

■ 論 文 ■

# 미시적 시뮬레이션 모형을 위한 차량추종모형의 정립 (GM모형을 기반으로)

Estimation of A Car-following Model for  
Microscopic Simulation Model Based on GM 5th Model

**이 영 인**

(서울시립대학교 도시공학과 교수)

**최 승 석**

(서울시정개발연구원 연구원)

## 목 차

- I. 서론
  - II. 관련연구고찰
  - III. 기본모형의 설정
  - IV. 모형구축
    - 1. 실측자료의 수집
    - 2. 이산적 궤적자료의 순간속도 및 가속도 추정
    - 3. 모형의 파라미터추정
    - 4. 각 모형 파라미터도출 결과의 신뢰성 분석
  - V. 모형의 적용 및 민감도 분석
    - 1. 모의자료를 이용한 모형의 적용
    - 2. 실측자료를 이용한 모형의 적용
    - 3. 민감도분석
  - VI. 결론
    - 1. 결론
    - 2. 향후연구과제
- 참고문헌

Key Words : 차량추종모형, 미시적 시뮬레이션, GM모형, 차량주행특성, 차량궤적합수

## 요 약

차량추종모형은 차선변경모형과 함께 미시적 시뮬레이션 모형의 핵심 모형으로서 정확한 차량추종모형의 적용은 시뮬레이션 모형 분석결과의 신뢰성에 영향을 미친다. 기존의 차량추종모형은 대부분 가속상황과 감속상황에 동일한 모형을 적용하거나 자극부분과 민감도 부분은 거의 동일한 형태를 취하고 있으며, 가상자료를 토대로 모형이 개발되었다. 본 연구의 목적은 첫째, 모형을 추정하기 위한 연구체계를 구성하고, 둘째, 이러한 연구체계를 이용하여 신호교차로 미시적 시뮬레이션에 직접 적용이 가능한 차량추종모형을 정립하는 데 있다. 본연구에서는 이를 위해서 신호교차로에서 미시적 실측자료를 수집하였으며, 수집된 자료에서 통계적 기법을 통해서 모형 추정에 적합한 자료를 구축하였다. 현장에서 실측된 이산적인 원시자료는 차량추종모형 추정에 직접 이용할 수 없다. 따라서, 이산적 원시자료를 모형추정에 적합한 자료로 구성하기 위하여 비선형 곡선적합 알고리즘을 이용하여 연속적인 궤적합수를 구성하였고, 이를 통해서 모형추정에 필요한 선두차량과 후행차량의 현재시점과 반응시간 이후 시점에서의 위치, 순간 가속도와 순간속도 등을 도출하였다. 본 연구에서는 차량추종상황을 가속상황, 감속상황, 출발상황, 그리고 정지상황으로 구분하여 차량추종모형을 구축하였다. 가속상황과 감속상황에 대해서는 실측자료를 이용하여 모형을 추정하였으며, 출발상황과 정지상황에 대해서는 추정된 가/감속상황의 모형을 바탕으로 출발상황과 정지상황에서의 차량행태를 설명할 수 있는 모형을 구축하였다. 또한, 민감도와 자극부분을 새롭게 정의하여 각 상황별로 미시적 실측자료를 이용하여 모형을 추정하였다. 이렇게 추정된 모형들 중에서 통계적 기법과 실측치와의 비교를 통해서 가장 적합한 모형을 선택하였다. 선택된 모형은 통계적 검증, 가상자료 그리고 실측치와의 비교를 통해서 분석하였으며, 분석결과 구축모형의 적용성은 우수한 것으로 분석되었다.

## I. 서론

교통운영 측면에서의 대도시 교통문제 완화방안은 1차적으로 교통혼잡구간을 효율적으로 운영·관리하는데 초점을 두고 있다. 교통혼잡구간은 불합리한 도로 기하구조 또는 운영전략, 운전행태, 돌발상황 등의 제반 교통문제로부터 발생되므로 교통혼잡구간의 교통관리전략은 다양한 접근방법으로 수립될 수 있다.

개별차량의 미시적 운전행태 분석을 토대로 수립되는 교통관리전략은 일반적으로 효율성의 측면에서 타 접근방법보다 우월한 것으로 인정되고 있다. 이는 운전자마다 상이한 운전기술을 가지고 다른 운전자와 반응하기 때문이다. 혼잡의 발생과 혼잡의 해결방안에 대한 이해를 위해서는 주행차량 간의 상호작용에 대한 심도 있는 이해가 필요하다. 이는 운전자의 행태를 미시적 수준(microscopic level)에서 설명할 수 있는 교통 이론이 필요함을 의미한다. 차량추종영역(car following regime)에서의 운전자의 가속행태<sup>1)</sup>에 관한 연구는 1950년대 이래로 폭넓게 연구되었다.<sup>1)</sup> 그러나, 대상차량(subject vehicle)과 그의 선두차량(leader vehicle), 차간 간격(gap length), 대상차량의 가속도 등의 미시적 실측자료를 이용한 모형추정은 거의 이루어지지 않았다. 반면에, 자유속도영역(free flow regime)에 대한 연구는 1980년대 초부터 주목을 끌기 시작했다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 운전자의 가속행태(주로 차량추종영역)를 모형화하기 위한 포괄적인 연구체계를 제시하고, 실증적 자료를 토대로 미시적 차량추종모형을 정립하였다. 즉, 모형추정을 위한 연구체계를 제공하고, 기존모형을 확장하여 새로운 모형을 개발·정립하며, 모의실험자료와 미시적 실측자료를 이용하여 모형을 적용하고, 적용성을 분석하였다.

## II. 관련연구 고찰

기존의 차량추종모형 중 가장 널리 이용되고 있는 모형으로는 CARSIM, NETSIM, 그리고 GM모형 등이 있다.

CARSIM모형<sup>2)</sup>은 전통적인 추종모형의 형태와는 다소 상이하며, 차량이 처할 수 있는 상황을 5가지로

구분하여 가속도를 계산한다. 각 상황에서의 가속도의 계산은 미시적 실측자료가 아닌 운동방정식이 이용되며, 계산된 가속도는 최대가속도와 최대감속도에 의하여 합리적인 수준으로 제한된다. 이모형은 연속류를 대상으로 개발된 모형이므로 차량발생 초기에 차량간의 차두거리가 작은 경우는 추종이 적절히 일어나지 않고 추종차량의 가속도가 음수가 되는 경우가 발생하기도 한다. 그러나, CARSIM모형은 기존 추종모형이 가지는 안정성 문제를 극복할 수 있는 장점이 있다. CARSIM의 차량 추종영역에서의 추종차량 가속도( $a_4(t)$ )는 다음식에 의하여 계산된다.

$$X_l - (X_f + V_f(t) + 0.5a_4(t)^2) = L_l + k$$

여기에서,

- $a_4(t)$  : 추종차량의 가속도
- $X$  : 차량위치
- $V$  : 주행속도
- $L$  : 차량길이
- $k$  : 매개변수
- $l$  : 선두차량
- $f$  : 추종차량

NETSIM의 차량추종모형<sup>3)</sup>은 네트워크를 미시적으로 분석할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 추종차량의 가감속을 선택하는데 있어 지나치게 결정적이고 이산적이며, 가감속도의 범위가 차량의 일반적인 가감속 성능을 위배하는 경우가 발생한다. NETSIM의 추종차량 가속도( $a_f$ )는 다음 식에 의하여 계산된다.

$$a_f(t+T) = (F_1 \times F_2) / (F_2^2 + F_1 \times t_1^2)$$

$$F_1 = 2d_f[S - (R-1) \times V_f(t)]$$

$$+ [(V_f(t)2 \times d_f) / d_l] - V_f(t)^2$$

$$F_2 = d_f(2R+1) \times V_f(t) + 2V_f(t)$$

여기에서

- $d_f, d_l$  : 선두, 추종차량의 최대감속도(12ft/s<sup>2</sup>)
- $R$  : 감속시 운전자 반응시간

GM모형<sup>4)</sup>은 선행차량과 후행차량의 차두거리와 속

1) 가속(acceleration)은 감속(deceleration)이라는 용어로 사용되지 않는 경우에는 가속과 감속 모두를 일컫는다.

도차의 함수식에 의해 추종차량의 가속속도를 결정하는 모형이다. 이로 인해, GM모형은 항상 안정성의 문제를 가지고 있으며, 선행차량의 급격한 속도변화는 충분한 거리가 떨어져 있는 추종차량에게 실제보다 지나치게 영향을 주어 불안정한 경우가 발생한다.

