

■ 論 文 ■

# 연속교통류 재현을 위한 거시적 모형의 비교 연구

A Study on Describing Uninterrupted Traffic Flows  
using Macroscopic Models

**임 성 만**

(서울시립대학교  
도시공학과 박사과정)

**김 대 호**

(서울특별시 교통관리실  
교통운영개선기획단 단장)

**김 영 찬**

(서울시립대학교  
도시공학과 부교수)

## 목 차

- I. 서론
    - 1. 연구의 배경 및 목적
    - 2. 연구의 범위 및 방법
  - II. 관련 이론 고찰 및 모형 선정
    - 1. 거시적 연속교통류 모형
    - 2. 모형 선정
  - III. Numerical Example을 이용한 성능 비교
    - 1. 분석적 결과
    - 2. 모형별 성능 비교
  - IV. 실측 현장자료를 이용한 성능 비교
  - V. 결론 및 제언
- 참고문헌

Key Words : 연속교통류, 단순연속방정식 모형, 가속도방정식 모형, 거시적 연속교통류 시뮬레이션 모형

## 요 약

본 연구는 도시고속도로 교통류의 효과적인 관리와 운영상태 평가에 사용되는 거시적 연속교통류 재현 모형의 성능 비교에 관한 연구이다. 연속교통류 재현을 위한 거시적 모형은 크게 단순연속방정식 모형과 가속도방정식 모형의 범주 안에서 여러 모형들이 개발되어져 왔지만, 국내에서는 이 두 모형들에 대한 성능 비교에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구는 대표적인 거시적 연속교통류 모형들의 성능평가를 통해서 개개 모형들이 가지고 있는 특징을 알아본 후 대도시 고속도로의 교통류 재현에 이용할 수 있는 모형을 선정한다.

모형의 성능 비교를 위해 거시적 연속교통류 모형 중에서 대표적인 5개 모형(Lax Method Model, Upwind Scheme Model, Hilliges' Model, Papageorgiou's Model, Cell-Transmission Model)을 선택하였으며, Numerical Example과 실측 현장자료를 이용하여 모형들의 성능 비교를 실시하였다. 가상자료를 이용한 분석 방법에서는 대체로 모든 모형이 적절한 결과값을 보여주었지만, 단순 연속방정식 모형이 모형의 안정성과 교통 상황 재현력 측면에서 볼 때 가속도방정식 모형보다 좀더 안정적인 결과값을 보여주었다. 현장자료를 이용한 분석방법에서는 미국의 Nimitz Freeway의 오전 침두시 3시간 교통 자료(밀도, 교통량)를 이용하였다. 분석대상 구간에 대한 모형성능 평가결과, 단순연속방정식 모형의 결과와 가속도방정식 모형의 결과가 유사하게 나왔으며, 비교적 계산식이 단순한 거시적 연속교통류 모형들도 분석대상구간의 혼잡상황을 어느 정도 잘 재현하고 있음을 보여준다.

본 연구 수행을 위한 실측 현장자료는 서울시정개발연구원의 손봉수 박사님께서 제공해 주셨습니다.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

최근, 서울시는 도심 통행 교통량 중 46%를 차지하는 도심통과 교통량을 처리하기 위해서 총 연장 40.1km의 순환형 도시고속도로인 내부순환로를 1999년 2월 개통하였으며, 이로 인해 도심통과 교통량 중 10%를 흡수할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 내부순환로 이용교통량은 개통 초기에 하루 3만5천대에 불과했던 것이 1999년 12월 11만대로 대폭 증가하여 하루 최대 처리 교통량인 16만대의 70% 수준에 도달해 있다. 그러나 내부순환로는 건설 당시 하천, 산악지, 기존도로와 같은 국공유지를 최대한으로 활용한 건설로 인하여 사고위험이 높은 급커브 구간, 좁은 차로폭, 불편한 진출입램프 등의 문제를 가지고 있다. 서울시는 이러한 문제들에 대한 처방책으로 기존의 교통관리체계에 정보·통신 기술을 접목시켜 도로와 차량을 효과적으로 관리하고 돌발상황에 신속하게 대응하기 위한 내부순환로 교통관리시스템을 구축 중에 있다.

도시교통관리시스템(Urban Expressway Traffic Management Systems:UTMS)은 도시고속도로의 교통상황의 변화에 따라 적절한 대응 방법을 가지고 교통류를 관리하는 시스템이다. 이러한 교통관리시스템의 운영과 대응전략의 수준을 높이기 위해서는 동적으로 변하는 교통상황을 추적할 수 있는 교통류 재현 모형이 필요하지만, 아직까지 국내 도시고속도로에 적합한 교통류 재현 모형에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 대도시 고속도로 교통관리시스템의 운영평가와 교통관리전략 수립에 이용될 수 있는 연속교통류 재현 모형들에 대한 기본적인 모형별 성능 평가와 비교를 실시하는 것이다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 연속교통류 재현에 주로 사용되는 거시적 모형들을 선택하여 성능 비교를 실시한다. 따라서, 제2장에서는 기존 거시적 연속교통류 모형들의 현황 및 기본적인 개념과 모형선정에 대해 설명하고, 제3장에서는 numerical example을 이용한 모형 성능 비교를 실시한다. 제4장에서는 모형들의 현장 적용성을 알아보기 위해 실측 현장 자료를 이용한 모형

성능 비교를 하며 제5장에서는 연구결과를 요약하고 향후 과제에 대하여 논의한다.

## II. 관련 이론 고찰 및 모형 선정

### 1. 거시적 연속교통류 모형

연속교통류 재현을 위한 시뮬레이션 모형은 크게 개개 차량의 움직임 추종이론에 의해서 재현하는 미시적 모형과 교통류를 차량군으로 보고 해석하는 거시적 모형으로 구분된다. 거시적 연속교통류 모형은 교통상황의 재현을 위해 도로를 일정한 간격으로 분할한 후 속도, 밀도, 교통량 등의 거시적 교통 변수가 시간과 거리의 변화에 따라 어떻게 변화하는지를 유체역학 원리를 응용하여 추적하는 것이다.<sup>1)</sup> 이를 위해서는 교통류 변수들간의 관계를 보여주는 두개의 기본 관계식과 한 개의 응용된 관계식이 필요하다. 모형식을 설명하기 위해 거리와 시간을 각각  $x$ ,  $t$  라 하면 교통변수들은 다음과 같이 정의된다.

$q(x, t)$  : 교통량(대/시)

$k(x, t)$  : 밀도(대/km)

$u(x, t)$  : 속도(km/시)

$g(x, t)$  : 발생율(generation rate)

$u_e(k)$  : 균형속도(equilibrium speed)

거시적 연속교통류 모형 구성을 위한 첫 번째 기본 관계식은 교통량은 속도와 밀도에 의해 결정된다는 불변식이다.

$$q(x, t) = u(x, t) \cdot k(x, t) \quad (1)$$

두 번째 관계식은 유체보존법칙에서 유도된 식으로 공간에 대한 교통량과 밀도의 시간적 변화관계를 편미분 방정식으로 표현한 것이다.

$$\frac{\partial k(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

위의 두 개 기본 관계식 외에 추가로 구간의 속도는 밀도에 의해 결정된다는 가정을 바탕으로 한 균형속도-밀도 관계식이 적용된다.

$$u(x, t) = u_e(k) \quad (3)$$

거시적 연속교통류 모형은 기본 관계식 외에 독립적인 속도방정식의 사용 여부에 따라 simple continuum 모형(Lighthill and Whitham, 1955)과 high-order continuum 모형(Payne 1971)으로 구분된다. Simple continuum 모형(이하, 단순연속방정식 모형)은 유체보존법칙(flow conservation)을 기초로 하고 있으며, high-order continuum 모형(이하, 가속도 방정식 모형)은 유체보존법칙 외에 가속도를 고려할 수 있는 momentum equation을 추가로 사용한다.

