

■ 論 文 ■

# 고속도로 교통류의 차량군집현상에 관한 연구 (차량군집화 발생모형)

A Study on Vehicle Platoon Formation on Freeways  
(Platoon Generation Model)

이 준

(중앙대학교 도시공학과 석사과정)

정 진 혁

(중앙대학교 도시공학과 부교수)

## 목 차

- |                    |                |
|--------------------|----------------|
| I. 서론              | 1. 자료의 수집      |
| II. 관련 문헌 고찰       | 2. 자료의 분석      |
| III. 차량군 생성을 위한 모형 | V. 시뮬레이션 결과분석  |
| 1. 모형의 가정          | 1. 시뮬레이션 결과    |
| 2. 임의효과            | 2. 검지기 데이터와 비교 |
| 3. 시뮬레이션 과정        | VI. 결론         |
| 4. 시뮬레이션의 제약조건     | 참고문헌           |
| IV. 검지기데이터 구축      |                |

Key Words : 차량군집, 임의효과, 선행차량, 추종차량, 연속교통류, 고속도로

Platoon, Random Effect, Leading Vehicle, Following Vehicle, Uninterrupted Traffic Flow, Freeway

## 요 약

본 연구에서는 고속도로와 같은 연속 교통류에서의 군집화 현상을 연구함으로써 보다 현실적인 고속도로의 교통류를 반영할 수 있는 방법론을 제시하고 있다. 이와 같은 연구를 통하여 안전성과 신뢰성을 확보하는 고속도로에서의 시스템 구축을 할 수 있을 것이다. 본 연구는 차량들의 '임의효과'에 의하여 차량군집을 발생되는 과정을 모형화하였으며, 본 모형의 검증은 경기도 지역의 '자유로' 지점데이터를 이용하였다.

This study developed a methodology that can reflect more realistic traffic flow to understand platoons on highways. The understanding of the phenomenon may secure highway safety and authoritative credibility in highway planning. In this study, platoons generated by 'random effects' of cars were modeled, and this model is validated using a real data set acquired from the Jayu Expressway in Kyonggi Province, Korea.

## I. 서론

고속도로를 운행하는 운전자는 도로 상황의 커다란 변화가 있지 않아도 때때로 차량들의 일부가 군집하여 이동하는 현상을 경험 할 수 있다. 도로의 여건이 변화하거나 특별한 IC가 존재하지 않아도 차량들이 어느 순간 수 개에서 수 십대의 차량들의 군집이동을 관찰할 수 있으며, 이런 차량들의 군집은 군집 내에서는 비교적 좁은 간격(높은 밀도)을 유지하고 운행하지만 군집들 간에는 넓은 간격(낮은 밀도)상태를 유지하고 있다. 이런 차량의 군집현상은 대부분의 교통류 속에서 언제든지 관측될 수 있고, 생성과 소멸이 가능하다. 하지만 기존의 연구들은 단속교통류의 단속(신호 외)에 의한 군집화 현상들의 연구중심으로 이루어지고 있으며, 연속교통류 속에서의 군집화현상에 대한 연구는 많은 연구가 되어있지 않은 실정이다.

연속 교통류의 차량에 대한 제어와 통제를 하기 위해서는 실제 차량들의 행태를 이해하고 이를 반영할 수 있는 시스템을 구축하고, 기 구축 및 연구된 교통류에 대한 이론들의 종합적인 적용이 필요하다. 연속교통류에서 반영되지 못하였던 차량의 군집화 과정은 차량들의 평균적 특성의 결과로서 생성되는 것이 아니라, 개별차량들의 특성들이 상호작용하며 만들어진 여러 가지의 특성 중 하나의 현상이라 생각된다. 그러므로 연속 교통류의 차량에 대한 제어와 통제를 하기 위해서는 실제 차량들의 행태를 이해하고 이를 반영할 수 있는 시스템을 구축하고, 기 구축 및 연구된 교통류에 대한 이론들의 종합적인 적용이 필요하며, 시스템 제어를 위한 다양한 방법을 이용한 제어를 해야 할 것이다.

본 연구는 군집화 현상의 발생에 대한 연구이며, 운전자의 운행속도에 영향을 줄 수 있는 모든 요인(도로환경, 차선변경, 차량의 입/출입 등)을 통제하고 운전자 개인이 가지고 있는 운전자 조작에서 발생하는 임의효과로 군집화 현상이 발생 되어지는 과정을 설명할 수 있는 모델을 제시 하고 있다. 이 모델의 평가는 자유로 검지기 데이터와 비교 분석하였으며, 분석가의 임의적인 판단 요소를 모델에 적용하여 교통류 현상을 설명하였다.

## II. 관련 문헌 고찰

차량군에 대한 연구는 단속류와 연속류의 경우로 크

게 나누어지며, 단속류의 경우 교통류의 효율적 관리를 위한 다양한 연구가 이루어져 있지만(윤 판, 2000), 연속류의 경우는 활발하지 못한 실정이다.

연속교통류의 차량 군집화현상에 대한 연구를 위해서는 우선 차량의 차두간격에 대한 연구들을 통하여 차량군에 대한 명확한 기준을 필요로 한다. 연속교통류 에서의 차량 군집화의 연구로 김태완(2004)의 연구에서는 속도-차두간격의 관계를 이용하여 다른 형태의 교통기본도가 나타나는 운전자의 행태연구를 하였다. 여기서 운전자의 주 관심사는 앞 차량과 충돌을 피하는 것이고 안전한 운행을 위하여 적당한 거리를 유지하는 것이 필요하다고 밝히고 있으며, 대체적으로 조사된 차량군의 차두간격은 1.7~2.94(sec) 사이의 값을 갖는다고 보고 있다. 또한 차두간격의 평균값이 크면 표준편차의 값도 크고, 평균값이 작으면 표준편차의 값도 작아지는 것으로 나타나고 있다. 이 연구를 통하여 충돌을 피하기 위한 운전자의 평균적 시간거리는 60(km/h)의 경우 약 30(m)에서 50(m)사이의 거리로 분석되었다.

연속교통류의 차량군집 현상을 반영한 이수일(2006)의 연구에서는 차량 추종상태에 대한 판정기준을 차간거리를 6초 이하로 판단하고 있으며, 그 안에서 하나는 차두간격이 0.8(sec) 이하인 집단으로 Close-Following Drivers라 하였고, 나머지는 하나는 차두간격이 2~5(sec) 사이로 Control Drivers로 구분하였다. 그리고 국도 지점의 검지기 자료를 통하여 누적속도 평균을 이용하여 차두간격으로 개별차량과 차량군을 구분하였으며, 분류기준을 차두간격 6초로 나타내고 있다. 특히 전체 차량집단과 개별차량의 차두간격, 속도, 속도편차, 차간거리가 정규분포를 따르고 있음을 통계적 검증을 통하여 보여주었다.

