

■ 論 文 ■

# 연속교통류에서의 끼어들기 행태 분석 및 모형 개발

## Development of Cut-in Lane Changing Model Based on Observed Driver's Behavior in Uninterrupted Traffic Flow

**김 경 희**

(한양대학교 첨단도로연구센터 연구원)

**김 진 태**

(교통개발연구원 책임연구원)

**장 명 순**

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

**김 응 철**

(인천대학교 토목환경시스템공학과 전임강사)

### 목 차

- I. 서론
  - II. 문헌고찰
    - 1. 차로변경모형
    - 2. 간격수락이론
    - 3. 차로변경모형 프로그램
  - III. 연구방법
    - 1. 차로변경 시작 및 종료, 끼어들기 정의
    - 2. 조사지점
    - 3. 조사방법
    - 4. 자료추출
  - IV. 자료분석
    - 1. 차로변경행태 특성 분석
    - 2. 적합도 검증
  - V. 모형개발
    - 1. 모형개발 방법
    - 2. 끼어들기 판단지표 도출
    - 3. 모형 프로그램 개발
  - VI. 모형평가
    - 1. 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간
    - 2. 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간거리
  - V. 결론 및 향후 연구 과제
    - 1. 결론
    - 2. 향후 연구과제
- 참고문헌

Key Words : 차로변경, 차간시간, 차간거리, 상대속도, 가·감속도, 끼어들기

### 요 약

끼어들기 행태는 차로변경 대상 측면차로에 충분한 차간간격이 존재하지 않는 상황에서도 운전자가 강제적으로 차간간격을 만들어내는 적극적인 운행행태이다. 이러한 끼어들기는 주변 주행차량들의 움직임에 종속적으로 대응하지 않는 능동적인 운행행태로 간격수락이론이 주요 기반을 이루는 기존 차로변경모형으로는 설명되지 않는다. 보다 현실적인 교통류 흐름의 모사를 지원하기 위하여 끼어들기 행태를 설명하는 운전자 운행행태 모형 개발이 수반될 필요가 있다.

본 연구에서는 합류부와 분류부를 대상으로 끼어들기 특성 분석 및 분포 추출을 하였으며, 끼어들기 판단지표를 도출하여 모형을 개발하였다. 합류부와 분류부를 대상으로 차로변경행태 분석 결과 차간시간의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간은 Erlang(0.343, 3) 분포, 후미차량과의 차간시간은 Weibull(1.12, 1.81) 분포, 상대속도의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 상대속도는 Lognormal (11.8, 4.6) 분포, 후미차량과의 상대속도는 Lognormal (6.01, 4.27) 분포, 차로변경차량의 가속 분포는 Lognormal (1.24, 2.5) 분포, 감속 분포는 Normal(-1.51, 1.27) 분포를 따르는 것으로 분석되었다. 현장관측 자료를 토대로 끼어들기 판단지표 도출 결과 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도 분포가 평균값 6.78m/sec, 분산 9.84m/sec인 Gamma(2.74, 1.74)분포를 따르며, 현장관측 자료의 분포와 모형결과 분포의 동일성 여부를 판단하기 위해 신뢰 수준 95%로  $\chi^2$ -test 검정을 실시 한 결과 "모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따른다."고 검증되었다.

## I. 서론

도로를 주행하는 차량의 운전자는 주변차량의 위치 및 속도를 파악하면서 개개인 운전자의 운행행태에 따라 차량을 적절히 운행한다. 교통공학자들은 이러한 운전자 운행행태를 '추종모형' 및 '차로변경모형'으로 모형화 하였으며 미시적 모의실험 전산모형은 이들 모형을 적극활용하여 개별차량의 주행을 모사한다. '추종모형'은 선두차량에 영향받는 주행차량(후행차량)의 움직임 결정하는 모형이고, 차로변경모형은 주변차량에 영향받는 주행차량의 움직임을 결정하는 모형이다. 이들 운전자 행태모형은 주변 주행차량들에 의하여 결정되는 주행상황에 종속되어 주행차량의 반응을 결정한다. 이들 모형의 운전자 운행행태 반영 신뢰도에 따라 미시적 모의실험 전산모형의 신뢰도 역시 좌우된다.