기존 연구는 다음과 같이 요약할 수 있다.<sup>1)</sup>

첫째, CARSIM이나 NETSIM 등은 차량추종모형에 있어서 차량간의 상관관계에 의하여 운동방정식을 적용하거나, 추종모형 자체보다는 다양한 상황에 대한 제약을 통해 차량의 가속도를 계산한다.

둘째, 자유속도상황에 대하여는 일반적으로 단순한 운동방정식, 즉 최대가속도(maximum acceleration)와 정상감속도(normal deceleration)를 적용하고 있다. 차량추종상황에서 자극의 영향은 선형관계로 가정하여 파라미터를 추정하였으며, 추정된 단일한 파라미터 셋이 전체 교통상황에 두루 적용되고 있다.

셋째, 운전자가 처한 가속상황을 결정하는 헤드웨이 범위는 대부분의 경우 결정론적으로 모형화 되고 있다. 비록, Subramanian(1996)이 개발한 일반가속모형은 운전자 행태에서의 이질성을 이끌어 내었으며, 헤드웨이 범위에서의 다양성과 반응시간을 모형화하는데 확률론적 작업을 취하였으나, 단지 차량추종상황에서만 파라미터들이 추정되었다.

본 논문에서는 Gazis(1961) 모형(GM 5th Model)을 기반으로 하여 각 상황, 즉 가속상황과 감속상황, 출발상황 및 정지상황에 대하여 모형의 각 파라미터를 추정하였다.

### III. 기본모형의 설정

본연구의 차량추종모형을 구성하기 위한 기본 모형은 GM 5번째 모형의 확장으로 표현된다. 본연구의 기본모형은 아래 식으로 표현되는데, 기본모형은 GM 모형의 민감도 요소 중에서 속도부분을 시점  $t$ 와 시점  $t + \Delta t$ 로 구분하며, 자극은 먹지수  $n$ 이 1인 경우(선형)와 1이 아닌 경우(비선형)로 구분하여 개별적으로 모형을 추정하였다.

$$a_{n+1}(t + \Delta t) = \alpha \frac{[v_{n+1}(t + \Delta t) \text{ or } v_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^n$$

- $a_{n+1}(t + \Delta t)$  : 반응시간 후 후행차 가속도
- $\Delta t$  : 반응시간
- $l, m, n, \alpha$  : 모형 파라미터
- $v_n(t)$  : 시간  $t$ 에서 선행차량 속도
- $v_{n+1}(t)$  : 시간  $t$ 에서 후행차량 속도
- $v_{n+1}(t + \Delta t)$  : 반응시간 후 후행차 속도
- $x_n(t) - x_{n+1}(t)$  : 차두간격

본 연구에서는 위 모형을 기본모형으로 하여, 차량 추종상황을 가속, 감속, 출발, 정지의 네 가지 상황으로 구분하여 각 상황마다 독립적으로 모형 파라미터를 추정하였다. 본 연구의 차량추종상황에서의 차량 주행특성은 다음과 같다.

- 가속상황 : 상대속도가 양일 때 가속도 분포의 기대값은 0보다 크다고 가정할 수 있으므로, 상대속도가 양인 경우에는 가속상황으로 구분하여 모형을 추정할 수 있다. 가속상황은 차량추종상황 중에서 현재 차량에 대한 선행차량의 상대속도가 0보다 큰 경우에 적용되며 차량은 가속을 통해서 자신의 속도를 선두차량의 속도와 일치시키려 한다.
- 감속상황 : 감속상황은 가속상황과 반대되는 경우이다. 감속상황은 선두차량과의 상대속도가 0보다 작은 경우이며 현재차량은 자신의 선두차량의 행태 변화에 반응하여 감속한다.
- 출발상황 : 출발상황은 정지하였던 차량이 움직이기 시작할 때 적용되는 상황이다. 출발상황에 대한 차량추종모형은 실측자료를 이용하여 추정되지 않고 가속상황 및 감속상황의 모형과 가속도 제약식을 이용하여 구성한다. Kazi<sup>5)</sup>는 헤드웨이를 0.5에서 6초로 구분하여 차량이 차량추종상황에 처할 확률을 계산하였다. 본 논문에서는 이 헤드웨이의 경계값(0.5, 6.0)을 출발상황과 정지상황을 구성하는 데 이용한다.
- 정지상황 : 정지상황은 출발상황과는 반대로 현재 차량이 전방의 장애물(신호 등)과의 충돌을 피하기 위하여 감속을 하여 정지하는 상황이다. 이 상황에서는 차량은 가속보다는 주로 감속을 하게 되며, 경우에 따라서는 최대가속도로 급히 감속해야 할 수도 있다. 정지상황의 차량추종모형은 출발상황의 모형과 마찬가지로 별도의 실측자료를 이용

하여 추정하지 않고 출발상황과 마찬가지로 가속 상황과 감속상황의 모형과 가속제약 등을 이용하여 구성한다.

본 연구에서는 위의 각 상황별로 차량추종모형을 네 가지 모형으로 구성하여 현장조사자료를 통하여 각 상황, 즉 가속상황과 감속상황의 파라미터를 추정 및 출발상황과 정지상황의 모형을 구성하였다.

- 모형 I : 속도민감도에 후행차량의 현재시점 속도( $v_{n+1}(t)$ )를 사용하고 자극의 멱지수는 1인 경우.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = a \frac{v_{n+1}(t)^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \times [v_n(t) - v_{n+1}(t)]$$

- 모형 II : 속도민감도에 후행차량의 반응시간 후 속도( $v_{n+1}(t+\Delta t)$ )를 사용하고 자극의 멱지수는 1인 경우.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = a \frac{v_{n+1}(t+\Delta t)^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \times [v_n(t) - v_{n+1}(t)]$$

- 모형 III : 속도민감도에 후행차량의 현재시간 속도( $v_{n+1}(t)$ )를 사용하고 자극 멱지수가 1이 아닌 경우.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = a \frac{v_{n+1}(t)^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \times [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^n$$

- 모형 IV : 속도민감도에 후행차량의 반응시간 후 속도( $v_{n+1}(t+\Delta t)$ )를 사용하고 자극의 멱지수는 1이 아닌 경우.

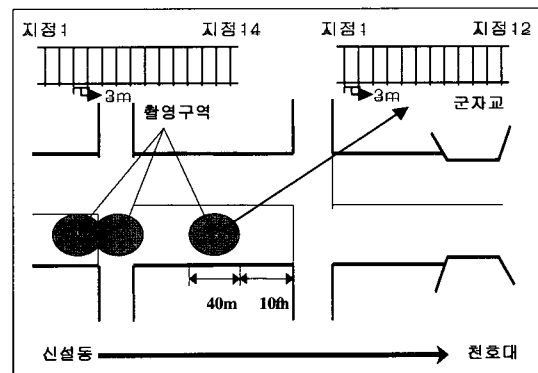
$$a_{n+1}(t+\Delta t) = a \frac{v_{n+1}(t+\Delta t)^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \times [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^n$$

## IV. 모형구축

### 1. 실측자료의 수집

미시적 차량추종모형의 파라미터를 추정하기 위해서는 현장자료의 수집이 필수적이다. 본 연구에서는 가속, 감속, 출발, 정지상황에서의 자료수집이 용이하도록 조사구간을 천호대로(답십리삼거리~장안평역사거리) 중 일부 구간을 <그림 1>과 같이 설정하였다. 각 상황(가속상황, 감속상황, 출발상황, 정지상황)에 대한 자료를 확보하기 위하여 조사는 총 3지역에 걸쳐서 9월 18일(오후5-7시), 9월 22일(오전10-오후3시), 10월 1일(오후3-3:50) 등 3일간 이루어졌다.

개별 주행차량의 가속자료는 링크중간, 출발자료는 정지선 하류, 정지자료는 정지선 상류의 40m 구간에서 조사하였다. 실측자료는 Video촬영을 통하여 수집하였으며, 이들 자료는 30frame/초의 화면 capture가 가능한 Video 편집기를 통하여 개별차량의 지점 통과시간을 1/30초 단위로 산출하였다.