선행차량과 추종차량을 분리하고 안전성과 함께 차량간 영향정도를 반영하여 분석한 최재성(1999)은 Normann의 선행차량과의 속도차에 의한 방법을 이용하여 Normann이 제시한 차두간격이 9~10(sec) 일 때 주행차량이 선행 차량에 의해 영향을 받지 않음을 확인하였다. 또한 하태준(2003)은 차두간격이 1(sec) 이하인 차량부터 제거하면서 차두간격이 큰쪽의 평균을 산출하여 작은 쪽 차두간격의 영향을 분석하였다. 차두간격 5에 해당하는 속도는 5(sec) 이하를 제거한 평균 속도이고 차두간격 10에 해당하는 속도는 10(sec) 이하를 제거한 평균속도이다. 그 결과 차두간격 6(sec) 이하를 차두간격 영향권으로 보고 있다.

안전성을 중심으로 차량간의 시간거리로 분류한 Vogel (2002)의 연구에서도 개별차량과 차량군 집단의 분류기준을 차두간격 6(sec) 이상으로 잡았다. 앞 차량이 급정거를 할 경우에도 뒤따라오는 차량은 위험에게 정지하지 않아도 되는 시간거리를 6(sec) 이상으로 보았다. 안정성과, 양항정도에 의하여 차량간의 시간거리를 분류한 연구들을 통하여, 차량들의 평균속도가 60(km/h)인 경우 추종차량의 경우 30(m)~50(m)의 차간거리를 유지하며 이동하는 차량이 많이 있으며, 안전성을 위하여 차량은 100(m)이상의 차간거리를 유지하고 있고, 약 170(m)이상이 되면 후방차량은 전방차량으로부터 영향을 받지 않는 것으로 연구되었다.

본 연구에서는 차량군의 발생단계를 설명하는 모형 개발을 목적으로 하고 있으므로, 기존에 연구되어있는 차량군의 거리간격을 수용하여 차량군을 정의하도록 한다. 김태완(2004)의 연구를 통하여 속도에 따라서 차두간격의 분산이 커지고 있는 것을 확인할 수 있었지만, 특정속도의 연속교통류의 실제상황과 같은 조건에서의 시뮬레이션 상황을 비교할 것이므로, 속도에 따른 분산의 영향은 고려하지 않았다. 그리고 사전연구의 연구결과를 살펴보면 6초의 차두간격을 기준으로 차량간에 영향을 받는 차량과, 영향을 받지 않는 차량으로 나누고 있으므로 본 연구에서 모형의 차량군의 분류기준을 잠정적으로 차두거리 6초를 기준으로 나누도록 한다.

또한 추종모형은 교통류 모형 중에서 미시적 모형에 속하며 차량의 행태를 중심으로 개발한 모형이다(Denos C. Gazis, 1974). 차량간의 상호 상충 현상이 있는 교통류에서 차량과 운전자의 행태를 수학적으로 표현한 이론이다. 이 이론에서 개발된 모형은 새로운 교통안전시설의 설치나 계획에 필요한 차량과 운전자의 행태분석에

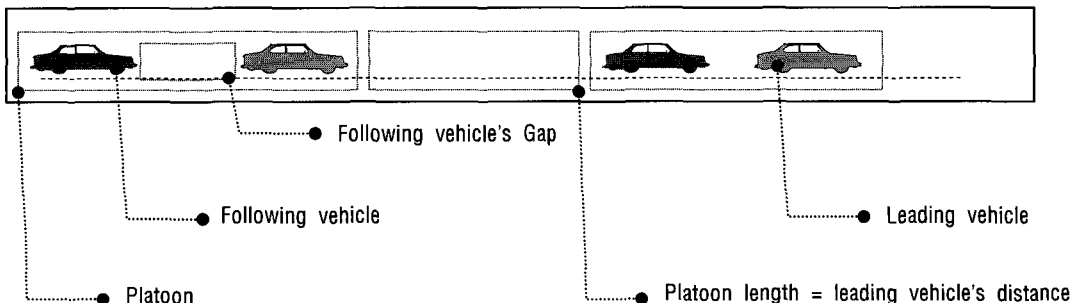
이용되고 있다(Brackstone, 1999, Ranney, 1999). 추종 이론을 이용하여 차량군 생성모형에서는 전방차량과 후방차량간의 안전성을 고려한 최소간격을 이용하여, 개별차량의 위치를 결정하고, 이런 개별차량들이 전체 교통류에 미치는 영향과 형태를 관찰하였다. 앞차와의 시간거리, 반응시간, 회망속도(Lee and Kim, 2002) 등의 관계를 이용하여 군집현상을 연구한 사례가 있다.

### III. 차량군 생성을 위한 모형

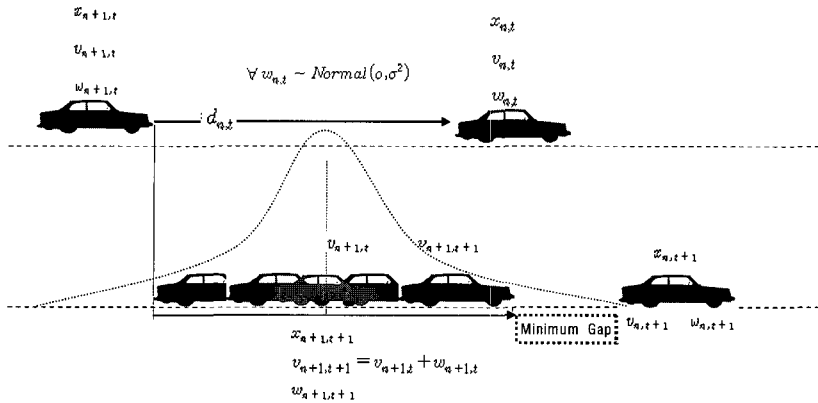
#### 1. 모형의 가정

차량군은 차량들의 종적 행렬 속에 존재하며, 수대에서 수 십대의 차량들이 군을 이루며 이동하는 것을 의미한다. 그러므로 <그림 1>과 같이 차량군은 현대의 선행 차량과 이를 따르는 다수의 추종차량들로 정의 된다. 차량의 선두차량과 전방 차량군의 마지막 차량간의 거리를 차량군간의 거리로 정의하며 차량군집의 구성차량들 간의 차간거리를 추종차량들간의 간격으로 정의한다. 차량군의 결정요인은 시간거리를 기준으로 선두차량으로부터 영향을 받는 시간거리내의 차량을 추종차량, 영향을 받지 않고 이동하는 차량을 선두차량으로 정의한다.