### 1) Simple continuum 모형<sup>1,5,6,11)</sup>

단순연속방정식 모형은 위에서 설명한 두 개의 기본관계식과 하나의 응용식을 기초로 하며, 편미분 방정식으로 되어 있는 연속방정식의 계산을 위해서 수치해석적 방법을 사용한다. 모형에 사용하는 수치해석적 방법으로는 유한차분법(finite difference method)을 이용하며, 적용하는 유한차분법의 종류에 따라 모형의 종류가 달라진다.<sup>6)</sup>

식(4)는 밀도와 교통량과의 관계를 유체보존법칙으로 표현한 연속방정식을 Euler 방법에 의한 1차 근사식으로 표현한 것이다.

$$k(x, t + \Delta t) = k(x, t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q(x-1, t) - q(x, t) + g(x, t)] \quad (4)$$

초기의 단순연속방정식 모형들은 밀도가 결정됨에 따라 식(3)의 균형속도-밀도관계식에 의해 속도가 결정되기 때문에, 고밀도의 하류부와 저밀도의 상류부에서 유입 교통량의 증가와 유출교통량의 감소에 의해 발생하는 차량의 정지상태인 잠금현상(lockup)이 발생한다.<sup>11)</sup> 하지만 단순연속방정식 모형은 관측되는 충격파를 잘 재현하며, 모형정산이 쉽고 계산시간이 짧다는 장점 때문에 좀더 양호한 교통류 재현을 위한 다양한 유한차분법의 채택으로 모형의 개선이 시도되었다. 이러한 시도들에는 Lax method, Upwind scheme method 등이 있다.

단순연속방정식 모형을 이용한 대표적인 시뮬레이션 모형으로는 Michalopoulos 등(1991)이 Lax method를 사용하여 개발한 KRONOS가 있다.

### 2) High-order continuum 모형<sup>5,7,10,12)</sup>

가속도방정식 모형은 단순연속방정식 모형에서 고려하지 못하는 교통류의 내부효과(inertia effects)와 가속도의 영향을 고려하기 위해서 시간과 공간에 대한 속도의 변화를 나타내는 가속도방정식을 추가로 사용한다. 식(5)는 Payne(1971,1979)에 의해 제안된 가속도방정식으로 시간에 대한 속도의 변화율은 후방전달항, 균형항, 전방예상항의 3개항에 의해 결정된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{T} \left[ u_e(k) - u - \frac{\nu}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] \quad (5)$$

여기서, 후방전달항(convection term)은 상류부의 속도를 가능하면 유지하려는 노력으로 상류부와 현구간의 속도차이를 전달한다. 균형항은(relaxation term)은 구간의 실제속도는 일정시간이 경과한 후, 밀도에 의해 결정되는 균형속도에 도달하려는 노력으로 계수 T에 의해 가중된다. 마지막으로 전방예상항은 하류부의 교통상황에 대응하려는 노력으로 운전자가 현재의 구간과 하류구간의 밀도차이에 대응하여 가감속하는 것으로 계수  $\nu$ 에 의해 가중된다.

가속도방정식 모형은 단순연속방정식 모형에 비해 개념적으로 우수하지만 모형정산의 어려움과 계산시간의 증가라는 단점을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 가속도방정식 모형은 독립된 가속도 방정식의 사용으로 속도의 가감속현상을 어느 정도 표현할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

가속도방정식 모형을 이용한 대표적인 시뮬레이션 모형으로는 Lieberman 등(1982)이 개발한 FREFLO가 있다.

### 3) 기존 모형의 한계

도시고속도로 교통류 관리를 위해 사용되고 있는 기존 거시적 시뮬레이션 모형들은 FREFLO, FREQ, KRONOS 등이 있다. 하지만, 기존 모형들은 진출교통량을 본선 교통량 중 일정 비율이나 일정한 양을 진출시키기 때문에 교통정보제공과 돌발상황 발생으로 인해 달라질 수 있는 운전자의 경로선택 과정에 대한 고려가 미흡한 실정이며,<sup>1)</sup> 실제 모형의 적용을 위해서는 시간평균속도와 같은 지점 수집자료가 아닌 공간평균속도, 밀도와 같은 신뢰성 있는 구간 수집자료의 획득 방법이 요구된다.

## 2. 모형 선정

본 절에서는 기존 거시적 연속교통류 모형들의 교통류 재현력과 모형별 특성을 알아보기 위해 단순연속방정식 모형과 가속도방정식 모형 중에서 대표적인 5개의 모형을 선정한다.

단순연속방정식 모형의 선정에서는 속도-밀도의 결정론적인 가정과 수치해석적 방법으로 인해 발생하는 잠금(lockup)현상을 해결할 수 있는 유한차분법인 lax method와 upwind scheme method를 사용하는 모형과 교통량-밀도관계가 삼각형 관계라는 가정하에서 개발된 Daganzo(1993, 1995)의 Cell-Transmission 모형을 선정하였다. Cell-Transmission 모형도 모든 upwind scheme의 원조라 할 수 있는 Godunov's method를 사용하기 때문에 잠금현상이 발생하지 않는다.<sup>9)</sup>

가속도 방정식 모형에서는 Hilliges(1995)가 제안한 모형과 Papageorgiou(1989)가 제안한 모형을 선정하였다. Hilliges가 제안한 모형은 가속도방정식 모형 중에서는 상당히 단순화된 모형으로 가속도방정식 모형의 원조라 할 수 있는 Payne(1971)의 모형에 들어 있는 전방예상항을 별도의 항을 사용하지 않고도 표현함으로써 모형 계산시간과 모형정산이 매우 용이해진 모형이며, Papageorgiou가 제안한 모형은 전통적인 가속도 방정식인 Payne의 모형에 진출입 램프로 인한 효과를 반영할 수 있는 항이 추가된 모형이다.

최종적으로 연속교통류 재현을 위해 선정된 거시적 모형은 총 5개이며 아래와 같다.

- Lax method model
- Upwind scheme model
- Cell-Transmission model(1993, 1995)
- Hilliges' model(1995)
- Papageorgiou's model(1989)

### 1) Lax method 모형<sup>2)</sup>

3개의 상태방정식을 사용하며 시간에 대한 밀도의 변화가 전,후방 셀의 교통량과 밀도에 의해 결정되는 모형이다.

### 2) Upwind scheme 모형<sup>6,7)</sup>

두 셀간에 생기는 충격파 방향에 따라 전방으로 전

이되는 교통량이 결정되는 모형이다. Upwind 모형에서는 교통량 전이계수를 사용함으로써 하류측으로 전이되는 교통량의 크기를 조절할 수 있는 모형이다.

### 3) Cell-Transmission 모형<sup>8,13)</sup>

교통량과 밀도의 관계를 삼각형 관계로 가정하며, 이때 전이 교통량은 상류부 셀의 진출용량과 하류부 셀의 진입용량의 최소값으로 결정하는 모형이다. 이 모형의 결과값은 교통량-밀도 관계식에 의해 영향을 많이 받기 때문에 좋은 결과값 산출을 위해서는 정밀한 교통량-밀도 관계식의 획득이 전제되어야 한다.

### 4) Hilliges 모형<sup>12)</sup>

시간에 대한 밀도와 속도 변화를 추가적인 예측항의 사용 없이도 상,하류부 셀의 교통변수들을 함께 고려하여 예측한다. 이 모형은 기존 가속도방정식 모형을 상당히 단순화시킨 모형이라 할 수 있다.

### 5) Papageorgiou 모형<sup>7)</sup>

전통적인 가속도 방정식에 진입 교통량으로 인한 영향을 고려한 모형이다. 속도 변화는 후방전달항, 균형항, 전방예상항, 램프영향항의 4개 항에 의해 결정되며, 다른 모형에 비해 많은 파라메타가 포함되어 있어서 정밀한 파라메타 값의 추정이 중요하다.

## III. Numerical Example을 이용한 성능 비교

도시고속도로의 교통관리 중 가장 중요한 것은 반복 및 비반복 정체로 인해 발생하는 대기행렬이 얼마나 자라나거나 줄어드는 지를 시공간적으로 예측하는 것이다. 따라서 가상의 교통상황 시나리오 설정은 모형들이 대기행렬의 발생과 소멸을 얼마나 정확하게 재현하는 지를 알아볼 수 있도록 설정한다.

수치적 예제를 사용한 모형 성능 비교의 기본 틀은 가상의 도로 및 통행상황 하에서 이론적으로 계산한 분석적 결과와 모형들의 시뮬레이션 결과와의 차이를 통해서 모형별 성능 비교를 실시하는 것이다.

### 1. 분석적 결과

본 절에서는 도시고속도로에서 돌발상황 발생시 또는 병목에서 특정시간대에 반복적으로 발생하는 혼잡의

진행과정을 이론적으로 추적할 수 있는 충격파 이론을 사용하여 가상의 교통상황에 대한 분석 결과를 도출하였다.