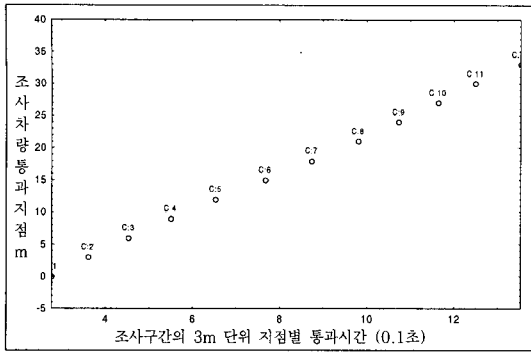


<그림 1> 현장조사지점

### 2. 이산적 궤적자료를 이용한 순간속도 및 가속도추정

#### 1) 이산적 차량궤적자료의 수집

차량추종모형의 파라미터를 추정하기 위해서는 주행차량의 순간속도와 순간가속도 자료를 연속적으로 조사하여야 한다. 그러나 조사장비 등의 한계로 인하여 연속적인 순간속도와 순간가속도 자료를 수집하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 이에 대한 대안으로 일정지점에 대한 통과시간 데이터를 수집하였다.



〈그림 2〉 임의차량 1대의 이산적 궤적자료

즉, 비디오 촬영구역내의 도로구간을 3m 단위로 총 12~14개 지점을 표시하여 차량이 각 지점을 통과하는 시간을 비디오편집기를 이용하여 매 1/30초 단위로 기록하였다. 〈그림 2〉는 임의의 조사차량 한 대의 각 지점(총 12개, 33미터) 통과시간, 즉 이산적 궤적 자료를 나타낸 것이다.

2) 순간속도 및 가속도 추정

차량의 순간속도와 가속도는 테스트 차량을 통하여 수집이 가능하기는 하지만, 이의 과정이 까다롭고 실제 교차로의 다양한 교통상황을 반영하기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 개별차량의 순간속도 및 가속도를 추정하기 위하여 이산실측자료를 연속적 궤적함수로 변환하였다. 차량의 궤적(trajec-tory)을 설명하는 연속함수는 다항회귀모형(polynomial regression model)을 이용하여 유도할 수 있다. 일단 궤적함수, X(t), 가 추정되면, 궤적함수의 1차와 2차 미분식은 시간 t에서의 순간속도와 순간가속도를 나타낸다.

$$V(t) = \frac{dX(t)}{dt}, \quad a(t) = \frac{d^2X(t)}{dt^2}$$

여기에서,

t : 시간

V(t), a(t) : 시간 t에서의 속도 및 가속도

일반적으로 혼잡상황에서는 stop-and-go의 상태가 반복되며 때로는 상당한 시간동안 정지상태가 지속된다. 따라서 관측된 궤적자료로서는 개별차량의 정지여부를 판단하기 어려울 뿐만 아니라 빈번한 가

감속을 하는 차량의 주행특성을 판단하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 개별차량의 주행특성 (지점속도, 순간가속도)을 추론하기 위하여 이산적 관측자료(이산자료)를 토대로 차량궤적함수를 추정하였다.

차량궤적함수는 2차이하의 다항식은 차량이 항상 등가속도 혹은 등속도 운동을 하므로 궤적함수에 적용할 수 없다. 이산적 실측자료를 여러 차수의 다항식으로 적합시킨 결과 6차이상의 다항식에서는 적합곡선이 심하게 진동하여, 차량이 후진하는 모습을 나타내곤 하였다. 이는 실측자료의 지점수가 12~14개로 제한되어 있고 실측자료가 일정시간에 대한 통과시간자료이므로 곡선적합시 이용되는 시간에 따른 위치데이터는 심한 편향 현상이 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 차량궤적함수를 5차식으로 가정하여 궤적함수를 유도하였다. 그러나, 5차식을 이용하여 곡선적합이 결과가 부적합 할 때는 차수를 하나씩 줄여 가면서 다항 회귀모형을 적용하였다. 모든 적합된 곡선은 R<sup>2</sup> 값이 0.95이상인 자료만을 이용하였다. 따라서, 적합된 차량궤적 다항식은 3차 다항식에서 5차 다항식으로 구성하였다.

다항회귀모형을 이용하면 5차 곡선 관계를 쉽게 표현할 수 있다. 5차 곡선 관계를 나타내기 위해서는 독립변수가 5개인 중회귀함수로 간주하여 추정할 수 있다. k 개의 항이 포함되는 경우도 마찬가지로 방법으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 다음의 차량궤적함수를 기본식으로 12개 지점에 대한 통과시간 자료(이산적자료)를 이용하여 차량궤적함수를 도출하였다.

$$X(t) = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3 + \beta_4x^4 + \beta_5x^5$$

여기에서,

X(t) : 독립변수(지점통과시간)

$\beta_n$  : 회귀계수

x : 개별차량의 조사지점 통과시간(초)

〈그림 3, 4〉는 조사자료 중에서 임의로 선택한 개별차량의 차량궤적함수를 나타낸 것으로서 이들 적합곡선은 R<sup>2</sup>값이 0.95 이상인 자료만 사용하여 추출하였다. 그림에서 점으로 표현된 부분은 이산적인 현장조사자료이며, 연속된 선으로 표현된 부분은 다항회귀함수를 이용하여 추정한 궤적함수, X(t), 이다. 〈그림 4〉의 조사차량은 상대시간 1.03초에 총

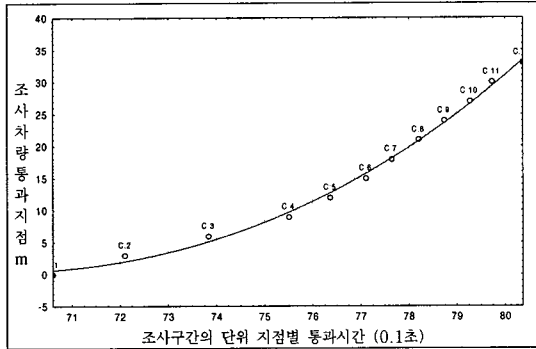
12개의 조사지점 중, 첫 번째 조사지점(지점1)을 통과하여 약 3.6초에 마지막 조사지점(지점12)에 도착한 차량이다. 이 차량은 약 12.9m/s의 속도로 조사지역에 2.5초 동안 관측되었다. 추정된 궤적함수는  $R^2$ 값이 0.95 이상으로서 실측자료와 매우 잘 부합되

고 있다. <그림 5>는 연속된 여러 차량의 추정된 궤적식을 나타낸 것으로서 궤적식이 실측치를 잘 반영하며, 차량의 진행형태 또한 제대로 반영하고 있음을 알 수 있다.

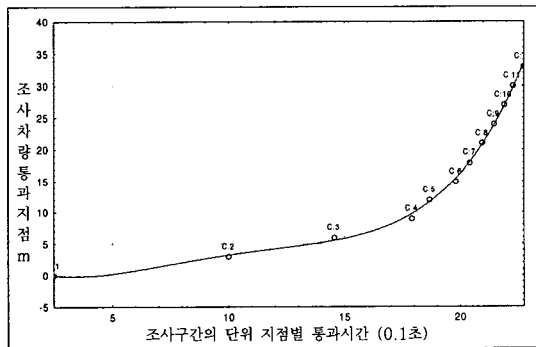
3) 모형추정을 위한 자료의 추출

차량추종모형을 구축하기 위하여 요구되는 자료는 앞절에서 설명한 차량궤적함수를 통하여 추출할 수 있다. 곡선적합에서 설명하였듯이, 적합한 궤적곡선은 실측자료가 존재하는 구간에서는 실측치를 잘 반영하고 있다. 그러나, 실측자료가 존재하지 않는 구간에서는 적합한 궤적곡선은 비현실적인 모습을 나타내기도 한다. 예를 들면, 어떤 차량이 3초에서 10초 사이에 관측되었다면, 3~10초 사이의 추정된 곡선만을 신뢰할 수 있다. 따라서, 모형 추정을 위한 자료는 차량이 관측된 시간 내의 것만을 사용하였다.

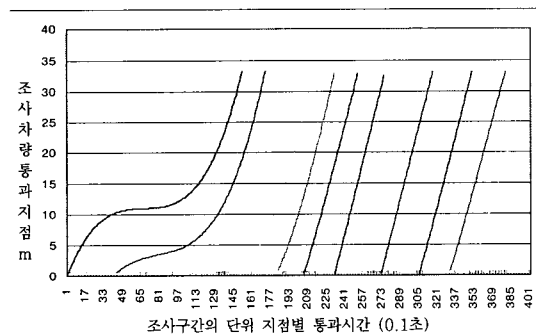
<그림 6>은 모형추정을 위한 자료의 추출 기준을 설명하고 있다. 여기에서  $n$ 은 선두차량,  $n+1$ 은 후행차량을 의미한다. 모형추정에 적합한 자료는 짧은 직선으로 표시된 것과 같이 선행차량과 후행차량이 모두 관측된 시간범위의 것이다. 선두차량과 후행차량 모두 관측시간 이내에 존재하기 때문에 모형추정에 이용될 수 있다.