차량군 생성모형은 <그림 2>와 같이 차량들이 최고 속도와 평균 속도를 시작으로 운행되며, 차량들의 최소간격을 설정하여 임의효과 만큼의 속도변화가 생기며 운행된다. 운전자 모두가 평균 속도를 기준으로 운행 되어지며 시간별 위치에서 지속적으로 앞차와의 최소간격 이상을 유지하도록 움직이는 교통류이론을 따르도록 하였다. 차선은 일 방향 단일 차선이며, 도로의 모든 상황은



<그림 1> 차량군의 모형과 용어정리



(그림 2) 추종이론을 따르는 차량군 생성 개념도

최고속도를 유지하거나 가속하는데 무리가 없고, 곡선부나 합류부가 없는 무한한 직선로를 가정하였다.  $v_{n,t}$ 는 n차량의 시점 t에서의 속도이며, n차량이 시점 t에서의 임의효과는  $w_{n,t}$ 로 표현하며, n차량의 시점 t에서 위치는  $x_{n,t}$ 로 하며, 최소간격과의 관계식과, 최대속도, 최저속도와의 관계식을 가지게 된다. 이 조건을 만족하는 차량속도의 변화는 단지 운전자의 평균속도에 작은 임의효과와의 발생에 기인한다고 가정하였다. 즉, 이상적인 상황속에서 단지 운전자 개인의 임의효과의 영향에 의하여 교통류의 변화를 가져오며, 이 변화가 군집화현상으로 진행된다. 본 연구에서 정의되는 군집은 선두 차량이 앞차의 영향을 받지 않고 운행하는 차량으로 가정하며 평균속도가 60(km/h)의 구간에서 100m이상의 거리를 유지하는 경우 군집화의 선두 차량으로 인정하였다 (Vogel, 2001 외)<sup>1)</sup>. 군집 차량의 개수는 제한하지 않았으며 최소 1대의 독립적 차량운행도 1개의 군집 집단으로 간주한다.

2. 임의효과

본 모형에서 군집화를 일으키는 가장 중요한 요소는 운전자의 임의효과이다. 임의효과란 운전자가 운전 중에 가질 수 있는 모든 요인의 묶음으로서 평균속도를 일정하게 유지하지 못하고 약간의 가속과 감속을 반복하는 만큼 발생되어지는 속도의 임의적 변화량을 말한다. 차

량의 일정하지 못한 감가속력, 운전자의 속도를 유지하지 못하는 오차량, 운전자개인의 심리적 변화 등, 개별 차량속에서 일어날 수 있는 속도변화 가능한 모든 요소를 포함하고 있는 이 변수는 속도로 표현된다. 결국 개별 차량이 가지는 평균속도로 부터의 가속과 감속의 속도변화량을 표현한 확률변수이며 평균이 0이며, 분산이  $\sigma^2$ 인 정규분포로( $w \sim Normal(0, \sigma^2)$ ) 가정한다(이수일, 2006).

(그림 2)와 같이 자동차가 시점 t에서 시점 t+1 동안 이동한 거리는  $x_{n,t+1} - x_{n,t}$ 이 되며 n차량의 위치  $x_{n,t+1}$ 는 t시간에 발생한  $w_{n,t}$ (임의효과)와 t 시간의 속도  $v_{n,t}$ 와 합산되어진 속도  $v_{n,t+1}$ 와 시간의 곱으로 결정되게 된다. 그러므로 시점 t에서 가지던 속도에 임의효과만큼의 속도가 가감되어 시점 t+1의 속도가 되고 이를 통하여 차량의 위치가 결정되게 되는 것이다. 이때 최소간격을 유지하며, 속도는 비음조건으로 최소속도는 0이다. 결국 차량은 최소 현재위치를 유지하거나 최대 전방차량의 최소간격을 유지하는 위치까지 이동할 수 있는 것이다.

3. 시뮬레이션 과정

차량은 첫 번째 차량부터 연속된 차량으로 구성되어 있으며, 특히 임의의 차량을 n차량, 다음 차량을 n+1차량으로 놓는다. 이때 초기 평균속도를  $\zeta$ 이라 하면, 각 차

1) Vogel(2001)은 두 차량 간의 선형독립적인 차량을 시간거리(6sec)를 기준으로 분류하였다. 또한 국내연구에서도 이수일(2006), 하태준(2003)은 전방차량에 영향을 시간거리(6sec)로 판단하고 있다. 본 연구에서도 평균속도 60km/h인 경우 차량간의 거리가 100m 일때 두 차량을 분리하며 전방차량을 추종차량로 후방차량을 선두차량으로 정의하며 두 차량간의 거리를 군집거리로 가정하였다.

량의 시간 t에서 속도는  $v_{n,t}$ 이며, 이때 발생하는 임의효과과는  $\omega_{n,t}$ 이다. 초기의 속도는  $\xi$  이지만 시간이 경과됨에 따라 속도에  $\omega$  만큼의 속도 변화가 누적되게 되며 결국 차량의 속도  $v$ 에 변화를 부여하여 최종위치  $x_{n,t}$ 를 산정하게 된다. 차량 n의 시점  $t=i$ 에서 시점  $t=i+1$ 까지 변화한 시간을  $\delta T$ 이라 하면 최초시점 1부터 최종시점 t까지의 위치  $x_{n,t}$ 는 식(1)과 같은 연산과정을 거치게 된다.

$$\begin{aligned}
 T_t: x_{n,t} &= x_{n,t-1} + v_{n,t} \delta T \\
 &= x_{n,0} + (\xi + \omega_{n,0}) \delta T \\
 &\quad + \{ \xi_n + (\omega_{n,0} + \omega_{n,1}) \} \delta T + \dots \\
 &\quad + \left\{ \xi_n + (\omega_{n,0} + \omega_{n,1} + \dots + \omega_{n,t-2} + \omega_{n,t-1}) \right\} \delta T \\
 &= x_{n,0} + \sum_{j=1}^t \left[ \left( \xi_n + \sum_{i=0}^{j-1} \omega_{n,i} \right) \delta T \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

그러므로 t시점에서의 차량의 위치와 속도는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{n,t} = x_{n,0} + \sum_{j=1}^t \left[ \left( \xi_n + \sum_{i=0}^{j-1} \omega_{n,i} \right) \delta T \right] \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 v_{n,t} &= v_{n,t-1} + \omega_{n,t-1} \\
 &= \xi_n + \sum_{k=1}^{t-1} \omega_{n,k}
 \end{aligned}$$

단,  $\xi_n$ 는 평균속도

연속되는 두 차량 간의 거리( $d_{n,t}$ )를 나타내는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 d_{n,t} &= x_{n,t} - x_{n+1,t} \\
 &= (x_{n,0} - x_{n+1,0}) + \\
 &\quad \sum_{j=1}^t \left\{ (\xi_n - \xi_{n+1}) \delta T + \sum_{i=0}^{j-1} (\omega_{n,i} - \omega_{n+1,i}) \delta T \right\} \\
 \forall v_{n,t} &\leq \text{Maximum Speed} \\
 \forall v_{n,t} &\geq 0 \\
 \omega_{n,t} &\sim \text{Normal}(0, \sigma^2)
 \end{aligned} \tag{3}$$

그러므로 차량은 각 단위시간마다 최소간격과 속도의

비음조건, 그리고 임의효과와 발생을 하며 위치를 이동하게 된다.

