

■ 論 文 ■

Momentum Equation을 이용한 차로감소구간 교통류의 Higher-Order Continuum 모형 개발

Developing Higher-Order Continuum Models for Describing Traffic Flow Behavior at Lane Drops Using Momentum Equation

손 영 태

(명지대학교 교통공학과 부교수)

양 총 현

(명지대학교 교통공학과 석사과정)

박 우 신

(명지대학교 교통공학과 석사과정)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 내용 및 범위
 - II. 이론적 고찰
 - 1. 모형을 구성하는 3가지 상태 방정식
 - 2. 수치해석을 이용한 해(solution)의 개념
 - 3. 고차연속교통류모형의 단점
 - III. 모형 개발
 - 1. 모형의 구성
 - 2. 차로변경을
 - IV. 모수 추정
 - 1. 모수 추정 방법
 - 2. 모수 추정 결과
 - V. 모의 실험
 - 1. 자료 수집
 - 2. 모형 수행 방법
 - 3. simulation 결과
 - VI. 결론 및 향후 연구과제
 - 1. 결론
 - 2. 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 차로 감소구간, Higher Order Continuum Model, Momentum Equation, 차로변경율, 모수추정

요 약

본 연구는 거시적 교통류 모형 중 고차연속교통류모형(high-order continuum model)의 개발을 목적으로 한다. 이 모형은 연속류 구간을 대상으로 수행되었고, 그 첫 번째 단계로 유·출입 구간이 없는 차로감소구간에 서의 교통류를 묘사하였다. 개발된 모형은 차로변경율을 고려하였으며, 짧은 구간에서, 단기간동안의 교통류 행 태에 대한 묘사를 가능하도록 하였다.

본 연구에서 개발된 모형은 우리나라 연속류 시설의 기하구조조건과 운전자들의 운전행태를 고려하여 우리나 라 실정에 맞도록 새롭게 적용하였다. 이를 통해 장래에 연속류 시설에 대한 교통제어 전략 수립이나 운영 체계 개선과 같은 교통공학적인 관리를 할 수 있을 것으로 기대된다.

모형의 현장적용성을 알아보기 위해, 현장에서 관측한 자료를 가지고 모의실험을 하였다. 그 결과, 교통량, 밀도, 속도의 시간대별 변동을 비교적 충실히 구현해 낸 것으로 판단된다.

본 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원 연구비에 의하여 수행(2000-041-E00603)되었으며, 이에 감사드립니다.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

현재까지 우리나라 대도시들의 가로망은 간선도로를 근간으로 발전해 왔다. 그러나 급격히 증가하는 교통 수요를 처리하기 위해서는 도시고속도로와 같은 연속류 시설이 많이 건설되어야 한다.

운전자들의 연속류시설 이용 시 기하구조의 변화나 유도 혹은 공사로 인해 차로가 감소하는 구간을 주행하게 된다. 이러한 지점을 주행하다보면 차로가 차단된 부분 근방에서 차량의 급감속과 끼어들기에 의한 잠재적인 사고의 위험이 존재하게 된다. 이 때, 운전자들은 무리하게 차로를 변경해야 하고 이로 인한 사고 위험의 증가와 용량감소로 인한 지체가 발생하게 된다. 차로가 감소하는 구간은 도로계획 단계에서부터 비릇된 것도 있지만, 도로의 노후화로 인한 도로의 확장, 보수와 같은 작업으로 인해 일시적으로 차로를 차단하는 경우도 있다. 따라서 이로 인해 발생하는 지체를 줄이기 위한 대처방안이 필요하다. 대처방안을 만들기 위해서는 이런 지점에서의 교통류를 분석할 수 있는 모형이 필요하며, 이것을 통해 지체와 사고의 위험을 줄일 수 있는 방안을 마련할 수 있다.

고차 연속류 모형은 대표적인 거시적 모형의 하나로써, 교통류의 재현을 통해 교통제어 전략의 수립이나, 연속류 시설의 관리와 운영에 중요하게 쓰일 수가 있다. 외국에서 이미 많은 모형이 개발되었으나, 그 모형의 실용성에 있어서는 모형이 갖는 문제점 때문에 널리 이용되고 있지는 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 모형이 갖는 문제점을 알아보고, 그 해결 방법을 모색함과 동시에 우리나라 도로 실정에 맞는 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 그리고 본 연구는 이론적 고찰과 모형개발, 현장조사, 모수 추정, 시뮬레이션의 절차에 따라 수행되었다.

2. 연구의 내용 및 범위

일반적으로 외국에서 개발된 고차연속교통류 모형을 우리나라에 바로 적용시켜 사용할 수는 없다. 이는 외국과 우리나라의 기하구조조건, 교통조건, 운전자 행태 등의 차이 때문이다. 따라서 우리나라 현실에 맞는 고차연속류 모형을 개발하고자 한 결과, 가속도

방정식이 교통조건(밀도)의 예측항에 따라 큰 영향을 받는다 점을 고려하여 전방 예상항에 변화를 주어, 실제 교통조건을 근접하게 추정할 수 있는 모형을 만들고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 유·출입구간이 없는 차로 감소구간에서의 교통류 행태를 묘사할 수 있는 모형을 개발하고, 모형의 현장 적용성을 위해 관측자료를 이용하여 모형의 성능을 평가하였다. 먼저, 이론적 고찰을 통해 고차연속교통류모형의 개념을 알아보고, 차로감소구간에 적합한 모형을 개발하였다. 모수추정을 통해 모형에 필요한 모수를 정산하였으며, 이를 바탕으로 모의실험을 실시하였다. 그리고 마지막으로 모형의 성능을 검토하였다.

II. 이론적 고찰

교통류 모형에는 거시적 모형과 미시적 모형이 있다. 미시적 모형의 경우, 개별 차량에 대한 자료를 필요로 하기 때문에 자료 수집이 어렵고, 분석에도 많은 시간이 걸린다. 거시적 모형의 경우, 차량의 평균적인 거동을 나타내는 3가지 집계변수를 사용하여 원하는 MOE를 얻어 낼 수 있다.

