

■ 論 文 ■

유비쿼터스 환경에서 최적교통관리를 위한 시뮬레이션 평가  
Simulation Experiments for Ubiquitous Traffic Flow Management

박 은 미

(목원대학교 도시공학과 교수)

고 명 석

(목원대학교 도시공학과)

목 차

- I. 연구의 배경 및 목적
  - II. 시뮬레이션 실험방법
  - III. 시뮬레이션 실험결과
  - IV. 교통류 안정성 지표
  - V. 교통상태별 운영관리 목표
  - VI. 유비쿼터스 교통환경에서 정체예방관리 잠재적 이익
  - VII. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : 교통류 안정성, 연속류 운영 관리, 유비쿼터스 교통, 정체관리, 차량군 안정성  
Traffic Flow Stability, Uninterrupted Traffic Flow Management, Ubiquitous Transportation, Congestion Management, Platoon Stability

요 약

유비쿼터스 교통환경이 구현되면 기존 ITS 환경에서는 불가능하였던, 개별차량 위치, 속도 등 미세한 데이터 수집이 가능해지며, V2V(Vehicle-to-Vehicle), V2I(Vehicle-to-Infra) 양방향통신이 가능해짐에 따라 개별차량 혹은 차량군 단위의 미세 제어가 가능해진다. 이러한 유비쿼터스 교통 환경의 장점에 입각하여 교통류 안정성을 지표로 하는 연속류 정체예방관리 방안이 선행연구에서 제시된 바 있다. 본 연구에서는 유비쿼터스 교통환경에서 정체예방관리를 실현함에 있어 제기된 쟁점사항들에 대하여, VISSIM 시뮬레이션 실험결과에 입각하여 해답을 제시하였다. 교통류 안정성을 명시적으로 교통류 관리에 적용할 수 있도록, 유비쿼터스 교통환경에서 수집 가능한 차량군 길이와 간격으로 도출하였다. 또한 교통상황에 따라 차별화된 운영관리가 필요하다는 타당성을 도출하고, 교통상황 구분 및 상황별 운영관리 방안을 제시하였다. 마지막으로 이러한 관리를 수행하였을 때 어떠한 잠재적 이익이 있는가를 보여주었다. 본 연구 결과는, 제반 제약조건으로 말미암아 제한적인 시뮬레이션 실험을 통해 도출되었다. 그러나 유비쿼터스 교통환경에서 새로운 개념의 교통관리를 시행하는 데 있어 그 타당성은 보여줄 수 있었다고 판단된다. 향후 보다 포괄적인 현장실험을 통해 제반 결과들이 확정되어야 할 것이다.

The ubiquitous transportation system environments make it possible to collect each vehicle's position and velocity data and to perform more sophisticated traffic flow management at individual vehicle or platoon level through V2V and V2I communications. The VISSIM simulation experiments were performed to address the issues in developing the preventive congestion management algorithm proposed in the companion paper. Traffic flow stability measures were developed based on the platoon profile, which enables us to explicitly consider traffic flow stability in traffic flow management. Traffic flow management strategies according to the traffic flow states were proposed: Maintain the equilibrium speed for free flow state, maintain the traffic flow stability by platoon control for critical state, and suppress the shock wave propagation for congested state. And finally potential benefit of the proposed traffic flow management scheme was evaluated based on the simulation experiment results. It is considered that extensive field experiments should be performed to confirm the simulated results.

본 연구는 2008년도 국토해양부 국가교통핵심기술 개발사업의 지원으로 수행되었음. 본 연구 결과는 저자 개인의 의견으로 향후 변경될 수 있음.