〈그림 1(a)〉는 가정한 도로의 기하구조를 보여주며, 〈그림 1(b)〉는 가상도로의 통행수요를 보여준다. 〈그림 1(b)〉에서 초기 30분 동안 유입교통량은 3,000대/시이며, 이후 30분 동안은 5,000대/시로 증가하여 병목구간의 용량인 4,000대/시를 초과하게 되어 대기행렬을 발생시킨다. 이후 20분 동안은 병목구간의 용량과 동일한 유입교통량으로 인해 대기행렬이 자라나지 않다가 마지막에 3,000대/시로 감소함으로써 대기행렬이 점차 소멸하는 상황을 가정하였다. 〈그림 1(c)〉는 선정된 모형들에 사용되는 교통량-밀도 관계를 보여준다. 이때 선정된 모형 중에서 Cell-Transmission 모형은 교통량-밀도 관계를 삼각형 관계로 가정하여 개발되었기 때문에 삼각형 관계식을 사용하며, 나머지 4개 모형은 중형 관계식을 적용하였다. 〈그림 1(c)〉에서 알 수 있듯이 모형의 임계밀도와 최대밀도는 각각  $k_c=32.32$ 대/km,  $k_{jam}=100$ 대/km로 같지만, 자유속도는 삼각형 관계식이 61.88km/h, 중형 관계식이 102.02km/h로 달라진다. 따라서, 각기 다른 교통량-밀도 관계식의 적용으로 인해 충격파 이론을 이

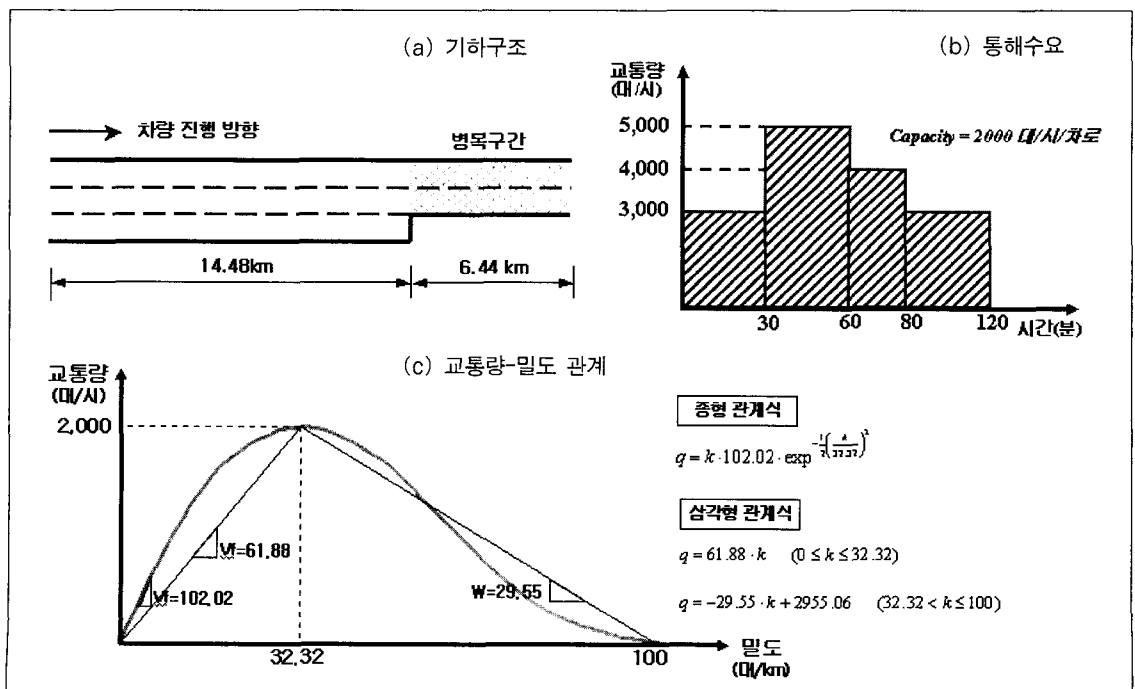
용한 분석적 결과는 각기 다른 두 개의 해를 갖게 된다.

〈그림 2〉는 충격파 이론 적용을 위한 교통변수 값들과 교통량-밀도 관계식에 따른 이론적 결과를 보여 주며, 그림에서 ①-②-③-④는 교통상황, I-II-III-IV-V는 충격파 속도를 나타낸다. 〈그림 2(a)〉를 예로 들어, 충격파 이론을 이용하여 대기행렬의 발생과 소거과정을 추적하면 다음과 같다.

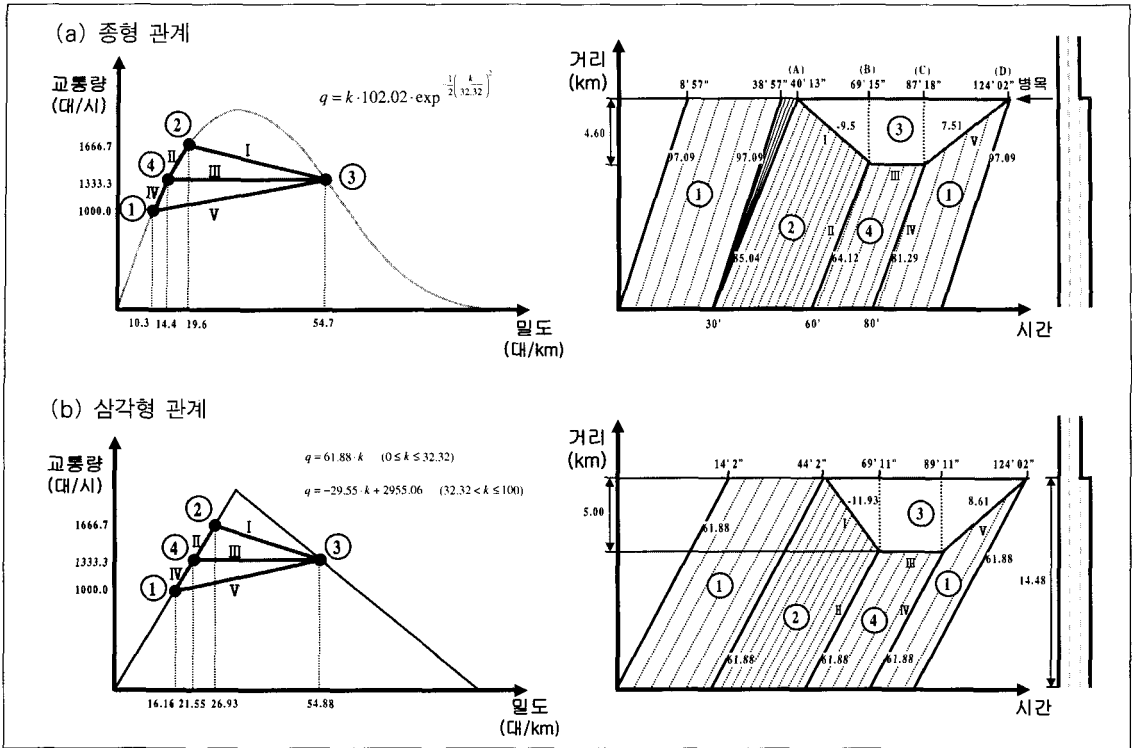
- 초기 교통량 유입(30분간) : ①
  - 병목구간 용량보다 적은 교통량 유입으로 인해 대기행렬이 발생하지 않음
- 두 번째 교통량 유입(30분간) : ②
  - 병목구간의 용량을 초과하여 후방충격파와 발생 : I
- 세 번째 교통량 유입(20분간) : ④
  - 병목구간 용량만큼의 교통량 유입으로, 대기행렬이 더 이상 자라나지 않는 고정충격파와 유입교통량 사이에 전방충격파와 발생
  - ②과 ④에 의한 전방충격파와 발생 : II

$$U_I = \frac{q_{30} - q_{30}}{k_{30} - k_{30}} = \frac{1333.3 - 1666.7}{54.7 - 19.6} = -9.5 \text{ (km/h)}$$

$$U_{II} = \frac{q_{40} - q_{30}}{k_{40} - k_{30}} = \frac{1333.3 - 1666.7}{14.4 - 19.6} = 64.12 \text{ (km/h)}$$