(다항회귀모형을 이용한 curve fitting)  
 <그림 3> 개별차량의 궤적에서 1

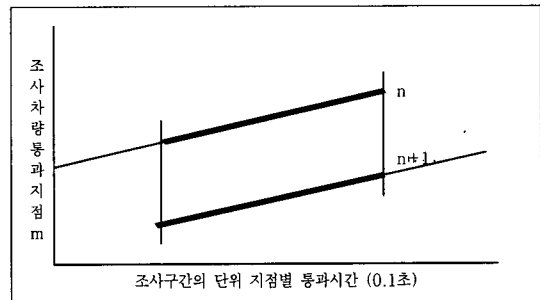


(다항회귀모형을 이용한 curve fitting)  
 <그림 4> 개별차량의 궤적에서 2



<그림 5> 임의의 차량 10대의 연속적인 궤적

주 : 1) 그림 2, 3, 4는 서로 다른 차량임.  
 2) 그림 5는 차량군으로 주행하는 차량 10대의 차량궤적을 curve fitting에 의하여 표시한 것임.



<그림 6> 모형추정에 적합한 자료

3. 모형의 파라미터추정

본절에서는 앞에서 제시한 모형 I, II, III, IV를 이용하여 모형의 각 파라미터  $\alpha$ ,  $m$ ,  $l$  또는  $\alpha$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $n$ 을 추정하였다. 본 연구에서는 각 모형의 파라미터 셋을 추정하기 위하여 다중회귀모형을 적용하였으며, 이를 위해서 모형 I, II, III, IV를 양변에 자연로그를 취함으로써 선형화 하였다. 모형 I, II는 가속도가 차량간의 상대속도와 선형관계에 있음을 가정하여 구축

하였으며, 모형Ⅲ,Ⅳ는 가속도가 상대속도와 비선형관계가 있음을 가정하여 구축하였다. 다음 모형들의 파라미터는 앞서 설명한 차량추종모형의 각 상황 (가속/감속상황) 자료를 토대로 회귀식을 이용하여 추정하였다.

- 모형 I :

$$\ln\left(\frac{a_{n+1}(t+\Delta t)}{(v_n(t)-v_{n+1}(t))}\right) = \ln(\alpha) + m\ln(v_{n+1}(t)) + l\ln(x_n(t)-x_{n+1}(t))$$

- 모형 II :

$$\ln\left(\frac{a_{n+1}(t+\Delta t)}{(v_n(t+\Delta t)-v_{n+1}(t))}\right) = \ln(\alpha) + m\ln(v_{n+1}(t+\Delta t)) + l\ln(x_n(t)-x_{n+1}(t))$$

- 모형 III :

$$\ln(a_{n+1}(t+\Delta t)) = \ln(\alpha) + m\ln(v_{n+1}(t)) + l\ln(x_n(t)-x_{n+1}(t)) + n\ln(v_n(t)-v_{n+1}(t))$$

- 모형 IV :

$$\ln(a_{n+1}(t+\Delta t)) = \ln(\alpha) + m\ln(v_{n+1}(t+\Delta t)) + l\ln(x_n(t)-x_{n+1}(t)) + n\ln(v_n(t)-v_{n+1}(t))$$

#### 4. 가속/감속 모형의 파라미터 도출결과

##### 1) 모형의 파라미터추정 결과

가속상황 차량추종모형의 파라미터는 173개의 가속상황 관측자료를 이용하여 추정하였다. 이들 관측자료의 속성 즉, 관측자료의 선행차량속도, 후행차량 속도, 가속도, 차두간격 등의 통계적 특성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 가속상황 차량추종모형 추정에 이용된 173개 관측자료의 통계적 속성

	선행속도 (m/s)	후행속도 (m/s)	가속도 (m/s/s)	헤드웨이 (sec)
최대값	19.13	17.34	3.07	14.55
최소값	0.13	0.06	0.01	0.87
평균	6.63	5.47	0.69	3.49
중간값	5.41	4.15	0.53	2.96
표준편차	4.41	3.77	0.55	2.35

<표 1>의 가속상황 관측자료를 이용하여 추정한 모형 I, II, III, IV의 가속상황 차량추종모형의 파라미터 추정결과는 <표 2>와 같다. 파라미터 추정결과는 모형Ⅱ의 결정계수 값이 0.5382로 가장 좋고, 모형Ⅲ의 결정계수가 0.2981로 가장 좋지 않다. 또한 추정된 각 파라미터의 t 값은, 모형 I의 경우 헤드웨이 파라미터를 제외하고는 모두 유의수준 10%에서, 모형Ⅱ의 경우에는 추정된 파라미터가 모두 유의수준 1%에서 유의한 것으로 분석되었다. 그러나 모형Ⅲ과 모형Ⅳ의 파라미터들은 통계적으로 의미가 없는 것으로 분석되었다.

<표 2> 각 모형(I, II, III, IV) 별 가속상황 차량추종 모형의 파라미터 추정치

모형	R <sup>2</sup>		추정표준오차	
	F(2,175)	추정값	t(175)	p-level
모형 I		0.5342		
		100.34		
		0.9162		
		추정값	t(175)	p-level
모형 II		0.5383		
		102.02		
		0.91208		
		추정값	t(175)	p-level
모형 III		0.2981		
		24.633		
		0.8758		
		추정값	t(174)	p-level
모형 IV		0.3313		
		28.737		
		0.8548		
		B	t(174)	p-level

감속상황 차량추종모형의 파라미터는 115개의 감속상황 관측자료를 이용하여 추정하였다. 이들 관측

자료의 속성 즉, 관측자료의 선행차량속도, 후행차량속도, 가속도, 차두간격 등의 통계적 특성은 <표 3>과 같다.

<표 3> 감속상황 차량추종모형 추정에 이용된 115개 관측자료의 통계적 속성

	선행속도 (m/s)	후행속도 (m/s)	가속도 (m/s/s)	헤드웨이 (sec)
최대값	10.18	10.51	0.00	11.69
최소값	0.11	0.45	-3.35	1.38
평균	3.52	4.22	-0.50	3.34
중간값	3.42	4.13	-0.36	3.16
표준편차	1.74	1.81	0.46	1.62

<표 3>의 115개 감속상황 관측자료를 이용하여 추정한 모형 I, II, III, IV의 감속상황 차량추종모형의 파라미터 추정결과는 <표 4>와 같다. 이의 결과를 보면 전체적으로 결정계수 값은 가속상황의 모형들보다 나쁘다. 개별적인 결과를 보면 모형III이 결정계수 0.24로서 가장 좋은 결과를 보이며, 모형II의 결과가 가장 좋지 않다.

<표 4> 각 모형(I, II, III, IV) 별 감속상황 차량추종 모형 추정치

모형	모형 I		모형 II		모형 III		모형 IV	
	추정값	t(112)	추정값	t(112)	추정값	t(111)	추정값	t(111)
모형 I	R <sup>2</sup>	0.0555			R <sup>2</sup>	0.0175		
	F(2,112)	3.2886			F(2,112)	0.9964		
	추정표준오차	1.1235			추정표준오차	1.1459		
	$\alpha$	0.9128	-0.0670	0.9470	$\alpha$	0.3699	-0.6545	0.5142
	m	0.6540	2.2722	0.0250	m	0.1968	0.7958	0.4278
	l	0.4864	-0.7461	0.4572	l	-0.1434	0.2051	0.8379
모형 II	R <sup>2</sup>	0.2422			R <sup>2</sup>	0.1783		
	F(3,111)	11.826			F(3,111)	8.0290		
	추정표준오차	1.0249			추정표준오차	1.0672		
	$\alpha$	1.0279	0.0221	0.9824	$\alpha$	0.2883	-0.8781	0.3818
	m	0.8575	3.2253	0.0017	m	0.2259	0.9802	0.3291
	l	0.7954	-1.3299	0.1863	l	0.0960	0.1473	0.8831
모형 III	R <sup>2</sup>	0.0000			R <sup>2</sup>	0.5191	4.5952	0.0000
	F(3,111)	4.5952			F(3,111)	8.0290		
	추정표준오차	1.0672			추정표준오차	1.0672		
	$\alpha$	0.2883	-0.8781	0.3818	$\alpha$	0.2883	-0.8781	0.3818
	m	0.2259	0.9802	0.3291	m	0.2259	0.9802	0.3291
	l	0.0960	0.1473	0.8831	l	0.0960	0.1473	0.8831
모형 IV	R <sup>2</sup>	0.0000			R <sup>2</sup>	0.0000		
	F(3,111)	4.5952			F(3,111)	8.0290		
	추정표준오차	1.0672			추정표준오차	1.0672		
	$\alpha$	0.2883	-0.8781	0.3818	$\alpha$	0.2883	-0.8781	0.3818
	m	0.2259	0.9802	0.3291	m	0.2259	0.9802	0.3291
	l	0.0960	0.1473	0.8831	l	0.0960	0.1473	0.8831

가속상황과 감속상황에 대하여 모형의 결정계수와 각 파라미터의 p-level이 만족스럽지 못한 경우가 있다. 특히 감속상황의 경우, 결정계수의 값이 0.25이하로 매우 낮는데, 이는 자료의 수가 적다는 것과 차량이 정지하거나 정지하려고 하는 상황에 대한 조사 자료의 오차로 인한 것 때문으로 판단된다. 이는 또한 조사방법(일정위치에 대한 통과시간조사)에 부수적으로 따르는 단점이다.