실제 도로현장에서 끼어들기를 수행하는 운전자를 많이 발견할 수 있다. 이러한 끼어들기 행태는 차로변경 대상 측면차로에 충분한 차간간격이 존재하지 않는 상황에서도 운전자가 강제적으로 차간간격을 만들어내는 적극적인 운행행태이다. 이러한 끼어들기는 주변 주행차량들의 움직임에 종속적으로 대응하지 않는 능동적인 운행행태로 간격수락이론이 주요 기반을 이루는 기존 차로변경모형으로는 설명되지 않는다.

보다 현실적인 교통류 흐름의 모사를 지원하기 위하여 끼어들기 행태를 설명하는 운전자 운행행태 모형 개발이 수반될 필요가 있다. 본 연구에서는 끼어들기 운전자 운행행태 연구를 위하여 다음의 연구목표를 설정하고 수행하였다.

- (1) 운전자 끼어들기 운행 행태 특성 분석
- (2) 끼어들기 판단지표 도출
- (3) 모의실험 전산모형에 적용 용이한 끼어들기 모형제안 및 평가

고속도로 연속교통류에서의 끼어들기 연구 대상을 제한하였으며 끼어들기가 관측이 용이하다고 판단된 고속도로 합류부 및 분류부에서 수집된 자료를 사용하여 연구를 수행하였다.

## II 문헌고찰

본 연구에서는 합류 및 분류부에서 본선에 차로변경 시 가·감속 차로에서의 차로변경행태, 간격수락을 이해하고 모형개발에 있어서 기존 차로변경모형 프로그램의 알고리즘을 이해하기 위해 차로변경모형, 간격수락

이론, 차로변경모형 프로그램 대하여 다음과 같이 고찰하였다.

### 1. 차로변경모형

Zhang, Owen and Clark(1998)는 차로변경 구분은 1) 선택적 차로변경(Discretionary Lane Changing) 2) 강제적 차로변경(Mandatory Lane Changing) 3) 예상되는 차로변경(Anticipatory Lane Changing)으로 구분하였으며 각각의 정의 및 특성을 다음과 같이 설명하였다.

#### 1) 선택적 차로변경 (Discretionary Lane Changing)

선택적 차로변경은 운전자가 희망하는 속도 및 운전상태 유지하기 위해 선택적 차로변경을 하게 된다.

선택적 차로변경행태는 운전자의 공격성, 희망 자유속도, 정상 및 최대 가·감속도, 인내 등의 운전자 특성과 차로변경차량과 선두차량과의 상대 거리, 상대 속도에 의해 선택적 차로변경을 하게 된다.

#### 2) 강제적 차로변경 (Mandatory Lane Changing)

강제적 차로변경은 합류부, 분류부, 차로 감소 지점, 차로 장애지점 및 차로 이용 제한 지점에서 유·출입을 위해 차로를 변경하는 등 현재의 차로에서 차로변경을 하지 않으면 안 되는 경우에 강제적 차로변경을 하게 된다. 만약에 후미차량의 상대적인 조작에 의해 간격수락을 이용 할 수 없으면 서행을 통하여 간격을 만들어 차로변경을 수행하게 된다.

#### 3) 예상되는 차로변경 (Anticipatory Lane Changing)

예상되는 차로변경은 의도적으로 차로가 더 이상 존재하지 않는 경우의 유출을 위해 또는 회전하기 위해서 적당한 지점에서 운전자는 차로변경을 수행하게 된다. 이런 경우는 운전자가 잠재적인 지체를 피하기 위해서나 선택적인 차로변경을 위해 차로변경을 하는 경우는 아니다. 이러한 차로변경 형태의 목적은 미리 정확한 차로를 획득하기 위한 것이다. 예상되는 차로변경은 운전자의 계획된 경로에 의해 수행되는 것이지만 선택적 차로변경처럼 희망속도를 얻기 위해 차로변경을 하는 것은 아니다. 운전자의 계획된 경로에 의해 차로변경을 하는 점은 강제적 차로변경과 같다.

## 2. 간격수락이론

간격수락이론은 차로변경모형에서 중요한 요소이다. 차로변경을 수행하기 위해서 운전자들은 대상차로에서 선두와 후미차량의 속도와 위치를 파악하며, 선두와 후미차량이 차로변경을 하기 위해 충분한 간격을 가지고 있는지 결정하며, 이를 표현한 것이 간격수락 모형으로 간격수락 모형에는 1) 경험적 간격수락모형, 2) 확률적 간격수락 모형이 있다.