거시적 모형은 독립적인 속도방정식의 사용여부에 따라 단순연속교통류모형과 고차연속교통류모형으로 구분된다. 단순연속교통류모형의 경우, 충격파를 감지할 수 있으나, 충격파를 비현실적으로 묘사하는 단점이 있다. 현실적으로 교통류가 하류부 상태에 반응하여 일정시간이 지난 후에 균형상태에 도달하는데, 이를 표현하지 못한다. 이러한 단점을 보완하고자 고차연속교통류모형에는 차량의 감·가속 특성과 관성효과를 고려할 수 있는 가속도방정식(momentum equation)을 포함하게 되었다. 이는 교통류가 하류부 상태에 반응하는 시간을 고려하여 교통류의 가다서기(stop and go)현상의 표현이 가능하게 하였다.

이러한 고차연속교통류 모형의 최초 모형은 Payne 모형이다. Payne은 모형에서 잠금현상(lockup)을 극복하기 위해 가속도 방정식에 예기계수(v)를 포함시켰다. 결과적으로 이 모형은 낮은 밀도 범위에서만 잠금현상을 해결하였으나, 평형 상태에서는 속도-밀도 관계식을 통해 얻은 속도를 사용함으로써 또 다른 문제를 야기 시켰다. 실제 현상에서 평형상태의 속도-밀도 관계의 관측은 불가능하고 교통류가 전방에 대기행렬을 만났을 때 아직 대기행렬이 생기지 않은 구

간의 밀도가 너무 높게 증가하는 문제도 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 Papageorgiou는 관성항과 전방예상항에 변화를 준 개량 모형을 개발하였다. 이 모형은 낮은 밀도 상태에서 높은 밀도 상태까지의 교통류 상태를 비교적 잘 추적하는 것으로 나타났다. 그러나 모형에 포함된 많은 parameter를 추정해야 하는 어려움을 갖고 있다.

1. 모형을 구성하는 3가지 상태 방정식

기본적으로 고차연속교통류모형은 속도와 교통량이 밀도의 함수라고 가정한다.

고차연속교통류모형은 다음의 3가지 상태방정식으로 구성된다.

1) 교통량, 속도, 밀도의 기본적 관계

$$q = u \cdot k \tag{1}$$

- q : 교통량(대/시)
- u : 공간평균속도(km/시)
- k : 밀도(대/km)

2) 교통량 보존 방정식

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

$g = (x, t)$ 는 단위 시간, 단위 거리 당 차량의 발생·소멸을 나타내는 것으로 분석구간에 진·출입 램프가 없으면 $g = (x, t)$ 은 0 이 된다.

3) 가속도 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u = \frac{1}{T} \left(u_e(k) - u - \frac{\nu}{k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right) \tag{3}$$

- T : 반응시간 계수(시/km)
- ν : 기대 계수(km²/시)
- $u_e(k)$: 균형속도(km/시)

식(3)은 Payne이 개발하여 FREFLO에 채택된 식으로서, 속도는 균형항, 후방전달항, 전방예상항에

의해 결정됨을 나타내고 있다.

식(3)의 왼쪽 항은 차량의 가속을 표현한 것이고, 오른쪽의 첫 번째 항은 실제 교통류의 속도가 일정시간이 지난 후 균형속도에 도달하려고 하는 것을 표현하고 있다. 오른쪽의 두 번째 항은 운전자들이 하류부의 교통상황에 반응하는 효과를 표현하고 있다. 만약, 혼잡 때문에 하류부의 밀도가 높아지면 속도가 줄어든다는 것을 의미한다.

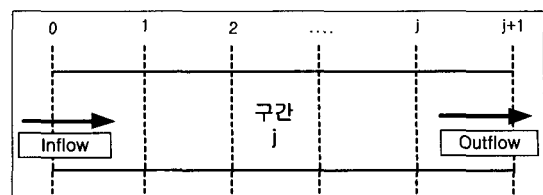
2. 수치해석을 이용한 해(solution)의 개념

모형을 구성하는 편미분 방정식은 아주 이상적인 조건을 제외하고 해석적(Analytical)방법으로는 해를 구할 수 없기 때문에 편미분 방정식에 근사하는 유한차공식을 얻기 위해 유한차분법(Finite difference method)을 이용해서 수치해석 방법으로 풀어야 한다. 이러한 수치해석적 방법은 편미분 방정식 형태를 완전히 만족시키지는 않지만 여기에서 얻어진 해는 도로를 따라 형성되는 밀도의 변화와 일치하게 된다. 널리 사용되는 수치해석적 방법으로는 다음 4가지가 있다.

- 1) Euler 방법
- 2) Lax method
- 3) Upwind scheme
- 4) Cell-transmission

본 연구에서는 차량 보존관계식을 수치해석적 방법으로 푸는데 위의 4가지 수치해석 방법 중 1)의 Euler 방법을 적용하였다. 개발되어진 모형이 독립적인 속도방정식을 사용하는 모형이므로 Euler 식의 잠금현상을 예방할 수 있기에 가장 효율적인 Euler 식을 사용하였다.(강정규, 1997)

수치해석적 방법을 적용하기 위해서는 분석대상도를 단위시간, 단위길이로 나누는 공간분할을 해야 한다. <그림 1>은 공간 분할의 예이다.



<그림 1> 공간 분할의 예(space discretization)

공간 분할을 할 때 주의해야할 사항이 있다. 그것은 수치해석의 안정성과 수렴을 위한 분할 범위이다. 이를 위해 식(4)의 조건을 만족해야만 한다.

$$\lambda = \frac{\Delta x}{\Delta t} > \mu_f \text{ (km/h)} \quad (4)$$

만약, $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 가 분석구간의 자유류 속도 μ_f 보다 적으면 차량들이 Δt 시간동안 전체 구간을 통과하게 되어 각 구역(segment)에서의 교통량, 속도, 밀도 값에 영향을 미쳐 부적절한 해가 얻어지게 된다.

3. 고차연속교통류모형의 단점

고차연속교통류모형은 개념적으로는 우수하나, 혼잡구간이나, 단속류에 실제로 적용했을 때에 만족스러운 결과를 얻지 못하고 있다.

예를 들어, 단순연속교통류모형은 속도-밀도 관계를 결정론적인 가정을 통해 얻기 때문에 특정구간의 밀도가 최대밀도이상으로 증가하여 속도가 음의 값을 갖는 잠금현상(lockup)을 발생시킨다. 이러한 문제점을 보완하고자 고차연속교통류모형이 개발되었으나, 이 모형에서도 잠금현상이 완전히 해결되지 않았다. 이러한 원인은 모형의 구조적인 문제이거나 모형실행을 위해 사용된 수치해석적 방법을 잘못 적용한 것으로 추측되고 있다.