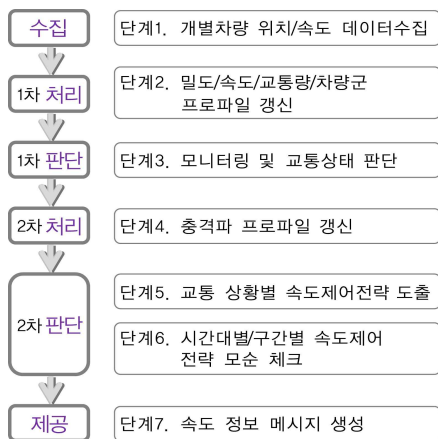
### 1. 연구의 배경 및 목적

유비쿼터스 교통환경에서는, 차량과 노변장치 등 관련 시설이 ad-hoc 네트워크로 구성된 유비쿼터스 교통 센서 네트워크를 통하여 교통자료수집, 구성요소간 정보 교환, 센터에서 가공된 정보 전달 등이 이루어지게 된다 (1-4). 유비쿼터스 교통환경이 구현되면 기존 ITS 환경에서는 불가능하였던, 개별차량 위치, 속도 등 미세한 데이터 수집이 가능해지며, V2V(Vehicle-to-Vehicle), V2I(Vehicle-to-Infra) 양방향통신이 가능해짐에 따라 개별차량 혹은 차량군 단위의 미세 제어가 가능해진다 (5). 이러한 맥락에서, 유비쿼터스 교통 환경의 잠재력을 살리기 위한 새로운 교통 운영관리기술이 필요하다.

선행연구(5)에서, 유비쿼터스 교통 환경하에서 교통류 안정성(Traffic Flow Stability)을 지표로 연속류 정체예방관리 방안을 제시한 바 있다. 본 연구와 병행하게 진행된 연구(6)에서는 이를 구체화하여 <그림 1>과 같은 유비쿼터스 환경의 연속류 정체예방관리 알고리즘을 제시하였다. 이하에서는 이를 u-연속류 정체예방관리 알고리즘이라 부른다.

<그림 1>에 제시된 알고리즘에 의한 정체예방관리 구현을 위하여는 다음과 같은 쟁점에 대한 해답이 요구된다.

1. 교통류 안정성을 어떻게 판단할 것인가?
2. 교통상태별 차별화된 운영 목표와 전략이 필요한가?



출처: 유비쿼터스 교통환경을 위한 연속류 정체예방관리 알고리즘, 대한교통학회지 제27권 제3호, 2009. 6.

<그림 1> u- 연속류 정체예방 알고리즘

3. 만일 차별화된 목표와 전략이 필요하다면, 교통상태를 어떻게 나누는 것이 타당한가?
4. 과연 정체예방관리 알고리즘이 효과가 있을 것인가?

본 논문은 시뮬레이션 실험 및 평가를 통하여, 별도의 논문<sup>1)</sup>에서 제시된 정체예방관리 알고리즘의 개발 쟁점들에 대한 해답을 구함을 그 목적으로 한다. 제II장과 III에서는 시뮬레이션 실험과 그 결과에 대하여 설명한다. 그 시뮬레이션 실험 결과에 의거 제 I 장에서 언급한 쟁점에 대한 해답을 IV장, V장, VI장에 나누어 제시하며, 마지막으로 VII장에서 결론 및 향후과제에 대하여 논하도록 한다.

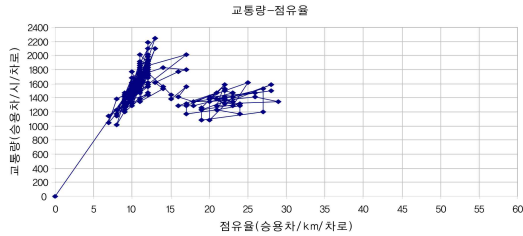
### II. 시뮬레이션 실험 방법

유비쿼터스 교통 환경이 아직 현장에 구현되어 있지 않은 점과 제반 현장 실험의 한계를 고려하여, 본 연구에서는 시뮬레이션 실험 방법을 선택하였다. V2I, V2V 통신에 의한 차량과 인프라의 상호작용, 즉 유비쿼터스 교통 환경이 모사되는 상용 교통시뮬레이션 프로그램은 아직 존재하지 않는다. 이에 VISSIM 모형을 활용하되, V2I, V2V 통신에 의한 차량과 인프라의 상호작용에 의해 구현될 교통류 관리 효과를 시나리오로 구성하여 시뮬레이션 실험을 시행하였다.