### 1) 경험적 간격수락모형

Ahmed(1996)는 경험적 간격수락모형은 차로변경시 부가차로에서 본선차로로 진입, 비신호 제어 교차로 통과 시 차량주행 행태를 모사하는 모형으로 용량분석에 주로 이용하였다. 결정적(Deterministic) 임계간격을 일반적인 구하는 방법은 다음과 같다.

(1) 연결로 차량에 의해 수락된 간격들을 가지고, 중앙값을 사용하거나 평균을 사용하여 임계간격을 결정한다.

(2) 크기가 일정차간시간인 간격보다 더 짧은 수락 간격의 수를 누적시킨 곡선과 일정차간시간보다 더 큰 거부간격의 수를 누적시킨 곡선을 서로 교차시켜 생기는 교점으로 결정한다.

(3) Drew(1967)는 임계간격을 예측하기 위하여 가속차로의 길이, 합류각사이의 상호관계를 중회귀분석으로 표현, 가속차로의 형태에 대한 영향을 반영하였으며, 직접식 가속차로의 경우에는 평행식 가속차로에 비하여 가속차로의 길이가 동일한 경우에 임계간격이 더 작다는 것을 제시하였다.

Drew의 모형은 다음과 같다.

$$T = 5547 + 0.8280\theta - 1.043L + 0.045L^2 - 0.042\theta^2 - 0.874S$$

여기서,  $T$  : 임계간격(sec)

$\theta$  : 합류각(°)

$L$  : 30 m 단위의 가속차로 길이

$S$  : 가속차로의 형태 계수, 직접식 가속차로=1, 평행식 가속차로=0

(4) HCM(2000)의 경험적인 회귀분석 방법을 이

용하여 연결로 인접차로의 교통량을 추정하는 거시적인 모형을 형태별로 제시하고 있다.

### 2) 확률적 간격수락모형

1960년 Drew(1967)에 의해 체계화된 간격수락모형은 도로 기하구조, 합·분류시 지체시간과 대기행렬 길이를 반영하였다. 모형에는 로짓(Logit)이나 프로빗(Probit) 확률모형이 있는데 이 모형들은 모형구축에 있어서 많은 변수와 모수가 필요하고, 모형정산에서 많은 비용과 시간이 든다. 또한, 차로변경 비 수행 차량에 대해서 파라메타(Parameters)에 대한 정산(Calibration)의 한계점을 가지고 있다.

(1) Mahmassani and Sheffi(1981)는 비신호 교차로에서 임계간격의 평균과 분산정도를 산정하기위해 '프로빗(Probit) 모형'을 이용하여 설명하였다.

(2) Yang and Koutsopoulos(1996)는 고속도로를 대상으로 시나리오를 통해 차로변경모형을 설명하였다.

(3) Kita(1999)는 가속차로의 잔여길이, 차간거리(Gap)의 간격, 상대속도를 토대로 고속도로 합류지점에서의 간격수락에 이항 로짓(Binary Logit) 모형을 적용하였다.

(4) 황순연(2002)는 고속도로를 대상으로 차로변경시 간격수락분포에 대한 모형식을 운전자의 행태 및 차량특성 등을 반영하고, 시간대를 구분하여 혼잡시와 비혼잡시의 간격수락모형을 구분하여 프로빗 모형을 제시하였다.

## 3. 차로변경모형 프로그램

Zhang, Owen and Clark(1998)는 (1) CORSIM (Corridor Simulation), (2) MITSIM (Microscopic Traffic Simulator), (3) MRS (Multiregime Approach for Microscopic Traffic Simulation)에 대한 차로변경모형을 다음과 같이 소개하였다.

### 1) CORSIM

CORSIM에서는 차로변경을 강제적 차로변경, 선택적 차로변경, 예상되는 차로변경으로 구분하였다. 강제적 차로변경은 차로줄어들 지점과 합류부와 분류부 등을 이용할 경우에 수행되어진다. 선택적 차로변경은 반드시 차로변경이 필요한 경우가 아니어도 운전자가 현

재의 차로보다 훨씬 좋은 운전 상황인 차로를 인지했을 경우 그 대상차로를 목적차로로 하여 차로변경을 수행하게 되며, 예상되는 차로변경은 운전자가 미리 차로변경을 계획하여 수행하게 된다. CORSIM에서 차로변경 차량은 차로변경 대상차로의 선두 및 후미차량에 영향을 받는 것으로 보았다.