III. 모형 개발

1. 모형의 구성

제안된 모형은 고차연속교통류모형의 최초 모형인 Payne 모형을 기본으로 하여 전방예상항에 변화를 주었다. 제안된 모형은 Payne 모형과 마찬가지로 3 가지 상태방정식으로 구성된다.

1) 교통량, 속도, 밀도의 기본적 관계

$$q = u \cdot k \quad (5)$$

q : 교통량(대/시)

u : 공간평균속도(km/시)

k : 밀도(대/km)

2) 교통량 보존 방정식

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = (S_{i+1,i} + S_{i-1,i} - S_{i,i+1} - S_{i,i-1}) \quad (6)$$

$S_{i+1,i}$: 단위시간, 단위길이동안 $i+1$ 차로에서 i 차로로 차로를 변경한 운전자수(대/시)

3) 가속도 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u = \frac{1}{T} (u_e(k) - u - \frac{u}{k} \cdot \ln k) \quad (7)$$

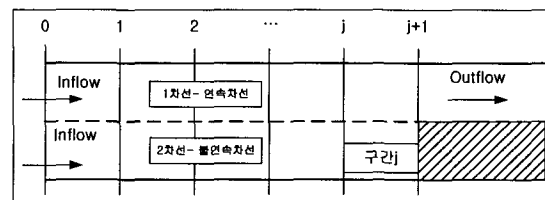
T : 반응시간 계수(시/km)

ν : 기대 계수(km/시)

$u_e(k)$: 균형속도(km/시)

모형의 성능을 평가하기 위해 분석대상구간을 설정하고 <그림 2>와 같이 공간 분할을 하였다.

분석대상구간을 공간 분할하고 모형을 구성하는 편미분 방정식을 Euler 방법을 이용하여 수치해석식으로 풀면 다음과 같다.



<그림 2> 분석대상구간의 공간 분할

1) 교통량, 속도, 밀도의 기본적 관계

$$q_{i,j}(t + \Delta t) = k_{i,j}(t) \times u_{i,j}(t) \quad (8)$$

2) 교통량 보존 방정식

$$k_{i,j}(t + \Delta t) = k_{i,j}(t) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (q_{i,j-1}(t) - q_{i,j}(t) - \Delta t \cdot (S_{i,i+1}^{t,j} - S_{i+1,i}^{t,j})) \quad (9)$$

$S_{i+1,i}^{t,j}$: 단위시간, 단위길이동안 $i+1$ 차로에서 i

차로로 차로를 변경한 운전자수(대/시)
 $S_{i,i+1}^t$: 단위시간, 단위길이동안 i 차로에서 i+1 차로로 차로를 변경한 운전자수(대/시)

식(9)의 오른쪽의 두 번째 항은 Δt 동안의 평균적인 밀도의 변화를 나타낸다. 세 번째항은 운전자들의 차로변경 때문에 발생하는 Δt 동안의 밀도변화를 나타낸다.

3) 가속도 방정식

$$u_{i,j}(t+\Delta t) = u_{i,j}(t) + \frac{\Delta t}{T} \cdot (u_e(k_j) - u_{i,j}(t)) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (u_{i,j}(t) - u_{i,j-1}(t)) - \frac{\nu}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta t}{T} \cdot \left(\ln \left(\frac{k_{i,j+1}}{k_{i,j}} \right) \right) \quad (10)$$

식(10)에서 오른쪽 두 번째 항은 균형항으로서, 실제교통류의 속도가 일정시간이 지난 후, 균형속도에 도달하려는 노력으로 반응시간 T 에 의해 가중되고 있음을 나타낸다. 본 연구에서 균형속도를 속도-밀도 관계의 결정론적인 가정을 통해 얻어내었다. 여기서, T 는 이완시간으로서, 실제 교통류의 평균적인 속도가 균형속도로 이완됨을 의미한다.

만약, T 값이 적다면, 이는 실제 교통류의 속도가 균형속도로 빠르게 이완됨을 나타내는 것이다. 즉, 교통 가속도와 T 와는 반비례의 관계에 있다.

오른쪽 세 번째 항은 후방전달항으로서, 운전자들이 상류부의 속도를 가능하면 유지하려는 노력으로 상류부와 현재구역(j)과의 속도차이를 나타낸다.

오른쪽의 네 번째 항은 전방예상항으로서, 하류부의 교통상황에 대응하려는 노력으로 운전자가 현재구역과 하류구역의 밀도차이에 반응하며, 계수 ν 에 의해 가중됨을 나타내고 있다. 여기서, 계수 ν 는 혼잡속도의 제곱을 의미한다.

앞서 살펴 본 바와 같이 가속도 방정식에서 속도는 4가지 항에 따라 구해지나, 단순히 속도와 전방예상항과의 관계를 알아보기 위해 Payne 모형의 전방예상항식으로 관측치를 가지고 plotting 을 해보았다.

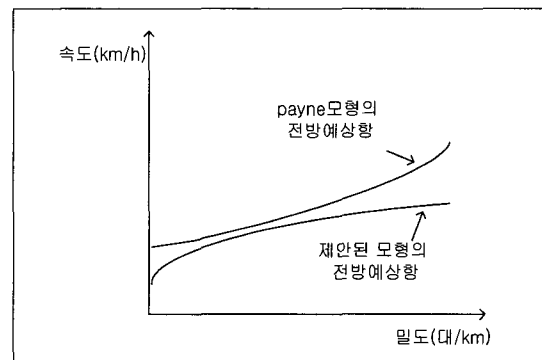
Payne 모형의 경우, 임의의 구역 j와 j+1의 밀도차가 크면 구역 j의 속도가 계속 증가하는 경향이

있다.

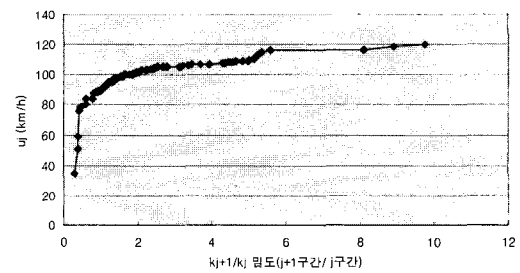
본 연구에서는 이러한 증가 추세를 완만하게 해주기 위해 log 함수를 이용하여 전방예상항에 변화를 주었다.