〈그림 1〉 가상자료(도로의 기하구조, 통행수요, 교통량-밀도 관계)



〈그림 2〉 교통량-밀도 관계식에 따른 충격파 발생도

- 용량만큼의 유입으로 고정충격파 발생 : III 충격파 I 발생시점(A) 계산

$$A = 30' + \frac{dist}{V_{at 2}} = 30' + \frac{14.48}{85.04} = 40분 13초$$

충격파 I 과 II 가 만나는 시점(B)과 길이(x) 계산 : 충격파 교차점을 기준으로 충격파에 대한 두 개의 식이 만들어짐

$$\frac{x}{(B-A)} = |U_I|, \frac{(14.48-x)}{(B-60')} = |U_{II}| \text{ 에서,}$$

2개의 미지수를 구하면, x=4.60km, B=69분 15초

- 네 번째 교통량 유입(40분간) : ①

- 병목구간 용량보다 적은 교통량 유입으로, 대기행렬을 소멸시키는 전방충격파와 유입교통량 사이에 전방충격파 발생

- ④과 ①에 의한 전방충격파 발생 : IV

$$U_{IV} = \frac{q_I - q_3}{k_I - k_3} = \frac{1000 - 1333.3}{10.3 - 14.4} = 81.29 \text{ (km/h)}$$

- 초기 교통량 유입으로 전방충격파 발생 : V 충격파 V 발생시점(C) 계산: 충격파 V 발생시점은 네 번째 유입 교통량 발생시간과 전방충격파 IV가

대기행렬 발생 지점까지 도달하는데 걸리는 시간을 더한 시간임

$$C = 80' + \frac{dist-x}{U_{IV}} = 80' + \frac{14.48-4.60}{81.29} = 87분 18초$$

①과 ③에 의한 전방충격파 발생 : V

$$U_V = \frac{q_1 - q_3}{k_1 - k_3} = \frac{1000 - 1333.3}{10.3 - 54.7} = 7.51 \text{ (km/h)}$$

마지막으로, 대기행렬 소거시간(D) 계산 : 대기행렬이 줄어드는 시점과 대기행렬이 소거되는데 걸리는 시간을 더함

$$D = 87'18'' + \frac{x}{U_V} = 87'18'' + \frac{4.60}{7.51} = 124분 02초$$

마찬가지 방법으로 교통량-밀도의 삼각형 관계식에 대해서도 충격파 이론을 이용하여 대기행렬의 생성과 소거과정을 추적할 수 있는데, 삼각형 관계식에서는 전방충격파의 진행속도와 자유속도가 동일하기 때문에 대기행렬을 쉽게 추적할 수 있다.

충격파이론을 통하여 구한 대기행렬은 실제 대기행렬을 의미하는데, 더 자세한 충격파 속도계산에 관한 내용은 손봉수(1997)의 연구를 참조하기 바란다. 참

고적으로 실제 대기행렬(real queue)를 발생시키는 충격파 기법과 수학적 대기행렬(point queue)을 발생시키는 누적입출입차 기법의 비교에 대한 손봉수(1997)의 연구에서는 두 기법에서 정의하는 대기행렬의 차이로 인해 두 기법간의 대기행렬 발생 시점은 다르지만, 총통행시간과 지체시간은 동일하다는 것을 밝힌바 있다.<sup>3)</sup>

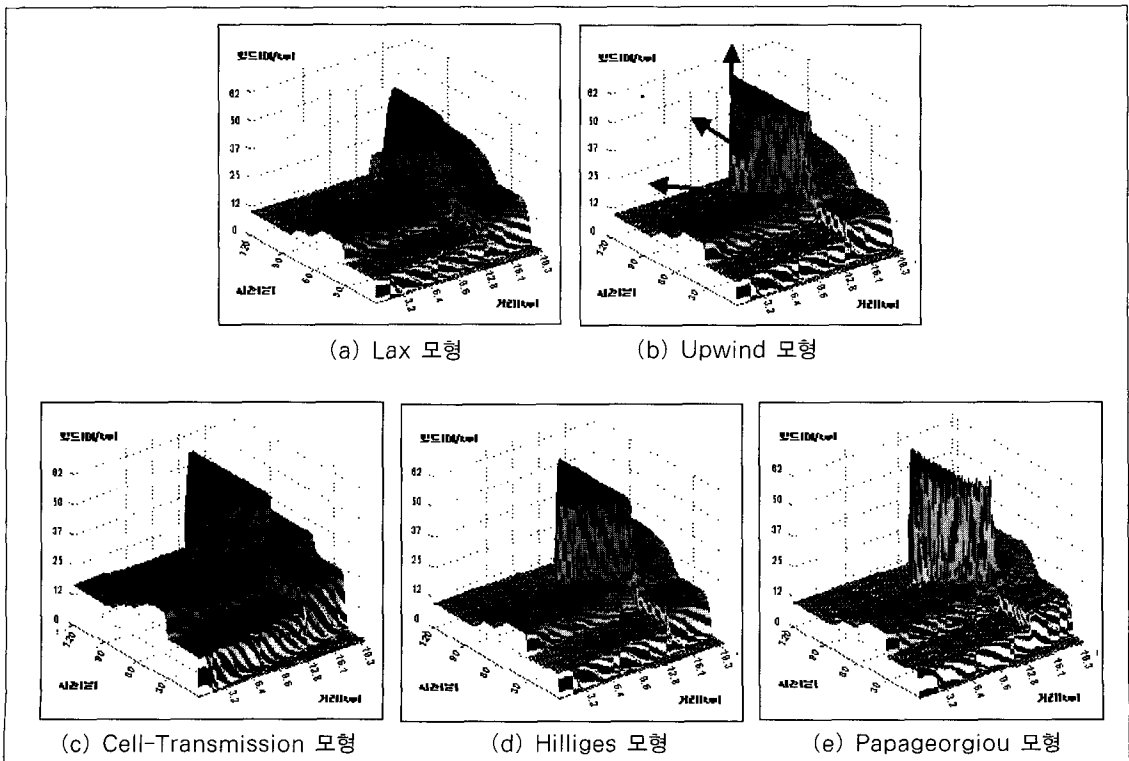
## 2. 모형별 성능 비교

모형별 성능 비교를 위해서 앞 절에서 가정된 자료를 그대로 이용하여 선정된 5개 모형별로 시뮬레이션을 실시하였다. 이때, Cell-Transmission 모형의 교통량-밀도 관계식은 삼각형 관계식을 사용하며, 그 외 모형들은 종형 관계식을 사용하였다. <그림 3>은 5개 모형들의 모의실험 결과로서 시간에 따른 구간별 밀도 값의 3차원 변화를 보여주고 있다. 예를 들어, <그림 3(b)>의 Upwind 모형에서 3개의 화살표는 충격파의 방향을 나타내며 사다리꼴 모양은 시공간도상에 나타나는 모형의 대기행렬을 의미한다.

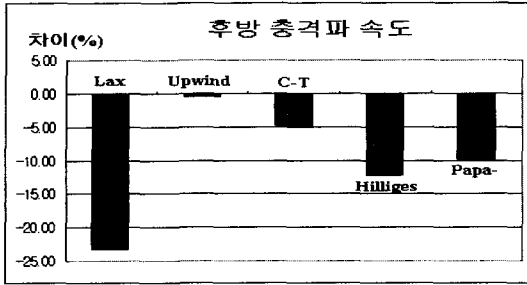
모형별 시뮬레이션 결과와 앞 절의 충격파이론을 통해 계산된 결과의 비교를 통한 모형별 성능 비교는 대기행렬 재현력 측면과 결과값의 안정성 측면에서 실시하였다. 먼저, 모형의 재현력 평가는 병목구간으로부터의 모형별 최대 대기행렬 길이와 대기행렬을 발생시키고 소멸시키는 전,후방 충격파의 속도 그리고 고정충격과 지속시간을 충격파이론에서 나온 계산 결과와의 차이를 가지고 비교하였다. <그림 4>는 선정된 모형별 대기행렬 재현력의 분석 결과를 보여준다.