**2) MITSIM**

MITSIM에서 운전자는 (1) 현재경로에서 대상경로로 이동하기 위해, (2) 지체로 인한 차로 막힘을 통과하기 위해, (3) 차선이용 규칙을 따르기 위해, (4) 차선 이용의 표지 및 여러 가지 표지에 대응하기 위해 강제적 차로변경을 수행한다. 차로변경 의사결정은 효용최적화 모델(Utility Maximization Model)을 이용하여 확률론적으로 해결하였다. 선택적 차로변경은 선두차량의 속도가 희망속도에 미치지 못할 때 수행한다.

**3) MRS**

MRS에서 강제적 차로변경과 선택적 차로변경은 차로변경이 완성되어지는 지점까지의 거리에 의존해서 차로변경을 하게 된다. 강제 차로변경은 차선 이용 규칙을 따르기 위해 수행한다. 선택적 차로변경은 짧은 대기 시간을 가지거나 좀더 빠른 통행 속도를 가지는 인접한 차로로 이동 및 대기시간 줄이고 속도를 확보하기 위한 시도에서 수행한다. 이러한 모델을 반영하여 MRS는 하나의 국한된 지역만을 처리하는 것이 아니라 다중지역을 처리 할 수 있다.

**III 연구방법**

본 연구에서는 끼어들기 모형을 고려하기 위해 합류부와 분류부를 연구대상 지점으로 선정하였으며, 차로변경 시작 및 종료, 끼어들기의 정의, 조사지점, 조사방법, 자료 추출은 다음과 같다.

**1. 차로변경의 시작 및 종료, 끼어들기 정의**

본 연구의 원활한 수행을 위하여 차로변경의 시작 및 종료, 끼어들기를 아래와 같이 정의하였다.

**1) 차로변경의 시작 및 종료**

차로변경차량이 차로변경 종료차로로 이동시 차로변

경차량의 앞 범퍼의 좌측이 차선과 만나는 시점을 차로변경 시작으로 정의함. 그리고 차로변경차량이 차로변경 후 종료차로에 일직선상으로 위치하기 시작하는 시점을 차로변경 종료시점으로 정의함

**2) 끼어들기**

1/30 프레임 영상자료 추출 시 차로변경 차량이 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량간의 간격이 차로변경하기에 충분하지 않아 0.10~1.63 초 범위 내에 차로변경을 수행하지 못하며, 차로변경 종료차로 후미차량의 감속이 관측되는 상황. 즉, 현장자료를 토대로 본 연구에서 정의한 차로변경시작 시점을 기준으로 차로변경차량의 끼어들기로 인해 차로변경 종료차로의 후미차량이 감속하게 되는 상황에서 차로변경차량과 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간이 0.10 ~1.63 초까지의 범위로 나타났다.

**2. 조사지점**

조사 지점은 (1) 오목교 합류부, (2) 안성I.C 분류부이며, 조사지점의 도로조건은 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> 도로조건

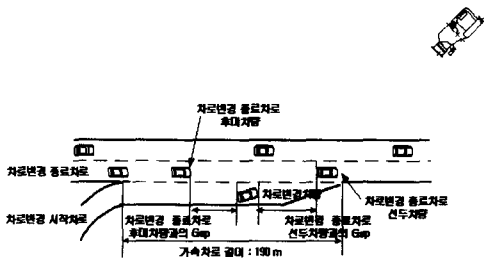
구분	편도 차로 수	차로 폭	가·감속 차로 길이	제한속도	지형특성
합류부	2	3.7m	190m	70kph	평지 (직선구간)
분류부	4	3.5m	300m	100kph	평지 (직선구간)