2) 모형추정결과의 신뢰성분석

본 절에서는 가속상황과 감속상황에 대하여 각 모형별로 추정된 총 8개의 모형을 제곱합수를 통해 얻은 실측치 가속도와 모형을 통해서 계산된 예측치 가속도, 그리고 실측치 속도와 예측치 속도에 대하여 카이제곱검정과 t-검정(쌍체비교)을 수행하였다. 카이제곱 검정조건은 가속도의 경우에는 -4.0~4.0m/초<sup>2</sup>를 0.25m/초<sup>2</sup> 단위로 구분하여 가속상황과 감속상황에 대하여 각 모형별로 수행하였다. 속도의 경우에는 가속상황에서는 0~20m/초를 1m/초단위로 구분하여 검정하였고, 감속상황에서는 0~10m/초를 1m/초 단위로 구분하여 카이제곱검정을 수행하였다. 그리고 각 상황 및 모형별로 가속도와 속도의 실측치와 예측치를 쌍체비교(paired comparison)를 수행하였다.

(1) 카이제곱검정결과

카이제곱 검정결과는 <표 5~8>과 같다. 카이제곱 검정결과 <표 5, 6>의 가속도 검정의 경우 가속상황과 감속상황 모두에서 모형 I과 모형II는 유의수준 10%에서 실측치 가속도와 예측치 가속도는 차이가 없다는 귀무가설을 채택한다. 그러나, 모형III과 모형IV는 모든 경우에서 귀무가설을 유의수준 10%에서 기각한다. <표 7, 8>의 속도 검정의 경우, 가속상황의



〈표 5〉 후행차량 가속도의  $\chi^2$ 검정결과(가속상황)

	카이제곱값( $\chi^2$ )	자유도(df)	p <
모형 I	22.894	15	0.086
모형 II	21.917	15	0.110
모형 III	96.446	15	0
모형 IV	125.657	15	0

〈표 6〉 후행차량 가속도의  $\chi^2$ 검정결과(감속상황)

	카이제곱값( $\chi^2$ )	자유도(df)	p <
모형 I	23.649	15	0.071
모형 II	14.452	15	0.492
모형 III	70.046	15	0
모형 IV	70.250	15	0

〈표 7〉 후행차량 속도의  $\chi^2$ 검정결과(가속상황)

	카이제곱값( $\chi^2$ )	자유도(df)	p <
모형 I	13.259	19	0.825
모형 II	6.585	19	0.996
모형 III	30.269	19	0.048
모형 IV	28.207	19	0.079

〈표 8〉 후행차량 속도의  $\chi^2$ 검정 결과(감속상황)

	카이제곱값( $\chi^2$ )	자유도(df)	p <
모형 I	6.681	10	0.755
모형 II	4.808	10	0.903
모형 III	4.733	10	0.908
모형 IV	4.409	10	0.926

모형 III을 제외하고는 모든 카이제곱 값이 유의수준 5%에서 유의하다. 카이제곱검정 결과로 볼 때는 모형 I과 모형 II가 가속상황과 감속상황에서 적합한 차량추종모형으로 판단된다.

(2) t-검정

쌍체비교는 실험전과 후의 결과치가 차이가 있는가를 검정하는 것이다. 이를 위해서 궤적식을 통해서 얻은 실측치 가속도와 속도를 각 모형을 통해서 계산된 예측치 가속도와 속도도 쌍체비교 하였다.

실측치와 예측치는 차이가 없다라는 귀무가설에 대한 쌍체비교 결과 값은 〈표 9〉와 같다. 쌍체비교 결과, 가속도와 속도, 그리고 가속상황과 감속상황에 대하여 모형 I과 모형 II의 경우에는 가속상황에서 가속

〈표 9〉 각 상황 및 모형별 쌍체비교결과

		모형 I (Prob)  T )	모형 II (Prob)  T )	모형 III (Prob)  T )	모형 IV (Prob)  T )
가속도 비교	가속상황	0.0394	0.0769	0.0001	0.0001
	감속상황	0.9075	0.5867	0.0013	0.0009
속도 비교	가속상황	0.1837	0.4269	0.0001	0.0001
	감속상황	0.8110	0.3379	0.0002	0.0001

도의 실측값과 예측값을 비교한 모형 I을 제외하고는 모두 유의수준 5%에서 귀무가설을 채택한다. 반면에 모형 III과 모형 IV의 경우에는 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각한다. 즉, 실측치와 예측치는 다르다라고 판정하고 있다. 쌍체비교의 결과는 카이제곱결과와 비슷한 결론을 나타내었다. 즉, 가속상황과 감속상황 모두 모형 III과 모형 IV, 즉 자극(상대속도)을 비선형 함수로 정의한 모형보다는 모형 I과 모형 II, 즉 자극을 선형함수로 정의한 모형이 더욱 신뢰할 만한 결과를 나타낸다.

본절에서는 정립모형의 파라미터 추정결과와 신뢰성을 카이제곱검정과 t-검정을 통하여 분석하였다. 분석결과 모형 I과 II의 유의성이 모형 III과 IV에 비하여 높은 것으로 분석되었다. 따라서 가속모형은 모형 I과 II를 조합한 형태로 구성함이 바람직할 것이다. 이의 적용결과는 다음 장에서 분석하였다.

V. 모형의 적용 및 민감도 분석

앞서 구성한 각 모형을 통계분석을 한 결과 일차적으로 모형 I, II가 유의성이 있는 것으로 나타났다. 그러나, 이 결과만으로는 모형의 실용성을 평가하기 어렵다. 본장에서는

- 다양한 차량추종상황에 따라 가상 시나리오를 설정하고, 이에 의하여 산출되는 모의자료를 이용하여 구축모형을 적용하고,
- 제한적인 상황에서 수집된 실측자료(IV장 참조)를 이용하여 모형을 적용하여 구축모형의 신뢰성을 분석하고,
- 민감도분석을 통하여 구축모형의 적용성을 분석하였다.

### 1. 모의자료를 이용한 모형의 적용

근본적으로 모형의 적용 결과는 실측자료를 이용하는 것이 좋지만, 본 연구의 특성상 차량이 관측된 시간이 3~10여초에 불과하기 때문에 차량이 처할 수 있는 다양한 상황은 비교적용이 매우 어렵다. 이로 인하여, 차량을 가상적으로 많은 변화를 겪도록 진행시켜 그 상황마다 선택된 모형의 결과를 분석하였다. 본장에서는 IV장의 신뢰성 분석결과 도출된 모형 I, II를 가속상황과 감속상황에 대하여 다음 <표 10>과 같이 조합하여 가상적으로 차량 5대를 발생시켜 모형을 적용하였다. 차량의 주행구간은 차량이 출발하여 정지하는 6개 구간으로 구분하여 차량주행시의 다양한 출발/정지 행태를 반영할 수 있도록 시나리오를 설정하였다. 선두차량의 구간별 주행행태는 다음과 같다.

- 구간1 : 36km/h(10m/sec)로 12초간 등속주행 후  $-2m/sec^2$ 으로 감속하여 25초간 정지.
- 구간2 :  $1m/sec^2$ 으로 가속하여 10.8km/h(3m/sec)로 28초간 등속주행 후  $-1m/sec^2$  감속하여 25초간 정지.
- 구간3 :  $2m/sec^2$ 으로 가속하여 21.6km/h(6m/sec)로 34초간 등속주행 후  $-1.5m/sec^2$ 으로 감속하여 31초간 정지.
- 구간4 :  $1.5m/sec^2$ 으로 가속하여 32.4km/h(9m/sec)로 15초간 주행한 후  $-3m/sec^2$ 의 감속도로 정지하여 15초간 정지.
- 구간5 :  $3m/sec^2$ 으로 가속하여 43.2km/h(12m/sec)로 24초간 주행하고  $-3m/sec^2$ 으로 감속하여 37초간 정지.
- 구간6 : 마지막 구간으로서  $2.5m/sec^2$ 로 가속하여 54 km/h(15m/sec)로 16초간 등속 주행.