실제, 병목구간에서 발생하는 대기행렬의 진행과정이 이론적 분석 결과를 그대로 따르지는 않겠지만, 충격파 이론을 통한 분석적 결과가 어느 정도 신뢰할 만한 기준으로 사용될 수 있다는 전제 하에 모형별 재현력을 비교하였다. 모의실험 결과에 대한 신뢰성 판단은 수치해석적 접근방법에 의해 발생하는 절삭오차들을 고려하여 분석적 계산결과와 시뮬레이션 모형들에서 나온 결과들과의 차이가 10%내에 있을 경우 모형의 교통류 재현력은 신뢰할 만한 수준으로 간주하였다.

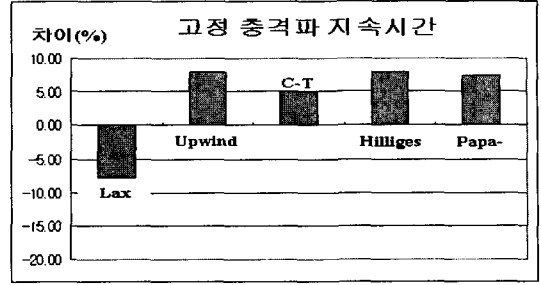
먼저, <그림 4>에서 Lax 모형은 다른 모형에 비해



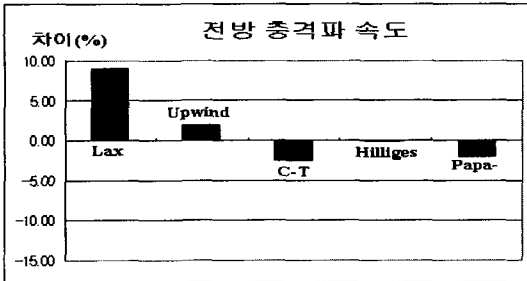
<그림 3> 시뮬레이션을 통해 계산된 모형별 3차원 밀도 시공간도



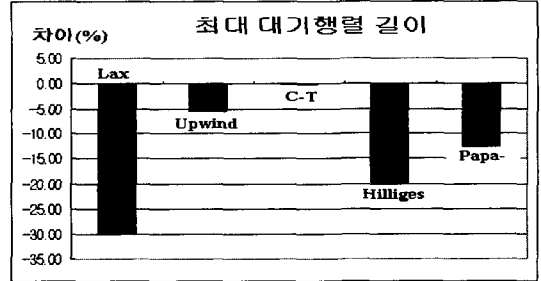
(a) 후방 충격파의 속도 비교



(b) 고성 충격파의 지속시간 비교



(c) 전방 충격파의 속도비교



(d) 최대 대기행렬 길이의 비교

〈그림 4〉 모형별 대기행렬 재현력 비교

충격파 속도, 대기행렬 길이에서 분석적 결과와 많은 차이를 보인다. Lax 모형에서는 현재 셀의 밀도가 상,하류부 셀 밀도값의 산술평균에 의해 가중되기 때문에 병목 시작부에서는 혼잡이 하류부(비혼잡구간)로 상당수 진행해 버리며, 또한 상류부로는 혼잡이 빠른 속도로 흩어지는 현상이 발생한다. 이에 대한 대책으로 병목구간에 대해 추가적인 경계조건을 수립하거나  $\Delta x$ 와  $\Delta t$ 값에 대한 조정이 필요할 것으로 사료된다.<sup>8)</sup>

Upwind 모형과 Cell-Transmission 모형은 분석적 계산 결과와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 따라서, 이 두 모형은 이론적으로 계산된 충격파를 충실히 재현하는 모형임을 알 수 있다.

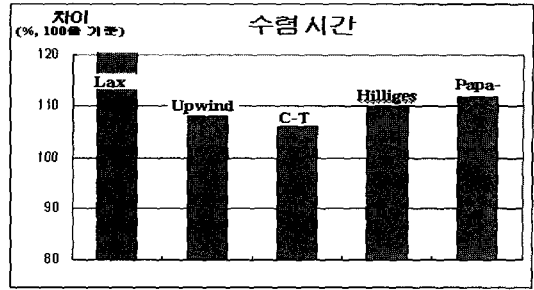
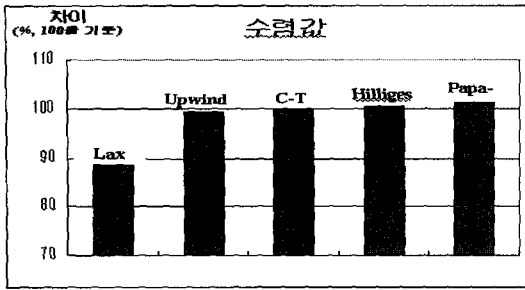
가속도방정식 모형인 Hilliges 모형과 Papageorgiou 모형은 단순연속방정식 모형과는 약간 다른 결과를 보인다. 전방예상항이 포함된 독립된 속도방정식을 사용하는 가속도방정식 모형에서는 혼잡상황 발생시 대기행렬 발생시점이 단순연속방정식 모형보다 늦게 시작하며, 후방 충격파의 속도가 상대적으로 낮고 이로 인해 대기행렬 길이 역시 단순연속방정식 모형에 비해 작게 나왔다. 분석결과와의 차이는 대부분 10% 내외로 단순연속방정식 모형보다는 크지만, 수치해석적 접근방법에 의한 절삭오차를 고려한다면 어느 정도

신뢰할 만한 결과를 도출하고 있다고 판단된다. 이 두 모형은 사용하는 변수값에 따라 결과가 상당히 달라질 수 있는데, 적절한 변수값 설정으로 실제 도로에서 기상상황과 운전자 행태에 따라 달라질 수 있는 대기행렬의 전이과정을 다양하게 재현할 수 있을 것으로 사료된다.

안정성 측면의 비교는 모형들의 수치적 결과값이 분석적으로 계산된 밀도값에 얼마나 빠르게 또한 안정적으로 그 값에 수렴하는지를 분석하는 consistency 비교를 통하여 진행된다.<sup>6)</sup> Consistency 비교를 위해 충격파 이론에 의해 계산된 대기행렬의 발생 및 소거 시점 또한 임의의 대기행렬 길이(병목으로부터 0.8km와 3.2km)에서 예상되는 밀도값과 대기행렬 발생시점을 기준으로 하여 모형별 시뮬레이션 결과값을 서로 비교하였다.

〈그림 5〉는 모형별 안정성 평가 결과를 보여주고 있는데, 밀도 수렴값 비교에서는 대부분의 모형들이 충격파 이론에서 계산된 밀도값에 수렴하고 있으며, 수렴시간의 비교에서는 모든 모형이 분석적 결과보다 조금 늦게 예상된 밀도값에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 수렴시간의 비교에서 보여지듯이 Lax 모형을 제외한 단순연속방정식 모형은 가속도방정식 모형보다 수렴시간이 약간 빠른 것을 알 수 있다.





(a) 지점별(a-e) 밀도 수렴값 비교

(b) 지점별(a-e) 밀도 수렴시간 비교

(그림 5) 모형별 안정성 비교

(표 1) 모형별 재현력과 안정성 비교

구분	모형	재현력				안정성	
		후방 충격파	고정 충격파	전방 충격파	최대 대기행렬 길이	밀도 수렴값	수렴 시간
단순연속 방정식 모형	Lax	×	○	○	×	△	×
	Upwind	⊙	○	⊙	○	⊙	○
	C-T	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○
가속도 방정식 모형	Hilliges	△	○	⊙	×	⊙	○
	Papa-	○	○	⊙	△	⊙	△

주 : 분석값과의 차이에 따라 ⊙(우수), ○(양호), △(보통), ×(불량)

이상의 결과를 종합하여 단순연속방정식 모형과 가속도방정식 모형을 비교하기 위해, 시뮬레이션 결과와 충격파 이론을 이용한 분석 결과와의 차이를 5%를 기준으로 우수, 양호, 보통, 불량 4단계로 구분한 결과가 <표 1>에 나타나 있다.

비교 결과, 모형별 재현력에서 크게 차이가 나는 부분은 후방충격파(대기행렬 발생) 재현 부분인데, 이는 단순연속방정식 모형은 충격파 이론에 충실한 충격파를 만들어내기 때문에 분석결과와 거의 일치했지만, 가속도방정식 모형은 독립된 속도방정식의 사용으로 인해 단순연속방정식 모형보다는 후방 충격파의 속도와 이로 인한 대기행렬 길이 값이 분석값보다 약간 작게 나오는 현상을 보인다. 하지만, 재현력 부분에서는 대체적으로 두 모형 모두 양호한 결과를 보인다고 할 수 있겠다.