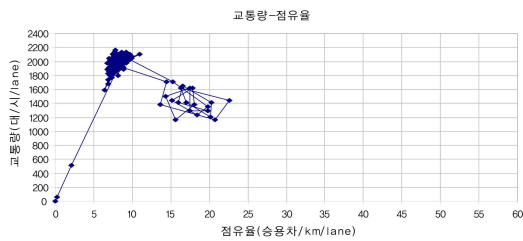
#### 1. 운전자 행태 파라미터 결정

VISSIM과 같은 미시 시뮬레이션 모형에서는 차량종류와 차로선택에 관한 운전자 행태 파라미터 결정이 중요하다(7, 8). 운전자 VISSIM 모형 수행에 필요한 운전자 행태 파라미터를 결정하기 위하여, 실제 고속도로 구간, 경부고속도 수원-기흥구간(4.2km)을 대상으로 모형에서 제공하고 있는 default 값을 가지고 시뮬레이션을 수행하였다. <그림 2>에 이 결과와 해당 구간 실제 검지기 데이터를 제시하였다. 두 교통량-점유율 곡선의 형태, 폭지점 위치, 와해지점 등을 비교하였을 때, 근접한 결과를 얻었다고 판단하였다. 이에 본 연구의 시뮬레이션 실험 목적을 달성함에 있어, 운전자 행태에 대한 파라미터들은 default 값을 사용해도 무방하다는 결론을 얻었다.

1) 유비쿼터스 교통환경을 위한 연속류 정체예방관리 알고리즘, 대한교통학회지 제27권 제3호, 2009. 6.



(a) 현장 집지기 데이터



(b) 시뮬레이션 데이터

<그림 2> 현장집지기 데이터 vs 시뮬레이션 데이터

2. 시뮬레이션 시나리오

시뮬레이션 시나리오는, 현재 운전자 속도 선택 행태를 반영한 시나리오와 유비쿼터스 환경에서 운영관리를 통해 구현될 균일한 속도 분포를 가정한 시나리오로 구성하되 LOS C-D, LOS E, LOS F 수준에 해당하는 교통량 시나리오를 추가하였다 (<표 1> 참고).

<표 1>에 제시된 시나리오 시뮬레이션을 위해, <그림 3>과 같은 편도4차로 총 8km의 가상 네트워크를 구축하였다. VISSIM에서 이와 같은 형태의 네트워크 내 지체제 발생을 모사하기 위하여 'Reduced Speed Area'나 'Lane

<표 1> 시뮬레이션 시나리오

교통량 수준 (pcphpl)	속도분포	다양한 속도분포 (기존 도로상황)	Uniform 분포 (u-연속류 운영관리로 구현 상황)
	1700		
1750		1700-Variant	1700-Uniform
1800		1750-Variant	1750-Uniform
		1800-Variant	1800-Uniform

주: 속도분포는, 소용원활한 상태의 시뮬레이션 결과로 나타난 분포임. 차량의 상호작용에 의한 가속속도로, 'Uniform' 시나리오에서도 약간의 속도분포는 나타남.



<그림 3> 실험용 가상 네트워크

Closure' 기능을 사용한다. 본 실험에서는 'Lane closure'를 사용하였다. 총 8km 구간 중 병목구간 제외한 7km 구간을 분석대상 구간으로 하였다. 시뮬레이션은 총 6시간(21600초) 동안 수행하였고, 이 중 분석대상 시간은 900초-21000초로 하였다. 이때, 난수(Random Seed)를 4의 배수로 하고 10번 반복 시뮬레이션한 후 이들 결과 중 이상 결과는 제거한 후 분석을 시행하였다.

