 유형은 다음과 같고, 이때 통행배분량은 식(3)과 식(4)와 같다.

메시지 4. 경로 1은 좋으나 경로 2는 나쁘다.

$$\begin{aligned} q_1(t) &= q(t) & (3) \\ q_2(t) &= 0 & (4) \end{aligned}$$

물론 이는 극단적인 통행집중을 가정한 통행배분 예이며, 위에서 언급한 바와 같이 실제로는 이러한 극단을 피한 적절한 값을 가정하여 사용할 수 있다.

VMS 정보제공에 의해 실제 나타나리라 예측되는 통행배분과 달리, 시스템 최적 관점에서 달성되어야 할  $\varepsilon$  값을 산정해 보도록 하겠다. 이때 시스템 최적은, 박은미(2002년)가 제안한 여유용량을 균등화시키는 통행배분으로 한다.

$$\begin{aligned} \delta_1(t) &= TH_1(t) - q_1(t) - \Delta\Gamma(t) \\ \delta_2(t) &= TH_2(t) - q_2(t) \\ \text{where, } \delta_1(t), \delta_2(t) &= \text{경로 1과 2의 여유용량} \\ TH_1(t), TH_2(t) &= \text{경로 1과 2의 동적용량} \end{aligned}$$

$$q_1(t) = \Gamma_{out}(t) + (q(t) - \Gamma_{out}(t)) * (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

$$q_2(t) = (q(t) - \Gamma_{out}(t)) * \varepsilon \quad (6)$$

$$\Delta\Gamma(t) = \Gamma_{in}(t) - \Gamma_{out}(t)$$

두 경로의 여유용량이 같게 되는 최적의 경로 2 선택비율  $\varepsilon^0$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \delta_1(t) - \delta_2(t) &= 0 \\ TH_1(t) - q_1(t) - \Delta\Gamma(t) - TH_2(t) + q_2(t) &= 0 \quad (7) \end{aligned}$$

식(7)에  $q_1(t)$ ,  $q_2(t)$  대신 식(5)와 식(6)을 대입하여  $\varepsilon^0$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

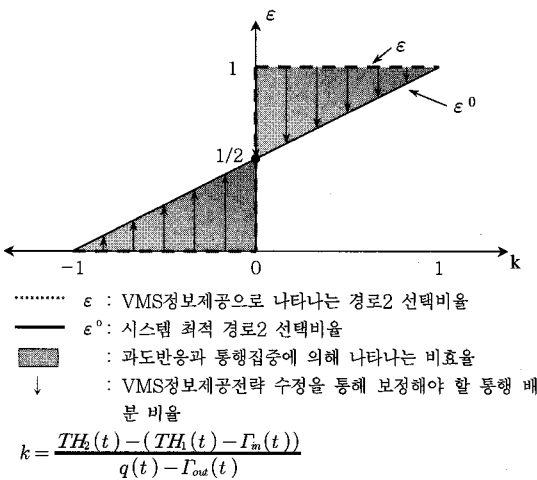
$$\begin{aligned} \varepsilon^0 &= \frac{(TH_2(t) - TH_1(t) + q(t) + \Delta\Gamma(t))}{2(q(t) - \Gamma_{out}(t))} \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} * \left( \frac{TH_2(t) - (TH_1(t) - \Gamma_{in}(t))}{(q(t) - \Gamma_{out}(t))} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

식(8)은 최적의 경로 2 선택비율은, 두 경로간 용량차이( $TH_2(t) - (TH_1(t) - \Gamma_{in}(t))$ ) 대 경로전환이 가능한 통행량( $q(t) - \Gamma_{out}(t)$ ) 비율에 비례함을 나타낸다. 아울러 식(8)은 다음과 같은 값의 범위를 가진다.

$$\begin{aligned} \epsilon^0 &= 0.5 \text{ when } TH_2(t) = TH_1(t) - \Gamma_{in}(t) \\ \epsilon^0 &= 1.0 \text{ when } TH_2(t) - (TH_1(t) - \Gamma_{in}(t)) \\ &= q(t) - \Gamma_{out}(t) \\ \epsilon^0 &= 0.0 \text{ when } TH_2(t) - (TH_1(t) - \Gamma_{in}(t)) \\ &= -(q(t) - \Gamma_{out}(t)) \end{aligned}$$