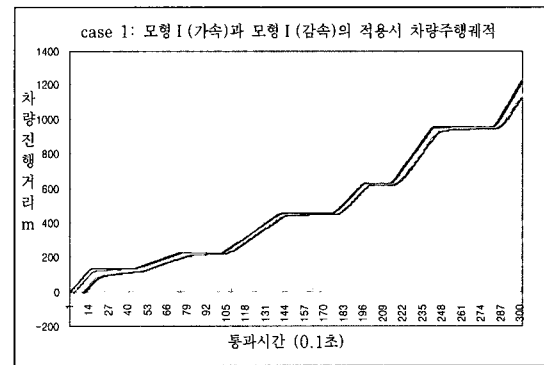
후행차량 4대는 각기 자신의 선두차량에 대하여 아래의 <표 10>의 조건대로 조합된 차량추종모형에 따라 진행한다.

<표 10> 모형의 가상적 실험조건

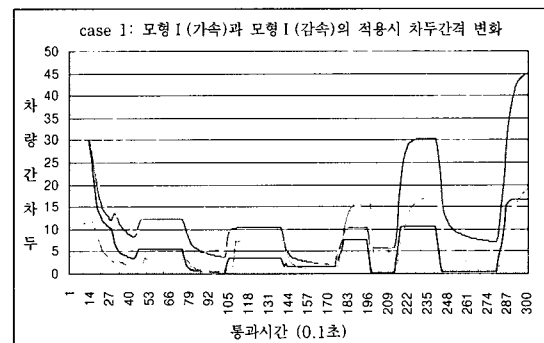
case	case1		case2		case3		case4	
상황	가속	감속	가속	감속	가속	감속	가속	감속
적용모형	I	I	II	I	II	II	I	II

#### 1) case 1 (가속모형 I, 감속모형 I 적용)

모의실험을 위하여 차량 5대를 가상적으로 발생시켜 이를 가속모형 I과 감속모형 I을 각각 적용하여 차량을 진행시킨 결과는 <그림 7>과 같다. 개별차량의 주행궤적은 후행차량이 자신의 선두차량을 추월하거나 선두차량과 너무 멀리 떨어지지 않고서 적절히 뒤따르는 모습을 볼 수 있다. <그림 8>은 이들 다섯대 차량들의 차두간격의 변화를 그린 것이다. 차두간격은 선두차량이 정지하면 좁아졌다가 선두차량이 가속하여 진행하면 다시 멀어지는 일반적인 현상이 잘 드러나고 있다. 그러나, 속도가 15m/s인 마지막 가속부분에서 차두간격이 40m 이상으로 다소 현실보다 크게 벌어지는 모습이 보이기도 한다. 또한, 선두차량이 정지하였을 때 차두간격이 지나치게 좁혀지는 다소 현실성 없는 결과가 나타나기도 한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 현장조사자료가 차량추종상황에 국한되어 조사되었으며 따라서 자유속도상황이나 긴급감속상황이 적용되어야 할 상황에서는 적절한 가속도를 계산하지 못하는 것으로 보인다.



<그림 7> case 1 : 주행차량 5대의 주행궤적



<그림 8> case1 : 주행차량 간의 차두간격 변화

2) case 2 (가속모형 II, 감속모형 I 적용)

가속상황에는 모형II를, 그리고 감속상황에는 모형 I을 적용하여 동일한 조건에서 차량 5대를 진행시킨 결과는 <그림 9, 10>과 같다. 그림을 보면 전체적으로 가감속상황 모두에 모형 I을 적용한 결과와 상당히 유사하게 나타나고 있다. 차량들의 궤적도 적합하며, 이에 따른 차두간격의 변화도 현실적으로 나타나고 있다. 오히려 차두간격의 경우에는 가감속 모두에 모형 I을 적용한 결과와 같이 지나치게 적은 차두간격을 나타내는 현상이 거의 없다.

3) case 3 (가속모형 II, 감속모형 II 적용)

case 3은 가감속 상황 모두에 모형 II의 차량추종모형을 적용한 것이다. case 3의 적용결과는 <그림 11, 12>와 같이 분석되었으며, 이 경우 차량들의 궤적이 현실성이 없게 나타나고 있다. 선두차량이 정지하였을 때도, 선두차량이 가까이 접근하지 않고 차두간격을 15m 이상으로 벌어진단다. 또한 정지하고 있던 차

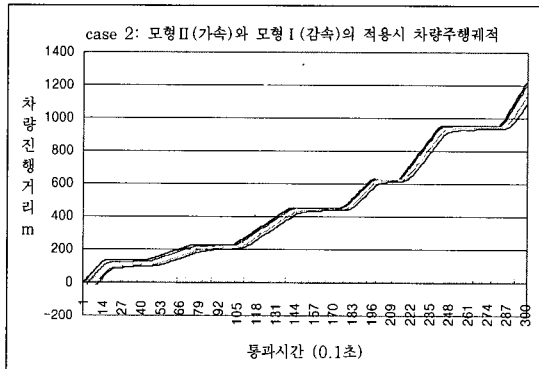
량이 가속하여 진행할 때 후행차량은 적절한 가속을 하지 못하여 차두간격은 시간이 지날수록 계속하여 증가하는 모습이 나타나고 있다. 특히 5번째 차량은 53초 지점에서 자신의 선두 차량과 충돌하였다.

4) case 4 (가속모형 I, 감속모형 II 적용)

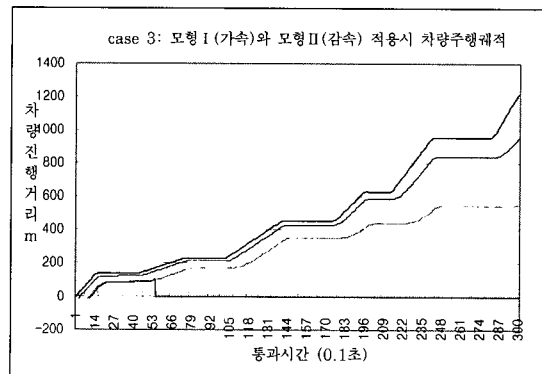
case 4은 가속 상황에 가속모형 I을, 감속상황에 감속모형 II의 차량추종모형을 적용한 것이다. case3의 결과는 가감속상황 모두에 모형II의 차량추종모형을 적용한 case 3과 유사한 결과가 나타났다. 후행차량이 선두차량을 적절히 추종하지 못하여 차두간격이 지나치게 크게 유지되는 모습이 나타난다.

5) 모의실험 결과 및 모형의 구성

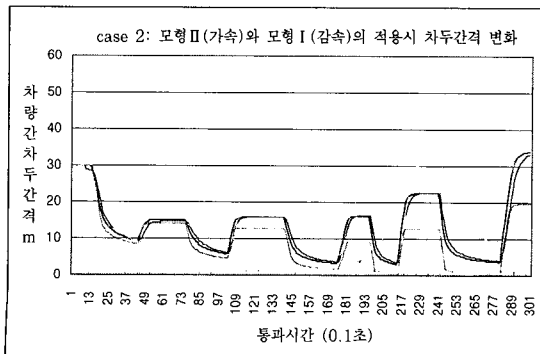
가상적으로 차량을 발생시킨 후, 모형의 계산식에 의하여 차량을 진행시킨 결과 모형 I과 모형II를 적용한 경우에는 차량을 바짝 추종하며, 반면에 모형III과 모형IV를 이용한 경우에는 차두간격이 벌어지는