**3. 조사방법**

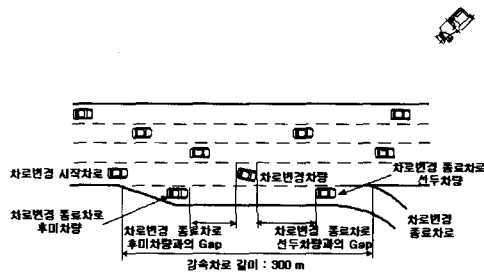
차량들의 위치와 속도를 얻는 방식중의 하나로 비디오 영상을 통한 영상검지기를 이용한다. 이 경우에 차량의 위치를 식별하기 위해서는 차량의 색상과 도로 포장의 색상간의 대비를 사용하게 된다. 차량추종과 같이 연속성을 가진 자료는 영상 검지기를 이용하는 것이 유용하지만, 차로변경과 같은 이산적인 사건은 오검지가 발생할 가능성이 존재하여 영상검지기를 쉽게 활용할 수 없다. 특히 교통상태가 혼잡한 경우에는 차량 간 간격이 짧고 차로간에 겹쳐지기 때문에 가까이 위치한 차량들의 앞, 뒤 범퍼의 위치를 확인하는 데에는 신뢰성이 떨어진다. 본 연구에서는 <표 2>, <그림 1>와 같이 고려하여 디지털 캠코더를 이용하여 현장조사를 실시하였다.

〈표 2〉 조사방법

구분	합류부	분류부
조사(촬영)위치	· 표고 45 m 높이	· 표고 60 m 높이
조사 조건	· 조사지점의 전구간 시야가 확보되는 지점을 선정 · 조사 구간 내 속도 안내표지 및 속도 감시카메라 시설이 없는 곳으로 선정	
조사 시간	· 합류부와 분류부 동일 시간대에 조사 실시 · 조사일자 : 2004년 1월 5일~10일 · 조사시간 : 07:00~09:00 시, 13:00~15:00 시	
촬영 장비	· 디지털 캠코더	



(1) 합류부



(2) 분류부

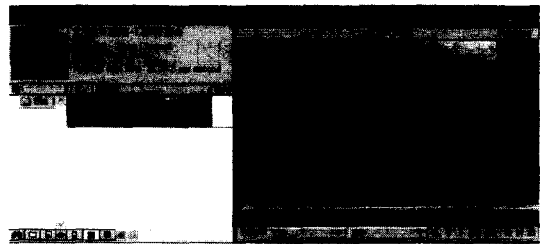
〈그림 1〉 차로변경행태 특성 분석을 위한 파라미터

4. 자료추출

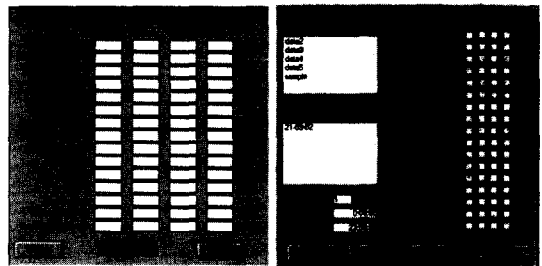
〈그림 2〉와 같이 디지털 캠코더로 촬영한 자료를 동영상 편집기인 Premiere 6.5 에서 1/30초 프레임 단위로 재생 및 정지 작업을 거쳐 분석하였다.

차로분리 점선 길이가 합류부의 경우 7m, 분류부의 경우 10m이므로 이 기준선을 토대로 개별 차량에 대하여 자료를 수집하였다.

〈그림 3〉과 같이 영상분석기(CCATS: Camera and Computer Aided Traffic Sensors)를 이용하여 조사구간의 평균주행속도를 추출하였다.



〈그림 2〉 동영상 편집 프로그램 Premiere 6.5



〈그림 3〉 영상분석 프로그램(CCATS)

〈표 3〉 차로변경 자료수집 결과

구분	차로변경 자료수	조사시간
합류부	292	07:00~09:00 시
	218	13:00~15:00 시
분류부	420	07:00~09:00 시
	200	13:00~15:00 시

자료 수집 항목 및 자료 수는 다음 항목과 〈표 3〉과 같으며, 합류차로변경행태를 설명해주는 다음 항목의 추출 기준은 차로변경시점을 기준으로 하였다.