<그림 4>는 j 구역과 j+1 구역의 밀도 비율과 j 구역의 속도의 관계를 알아보기 위해 실측치를 plotting 한 결과, 두 관계는 log 함수의 형태를 가진다는 것을 알 수 있었다.

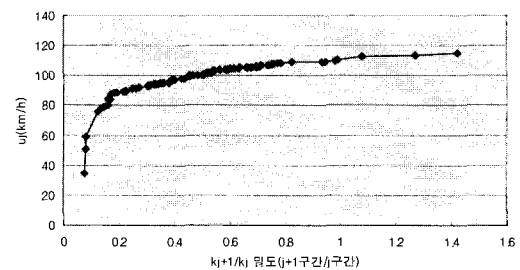
<그림 6>은 관측된 속도-밀도 관계를 바탕으로 한 균형속도이다.



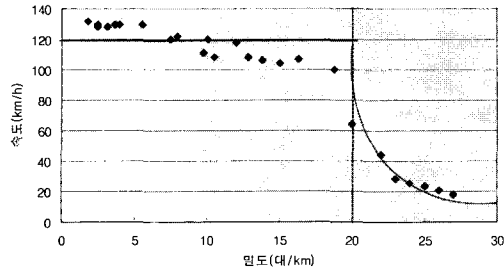
<그림 3> 전방예상항과 속도의 관계



<그림 4> 1번지점의 속도와 1,2지점의 밀도와의 관계



<그림 5> 2번지점의 속도와 2,3지점의 밀도와의 관계



〈그림 6〉 분석대상 구간의 속도-밀도 관계

- ▷ 밀도(k) < 20(대/km) 이면
 $u_e(k) = 120 \text{ km/h}$
- ▷ 밀도(k) > 20(대/km) 이면
 $u_e(k) = 63.43 \ln \left(\frac{k}{36} \right)$

2. 차로변경을

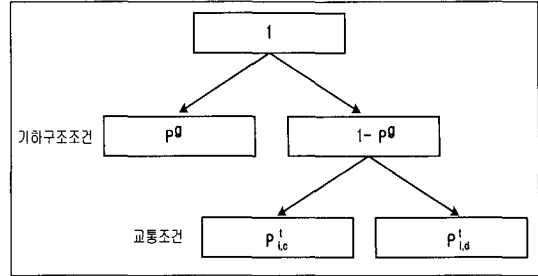
1) 차로 변경 확률 $P_{i,i+1}$ 산정

운전자가 Δt 동안에 차로변경을 할 확률을 $P_{i,i+1}$ 로 가정한다. 그러나 확률만을 가지고 차로변경을 하는 운전자수를 구하기 어렵다. 운전자가 차로변경을 하기 위해서는 차로변경을 할 차로에 충분한 간격과 차로변경을 완전히 수행하기까지의 시간이 필요하다. 식(11)은 차로변경을 하는 운전자수를 구하는 식이다. (FHWA/IN/JTRP-97/12)

$$S_{i,i+1} = \frac{k_i \cdot P_{i,i+1}}{T_{i,i+1}} \quad (11)$$

- $S_{i,i+1}$: i 차로에서 $i+1$ 차로로 차로변경을 하는 운전자수(대/시)
- k_i : i 차로의 밀도 (대/km)
- $T_{i,i+1}$: i 차로에서 $i+1$ 차로로 차로변경을 하는데 필요한 시간(시)
- $P_{i,i+1}$: 운전자가 i 차로에서 $i+1$ 차로로 차로변경을 할 확률

여기서, 확률 $P_{i,i+1}$ 와 시간 $T_{i,i+1}$ 는 각각 분석대상 도로의 기하구조 조건과 교통조건에 따라 계산된다. 확률 $P_{i,i+1}$ 를 구하기 위해서는 〈그림 7〉과 같은 두 단계의 결정 절차를 따르게 된다.



〈그림 7〉 차로변경 확률 결정 절차

p^g 는 지수함수(Exponential function)로 가정하여 표현할 수 있다.

$$p^g = e^{-al} \quad (12)$$

- l : 운전자와 차로가 폐쇄된 지점 사이의 거리(km)
- a : 운전자와 차로가 폐쇄된 지점 사이의 거리에 따른 가중치를 나타내는 parameter

차로변경 확률을 구하기 위한 첫 번째 단계 중 기하구조 조건에 따른 확률 p^g 는 운전자와 차로가 폐쇄된 지점사이의 거리에 따라 결정된다. 만약, 운전자가 폐쇄된 차로를 주행하고 있다면, 차로가 폐쇄된 지점과 가까울수록 p^g 는 1에 가깝게 되고, 반대로 멀리 떨어져 있다면 0에 가깝게 된다. 따라서 p^g 는 “기하구조 조건에 영향을 받아 폐쇄된 차로를 이용하지 않기로 결정할 확률”로 정의 될 수 있다.

두 번째 단계는 교통조건을 고려한 확률 $p_{i,j}^t$ 이다. 일반적으로 운전자는 두 차로 중 교통조건에 따라 더 오랫동안 주행할 수 있는 차로를 선택하는 경향이 있다. 이러한 특성을 잘 반영하는 것은 밀도가 된다. 밀도는 운전자들이 차로변경을 선택하는데 있어 중요한 요소가 된다. $p_{i,j}^t$ 를 구하기 위해서 Logit 모형을 이용하였다.

$$p_{i,j}^t = \frac{e^{-\beta(k_j + \delta)}}{e^{-\beta(k_j + \delta)} + e^{-\beta(k_i)}} \quad (13)$$

- $p_{i,j}^t$: 운전자가 i 차로에서 j 차로로 차로변경을 할 확률
- k_i : i 차로의 밀도(대/km)
- k_j : j 차로의 밀도(대/km)

- δ : i 차로와 j 차로의 밀도가 같을 때 차로변경을 하는 운전자들의 위험을 설명하기 위한 parameter
- β : 운전자들의 교통조건에 대한 인식을 나타내 parameter

식(13)을 바탕으로 $p_{i,c}^f$ 는 "현재 차로가 i 일 때 교통조건에 따라 연속된 차로 선택을 결정할 확률"로 정의 할 수 있고, $p_{i,d}^f$ 는 "현재 차로가 i 일 때 교통조건에 따라 폐쇄된 차로 선택을 결정할 확률"로 정의 할 수 있다.