III. 시뮬레이션 실험 결과

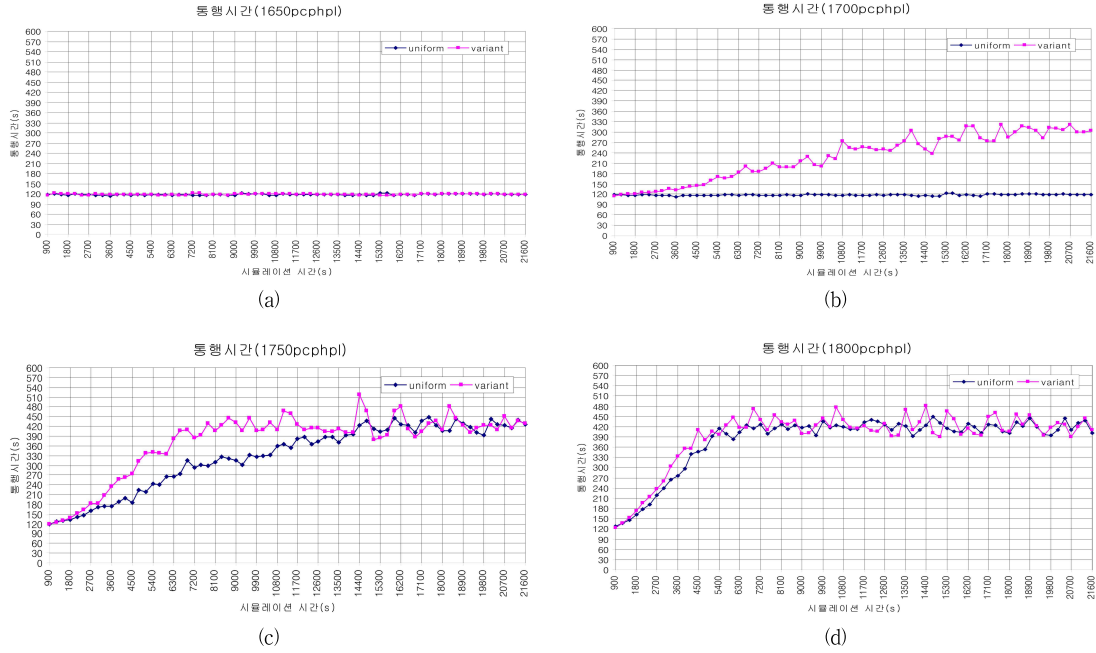
시뮬레이션 실험결과를 설명함에 있어 <표 1>에서 제시된 시나리오 명인 'Variant'와 'Uniform' 편의상 그대로 쓰도록 한다. 'Variant'는 실제 도로상에서 운전자가 선택하는 속도분포를, 'Uniform'은 유비쿼터스 교통환경에서 운영 관리를 통해 상대적으로 균일해진 속도분포 시나리오를 지칭한다. 시뮬레이션 실험결과는 다음과 같이 요약된다.

첫째, LOS D-E 정도의 교통량 수준에서 'Variant' 시나리오는 'Uniform' 시나리오 보다 통행시간이 오래 걸리고, 통과교통량도 줄어들었다.

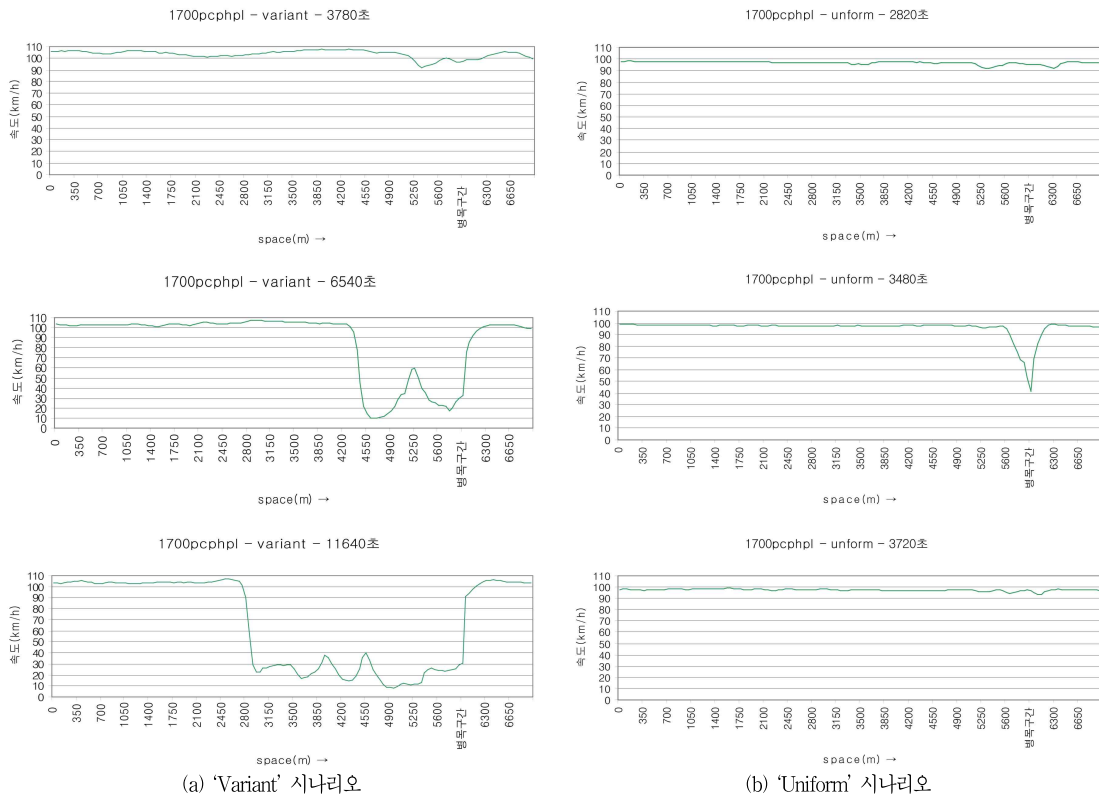
'Uniform' 시나리오에서는 충분히 자유 교통류 상태를 유지할 수 있는 교통량 수준이지만, 'Variant' 시나리오에서는 교통류가 와해되고 혼잡을 형성하는 것으로 나타났다 (<그림 4>(b), (c) 참고). 그러나 LOS C 이하로 낮은 교통량 수준에서와 LOS F 정도의 높은 교통량 수준에서 두 시나리오는 통행시간에 차이가 나타나지 않았다 (<그림 4>(a), (d) 참고).