#### 4. 시뮬레이션의 제약조건

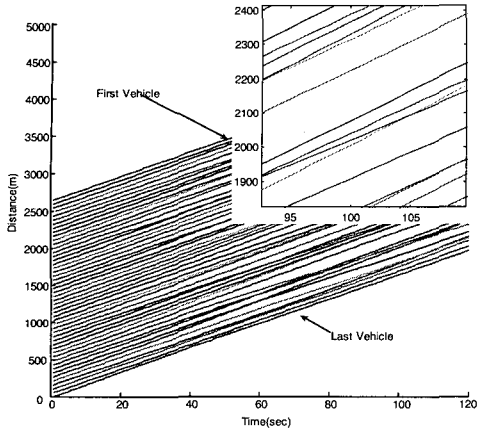
모형의 제약조건인 식(4)에서 최소간격을 유지하지 못하는 제약의 조건에서는 임의효과와 속도를 제한하게 된다. 차량간의 거리가 식(4)과 같은 경우는 속도 ( $v_{n+1,t}$ )와 속도의 임의효과( $\omega_{n+1,t}$ )를 제한하여 최소거리를 다음 조건으로 유지하도록 한다.

$$\begin{aligned}
 \text{IF } d_{n,t} &\leq MG \\
 \text{THEN } &\left\{ \begin{aligned} \omega_{n+1,t} &= 0 \\ v_{n+1,t} &= \{ (x_{n,t} - MG) - x_{n+1,t-1} \} / \delta T \\ x_{n+1,t} &= x_{n,t} - MG \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \tag{4}$$

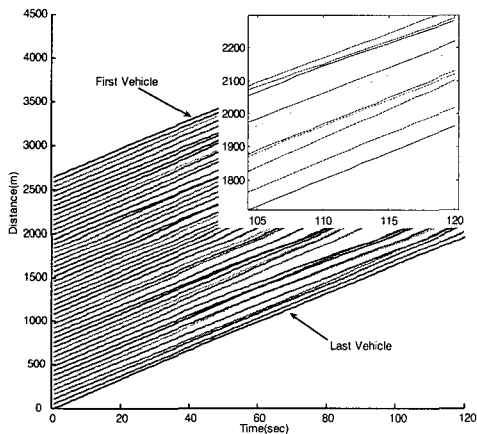
시뮬레이션을 통한 차량의 이동은 식(4)의 제약조건을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어 모형의 시공도를 살펴보았다. 제약조건을 적용한 경우는 차량들이 최소간격을 유지하지 않는 경우 차량의 임의오차를 0으로 하고 차량의 속도는 최소간격 이상으로 전진할 수 없는 속도로 제한하게 되는 것이다.

첫 번째, 임의오차를 강제로 0으로 만든 것은 차량이 사고의 직접적인 위협을 느끼기 때문에 운전자는 속도를 줄이는데 집중하게 되고, 집중 상태에서 운전자가 다음 행동을 하기 때문에 이때 발생하는 임의적인 요소는 배제된 것이다. 두 번째, 차량의 속도를 최소간격으로 만든 것은 속도를 내고 싶은 운전자가 전방차량을 추월하지 못하고 추종하면서 최소 안전거리까지는 최대한 접근하게 되는 상황을 반영한 것이다. 이와 반대로 제약조건이 없는 경우는 식(2)에서 제시된 차량의 이동방법을 따라 차량이 이동하며, 이때 전방차량과 관계없이 후방차량은 어떤 위치라도 이동할 수 있는 것으로 시뮬레이션 하게 된다.

식(4)는 최소거리를 유지하는 시뮬레이션으로 <그림 3>이 된다. 확대된 그림에서 각 차량들은 자유로운 속도를 가질 수 있었지만 선행 차량의 있는 경우 최소간격이상 전진하지 못하고 있다. 식(4)의 제약조건을 적용하지 않은 경우에는 식(4)의 최소거리를 유지하지 않는 시뮬레이션으로 <그림 4>와 같이 확대된 그림에서 각 차량들은 제약 없이 각자의 속도를 유지하며 진행하게 되며 차



〈그림 3〉 제약조건을 적용한 시공도: 차간 거리유지 때문에 속도 영향 받음



〈그림 4〉 제약조건이 없는 시공도: 차량이 원하는 만큼 속도 조절가능

량들이 겹치는 모습이 관측되고 있다. 이것은 속도를 높이고 싶은 차량들이 선행차량을 만났을 때 선행차량을 추월을 한 경우라고 생각할 수 있다.

본 연구에서는 최소거리를 유지하는 제약 조건(식 (4))을 가지고 있는 모형을 사용한다. 선행차량의 속도가 추종차량들의 속도에 영향을 미치게 되며, 최소 간격 이상으로 이동할 수 있는 속도를 낼 수 없다. 추종차량들은 최소 거리를 내에서 선행차량의 속도를 최대 속도가 되도록 운행하게 된다. 만약 임의의 속도가 선행차량을 추월하거나 최소 간격을 유지하지 못하게 될 경우는 추종차량은 임의효과가 없어지고 속도는 간격을 유지할 수 있는 속도로 강제로 감속 시킨다 .

## IV. 검지기 데이터 구축

### 1. 자료의 수집

차량군 생성모형에서는 현실상황을 설명하는 초기 값과, 특정 시점의 교통류의 모습을 가장 잘 설명할 수 있는 초기 값, 그리고 모형의 평가를 위하여 관측구간의 실제 값을 사용한다. 즉, 현재 교통류의 상황의 일부가 시뮬레이션의 초기 값 중 일부로 사용되며, 모형의 평가에도 이용된다. 그러므로 다음과 같은 실제 도로상의 검지기 자료를 수집하고 분석하였다.

본 모형에서 사용되고 있는 초기 값은 차량들의 초기 평균 차간거리, 차량들의 개수, 시뮬레이션 시간간격, 차량들의 최소간격, 차량들의 평균 속도, 차량들의 최저 속도, 임의오차, 총 시간, 군집판독을 위한 군집의 거리가 있으며, 이들 중 초기평균속도, 초기평균거리, 평균 차간거리를 실측자료로부터 정산하여 사용하게 된다. 그리고 나머지 초기 값은 수회 반복을 통하여 가장 현실상황 반영에 적합한 초기 값을 이용한다.

본 연구에서 데이터 수집을 위한 대상지역은 행주 인터체인지에서 이산포 인터체인지 구간으로서 길이는 10.7(km)이고 차로는 왕복 6차선으로 이루어져 있는 구간이다. 데이터는 2006년 4월 1일 자유로상의 루프검지기에서 24시간 검지되어진 자료로서 이재명(2006)이 사용한 자료와 동일하다.

루프검지기는 각각의 차로(왕복 1~10차로)에 설치되어 있으며 주로 통행 정보를 수집하였다. 시간은 12시부터 14시까지의 3시간 동안의 데이터를 이용하여 기초 분석을 하였으며 이중 가장 안정적인 속도 분포를 가지고 있는 13시 30분부터 14시 30분의 자료를 이용하였다. 이와 같은 시간설정은 12시부터 14시까지의 데이터 분석결과 가장 안정적인 속도유지가 되고 있는 시점이기 때문이며, 차량의 자유로운 흐름 상태에서 차량들 간의 속도 및 거리를 분석하는 것이 목적이 되기 때문이다.

이와 같은 대상지를 분석한 동일한 날짜와 시간대의 3차로 연구에서는 차량검지기 데이터로부터 차량속도, 차두간격, 속도차이, 앞차와의 거리, 차량길이를 분석하였다. 차량간의 평균 차두간격은 최대 21(sec)에서 최소 0.08(sec)인 것으로 나타났으며, 앞차와 거리는 평균 54(m)인 것으로 나타났다.