식(13)의 parameter β 는 교통조건(연속차로와 불연속차로)에 대한 운전자들의 인식을 설명하는 계수로써, 이 값이 높을수록 운전자들이 연속차로와 불연속차로 중 밀도가 높은 쪽으로 차로변경을 하지 않음을 나타낸다. 만약 이 값이 0일 경우 밀도에 관계없이 차로변경을 할 확률은 항상 1/2이 된다. parameter δ 는 양쪽 차로의 밀도가 같을 때 차로변경을 하는 운전자수들의 위험을 설명하는 계수이다. 이 값은 현재 차로의 밀도에 추가되는 것이 아니라, 차로변경 대상 차로의 밀도에 추가하게 된다. 이 값이 높을수록 차로변경을 하는 운전자수는 그 만큼 적음을 나타낸다. 만약 이 값이 0이면 양쪽 차로의 밀도는 같다고 볼 수 있으며, 이 때의 차로변경 확률도 1/2이 된다.

위에서 제시된 과정을 통해 구해질 확률은 다음과 같이 정의할 수 있다. 연속차로를 주행하고 있는 운전자가 계속해서 연속차로로 주행하기로 결정할 확률 p_{11} 는 e^{-at} 이고, 연속차로를 주행하고 있는 운전자가 기하구조 조건과는 상관없이 교통조건에 의해 불연속차로로 차로변경을 결정할 확률 p_{12} 는 $(1 - e^{-at}) \cdot p_{i,d}^f$ 이다.

반대로, 불연속차로를 주행하고 있는 운전자가 계속해서 불연속차로로 주행하기로 결정할 확률 p_{22} 는 $1 - e^{-at}$ 이고, 불연속차로를 주행하고 있는 운전자가 기하구조조건에 관계없이 교통조건에 의해 연속차로로 차로변경을 결정할 확률 p_{21} 은 $(1 - e^{-at}) \cdot p_{i,c}^f$ 이다.

2) 차로변경에 필요한 시간 $T_{i,i+1}$ 산정

식(11)에서 제시된 차로변경에 필요한 시간 $T_{i,i+1}$ 는 T_d 와 T_f 로 구성되는데, T_d 는 운전자가 변경할 차로에서 충분한 간격(gap)을 찾는데 필요한 시간이며,

T_f 는 간격을 찾은 후, 차로변경을 수행할 때까지 시간으로 정의 될 수 있다.

T_d 의 경우 운전자가 차로변경을 위한 간격을 찾을 때까지 겪는 지체로 간주 할 수 있다. 이 시간은 차로변경을 하고자 하는 차로에서의 차량간 간격수(number of gaps)에 영향을 받는다. 차로변경은 아래의 두 가지 조건을 만족할 때 수행 할 수 있다.

1. 변경하고자 하는 차로에서의 차량간 space gap이 critical space gap 보다 클 경우.
2. 변경하고자 하는 차로에서의 차량간 time gap이 critical time gap 보다 클 경우.

critical gap은 비신호교차로에서 부도로의 차량이 주도로를 완전히 횡단하는데 필요한 시간의 개념이다. critical gap은 비신호교차로에서 부도로의 차량이 주도로를 횡단하기 위해 필요한 시간 중 최소값을 사용하였다. 본 연구에서는 시·공간 간격은 모두 음지수 분포에 따른다고 가정한다.

T_d 는 비신호교차로에서 차량교통류를 횡단하기 위해 보행자가 겪는 지체를 산정하는 보행자 지체 산정식을 적용하였다(TRB, Special report 1975).

$$T_d = \frac{1}{\Delta q_{i,i+1}} \times \frac{1}{e^{-\Delta q_{i,i+1} \times \tau}} - \frac{1}{\Delta q_{i,i+1}} - \tau \quad (14)$$

- τ : $\max(\tau_c, \tau_e)$
- τ_c : critical time gap
- τ_e : equivalent time gap

임계공간간격(critical space gap)은 식(15)를 이용하여 equivalent time gap으로 바꿀 수 있다.

$$\tau_e = \frac{g_c}{\Delta v_{i,i+1}} \quad (15)$$

g_c : 임계공간간격(critical space gap)

이와 같이 구해진 $T_{i,i+1}$ 와 $P_{i,i+1}$ 을 통해 식(11)를 구할 수 있다.

IV. 모수 추정

1. 모수 추정 방법

고차연속교통류모형을 구성하는 식은 모두 편미분 방정식의 형태를 가지고 있다. 이들은 모두 비선형이기 때문에 모수 추정은 간단한 문제가 아니다.

비선형 시스템에서는 일반적으로 하나의 global 최적 해가 존재하는지 혹은 여러 local 최적 해가 존재하는지 확실치 않다. 결과적으로 local 최적값만을 찾아내고 gradient 값을 계산하여야 하는 gradient 방법이나 steepest descent 방법은 이런 경우 적용하기에 부적절하다. 이러한 비선형 시스템에서 필요한 모수를 추정하는데 사용되는 접근방법은 모형값과 실측값의 차를 최소화하는 방법이다. 본 연구에서는 구하고자 하는 parameter 의 수를 결정하고, 무작위(random) 그리고 순차적(sequential)으로 발생시킨 parameter 집합을 P라고 정의한다. 구하고자 하는 parameter 들은 각각 최고값(B'')과 최저값(B')을 경계로 하는 일정범위를 설정하고, (0,1)사이에 균일하게 분포되어 있는 난수(random number)를 발생시켜 아래와 같은 식으로 parameter 값을 구한다. 효율적인 계산을 하기 위해 각 경계값은 가능한한 조밀하게 설정한다.

$$\text{parameter값} = B' + (B'' - B') \cdot \text{난수} \quad (16)$$

구해진 parameter 집합 P를 각 식에 대입하여 반복적으로 모형을 simulation 했을 때 나온 모형값과 실측값 사이의 차이가 가장 적으면 그 값을 global 또는 good 최적 해로 간주한다.