둘째, 같은 교통량 수준에서 'Variant' 시나리오의 경우 'Uniform' 시나리오의 경우보다 와해의 정도가 심하고, 회복되는 시간도 더 많이 소요되었다 (<그림 5> 참고).

셋째, 시뮬레이션 실험에서, 같은 교통량 수준과 같은 속도 분포 시나리오에서 흐름이 원활히 유지되기도 하고 깨지기도 하는 확률적 현상이 나타났으며, 이는 관련 선행연구 (9, 10)의 결과와 일치한다. 이러한 확률적 현상의 원인을 분석해 본 결과, 이는 차량군 길이와 차량군 간격이 형성된 특정 차이에 기인하는 것으로 나타났다. 즉 차량군 길이가 과다해 지고 차량군 간격이 조밀한 상



<그림 4> 시나리오별 통행시간 추이



<그림 5> 흐름 교란과 와해 ('Variant' vs. 'Uniform' 시나리오)

태에서 병목 구간을 통과하게 될 때, 차량군 속도가 둔화된 상태에서 미처 병목구간을 통과하기 전에 후방의 차량군이 도착하여 충돌하며 왜해가 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 흐름에 차량군 형성이 본격화되는 LOS D에서 E 사이 교통량 수준에서 나타났다.

이와 같은 시뮬레이션 실험 결과를 종합해 볼 때, 속도분포를 균일하게 관리하는 것과 차량군 관리를 통해서 교통류 안정성을 유지하고 혼잡류로의 전이를 예방 혹은 최대한 지연시킬 수 있는 것으로 판단된다. 이하에서는 이상의 1차 분석결과를 토대로, 제 I 장에서 언급한 쟁점 사항들에 대하여 논하도록 한다.

#### IV. 교통류 안정성 지표

동일 시나리오에서 흐름이 원활하게 유지되기도 하고 깨지기도 하는 확률적 현상은 차량군 길이와 차량군 간격의 영향과 관련이 있는 것으로 시뮬레이션 실험에서 나타났다. 즉 동일한 교통 조건에서 차량군 길이 대비 차량군 간격이 짧을 때, 그리고 차량군 길이가 과다하게 형성되었을 때 문제가 발생하였다. 이에 VISSIM의 애니메이션 기능을 활용하여 이러한 차량군 형성 특성과 왜해의 관계에 대한 관측과 분석을 시행하였다 (<그림 6> 참고).

200개의 차량군 샘플에 대하여, 차량군길이/차량군간격 과 왜해여부를 조사하여 <표 2>와 같은 결과를 얻었다.

차량군길이/차량군간격 값이 커질수록 왜해 확률이 높아지는 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 차량군길이/차량군간격을 교통류 안정성 지표로 사용할 수 있음을 나타낸다. 부가