## 2. 자료의 분석

〈표 1〉 자유로 검지기(#1053) 분석 결과

	차량대수	평균	분산
차량속도(m)	1200(대)	16.18	3.51
속도차이(m/s)		6.33	4.36
앞차거리(m)		54.40	42.99

차량군 발생모형의 초기 값을 산정하기 위하여, 검지대 상 구간의 13시 30분부터 14시 30분까지 1시간동안의 3 차로에서 검지된 차량을 분석 대상으로 하였으며, 분석 대상 차량 중에서 속도가 200(km/h)이상으로 이상치 값을 보이는 56(대)를 제외한 1200(대)를 최종 분석대상 차량으로 결정하였다. 분석대상 차량들의 평균통행속도는 약 16.18(m/sec), 분산은 3.51(m/sec)로 나타났으며, 앞차와의 거리는 54.40(m), 분산은 42.99(m)로 나타났다.

본 자료에서 평균 속도가 약 60(km/h)로 80(km/h)의 법정최고속도보다 낮은 것으로 나타났다.

## V. 시뮬레이션 결과 분석

### 1. 시뮬레이션 결과

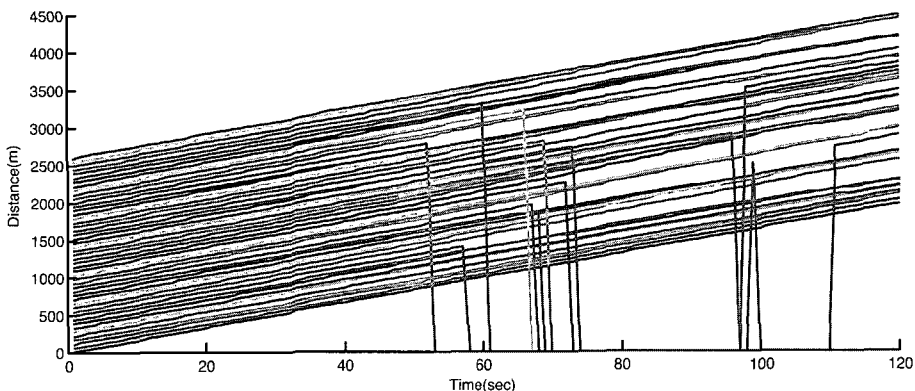
검지기 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 모형의 초기 파라메타는 자유로 검지기의 분석 자료를

일부 이용한다.

- (1) 차간거리 : 54.40 meter
- (2) 차량의 개수 : 50 vehicle
- (3) 시뮬레이션 시간간격 : 1 sec
- (4) 차량들의 최소거리 : 6.00 m
- (5) 차량들의 평균속도 : 16.18 m/sec
- (6) 차량들의 최저속도 : 0.00 m/sec
- (7) 임의효과  $\sim N(0, \sigma^2)$  단,  $\sigma^2=0.1$
- (8) 시뮬레이션 시간 : 120 sec
- (9) 군집거리 : 100.00 meter

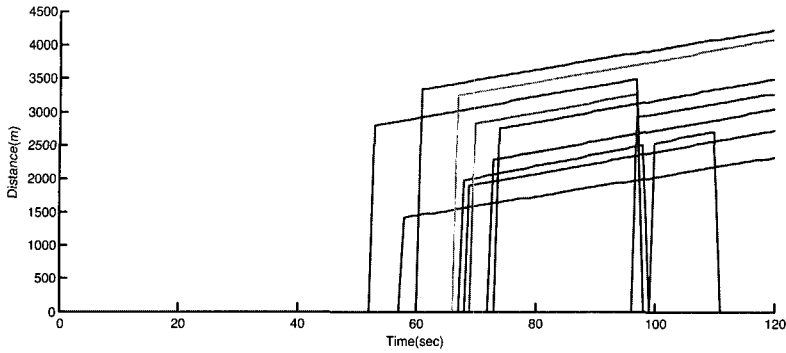
(1), (5)는 검지기 자료로부터 얻은 평균 차량속도와 평균차량거리를 사용하였으며, 초기조건이다. (2), (3), (5), (6), (7), (8), (9)는 다양한 파라메타의 적용을 통하여 각각의 영향정도를 분석하여 각각의 성질<sup>2)</sup>을 이용하여 현실 묘사력<sup>3)</sup>이 높은 값을 사용하였다.

시뮬레이션 된 50대 차량의 시공도(그림 5)에서 군집 선두차량이 되어지는 차량들의 시공도(그림 6)에서 추 출하였다. 최초에는 균일한 거리에서 출발한 차량들이지만 약간의 속도 감/가속(임의효과 만큼의 변동)을 거치 며 일부는 앞차와의 거리가 멀어지고 일부는 앞차와 거 리를 줄여가면서 군집으로 나누어진다. 군집차량의 선두 차량 발생은 50초 이후에 발생하기 시작하였다. 일부 차 량들은 추종차량에서 선두차량으로, 다시 선두차량에서

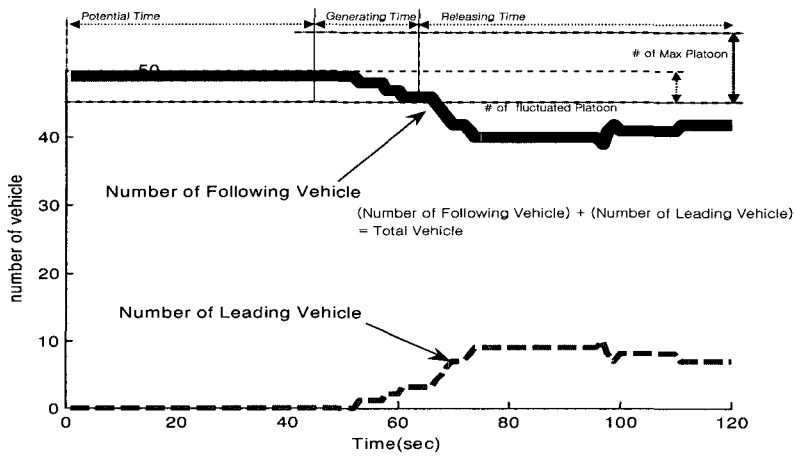


〈그림 5〉 시뮬레이션 군집화의 추종차량의 시공도

2), 3) 최소 차간거리는 도로상의 밀도와 교통량을 제어하는 파라메타이며, 시뮬레이션 시간간격은 군집화 시작 시기를 제어할 수 있고, 차량들의 최소거리는 추종차량들의 종적 최소 거리를 제어한다. 초기속도는 차량들의 차량 평균속도 제어 값이며, 임의효과는 군집화 현상의 생성시기와 생성 개수, 군집화 지속시간을 조절할 수 있는 파라메타이다.