본 연구에서는 50000개의 parameter 집합 P를 선택하여 수행한 후 최적 모수 값을 찾아내었다.

2. 모수 추정 결과

추정해야 할 parameter 집합 P를 정하고, 각 parameter의 최대값과 최소값을 설정한다.

<표 1>과 같이 각 parameter 별로 최대값과 최소값의 범위를 정한 다음, 각 범위 안에서 산출된 parameter 집합 P를 50000개 만들고, 모형식에 대입한 후, 모

<표 1> parameter의 경계값

parameter	최대값	최소값
α	0.001	1
β	0.5	5
ν	20	50
T	0.01	0.1
δ	0.0001	0.1

<표 2> 추정된 parameter값

parameter	모수값
α	0.45
β	1.37
ν	31
T	0.04
δ	0.001

형에 의해 산출된 값과 실측값의 차이가 가장 적은 집합 P를 모수로 결정한다. 모형값과 실측값의 차이를 알아보기 위한 척도로서, 절대 평균오차와 평균제곱오차를 사용한다.

$$(\text{MAE}) = \frac{1}{N} \sum | \text{실측치} - \text{모형치} |$$

평균절대오차

$$(\text{MSE}) = \frac{1}{N} \sum (\text{실측치} - \text{모형치})^2 \quad (17)$$

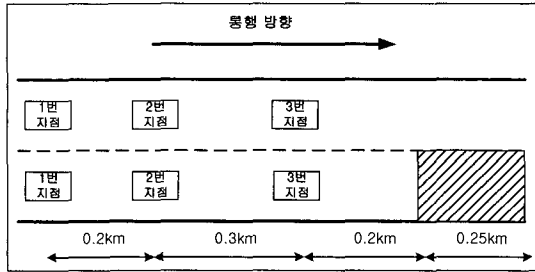
평균제곱오차

N : 관측 시간 간격

V. 모의 실험

1. 자료 수집

본 연구에서 제안된 모형의 정확도를 평가하기 위해 편도 2차로 중 한 차로가 공사로 인해 폐쇄된 지점을 선정하였다. 총 조사시간은 160분이고, 이 중 100분의 교통량, 점유율 자료를 1분 단위로 관측하였다. 대상 시간대가 오후 첨두시이고, 차로가 감소되는 지점 이전에 차로감소에 대한 표지판이 설치되어 있지 않아, 폐쇄구간 직전에 갑작스럽게 차로변경을 하는 차량들에 의해 급감속이 많이 발생하였다. 대상



〈그림 8〉 자료 수집 개념도

구간의 총 길이는 1km이고, 차로 폐쇄 전까지 0.7km이다.

2. 모형 수행 방법

모형을 수행하기 전에 경계조건과 초기조건에 대한 설정이 필요하다. 경계조건은 분석대상구간의 첫 번째 구간으로 들어오는 교통량과 속도를 의미한다. 초기조건은 각 구역에서 t=0 일 때의 밀도, 속도값을 의미한다.

1) 경계조건(Boundary condition)

경계조건은 차로 별로 적용하게 된다. 각 구역(segment)의 교통량, 속도는 전 구역(j)과 다음 구역(j+1), 전 시간(t)과 다음 시간(t+1)의 관계에 의해서 구역 별로 산출되기 때문에 t=0 일 때의 교통량, 속도값에 대한 설정이 필요하다.

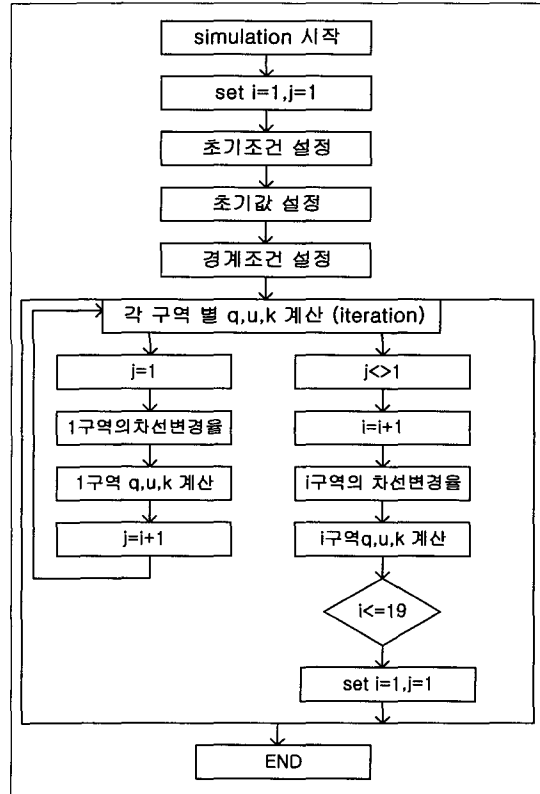
모형을 수행하기 위해서는 차로감소지점에 또 다른 경계조건이 필요하게 된다. 차로가 감소된 지점 이후의 교통류율과 차로변경율은 모두 0이 된다.

2) 초기조건(Initial condition)

각 구역(segment)의 밀도, 속도는 전 구역(j)과 다음 구역(j+1), 전 시간(t)과 다음 시간(t+1)에 관계에 의해서 구역 별로 산출되기 때문에 t=0 일 때의 밀도, 속도값에 대한 설정이 필요하다.

초기조건은 warm-up simulation을 통해 구한다. 실측치를 근거로 초기조건을 설정하고, 모형을 약 10분 정도 수행하여 나온 각 구간의 밀도, 속도값을 새로운 초기조건으로 재 설정한다

경계조건에는 실측 1분 교통량이 매 분마다 들어가게 되고 초기조건은 각 구역마다 warming up simulation을 통해 나온 값들을 대입하게 된다. 분



〈그림 9〉 모형 수행 흐름도

석대상구간은 $\Delta x=50m$, $\Delta t=1$ 초로 공간 분할 하여 〈그림 9〉와 같은 흐름도에 따라 모형을 수행하였다.

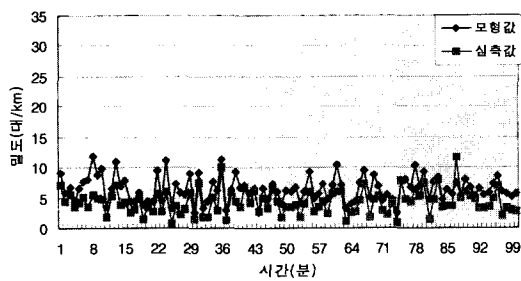
본 연구에서는 모형의 코딩 작업을 위한 programming tool로서, Visual Basic program을 사용하였다.