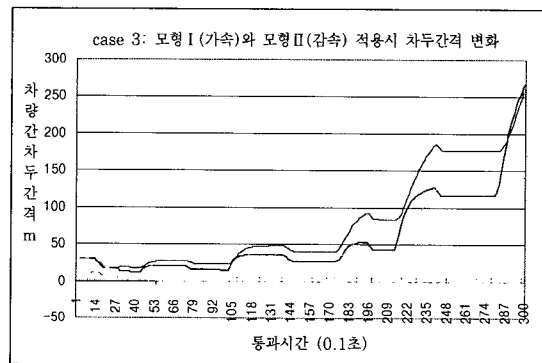
<그림 9> case 2 : 주행차량 5대의 주행궤적



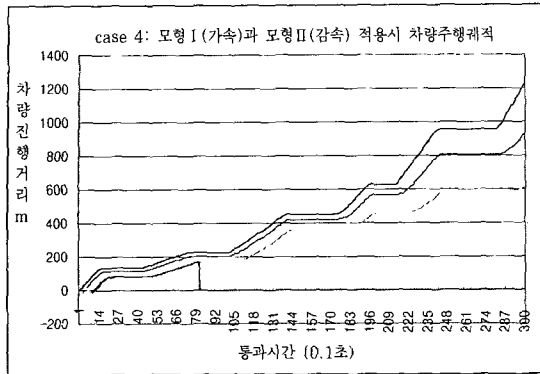
<그림 11> case 3 : 주행차량 5대의 주행궤적



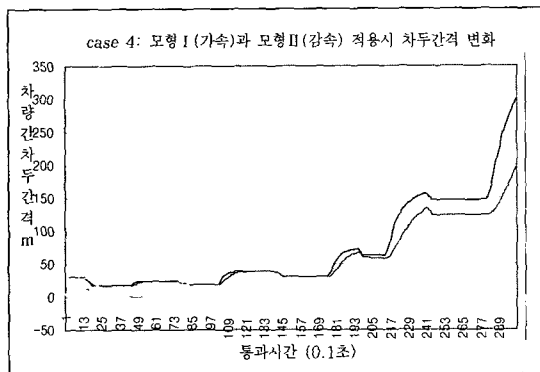
<그림 10> case2 : 주행차량 간의 차두간격 변화



<그림 12> case 3 : 주행차량간의 차두간격 변화



〈그림 13〉 case 4 : 주행차량 5대의 주행격적



〈그림 14〉 case 4 : 주행차량 간의 차두간격 변화

현상이 나타났다. 특히, 모형 I과 모형II를 적용한 경우에는 차두간격이 5m 이하로, 심할 때는 1m 이하로 접근하는 것이 있다. 이는 GM모형의 특성상, 차량의 안정성과 진동현상은 서로 상반되는 관계에 있기 때문이다. 차두간격이 비현실적으로 근접하는 경우는 주로 정지상황에서 발생한다. 따라서 차량의 미시적 행태분석을 위해서는 본연구의 대상 교통상황인 주행상황(가속상황)과 더불어 정지선에서의 차량 출발상황과 정지상황에서의 추종모형이 개발되어야 할 것이다.

본절에서는 총 4가지의 경우(가속 상황 모두 모형 I 적용, 가속은 모형II 감속은 모형 I 적용, 가속 상황 모두 모형II 적용, 그리고 가속은 모형 I 감속은 모형II 적용)의 적용결과를 살펴보았다. 그 결과 case 1 (가속 상황에 모두 모형 I을 적용)과 case 2 (가속 상황은 모형II, 감속 상황은 모형 I을 적용)의 결과가 현실성이 있었다. 그 중에서도 가속 상황에는 모형II, 감속 상황에는 모형 I을 적용한 경우가 가속 상황과 감속 상황에 모두 모형 I을 적용한 것보다 우수하다. 따라서, 가속 상황과 감속 상황에 각각

모형II와 모형 I을 적용하는 것이 합리적으로 판단된다. 결국, 차량추종모형은 다음과 같이 정의된다.

- 가속상황 : 모형II을 이용함.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = 3.3112 \frac{V_{n+1}(t)^{0.1185}}{(X_n(t) - X_{n+1}(t))^{0.7579}} \times (V_n(t) - V_{n+1}(t))^{0.3095} + \epsilon_{n+1}(t)$$

t : 시간(s)

Δt : 운전자 n+1의 반응시간(s)

$V_{n+1}(t)$  : 시간 t에서 운전자 n+1의 속도(m/s)

$V_n(t)$  : 시간 t에서 운전자 n의 속도(m/s)

$V_n(t) - V_{n+1}(t)$  : 시간 t에서의 상대속도(m/s)

$X_n(t) - X_{n+1}(t)$  : 시간 t에서의 헤드웨이(m)

$\epsilon_{n+1}(t)$  :  $N(0, 0.9162^2)$

- 감속상황 : 모형 I을 이용함.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = 0.9128 \frac{V_{n+1}(t)^{0.6540}}{(X_n(t) - X_{n+1}(t))^{0.4864}} \times (V_n(t) - V_{n+1}(t))^{0.3095} + \epsilon_{n+1}(t)$$

t : 시간(s)

Δt : 운전자 n+1의 반응시간(s)

$V_{n+1}(t)$  : 시간 t에서 운전자 n+1의 속도(m/s)

$V_n(t)$  : 시간 t에서 운전자 n의 속도(m/s)

$V_n(t) - V_{n+1}(t)$  : 시간 t에서의 상대속도(m/s)

$X_n(t) - X_{n+1}(t)$  : 시간 t에서의 헤드웨이(m)

$\epsilon_{n+1}(t)$  :  $N(0, 1.1235^2)$

- 출발상황 : 모형 I의 가속상황모형을 통해서 가속도를 계산하되 선행차량과의 헤드웨이가 6초 이상이면 가속제약식과 조합하여 후행차량의 가속도를 계산.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = \max(\text{가속상황 모형II, 최대가속도})$$

- 정지상황 : 모형 I의 감속상황모형을 통해서 감속도를 계산하되 선행차량과의 헤드웨이가 0.5초 이하이면 가속제약식과 조합하여 후행차량의 가속도를 계산.

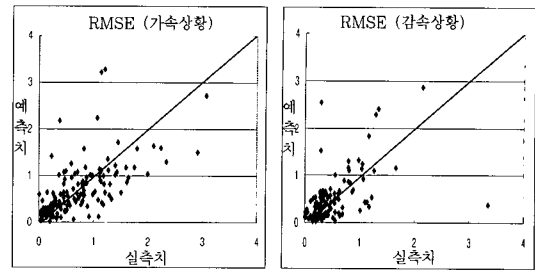
$$a_{n+1}(t+\Delta t) = \min(\text{감속상황 모형 I, 최대가속도})$$

## 2. 실측자료를 이용한 모형의 적용

본절에서는 모의실험결과 제안된 차량추종모형을 이용하여 실측치와 예측치의 궤적을 비교하였다. 본절에서는 가속상황에는 모형Ⅱ를, 감속상황에서는 모형Ⅰ을 각각 적용하여 차량추종 결과를 예측하였다.

〈그림 15, 16〉은 실측차량중 임의로 선두차량을 선정하고, 후행차량들을 제안된 차량추종모형을 통하여 진행시킨 후 후행차량들의 추정궤적(차량추종모형에 의하여 추정된 궤적)과 후행차량들의 실측궤적을 비교한 것이다. 분석결과 모형을 통해서 계산된 예측궤적(실선)은 현장조사를 통해서 얻은 실측궤적(점선)과 거의 일치하는 결과를 보이고 있다.

감가속상황에서의 현장조사치와 모형예측치 간의 상관관계는 RMSE(Root Mean Square Error)를 이용하여 분석하였다. 〈그림 17〉은 현장조사치와 모



〈그림 17〉 실측치와 모형추정치 간의 상관관계

형예측치 간의 상관관계를 나타낸 것이다. RMSE는 다음식에 의하여 계산되었다.

$$R.MSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum [X(t)_{\text{실측치}} - X(t)_{\text{모형추정치}}]^2}$$

여기에서,

t : 시간

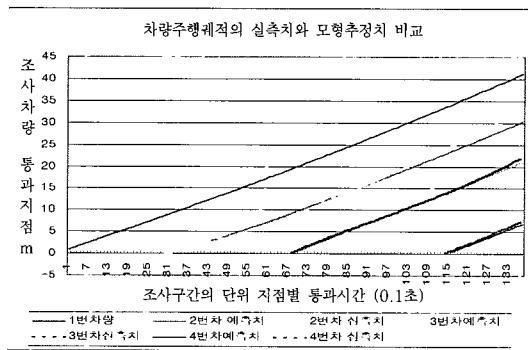
X(t) : 시간 t에서의 차량위치

분석결과, 추정된 모형의 예측궤적은 실측궤적과 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 또한, 가속상황과 감속상황에 대하여 실측치와 예측치 간의 RMSE는 0.059와 0.067로 각각 나타났다.