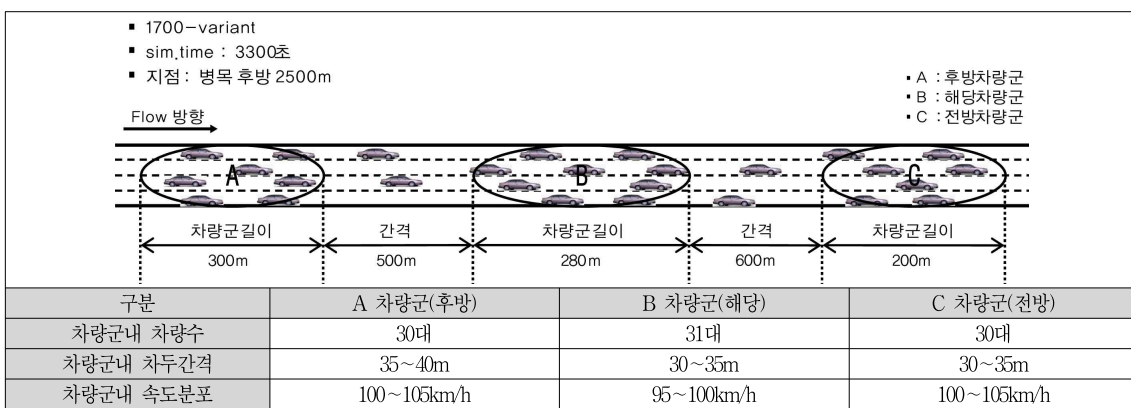
<표 2> 차량군길이/차량군간격 과 왜해확률

차량군길이/차량군간격	Variant		Uniform	
	샘플수	왜해비율(%)	샘플수	왜해비율(%)
1.5 미만	19	15.8	26	7.7
1.5 - 3.0	28	32.1	38	18.4
3.0 - 4.5	45	46.7	46	34.7
4.5 - 6.0	49	61.2	48	52.1
6.0 - 7.5	22	81.8	16	68.8
7.5 - 9.0	17	88.2	9	77.8
9.0 초과	20	95.0	17	94.1
계	200	-	200	-

하여 차량군길이/차량군간격 이 6이상이고 차량군 길이가 700m 이상이 되면 100% 깨지는 것으로 나타났다. 또한 차량군 길이가 1000m 이상이 되면 후방 차량군과의 간격과 상관없이 차량군 안정성(Platoon Stability)이 문제가 되는 것으로 나타났다. 따라서 교통류 안정성 평가지표로, 차량군길이/차량군간격 과 함께 차량군 길이와 차량군내 차두간격을 보조지표로 쓰는 것이 필요하다고 판단하였다.

<표 2>의 결과는 제한적인 시뮬레이션 실험을 통해 도출된 값으로서, 구체적 문턱치(Threshold Value)는 향후 현장실험을 통해 확정하는 것 필요하다.

선행연구 (11, 12)에 의해 제시되었던 교통류 안정성 지표들은 자동주행운전에 초점을 둔 앞차와의 관계에 국한되어 있거나, 아니면  $\frac{\Delta\text{교통량}}{\Delta\text{밀도}}$  와 같은 거시지표들이다. 이들은 교통류 안정성을 정밀하게 판단하는 데 한계가 있고, 기존 ITS 수집체계에서는 실제 관측 가능한 값도 아니다. 이러한 제약으로 말미암아 교통류 관리에 교통류 안정성이 가장 핵심적인 사안임에도 불구하고 이제



<그림 6> 차량군 분석 과정 예시

까지 명시적으로 고려되지 못하였다. 이러한 맥락에서, 개별차량단위까지 제어가 가능한 유비쿼터스 교통관리에 적용가능하며, 그리고 관측 가능한 교통류 안정성 지표를 도출하였다는 점에서 본 연구 결과는 상당한 의미를 가진다. 유비쿼터스 교통환경에서 차량군 길이와 차량군 간격을 어떻게 수집할 것인가 하는 문제는 향후 별도의 논문에서 제시하도록 한다.

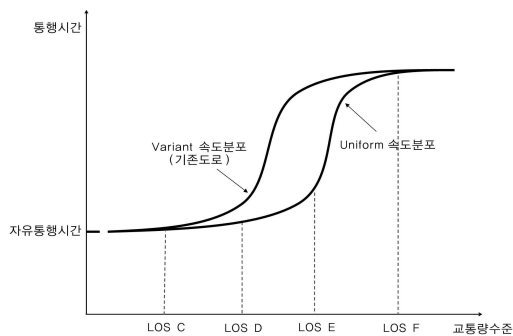
### V. 교통 상태별 운영관리 목표

제III장의 시뮬레이션 결과에 제시된 교통량 수준에 따른 ‘Variant’와 ‘Uniform’ 두 시나리오간 통행시간 증가 추세를 <그림 7>과 같이 도식화 할 수 있다. 이 결과를 분석해 볼 때, 교통상태는 LOS D 이하, LOS E, LOS F로 나누고 각 교통상태별로 운영관리 목표를 차별화할 필요가 있는 것으로 나타났다. 그 구체적 내용은 다음과 같다.