이러한  $\epsilon^0$ 에 대한 식(8)을 그래프로 나타내면 <그림 5>과 같다. 시스템 최적의  $\epsilon^0$ 는 교통상황에 따라 0과 1 사이의 값을 갖는 직선으로 나타나는 반면, VMS 정보제공의 결과로 나타나는  $\epsilon$  값은 0과 1의 값을 갖는 계단함수 형태로 나타난다. <그림 5>에서 음영 부분은 VMS 정보제공에 대한 과도반응과 통행집중으로 발생할 수 있는 비효율이며,  $\epsilon$ 와  $\epsilon^0$  값의 차이를 보정하기 위한 VMS 정보제공전략의 수정이 필요함을 나타낸다.

마지막으로, 이러한 시스템 최적과 VMS 정보제공



<그림 5> 시스템 최적 vs. VMS정보제공에 의한 통행배분비율

<표 2> VMS 정보제공 전략 수정 예

구 분	예상되는 VMS 정보제공결과	정보제공 전략 수정 방안
$\epsilon = \epsilon^0$	현재의 메시지로 시스템 최적을 달성함	수정 불필요
$\epsilon > \epsilon^0$	현재의 메시지는 경로 2에 과도한 통행 집중을 발생시킬 것으로 판단됨.	경로 2로 통행을 유도하는 메시지 표출 시간 단축
$\epsilon < \epsilon^0$	현재의 메시지로 경로 2에 충분한 통행배분이 이루어지지 못할 것으로 판단됨.	경로 2로 통행을 유도하는 메시지의 강도를 높이도록 함.

$\epsilon$  : VMS 정보제공에 의해 나타날 수 있는 경로 2 통행선택 비율

$\epsilon^0$  : 시스템 최적을 이루는 경로 2 통행선택 비율

결과로 나타난 통행배분의 차이를 보정하기 위한, VMS 정보제공 전략 수정방안은 <표 2>와 같다.  $\epsilon$ 가  $\epsilon^0$ 에 비해 큰 경우 경로 2로의 통행집중을 완화할 수 있는 전략 수정이,  $\epsilon$ 가  $\epsilon^0$ 에 비해 작은 경우 경로 2에 보다 많은 통행을 유도할 수 있는 전략 수정이 필요하다. 이에 대한 구체적 VMS 메시지의 설계는 향후과제로 남겨둔다.

### V. 본 연구의 한계 및 향후과제

본 연구에서는 VMS의 과도반응과 통행집중 문제에 대응하기 위한 예측적 알고리즘을 제시하였다. 특히 물리적 병목 등의 존재로 인해 대안경로 간에 우열이 존재하는 경우 통행집중 문제가 심각하다고 판단하여, 이러한 가상네트워크를 대상으로 알고리즘을 개발하였다. 앞서도 지적된 바와 같이, 목표로 하는 대안경로간의 최적 통행배분을 자동적으로 달성할 수 있는 VMS 메시지는 있을 수 없다. 오히려 VMS 정보제공은 특정 경로에 과도한 통행집중을 불러 올 수 있다. 본 연구에서는 모든 통행이 집중한다는 극단적 예를 제시하였으나, 물론 이러한 통행집중의 정도는 네트워크의 물리적, 운영적 특성과 이에 대한 운전자의 경험 내지 지식에 따라 달라진다. 이처럼 정도의 차이는 있겠으나, 통행집중 문제는 분명 네트워크의 효율을 저해한다. 따라서 이를 보정하기 위한 구체적 방법론의 제시를 본 연구의 목적으로 하였다. VMS 정보제공 결과를 미리 예측해 보고 통행집중으로 문제가 된다고 판단될 경우, 이러한 집중을 완화할 수 있도록 정보제공 전략을 수정한 후 정보를 제공하는 방법을 본 연구에서는 제안하였다.