전체 프로그램의 순서도는 〈그림 9〉와 같고, 1구역과 같이 경계조건이 식에 포함되거나 식의 일부분이 보완되는 지역은 따로 식이 적용되어 계산되지만 이것은 따로 함수를 불러 사용함으로 대부분의 구역이 순서대로 반복되어 계산되어지게 된다. 즉 j=1은 첫번째 구간의 계산과정을 나타내는 것으로 큰 네모박스 안의 왼쪽의 순서도이고, j가 1이 아닌 경우는 나머지 구간(2-19)을 계산하는 순서도를 나타내는 것이다. 그리고 큰 네모박스의 테두리는 반복문으로써 전체적인 각 구간의 속도, 밀도, 교통량 값이 1초마다 반복 계산되어지는 것을 의미한다. 계산 순서는 1,2,3,4,5,---19까지가 되는데 여기서 계산되어지는 구간값의 증가분을 나타내는 변수가 i이다. 내부적으로 1초단위로 계산되어지지만 각 구간의 특성을 나타내는 결과 값은 1분단위로 산출되도록 작성되었다.

3. simulation 결과

가장 이상적인 조사구간의 길이가 적어도 2.5Km 정도는 되어야 하나, 본 연구에서는 현장조사에서의 불가피성 혹은 안전성 문제로 인해 1Km 구간에 걸쳐 조사를 시행하고 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로 앞에서의 모형값과 실측값과의 비교를 보면 차로감소지점에서 0.7km 떨어진 지점에서는 시간에 따른 교통량, 속도, 밀도의 변화를 비교적 잘 보여주고 있다. 하지만 차로감소지점에서 0.2km 떨어진 지점과 그 이후 지점에서의 결과값은 통계적으로 평균 절대오차값이 앞에서보다 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 원인은 실측치를 조사한 대상구간이 완전한 직선부가 아니라 차로감소지점의 하류부가 곡선부로 이루어져 중차량 통과시 순간적으로 정체가 발생하는 데서 원인을 찾을 수 있다. 고차연속교통류 모형의 특성상 경계조건(boundary condition)에 따라 밀도, 속도, 교통량의 변화가 있어야 하지만 조사 대

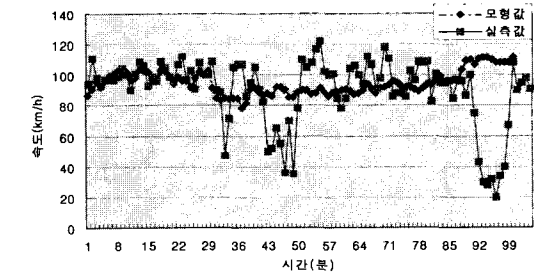
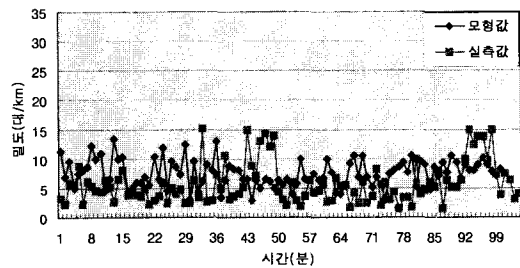
상구간의 위와 같은 특성으로 인하여 실측치에서는 병목구간 전, 후에 경계조건 교통량의 상승없이 밀도의 상승, 속도의 감소 현상이 나타나고 거시적 모형인 본 모형에서는 이를 정확하게는 구현하지 못하고 있다. 이러한 작용으로 인해 병목지점인 곡선부 상·하류구간의 밀도와 속도, 교통량에 영향을 미쳤고, 이는 병목구간이후에 교통류 상황의 변화가 제대로 표현되지 않아 평균절대오차값이 점점 증가하는 경향으로 나타나는 것이다.



〈그림 10〉 연속차로 중 차로감소 지점에서 0.7km 떨어진 지점에서의 밀도, 교통량

〈표 3〉 평균절대오차(연속차로, 차로감소지점에서 0.7km 지점)

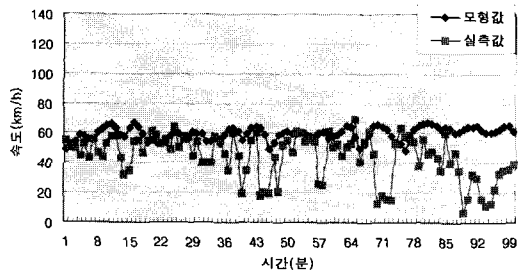
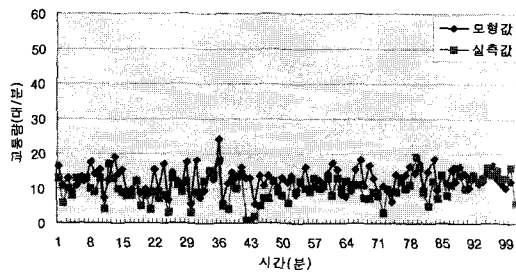
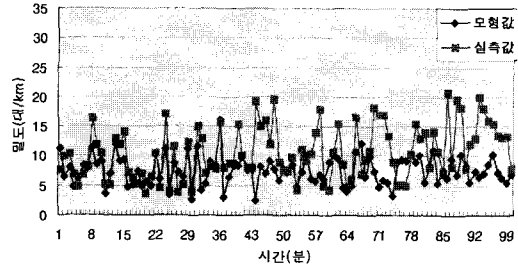
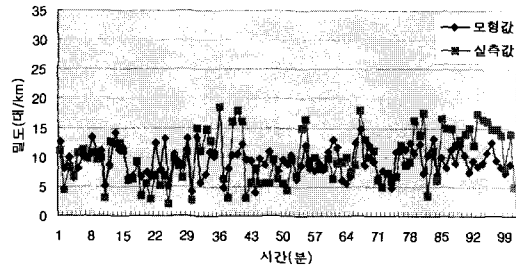
	밀도	교통량
MAE	2.8	1.5