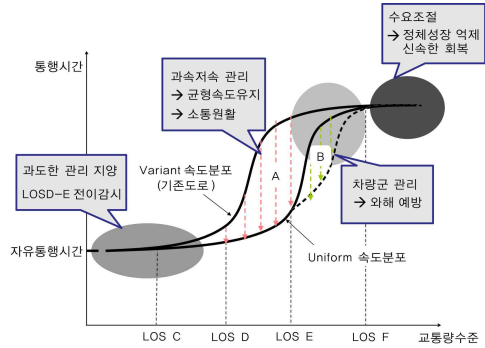
첫째, LOS C 이하에서는 두 시나리오간 통행시간 차이가 없었다. 즉 기존 운전자 속도 선택 행태에서도 소통원활 상태를 유지하였다. 따라서 LOS A-C 사이에서는 과도한 관리는 불필요하며, 모니터링에 집중하여 D-E 상태로의 전이를 감시하는 전략이면 충분하다.

둘째, LOS D-E 수준에서는, 같은 교통량 수준에서 ‘Uniform’ 시나리오가 ‘Variant’ 시나리오에 비해 통행시간이 적게 걸리고 통과 교통량이 크다. 특히, ‘Variant’ 시나리오는 혼잡을 형성하는 LOS D 수준에서 ‘Uniform’ 시나리오는 소통원활을 유지한다. 이는 LOS D까지는 과속, 저속을 관리하여 상대적으로 균일한 속도 분포로 바꾸어 줌으로써 소통원활을 유지할 수 있다는 것을 의미한다.

셋째, 그러나 LOS E에 이르게 되면, ‘Uniform’ 시나리오에서도 통행시간이 급격히 증가한다. 즉 LOS E 수준에서는 과속,저속 관리 외에 추가적인 관리를 시행해



<그림 7> 시나리오별 통행시간 증가 추세



<그림 8> 교통상태별 운영관리 목표

야만 함을 의미한다. 즉 제IV장에서 제시한 교통류 안정성 지표를 활용하여 차량군 관리를 추가적으로 시행함으로써, 통행시간 증가 예방 혹은 둔화를 달성할 수 있다.

넷째, LOS F가 되면 두 시나리오간 통행시간 차이가 소멸된다. 이때는 균형속도 유지, 차량군 관리 외에 근본적인 진입 수요 조절이 필요함을 의미한다.

이와 같은 개념의 교통 상태별 운영관리 목표는 <그림 8>에 도식화 시켜 놓았다. 교통상태별 운영관리 목표를 달성하기 위한 세부적인 관리전략에 대하여는 지면의 제약 상 별도의 논문에서 제시하였다.

### VI. 유비쿼터스 환경에서 정체예방관리의 잠재적 이익

앞서 ‘Variant’와 ‘Uniform’ 시나리오의 시뮬레이션 결과를 분석하고 도식화했던 것을 활용하여, 유비쿼터스 교통환경에서 정체예방 관리의 잠재적 이익을 나타낼 수 있다. LOS D 수준까지는 과속,저속 관리로 소통원활을 유지할 수 있게 된다. 이때 이러한 과속,저속 관리의 잠재적 이익은, 실제 도로의 속도분포를 나타내는 ‘Variant’ 시나리오와 과속저속 관리로 얻어질 ‘Uniform’ 속도분포 시나리오의 통행시간의 차가 된다 (<그림 8>의 A 영역). 또한 LOS D 이상이 되면 과속,저속 관리만으로는 소통원활이 유지되지 못하며, 이때 차량군 생성 특성에 의해 나타나는 교통류 안정성을 모니터링 하며 관리해야 한다. 이러한 차량군 관리에 의해 나타나는 통행시간 감소가 그 잠재적 이익이 된다 (<그림 8>의 B 영역).

이상에서는, 차량과 인프라의 상호작용에 의한 교통 관리 효과를 기존의 상용 시뮬레이션 프로그램으로 모사하는데 한계로 인하여 실제 교통관리 효과를 산정하지 못하고, 시나리오에 의한 잠재적 효과만을 제시하였다.