현장이 아닌 실험실에서 본 논문에서 제안한 형태의 알고리즘의 실제 성능이나 안정성을 시험한다는 것에는 많은 제약이 따르며 사실상 불가능하다고도 할 수 있다. 제안한 알고리즘의 운영을 통하여, 바람직한 통행배분이 달성되었을 때 얻어지는 효과, 즉 잠재적 이득을 시뮬레이션에 의해 산정하여 제시할 수는 있으나, 이는 알고리즘의 성능 검증의 관점으로는 사실상 무의미하다. 이러한 제약으로 인하여, 본 연구에서는 제시한 알고리즘에 대한 검증을 가상네트워크를 가지고 산정 예를 제시함으로써 대신하였다.

본 연구에서 제안한 알고리즘의 정교화를 위하여, 실시간 모니터링 자료에 의한 단기예측, 동적용량산정에 대한 포괄적인 자료 분석이 뒷받침되어야 하며, 이



는 별도의 연구로 진행 중에 있다. 아울러 VMS 메시지 레귤레이터 모듈을 위한 구체적인 메시지 설계를 향후 과제로 남겨두었다. 이를 위해서는 메시지에 대한 운전자 반응 민감도에 대한 연구가 선행되어야 하는데, 현재 대부분의 교통관리센터에서 표출된 VMS 메시지가 저장되고 있지 않아 이러한 연구가 활성화되지 못하고 있는 점이 아쉬움으로 남아있다.

**참고문헌**

1. Daganzo, C. F. (1998), "Queue Spillovers in Transportation Networks with a Route Choice," *Transportation Science*, Vol.32, No.1, pp.3~11.
2. Messmer, A. and Papageorgiou, M. (1994), "Automatic Control Methods Applied to Freeway Network Traffic," *Automatica* 30, No.4.
3. Oh, J. S. and Jayakrishnan, R. (2001), "Temporal Control of Variable Message Signs towards Achieving Dynamic System Optimum," Paper No. 01-3363, 80th Annual Meeting of the TRB, Washington D.C..
4. Pavlis, Y. and Papageorgiou, M. (1999), "Simple Decentralized Feedback Strategies for Route Guidance in Traffic Networks," *Transportation Science*, Vol.33, No.3.
5. Park, E. M. (2003), "Automatic Control Algorithm for VMS and Signal Coordination in Urban Traffic Network," *Journal of EASTS*, Vol.5, EASTS 03 Fukuoka, Japan.
6. Sawaya, O.B., Doan, D.L., and Ziliaskopoulos, A.K. (2000), "A Predictive Time Based Feedback Control Approach for Managing Freeway Incidents," 79th Annual Meeting of the TRB, Washington D.C..
7. Valdes-Diaz, D.M., Chiu, Y., and Mahmassani, H.S. (2000), "Optimal Time-Dependent Variable Message Sign Diversion Strategy," 79th Annual Meeting of the TRB, Washington D.C..
8. 박은미 (2002), "도시내 도로망 효율성 제고를 위한 가변정보판 운영전략," 대한교통학회 20주년 기념 학술발표회 발표 논문집.
9. 박은미 (2002), "VMS 자동제어 알고리즘 설계", 대한교통학회지, 제20권 제7호, 대한교통학회, pp.177~183.
10. 박은미 (2004), "혼잡교통류 관리를 위한 동적 용량의 개념 및 산정방법," 대한교통학회지 제22권 제3호, 대한교통학회, pp.159~166.
11. 이청원 (2001), 서울시 동적 교통정보 제공을 위한 기본연구, 2001-R-08, 서울시정개발연구원.
12. 조준한·김성호 (2003), "연속교통류에서 최적의 경로전환율을 고려한 VMS 운영방안," 대한교통학회 제44회 학술발표회 발표논문집, 대한교통학회.

✉ 주 작 성 자 : 박은미  
 ✉ 논문투고일 : 2004. 3. 10  
 논문심사일 : 2004. 5. 27 (1차)  
 2004. 6. 9 (2차)  
 2004. 6. 17 (3차)  
 심사판정일 : 2004. 6. 17  
 ✉ 반론접수기한 : 2004. 12. 31