〈그림 6〉 시뮬레이션 군집화 선두차량의 시공도

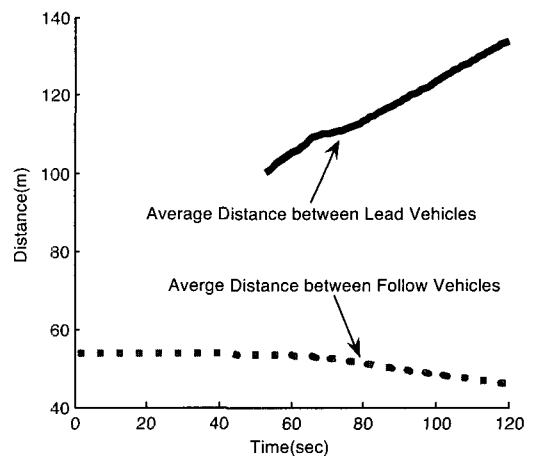


〈그림 7〉 군집화에 따른 추종차량과 선두차량의 수

추종차량으로 변하는 것을 알 수 있었다. 차량군의 생성과 소멸이 반복적으로 일어나는 것은 본 논문의 가정에서 제시한 부분으로 현실적인 결과라 할 수 있다.

〈그림 7〉에서 초기에 차량들은 평균거리를 가지고 있으므로 모두가 100(m) 미만의 거리이다. 50대 전체를 추종차량 군집화 차량으로 놓고 시뮬레이션을 시작한다. 이후에 선두차량의 개수는 50초에서 70초 사이에 10개로 늘어나며 이후에는 약간의 변동 폭을 가지게 된다. 이는 군집이 일정시간동안 발생 후 소수의 군집들이 생성 소멸을 반복하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 파라메타에서  $\sigma^2$  값의 크기가 커지면 더욱 큰 폭으로 군집의 개수가 변하게 되며, 약간의 변동 폭을 가지는 군집의 개수에도 영향을 준다. 이때 차량 평균거리가 변하여 차량군집이 될 때까지의 시간을 잠재시간, 군집이 발생하는 시간을 발생시간, 변동을 가지고 군집의 개수가 자유롭게 유지되거나 변하는 시간을 해소시간으로 구분한다.

〈그림 8〉는 시간대별 차량들의 평균 거리의 변화를



〈그림 8〉 시간대별 선두차량의 평균 차간거리와 추종차량의 평균 차간거리

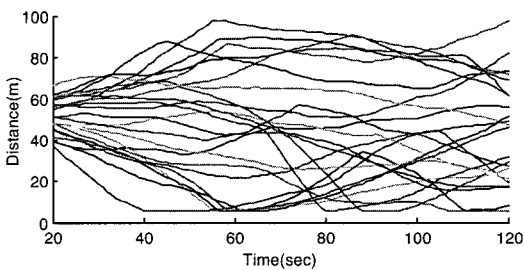
나타낸 것으로 최초 54(m)로 차량 거리를 유지해오던 차량들이 군집화 현상이 발생하면서 군집화 선두차량과



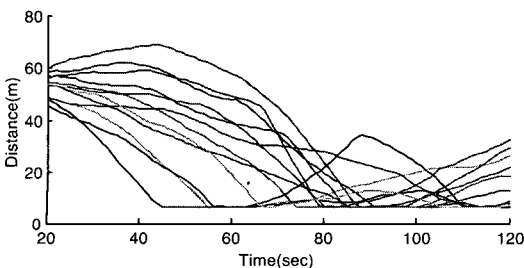
추종차량간의 평균거리에 변화가 생기게 된다. 군집화 선두차량과 군집화 마지막 차량 간의 평균 거리는 100(m)에서 계속 증가하며, 군집화 추종차량들 간의 평균 거리는 군집화 발생이후 감소하게 된다. 다시 말하면 군집화의 발생으로 군집화 선두차량은 전방의 차량군집의 마지막 차량과 평균거리가 증가하게 되고, 추종차량들은 각각의 전방차량을 따르면서 간격을 줄여가고 있음을 알 수 있다. 이것은 추종차량들은 최소간격이 될 때까지 자유로운 속도로 운행되어지다가 최소간격을 넘지 못하는 제약조건 때문에 평균 속도가 줄어들게 되는 것이다. 최소간격상태의 추종차량들은 전방차량의 속도이상 낼 수 없으며, 전방차량의 속도 이하로만 자유롭게 속도 조절을 할 수 있다. 차선변경이 없는 경우 선두차량 이상의 속도를 가질 수 없는 현실적인 상황이다.

〈그림 9〉은 추종차량들의 시간별 앞차와의 거리로서 초기속도에서 출발하여 최대 100(m)부터 최소간격 10(m)까지의 분포를 나타내고 있다. 추종차량들의 전방차량과의 거리분포는 임의적으로 변하고 있었으며 일부 차량들이 10(m)의 차간거리 도달 후 다시 거리를 넓히는 것은 10(m)이하로 거리를 줄일 때는 강제적으로 속도를 전방차량에 맞추지만 10(m) 이상으로 거리를 늘리는 것은 자유롭게 때문이다.

〈그림 10〉은 추종차량의 속도가 앞 차의 속도보다 빨라서 지속적으로 간격이 줄어들어 추종하는 차량들이 최



〈그림 9〉 추종차량의 앞차와의 거리 분포

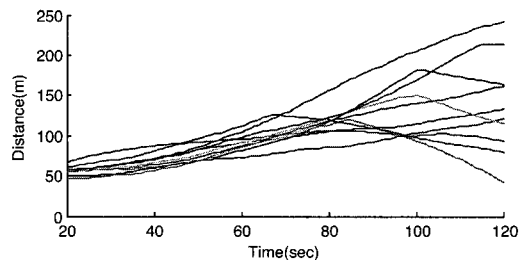


〈그림 10〉 최소간격으로 이동하는 차량의 거리 분포

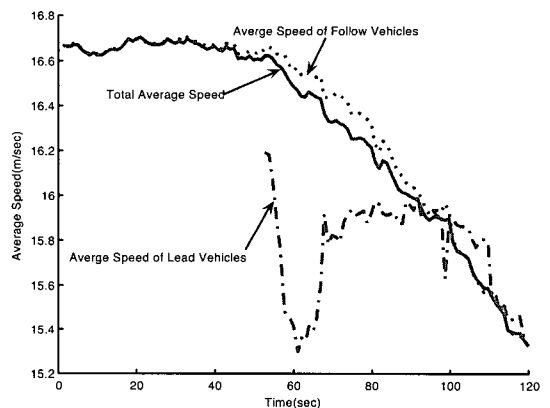
소간격 10(m)에 도달한 추종차량들의 전방차량과의 거리분포이다. 최소간격 이후에는 추종차량이 속도를 줄이는 방향(거리가 멀어지는 방향)으로만 차량이 움직일 수 있다. 보다 현실적인 상황은 전방차량에 의하여 속도를 증가시킬 수 없을 경우 최소간격을 유지하면서 추종할 수 있어야 한다.

〈그림 11〉은 선두차량들의 거리 분포로 앞차와의 거리가 증가하고 있으며, 일부 차량들은 증가이후 감소를 보이고 있다. 이 경우는 선두차량으로 움직이던 차량이 속도를 높여 앞의 군집화군의 후미에 합류된 것이라 볼 수 있다. 그러므로 일부차량은 100(m) 이상의 전방차량과의 거리가 증가하지만 일부차량은 증가 후 감소가 되어 전방의 군집에 합류하고 선두차량에서 추종차량으로 변하는 현상을 볼 수 있다. 실제 상황에서 군집이 생성 소멸을 반복하는 과정을 가정하였으므로 현실적이다.