그러나 이러한 분석 결과는, 제 I 장에서 쟁점으로 제기 한 유비쿼터스 교통환경에서 정체예방관리 알고리즘 타당성 여부를 제한적이거나 판단할 수 있다고 생각된다.

**VII. 결론 및 향후 연구과제**

본 연구에서는 유비쿼터스 교통환경에서 최적의 교통 관리를 실현함에 있어 제기된 쟁점사항들에 대하여, 시뮬레이션 실험결과에 입각하여 해답을 제시하였다. 유비쿼터스 교통환경에서 수집 가능한 차량군 길이와 간격으로 교통류 안정성 지표를 도출하여, 교통류 안정성을 교통류 관리에 명시적으로 고려할 수 있도록 하였다. 또한 교통상황에 따라 차별화된 운영관리가 필요하다는 타당성을 도출하고, 교통상황 구분과 상황별 운영관리 방안을 제시하였다. 마지막으로 이러한 관리를 수행하였을 때 어떠한 잠재적 이익이 있는가를 보여주었다.

본 연구의 수행에는, 현장에 유비쿼터스 교통환경이 아직 구현되어 있지 않고 유비쿼터스 교통환경에서 V2I, V2V 상호 작용을 모사해주는 교통 시뮬레이션 모형이 아직 존재하지 않는다는 제약이 존재하였다. 본 연구 결과는 이러한 제약 하에서 제한적인 시뮬레이션 실험을 통해 도출되었다. 그러나 유비쿼터스 교통환경에서 새로운 개념의 교통관리를 시행하는 데 있어 그 타당성은 보여줄 수 있었다고 판단된다. 향후 보다 포괄적인 현장실험을 통해 제반 결과들이 검증되고 확정되어야 할 것이다.

**참고문헌**

1. 강연수 · 오철 · 김범일(2005), 유비쿼터스 환경에서의 교통부문 여건변화분석 및 대응전략개발 연구, 연구총서 2005-13, 한국교통연구원.
2. R. Morris and et al., CarNet: A Scalable Ad-Hoc Wireless Network System, 9th ACM SIGOPS European Workshop, 2000.
3. M.G. McNally and et. al., Autonet: An Ad hoc Peer-to-Peer Information Technology for traffic Networks, www.its.uci.edu/~mcnally/mgm-autonet.html
4. W. J. Franz, and et. al, Internet on the Road via Inter-Vehicle Communications, www.et2.tu-harburg.de/fleetnet/pdf/GI\_WShop\_FleetNet.pdf.

5. 박은미(2008), 유비쿼터스 교통 환경하에서 교통류 관리구상, 대한교통학회지, 제26권 제3호, 대한교통학회, pp.179~186.
6. 박은미(2009), 유비쿼터스 교통환경을 위한 연속류 정체예방관리 알고리즘, 대한교통학회지, 제27권 제3호, 대한교통학회, pp.161~168.
7. B. Park and S. Yadlapati(2003), Development and Testing of Variable Speed Limit Logics at Work Zones Using Simulation, TRB 2003 Annual Meeting
8. A. Mitra and P. Pant(2005), A Framework to Evaluate the Impact of Variable Speed Limit Systems on Work Zone Traffic Operation Using VISSIM, ITE 2005 District 6 Annual Meeting
9. M. Lorenz and L. Elefteriadou, "A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown", Transportation Research Circular E-C018, 4th International Symposium on Highway Capacity.
10. L. Elefteriadou, and et. al.(1995), "Probabilistic Nature of Breakdown at Freeway Merge Junctions," Transportation Research Record 1484.
11. J. Zhou and H. Peng, "Range Policy of Adaptive Cruise Control Vehicles for Improved Flow Stability and String Stability," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, T-ITS-04-03-0035. R2.
12. S. Darbha and K. Rajagopal, "Intelligent Cruise Control Systems and Traffic Flow Stability," UCB-ITS-PRR-98-36, University of California, Berkeley.

✉ 주 작성자 : 박은미  
 ✉ 교신저자 : 박은미  
 ✉ 논문투고일 : 2009. 4. 16  
 ✉ 논문심사일 : 2009. 5. 15 (1차)  
                   2009. 5. 20 (2차)  
 ✉ 심사판정일 : 2009. 5. 20  
 ✉ 반론접수기한 : 2009. 10. 31  
 ✉ 3인 익명 심사필  
 ✉ 1인 abstract 교정필