수치해석적 접근방법의 차이로 인해 결과값이 다른 모형보다 안 좋게 나오는 Lax 모형을 제외할 경우, 두 모형들의 수렴 밀도값은 차이가 발생하지 않으며, 계산된 충격파 또한 양호한 결과를 보임을 알 수 있다. 하지만, 수렴시간에 있어서는 약간의 차이가 발생

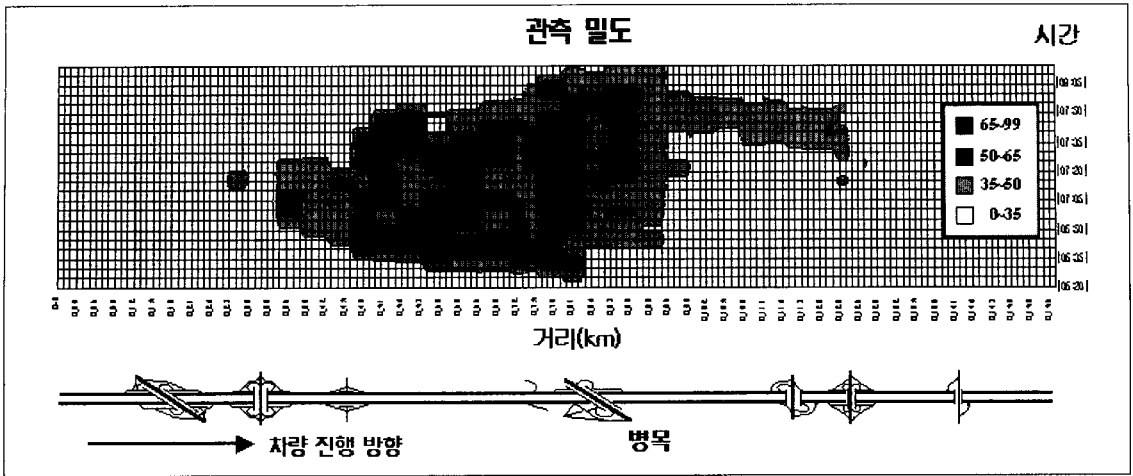
하는데 단순연속방정식 모형이 가속도방정식 모형보다 더 빠르게 수렴하기 때문에 안정성 측면에서 볼 때는 단순연속방정식 모형이 가속도방정식 모형보다는 좀더 안정적인 모형으로 판단된다.

#### IV. 실측 현장자료를 이용한 성능 비교

시뮬레이션 모형들의 현장 적용성을 알아보기 위해 실측 현장자료를 이용한 모형 성능 비교를 실시하였다. 현장자료는 서울시의 대표적인 도시고속도로인 내부순환로의 교통관리시스템이 구축되면 고속도로 본선과 진출입램프에서의 자료수집이 가능하지만 아직까지 시스템 구축 및 안정화 작업 중에 있기 때문에, 자료수집의 제약을 고려하여 기존에 조사된 국외 자료를 이용하였다. 분석을 위해 사용한 실측자료는 미국의 Nimitz Freeway에서 1967년 11월 1일 오전 6:15-08:21분에 항공촬영과 검지기를 통해 수집한 교통 자료(밀도, 교통량)로, 분석 대상 도로의 기하구조는 분석구간 연장 15.7km, 차로수 3차로에 진출입램프가 16개로 구성되어 있다.

<그림 6>은 관측자료를 수집한 대상 도로의 기하구조와 항공촬영에 의해 얻어진 본선의 시간대별 관측밀도를 보여준다. <그림 6>에서 대상도로는 병목구간에서 과도한 진입램프 교통량으로 인해 혼잡이 발생하며, 시간이 지남에 따라 대기행렬이 점차 상류부로 확산되는 현상을 보여주다가 다시 혼잡이 해소되는 현상을 보여준다.

대상도로에 대한 거시적 모형들의 시뮬레이션을 위해서는 대상도로의 구간별 교통변수값(용량, 최대밀도, 임계밀도, 자유속도, 진출입교통량)의 설정이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 기존 연구 중 동일한



〈그림 6〉 대상도로의 시간대별 현장 관측 밀도값

〈표 2〉 구간별 교통변수값 설정

구분	용량 (대/시/lane)	임계밀도 (대/km)	자유속도 (km/시)	최대밀도 (대/km)
본선구간	1,862	34.5	89	120
진출부	1,820	34.1	88	120
진입부(일반)	1,683	31.9	87	120
진입부(병목)	1,585	30.4	86	120

자료 : Bongsoo Son(1996), Newell's Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Ph.D. thesis, University of Toronto.

대상도로에 대한 모의실험을 실시한 손봉수(1996)의 박사학위 논문을 참조하였다. 대상도로의 주요 구간별 교통변수값은 〈표 2〉처럼 본선구간, 진출부, 진입부(일반), 진입부(병목)로 구분하여 설정되며, 대상도로의 진출입 교통량은 15분별 자료를 사용한다. 모형의 시뮬레이션 결과에는 입력자료의 수집주기(time interval)도 영향을 미칠 수 있기 때문에, 공정한 모형 성능

비교를 위해서는 모형별로 적절한 수집주기를 사용해야 하지만 본 연구에서는 동일한 15분별 자료를 사용함으로써 수집주기에 민감할 수 있는 모형에서는 이 영향이 포함될 수 있음을 밝혀둔다.

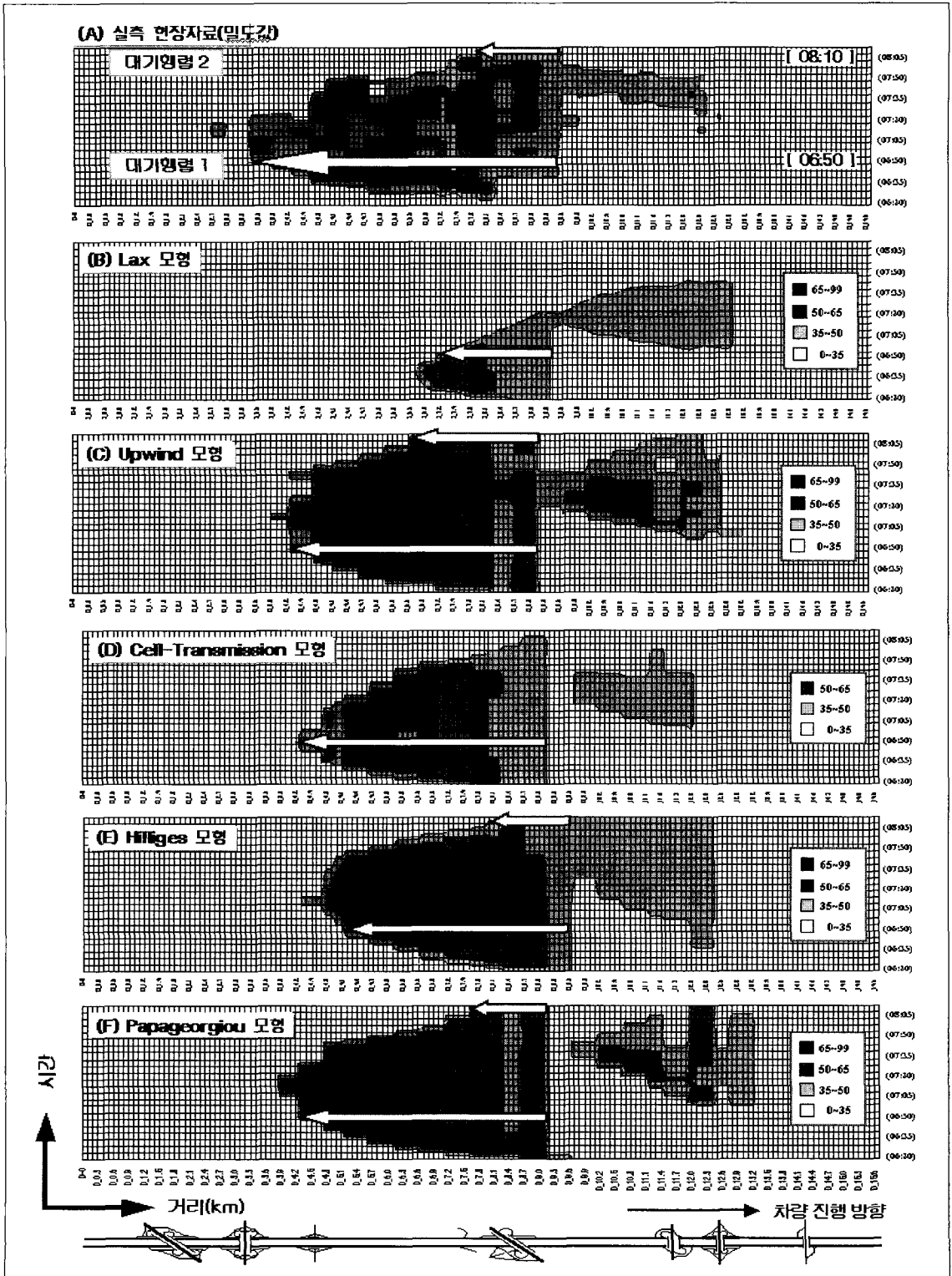
교통류 변수값 외에 모형에 들어가는 파라메타값의 설정은 시행착오법을 통한 파라메타별 민감도 분석 결과를 근거로 설정하였으며, 추가로 거시적 시물레이션 모형의 수행시간을 줄이기 위해 셀 구간거리와 시물레이션 시간간격에 민감한 Lax모형을 제외한 나머지 모형들은 진출입램프가 많은 대상도로의 특성상 비등간격식으로 변환하여 시물레이션을 실시하였다.