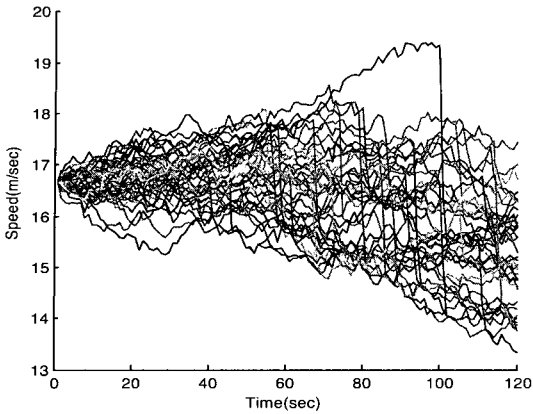
〈그림 12〉는 차량들의 시간대별 평균 속도를 나타내고 있다. 최초에는 전체차량이 하나의 군집이었지만 50 초 이후부처 여러 개의 군집으로 나누어지게 되며, 차량군의 선두차량이 되는 차량의 평균속도는 전체평균 속도보다 약 0.2(m/sec) 낮은 속도인 시점에서 발생한다.



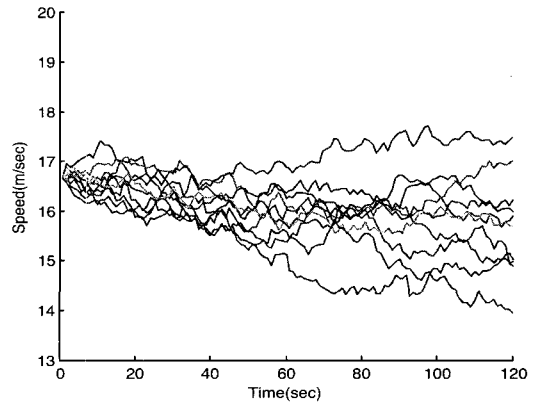
〈그림 11〉 최소간격으로 이동하는 차량의 거리분포



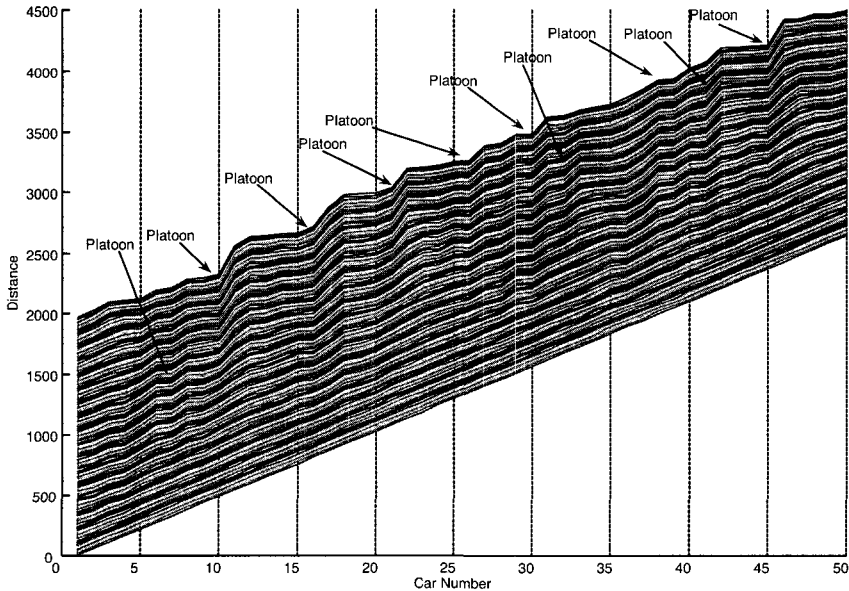
〈그림 12〉 시간대별 차량들의 평균 속도



〈그림 13〉 시간대별 각 차량의 속도(추종차량 속도 분포)



〈그림 14〉 시간대별 각 차량의 속도(선두차량 속도 분포)



〈그림 15〉 시간과 거리에 따른 차량들의 자취도

차량군집이 발생한 직후 선두차량의 평균 속도는 등락을 반복하고 있지만 전체차량의 평균속도보다는 낮은 것을 알 수 있다. 최초 모든 차량이 추종차량이었다면 전체 차량의 속도는 군집화 발생 이전 단계일 때 초기의 속도 16.67(m/sec)의 속도를 유지하였지만 군집화 발생이후 속도가 감소하게 되며 100(sec) 이후에는 군집화의 속도와 비슷한 속도를 가지게 된다. 이는 군집화 선두차량의 속도 저하가 추종차량들에게 지속적인 영향을 미쳐 결국 총 통행 속도를 줄이고 있음을 보여주고 있다. 100(sec) 이후의 상황은 군집화 선두차량 평균속도보다 추종차량의 평균속도보다 낮은 것을 알 수 있다. 이것은

최고속도가 선두차량의 속도이고, 속도의 변화는 속도를 줄이는 방향으로만 자유롭기 때문이다.

시간대별 각 차량의 속도 분포로서 〈그림 13〉의 경우 추종차량들의 속도 분포는 최초 속도를 중심으로 무작위한 속도 분포를 보이다가 60(sec)가 되는 지점부터 속도가 줄어들고 있다. 이것은 차량군의 군집화 과정이 진행되어 질수록 속도가 줄고 있는 것이며 세로방향으로 급격한 속도감속이 있는 것은 자유로운 속도로 이동하는 차량이 앞에 차량에 대하여 최소간격을 유지하기 위하여 급감속하는 것이다. 이모형에서는 최소간격을 유지하는 감속에 대한 정의가 순식간에 최소간격을 유지하도록 설계가

되어있으므로 강제적인 속도 감속현상이 묘사되고 있다. 현실성을 반영하기위하여 차량들의 속도와 거리와의 관계에 따른 속도 변화를 고려한 제약조건이 필요하다.

〈그림 14〉는 선두차량이 되었던 차들의 속도 분포이다. 대부분이 최초 속력 이하로 움직이는 행태를 보이고 있으며, 추종차량의 속도 분포에서 보였던 급감속지점이 없이 전 구간에서 임의적 분포를 보이고 있다. 이것은 앞차에 대한 영향 없이 저속이지만 속도를 유지하며 차량이 운행 되었다는 것을 알 수 있다.

〈그림 15〉는 50개의 차량들이 시뮬레이션을 통하여 결정되어진 차량들의 시간별 위치의 자취로서 선의 기울기는 앞차와의 거리와 비례한다. 그림과 같이 앞차와의 거리가 먼 위치는 군집군의 선두차량의 위치가 된다.

## 2. 검지기 데이터와 비교

검지기 자료 분석 결과 값과 모형의 결과 값을 비교하면, 최초 차량 거리는 모형내의 차량들이 등 간격에서 시작하므로 검지된 차량들의 평균 거리로부터 변화하기 시작하였고, 최초의 속도 또한 초기에 모든 차량의 등속으로부터 변화하였다. 120(sec)간의 결과는 〈표 2〉이며 검지기의 기초자료들과 비교 하였다. 검지기 자료는 지점에서 관측된 지점데이터 자료로서 종적인 거리개념이 있는 군집화 자료와 비교하는데 한계가 있는 자료이다. 따라서 차량의 평균속도, 차량의 평균 앞차와의 거리, 그리고 최초 본 연구에서 가정한 군집의 기준(100m 이상의 간격)에 따른 군집군의 수를 비교하였다.