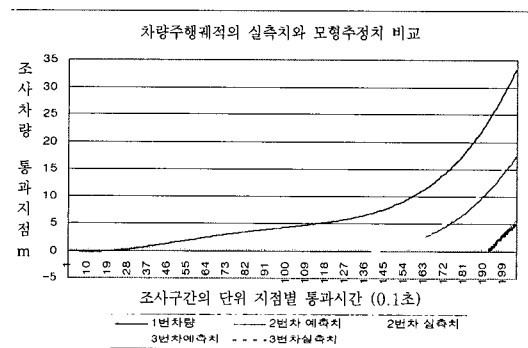
그러나 실측구간은 40m의 소구간으로서 선두차량의 주행시간은 불과 13초(〈그림 15〉)와 20초(〈그림 16〉)이며, 선행차량과 동일구간에서 관측된 후행차량도 각각 3대(〈그림 15〉)와 2대(〈그림 16〉)에 불과하다. 차량추종모형의 신뢰성을 계량적으로 분석하기 위해서는 적정 조사구간에서 후행차량이 여러대 존재하는 경우의 현장자료를 수집하여야 한다. 따라서 제안된 차량추종모형의 적정성을 현장자료에 의하여 계량적으로 분석하기 위해서는 적정구간의 선행차량과 후행차량의 개별차량 궤적자료를 상세하게 조사하여 모형의 적정성을 분석하는 연구가 추후 수행되어야 할 것이다.

## 3. 민감도 분석

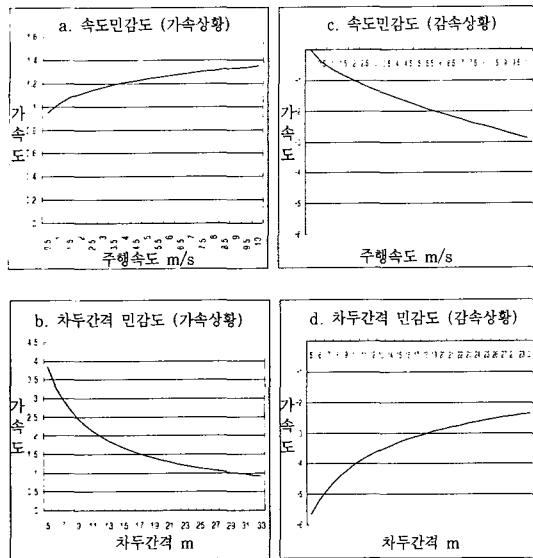
추정된 가속상황 및 감속상황 모형은 3개의 독립변수(속도, 헤드웨이, 상대속도)에 대한 함수이다. 이들 각 변인들이 종속변수인 가속도에 어떠한 관계가 있는지를 살피기 위하여 민감도 분석을 수행하였다.



〈그림 15〉 차량추종 실측궤적과 추정궤적과의 비교 분석 예시1 (선행차량 1, 후행차량 3대)



〈그림 16〉 차량추종 실측궤적과 추정궤적과의 비교분석 예시 2 (선행차량 1, 후행차량 2대)



〈그림 18〉 가감속상황 모형의 민감도 분석결과

속도, 헤드웨이와 상대속도의 각 변인은 상수로 취급될 경우에 10m/s, 20m, 그리고  $3\text{m/s}^2$ 으로 하였다. 추정모형의 민감도분석결과는 〈그림 18〉과 같다.

본 모형의 가속상황에서 가속도는 후행차량속도에 비례하며 헤드웨이에는 반비례하는 모습을 나타낸다. 즉, 속도 민감도 (a)의 경우 후행차량의 반응시간 이후 가속도(반응)는 주어진 상대속도와 차두간격을 유지하기 위해서 앞차가 고속주행 할수록 커지므로 주행속도에 민감하게 반응한다. 차두간격 민감도 (b)의 경우 후행차량의 반응시간 이후의 가속도는 상대속도와 후행차량 속도를 유지하기 위해서는 앞차와 뒤차의 간격이 멀수록 가속도는 작아진다. 즉, 헤드웨이가 커질수록 가속도는 감소하는 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 선행차량과 거리가 멀면 선행차량의 속도 변화에 크게 좌우되지 않는 현상을 적절히 설명되고 있다.

감속상황에서는 가속도는 후행차량의 속도가 클수록 감속도의 절대적 크기는 증가하고 차두간격이 멀수록 감속도의 절대적 크기는 감소한다. 즉, 속도 민감도 (c)의 경우, 주어진 상대속도와 차두간격을 유지하기 위해서는 선두차량이 속도를 줄이면 후행차량도 덜 민감하게 반응한다. 또한, 일반적으로 차량의 속도가 클수록 감속할 수 있는 능력은 증가한다. 차두간격 민감도 (d)의 경우도 같은 논리로 설명될 수

있다. 차두간격이 멀면 주어진 상대속도와 속도를 유지하기 위하여 선행차량의 가속도 변화에 덜 민감하게 반응하게 된다. 즉, 선행차량의 속도 변화에 크게 좌우되지 않는다.

따라서 민감도 분석결과 본연구에서 정립된모형은 일반적인 차량의 주행행태를 적절하게 반영하는 것으로 분석되었다.

## VI. 결론

### 1. 결론

본 연구는 미시적 시뮬레이션 모형에 직접 적용이 가능한 차량추종모형을 개발하였다. 또한, 운전자의 가속행태를 모형화하는 연구체계를 제시하였다.

개별 운전자의 행태는 운전자마다 상이한 특성을 보인다. 같은 상황과 조건하에서도 그 결과로 발생하는 반응은 제 각각이기 마련이다. 이러한 이유로 인하여 운전자의 가속행태를 정확히 반영하는 모형을 구성하기는 거의 불가능하다.

본 연구에서 제시하는 모형은 이 중 일부인 차량추종상황에서의 가감속행태이다. 또한, 미시적 실측 자료를 이용하여 개발한 가속상황과 감속상황의 차량추종모형을 이용하여 출발상황과 정지상황에 대한 모형을 구성하였다. 기존의 연구는 가감속상황에 동일한 모형을 적용하거나, 민감도와 자극 부문에 획일적인 요소를 적용하였다. 이에 반하여 본 연구에서는 차량추종상황을 가속상황과 감속상황, 그리고 출발상황과 정지상황으로 구분하였으며 민감도 부문의 후행차량의 속도를 반응시간 이전과 이후로 구분하고 자극 부문을 선형과 비선형 함수로 구분하여 모형을 추정하였다. 그 결과 자극, 즉 상대속도 부문이 선형일 때 모형의 예측치가 신뢰성이 있었다. 후행차량의 속도는 반응시간 이전과 이후의 경우가 모두 신뢰성이 있었다. 그러나, 반응시간 이후의 후행차량속도는 적용에 어려움이 있다. 제안된 모형을 통해서 가상적으로 차량을 진행시킨 결과, 비록 차두간격이 비현실적으로 좁아지는 경우가 있었지만 후행차량은 선두차량의 행태 변화에 적절히 반응하는 모습을 나타내었다. 또한, 실측자료와의 비교에서도 예측치는 실측치를 합리적으로 반영하였다.

## 2. 향후연구과제

첫째, 단위시간당 차량의 이산적 위치를 조사할 경우, 원시자료의 신뢰성이 증대될 수 있다. 둘째, 실측 자료를 구성할 때, 평균속도가 큰 경우에는 한 차량 당 관측되는 시간은 불과 2~3초 정도(33m 구간에서)에 불과하다. 따라서, 조사구역을 보다 넓게 잡아서 다양한 실측자료를 구성할 필요가 있다. 셋째, 간단한 시뮬레이터를 구성하여 추정된 모형을 보다 다양하게 검증할 필요가 있다. 넷째, 미시적 시뮬레이션 모형을 구성하는 또 다른 주요 모형인 차선변경 모형에 관한 연구가 요구된다. 마지막으로, 운전자의 개별적인 특성을 모형화 할 필요가 있다. 즉, 운전자 반응시간과 헤드웨이 분포에 대한 연구가 추가로 요구된다.

## 참고문헌

1. Qi yang, 1998, "A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems" Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT.
  2. R. F. Benekohal et al., 1988, "CARSIM: Car-following Model for Simulation of Traffic in Normal and Stop-and-Go Conditions", Transportation Research Record 1194.
  3. FHWA, 1989, "TRAF-NETSIM User's Manual". US DOT.
  4. 임평남 외, 1993, "교통신호제어 시스템 기술개발 (3차년도) 시뮬레이터 개발 보고서", 도로교통안전협회, 교통개발연구원.
  5. Kazi Iftekhar Ahmed, 1999, "Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior", Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT.
  6. M. Van Aerde, 1998, "INTEGRATION Release 2.10 for WINDOWS: User's Guide-Volume I: Fundamental Model Features".
- ♣ 주 작성자 : 이영인  
 ♣ 논문투고일 : 2000. 2. 28  
 논문심사일 : 2000. 3. 31 (1차)  
 2000. 11. 1 (2차)  
 2000. 11. 22 (3차)  
 심사판정일 : 2000. 11. 22