실측 현장 자료를 이용한 분석에서는 기존 연구결과와 비교를 위해 Newell 모형(손봉수, 1996)의 평가결과도 일부 포함시켜 비교하였다. 〈표 3〉과 〈그림 7〉은 모형별 시물레이션 결과로서, 실측자료와 모의실험자료와의 밀도값에 대한 오차 비교와 대기행렬 발생

〈표 3〉 모형별 시물레이션 결과

구분	오차 비교			대기행렬 길이		총통행 시간주 (대·시)
	MARE	MAE	EC	대기행렬1	대기행렬2	
현장값	-	-	-	6.1km	1.7km	2,301
단순연속방정식모형	Lax	0.464	404.1	0.6	2.3km	1,732
	Upwind	0.374	133.7	0.83	5.0km	2,435
	C-T	0.284	136.1	0.80	5.0km	1,834
가속도방정식모형	Hilliges	0.377	138.9	0.82	4.6km	2,631
	Papa-	0.343	120.1	0.84	5.0km	2,368
Newell <sup>*)</sup>	-	-	-	6.0km	1.7km	2,301

주) Newell 모형의 분석결과는 손봉수(1996)의 연구결과를 이용



〈그림 7〉 모형별 시공도상의 밀도값과 대기행렬 발생길이

길이(대기행렬 진행시, 대기행렬 해소시) 그리고 대상도로의 총통행시간을 보여준다.

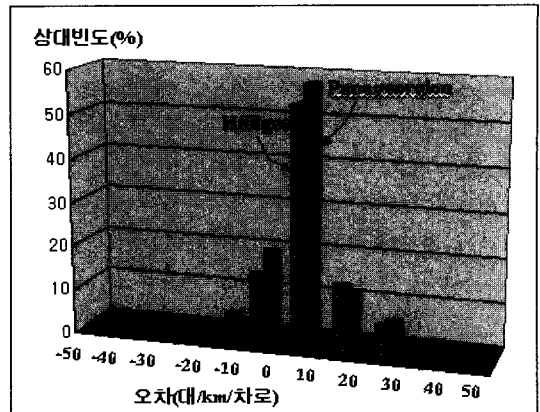
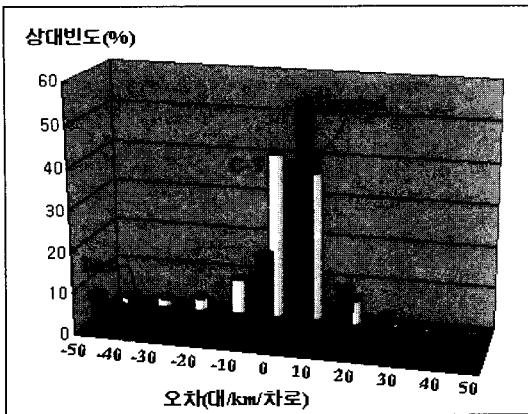
실측자료를 이용한 모형의 오차비교를 위해서는 모의 실험 결과와 실측치와의 차이인 평균제곱오차(MSE), 평균절대상대오차(MSRE), 등가계수(EC)를 이용하였으며, 대기행렬 발생 길이 비교를 위해서는 <그림 7(a)>의 실측자료에서 화살표로 표시된 부분인 최대 대기행렬이 처음으로 발생하는 06:50분과 대기행렬이 해소되고 있는 08:10분일 때의 대기행렬 발생 길이를 비교 대상으로 설정하였다. 총통행시간은 구간내 차량들의 통행시간의 합으로서,  $\int \int k(x, t) dx dt$ 에 의해 계산되며, 본 연구에서는 손봉수(1996)의 연구결과를 이용하였다.

모형별 오차를 알아보기 위해 <표 3>에서 등가계수(EC)값을 비교해 보면, 1.0에 가장 가까운 결과를 보인 가속도방정식 모형의 Papageorgiou 모형과 단순연속방정식 모형의 Upwind 모형이 다른 모형보다 대상도로의 교통상황을 더 현실적으로 재현하고 있는 것으로 판단된다. 여기서, Lax 모형의 결과가 다른 모형에 비해 상당히 차이가 많이 발생하는데, 이는 Lax 모형의 유한차분법 사용을 위해서는 좀더 정밀한 셀 구간거리, 시물레이션 시간간격, 그리고 세분화된 경계조건의 사용이 요구된다는 것을 보여준다. 본 연구에서는 Lax 모형의 시물레이션 수행시 이런 문제들을 충분히 고려하여 시물레이션을 수행하지 않았기 때문에 좀더 나은 결과를 도출하지 못했지만, 앞으로 좀더 세밀한 파라메타와 경계조건을 사용하면 시물레이션 결과가 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

대기행렬 발생 길이는 모형별로 만들어지는 충격파 속도와 밀접한 관련이 있는데, <그림 7(a)>의 대기행렬1을 통해서는 후방충격파를 대기행렬2를 통해서는 전방충격파의 정도를 가늠해 볼 수 있겠다. 먼저 후방충격파에 의해 발생하는 대기행렬1의 발생길이는 모든 모형이 실측된 대기행렬 길이인 6.1km보다 짧은 결과를 보였으며, 이 결과는 3장의 Numerical example을 이용한 성능 비교에서 나온 대기행렬 예측 결과와 유사하다. 비교적 이론적인 충격파를 잘 나타내었던 단순연속방정식의 Upwind 모형과 Cell-Transmission 모형의 대기행렬 길이는 5.0km였고, 가상자료를 통한 분석에서 다른 모형보다 좀 작은 후방충격파 속도를 만들어낸 가속도 방정식의 Hilliges 모형은 관측

자료를 이용한 분석에서도 대기행렬 길이가 4.6km로 다른 모형에 비해 작게 나왔으며, 반면에 가상자료를 통한 분석시 Hilliges 모형보다 큰 값의 후방충격파 속도를 산출했던 Papageorgiou 모형은 5.0km의 대기행렬 길이를 만들어내었다. <그림 7>에서 대기행렬 2의 발생 길이 비교에서는 가속도방정식의 Hilliges 모형과 Papageorgiou 모형의 대기행렬이 1.6km와 1.7km로, 실제 대기행렬 발생 길이를 잘 재현하고 있다. 가상자료를 이용한 모형별 전방충격파 분석시는 모형별 차이가 거의 발생하지 않았지만, 실측자료를 이용한 분석에서는 모형별로 약간의 차이가 발생하고 있다. 대기행렬 2의 재현시 차이가 발생하는 것은 <그림 7>에서 보여지듯이 모형별 후방충격파의 발생시점이 다르다는 것에 착안하여 분석할 수 있다. <그림 7>에서 삼각형 교통량-밀도 관계식을 사용하는 Cell-Transmission 모형의 전방충격파 발생시점은 다른 모형에 비해 상당히 빨라서 혼잡으로 발생한 대기행렬이 08:10분 이전에 소멸해 버렸지만 이와는 대조적으로 Upwind 모형의 전방충격파 발생시점은 Cell-Transmission 모형보다 느릴 뿐만 아니라 Hilliges 모형과 Papageorgiou 모형보다도 5분 정도 늦게 시작되고 대기행렬 길이 또한 실측값보다 크게 나왔다. 여기서, 모형별로 대기행렬 2의 발생길이가 차이가 보인 이유는 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 그중 하나는 모형구축시 셀 구간거리를 100~500m 사이의 비등간격식으로 구성함으로 인해 후방충격파가 발생하는 시간대에서의 모형별 밀도값의 작은 변동들이 셀 구간 거리의 크기에 따라 조금씩 증폭되거나 상쇄되는 영향에 의해 발생하는 것과 모형 자체의 특성에 의한 것으로 사료된다.