〈그림 11〉 연속차로 중 차로감소 지점에서 0.5km 떨어진 지점에서의 밀도, 교통량, 속도

〈표 4〉 평균절대오차(연속차로, 차로 감소지점에서 0.5km 지점)

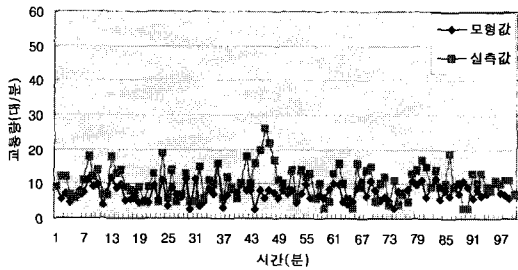
	밀도	교통량
MAE	4.0	4.8



〈그림 12〉 연속차로 중 차로차단 지점에서 0.2km 떨어진 지점에서의 밀도, 교통량

〈표 5〉 평균절대오차(연속차로, 차로감소 지점에서 0.2km 지점)

	밀도	교통량
MAE	3.0	3.5



〈그림 13〉 불연속차로 중 차로감소 지점에서 0.2km 떨어진 지점에서의 밀도, 교통량, 속도

〈표 6〉 평균절대오차(불연속차로, 차로감소 지점에서 0.2km 지점)

	밀도	교통량
MAE	4.0	4.0

VI. 결론 및 향후 연구과제

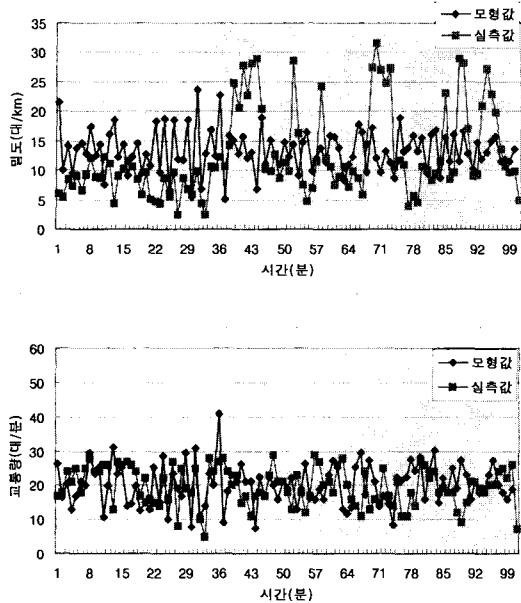
1. 결론

본 연구는 기존의 고차연속교통류모형을 근거로 차로감소구간에 적합한 모형을 개발하기 위해 수행되었다. 기존 모형을 국내에 직접 적용하기에는 외국의 도로와 국내도로와의 기하구조조건의 차이와 운전자들의 운전행태의 차이 때문에 적합하지 않다. 본 연구에서는 차로감소구간에서의 교통류 재현을 위한 고차연속교통류모형 개발, 모수추정, 컴퓨터 시뮬레이션, 모형 평가의 순서로 수행되었고 제안된 모형은 도로의 기하구조조건과 교통조건에 대응한 운전자의 행태를 고려하여 편도 2차로 중 한 차로를 폐쇄한 연속류 시설의 교통류 행태를 묘사하기 위해 새롭게 적용하였다. 그 결과, 교통량, 속도, 밀도의 추적이 비교적 잘 되었고, 기존 모형에서 발생하던 잠금현상(lockup)을 줄일 수 있게 되었다. 이러한 모형의 개

발을 통해, 장애에 차로를 폐쇄할 구간에서 교통수요의 변화로 줄어든 용량상태와 지체 등을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 향후 연구과제

본 연구에서는 단지 기하구조 조건과 교통 조건만을 고려하여 모형을 제시하였으나, 향후에는 교통통제조건을 고려하여 차로감소구간에서 차로감소에 대한



<그림 14> 차로감소 지점에서 안쪽으로 0.3km 떨어진 지점에서의 밀도, 교통량

<표 7> 평균절대오차(연속차로, 차로 감소지점에서 안쪽으로 0.3km 지점)

	밀도	교통량
MAE	6.6	6.4

정보를 운전자들이 미리 알았을 경우의 교통류 행태에 대한 묘사가 필요할 것이다. 본 연구에서는 분석대상구간이 짧은 단점을 가지고 있었으므로, 향후에는 분석대상구간이 적어도 2.5km 이상 되는 구간을 선정하여야 할 것이다.

모수 추정방법에 있어서도 여러 가지 다양한 방법들을 사용하여 실제 교통류에 근접한 모수를 추정해야 할 것이다.

참고문헌

1. 강정규(1997), "도시고속도로 교통류 시뮬레이션 모형 개발", 대한교통학회지, 제15권 제1호, 대한교통학회, pp.85~103.
2. 명지대학교 공학기술연구소(1995), "도시고속도로 교통류 모의실험모형의 연구개발 보고서", pp.8~11.
3. 임성만·김영찬(2000), "고속도로 교통류 재현을 위한 거시적 모형의 비교 연구", 제38회 학술발표회, 대한교통학회, pp.385~390.
4. 김동녕·이승환(1998), "공사로 인한 차로감소 구간의 교통류 특성에 관한 연구", 대한토목학회.
5. M.Papageorgiou, M.Cremer, Parameter(1981), "estimation for a traffic flow model", Automatica, Vol.17 No.6, Pergamon Press, pp. 837~843.
6. Paul Ross(1987), "Traffic dynamics", Pergamon Press, pp.421~435.
7. Pamos G. Michalpoulos, Ping Yi and Anastasios S. Lyrintzis(1998), "Development of an improved high-order continuum traffic flow model", Transportation Research Board 1365, pp.125~132.
8. A. Tarko, S. Kanipakapatnam, J.Wasson(1997), "Modeling and optimization of the indiana lane merge control system on approaches to freeway work zones", Indiana Dept. and Purdue Univ.
9. Adolf D. May(1990), "Traffic flow fundamentals", Prentice-Hall, Inc.

✉ 주 작 성 자 : 손영태
 ✉ 논문투고일 : 2002. 1. 7
 논문심사일 : 2002. 3. 5 (1차)
 2002. 3. 18 (2차)
 심사판정일 : 2002. 3. 18
 ✉ 반론접수기간 : 2002. 8. 30