평균속도는 최초 60(sec)까지 두 결과가 유사한 속도를 보였으나 군집화가 진행되면서 모형의 평균 차량 속도는 지속적으로 감소하였다. 모형 평균 속도의 결과 값이 검지기 자료에서의 평균속도보다 작은 것은 교통류에

게 차선변경의 권한이 없기 때문에 발생한 것이라 생각되어 현실적이라 판단하였다. 앞차와의 평균 거리는 모형의 결과 값과 5(%) 미만의 차이 값을 가지고 있었고, 군집의 선두차량과 추종차량의 평균 속도 또한 검지기 자료와 최초 1(%)이내의 차이 값에서 120(sec)의 시물레이션 종료시에 5(%)미만(검지기 평균속도16.18(m/sec), 모형결과 평균속도 15.42(m/sec)의 오차를 가지고 있었다. 즉, 차량들 간의 평균거리는 시물레이션 결과 53.0049(m)로 이것은 초기 평균 거리인 54.40(m)보다 감소한 것으로 나타났지만, 선두차량과 추종차량의 평균 거리가 133.9072(m)와 46.0901(m)인 것으로 볼 때 선두차량의 군집거리는 멀어지고 추종차량간의 거리는 줄어드는 것으로 판단된다.

100(m) 이상의 거리를 두고 움직이는 차량군은 모형에서 70(sec) 후 20(%), 90(sec) 후 18(%)이었고, 등락을 거듭 하였으며, 검지기 자료에서도 18(%)이었다(1200 차량 중 216대가 100(m) 이상의 간격을 두고 이동).

가장 중요한 차량군의 형태와 생성 소멸과정은 검지기 자료를 통하여 비교 할 수 없었지만 모형을 통하여 재현하였다.

## VI. 결론

기존 연구들이 차량들이 단속류의 강제적 제어에 의한 군집화현상을 주로 가정하고 있었으며, 연속류에 대한 군집화는 운전자 외적인 요소(차선감소, 입출입구조 등)를 주로 다루고 있다. 하지만 운전자에 의한 교통류의 특성과 행태를 예측하기 위해서는 운전자로부터 발생하는 요소를 고려해야 할 것이다.

본 연구에서 운전자의 개별행태를 반영할 수 있는 가장 기초적인 모형을 제시하였다. 군집화현상을 재현하고, 군집화현상을 발생시킬 수 있는 모형으로서 본 모형에서는 차량 추종모형을 기반으로 하고, 운전자의 행동을 임의효과로 가정하였다. 또한 자유로의 실제 관측 자료를 이용하여 초기 조건을 부여하고 현실적으로 가능한 파라미터를 가정하여 군집의 정도와 군집의 길이, 군집화 시간, 군집 내 속도, 차량 간의 간격을 조절 할 수 있는 모형을 개발하였다. 운전자의 행태는 임의적인 요소로 반영하였기 때문에 현실을 정확히 반영하지는 못하는 한계를 가지고 있으나 평균 차간거리, 군집화 비율은 실측자료와 유사함을 확인 할 수 있었다.

〈표 2〉 관측 값과 시물레이션 결과 비교

비교	관측 값	시물레이션 결과
차량수(대)	1200	50
평균 속도(m/sec)	16.18	15.42
선두차량의 평균속도(m/sec)	-	15.45
추종차량의 평균속도(m/sec)	-	15.34
평균거리(m)	54.40	53.01
선두차량의 평균 거리(m)	-	133.91
추종차량의 평균 거리(m)	-	46.09
선두차량의 수(대)	216(18%)	10(20%)

본 연구에서의 시뮬레이션은 많은 영향요소를 가정하여 가장 간단한 모형으로 제시하였다. 특히 운전자의 임의성 부분을 간단한 확률 분포로 가정하였지만 제시된 모형을 바탕으로 임의성을 줄여가고 운전자의 특성을 반영한다면 보다 현실적인 모형으로 접근할 수 있을 것이다. 또한 차선변경과 감/가속 상황을 반영하면서 모형이 운전자의 행태부분에서 더욱 연구되어야 할 부분이다. 운전자의 행태부분 뿐만 아니라 군집화 현상을 발생시키는 도로 환경적 요소로서, 도로의 구배, 경사, 차선 수, 입/출입여부, 그리고 곡선반경, 중차량의 운행, 기후 등의 다양한 요소들을 적용할 수 있는 모형으로 발전이 향후 요구된다.

## 참고문헌

1. 김태완·김상구·김영호·손영태(2004), 차간시간(Time Gap) 변수를 이용한 교통기본도(Fundamental Diagram)의 미시적 해석, 대한교통학회지, 제22권 제3호, 대한교통학회, pp.95~105.
2. 윤 판(2000), 차량군 분산계수의 변화에 따른 내재변수의 민감도 분석, 대한지역개발학회지, 제12권 제2호, 대한지역개발학회.
3. 이수일(2006), 안전측면의 도로선형 설계 일관성 평가기준 개발에 관한 연구, 박사학위논문
4. 이재명(2006), 연속류 차량군 설정 기준에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회.
5. 최재성(1998), 도로선형에 대한 설계일관성 평가 모형의 개발, 대한교통학회지, 제16권 제4호, 대한교통학회, pp.195~211.
6. 하태준·박제진·김유철(2003), 가속도를 고려한 도로의 설계일관성 평가기법에 관한 연구, 대한교통학회지, 제21권 제1호, 대한교통학회, pp.127~136.
7. Brackstone(1999), "Car following: a historical review", Transportation Research Part F, Vol. 2, pp.181~196.
8. Denos C. Gazis(1974), "Traffic Science, John Wiley & Sons, Inc.", pp.145~169.
9. G. D. Lee, S. W. Kim(2002), "A Longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm", Mechatronics, Vol. 12, pp.97~118.
10. Gray A. Davis(2000). "Collective responsibility for freeway real-ending accidents, An application of probabilistic causal models", Accident analysis & prevention 38, pp.728~736.
11. Katja Vogel(2002), "What characterizes a Free Vehicle in an urban area?", Transport Research Part F, pp.15~29.
12. Katja Vogel(2002), "A comparison of headway and time to collision", pp.427~433.
13. Thomas A. Ranney(1999), "Psychological factors that influence car-following and car-following model development", Transportation Research Part F, pp.213~219.

- ✉ 주 작성자 : 이 준  
 ✉ 교신저자 : 이 준  
 ✉ 논문투고일 : 2006. 10. 28  
 ✉ 논문심사일 : 2006. 12. 18 (1차)  
                   2007. 1. 29 (2차)  
                   2007. 2. 28 (3차)  
 ✉ 심사판정일 : 2007. 2. 28  
 ✉ 반론접수기한 : 2007. 8. 31