대기행렬 비교와 마찬가지로 운전자들이 선호하는 통행시간 정보는 모형의 성능 비교에 있어서 중요한 요소이다. <표 3>에 나와있는 총통행시간 비교 결과에서는 Upwind 모형과 Papageorgiou 모형이 Newell 모형을 제외한 다른 모형에 비해 실측값에 가까운 결과를 보였다. 하지만, 최대 대기행렬 길이가 실측값보다 짧으면서 통행시간이 실측치보다 약간 높다는 것은 혼잡발생시 약간 높은 밀도값을 가지며, 이로 인해 통행시간이 조금 증가함을 알 수 있다. 여기서, Newell 모형의 총통행시간의 추정과 대기행렬 길이의 예측력이 모형의 단순함에도 불구하고 매우 좋은 것을 알 수 있다. 하지만, Newell 모형은 교통량-밀도 관계를



〈그림 8〉 모형에서 밀도 예측시 발생하는 오차 범주별 상대빈도

삼각형 관계로 설정하고 있기 때문에 정밀한 관계식이 요구되며, 용량 근처의 교통상황이 지속될 경우에는 종형 관계식을 사용하는 모형들보다 오차가 커질 수 있는 특성을 가지고 있다.<sup>10)</sup>

다음으로 모형들의 밀도 예측 특성을 알아보기 위해 오차의 분포를 분석하였다. 〈그림 8〉은 모형별 밀도 예측시 발생하는 오차의 크기가 어떻게 분포하고 있는지를 보여주고 있다. 단순연속방정식 모형 중에서 Lax 모형은 혼잡발생시 밀도를 과소 추정하는 경향이 있고, Cell-Transmission 모형은 Upwind 모형보다 오차가 골고루 분포하고 있다. Hilliges 모형과 Papageorgiou 모형은 단순연속방정식 모형보다 밀도값을 조금 높게 산출함을 알 수 있으며, 이런 결과는 가속도방정식 모형이 밀도를 조금 높게 산출한다는 Rathi et. al.(1987)의 연구 결과와 같다.

〈표 4〉의 결과는 〈표 3〉의 결과를 실측값과의 차이를 10%를 기준으로 우수, 양호, 보통, 불량으로 나눠 현장실측값을 비교한 것으로, 파라메타 수정이 요구되는 Lax 모형과 본 연구에서 직접 수행하지 않은 입출입 누적차 모형인 Newell 모형의 결과는 비교에서 제외하였다.

지금까지 실측 현장자료를 이용한 모형 성능 비교를 실시한 결과, 거시적 모형들은 병목구간에 교통수요 과다로 인한 혼잡상황 발생과 해소를 양호하게 재현하고 있음을 알 수 있었다. 하지만, 대기행렬 길이, 총통행시간, 오차발생 분포를 분석해 보면, 모형별로 각기 다른 특성을 가지고 있음을 보여주었다.

〈표 4〉 모형별 성능 비교

구분	오차 비교	대기행렬 길이		총통행 시간 (대·시)
		EC	혼잡 진행시	
단순연속방정식모형	Lax	-	-	-
	Upwind	○	○	×
	C-T	○	○	×
가속도방정식모형	Hilliges	○	△	○
	Papa-	○	○	○

주) 실측값과의 차이에 따라 ○:우수, ○:양호, △:보통, ×:불량

#### IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 기존의 대표적인 거시적 연속교통류 모형들의 성능 비교를 위해 numerical example과 실측 현장자료를 이용하여 모의실험을 통한 분석을 실시하였다.

Numerical example을 이용한 성능 비교 결과, 대기행렬 재현력에서는 모든 모형이 어느 정도 유사한 결과를 산출하였다. 특히, 단순연속방정식 모형은 가속도방정식 모형보다 충격파 이론으로 계산한 결과와 유사한 충격파를 산출하는 모형의 특성이 나타났으며, 수렴값에 도달하는 시간 역시 빠름을 알 수 있었다.

실측 현장자료를 이용한 성능 비교 결과, 추가적인 파라메타의 수정이 요구된 Lax 모형을 제외한 나머지 거시적 모형들은 비교적 현장값을 양호하게 재현해 주었다. 또한 모형의 특성에 따라 대기행렬 길이, 총통행시간, 오차발생 분포가 조금씩 다르게 산출됨을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과 거시적 모형을

이용한 연속교통류 재현을 위해서는 현장의 교통상황과 분석 목적에 적합한 모형을 선정해서 사용하여야 할 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구에서는 거시적 모형들의 성능 비교 결과를 토대로 향후 구축될 내부순환로 교통관리시스템에 사용할 수 있는 거시적 연속교통류 시뮬레이션 모형을 제안하려고 한다. 국내의 도시고속도로 교통관리시스템은 아직 초기 단계라 할 수 있기 때문에, 운영의 용이성과 안정성이 중요하다고 할 수 있겠다. 이러한 관점에서 볼 때 내부순환로 교통관리시스템에서 사용할 수 있는 연속교통류 재현 모형으로 단순연속방정식 모형에서는 많은 수의 파라미터 추정작업 없이도 간단하게 충격파의 정도를 조절할 수 있으며, 모형의 단순함에 비해 우수한 분석 결과를 보이는 Upwind scheme 모형을 제안하며, 더불어 가속도방정식 모형에서는 실제 도로에서 기상상황, 운전자의 운전행태에 따라 다양하게 변하는 교통상황을 재현할 수 있게 하기 위해 가속도방정식 모형의 Papageorgiou 모형을 함께 제안한다.

추후 연구과제로는 국내 도시고속도로에서 수집된 자료를 바탕으로 모형들에 대한 성능 비교를 실시하는 것과 좀더 효과적인 실시간 파라메타 추정과정에 관한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. 강정규(1997), "URFSIM-1: 도시고속도로 교통류 시뮬레이션 모형 개발", 대한교통학회지, 15권 1호.
2. 명지대학교 공학기술연구소(1995), "도시고속도로 교통류 모의실험모형의 개발연구", pp.18~28.
3. 손봉수(1997), "The Consistency of Two Conventional Techniques in Estimating the Impact of Freeway Congestion", 대한교통학회지, 15권, 제1호, pp.193~213.
4. V. F. Hurdle, Bongsoo Son(2000), "Road Test of a Freeway Model", TR. Part A 34, pp.537~564.
5. Paul Ross(1988), "Some Properties of Macroscopic Traffic Model", TRR 1194.
6. H. Zhang and T. Wu(1997), "Numerical Simulation and Analysis of Traffic Flow", TRB.
7. Markos Papageorgiou et al(1989), "Macroscopic Modelling of Traffic Flow on The Boulevard Peripherique in Paris", TRB.
8. Panos Michalopoulos et al(1991), "Enhancement and Field Testing of a Dynamic Freeway Simulation Program", TRR1320, pp.203~215.
9. Pergamon(1999), "Transportation and Traffic Theory", pp.81~104.
10. Bongsoo Son(1996), "Newell's Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic", Ph.D. thesis. University of Toronto.
11. Paul Ross(1988), "Traffic Dynamics", TR. Part B. pp.421~435.
12. Martin Hilliges and Wolfgang Weidlich(1995), "A Phenomenological Model for Dynamic Traffic Flow in Networks", TR. Part B.
13. Carlos F. Daganzo(1994), "The Cell Transmission Model(Part II : Network Traffic)", Univ. of California, Berkeley.

✉ 주 작 성 자 : 임성만

✉ 논문투고일 : 2001. 11. 22

논문심사일 : 2002. 1. 21 (1차)

2002. 5. 30 (2차)

2002. 6. 5 (3차)

심사판정일 : 2002. 6. 5

✉ 반론접수기간 : 2002. 10. 30