- 차로변경차량과 차로변경 종료차로의 선두 및 후미 차량간의 차간시간, 차간거리, 상대속도
- 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량의 가·감속도
- 차로변경차량의 가·감속도 및 차로변경 시점 위치
- 조사구간의 평균주행속도, 밀도

IV. 자료 분석

본 연구에서 자료 분석은 스프레드쉬트 프로그램을 이용해 코드화 시켰고, 통계프로그램인 SPSS (Statistical Package for the Social Science), 데이터의 통계적 분포의 산정 및 시뮬레이션 분석 프로그램 ARENA를 이용하여 분석하였다.

지금까지 차로변경모형 개발 시 차로변경행태 특성 및 분포를 모형에 적용 할 때 기존연구의 차로변경행태 특성 및 분포를 그대로 가정하여 반영하는 경우가 많았

으나 본 연구에서는 현장관측 자료를 토대로 우리나라 실정에 적합하도록 모형에 적용하기 위해 차로변경행태 특성 분석 및 적합도 검정을 통하여 분포를 검정하였다.

### 1. 차로변경행태 특성 분석

모형에 차로변경행태 특성을 반영하기 위해 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간, 상대속도, 차로변경차량의 가·감속도 특성 및 밀도에 따른 차간시간, 상대속도, 차로변경시점의 상관관계에 대하여 분석 하였다. <표 4>, <그림 4>는 합류부와 분류부를 토대로 차로변경행태 특성을 퍼센트 값으로 제시한 것이며 분석 결과는 다음과 같다.

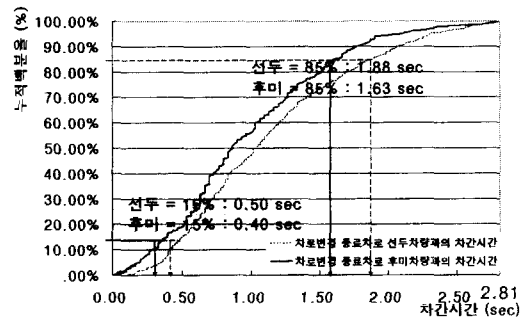
1) 차간시간의 경우 85% 운전자를 기준으로 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과는 1.88 sec, 후미차량과는 1.63 sec, 15% 운전자를 기준으로 선두차량과는 0.50 sec, 후미차량과는 0.40 sec 의 차간시간을 갖는 것으로 나타났으며,

2) 상대속도의 경우 85% 운전자를 기준으로 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과는 3.55 m/sec, 후미차량과는 3.46 m/sec, 15% 운전자를 기준으로 선두차량과는 -2.09 m/sec, 후미차량과는 -1.40 m/sec 의 속도 차이가 나는 것으로 나타났으며,

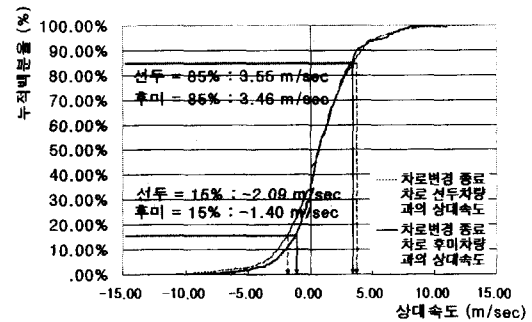
3) 차로변경을 수행하는 85%, 15% 운전자를 기준으로 가속도의 경우 3.45 m/sec<sup>2</sup>, 0.28 m/sec<sup>2</sup>, 감속도의 경우 -2.78 m/sec<sup>2</sup>, -0.36 m/sec<sup>2</sup> 의 가·감속을 하는 것으로 나타났다.

4) 본선차로의 밀도에 따른 차간시간, 상대속도, 차로변경시점과의 상관관계 분석 결과, 차간시간은 밀도

가 높아짐에 따라 작은 차간시간을 이용하는 것으로 나타났으며, 상대속도도 밀도가 높아짐에 따라 작아지는 것으로 나타났으며, 차로변경시점은 밀도가 높아짐에 따라 차로변경 시점이 가·감속차로의 중점에 가까운 지점에서 나타날 것으로 예상하였으나, 85% 운전자를 기준으로 가·감속차로 길이가 300 m (100%)인 도로조건에서 밀도가 높아짐에 따라 차로변경차량 운전자는 가·감속차로 시점에서부터 126 m (42%)이내에서 차로변경을 하는 것으로 분석되었다.



(a) 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간 누적분포

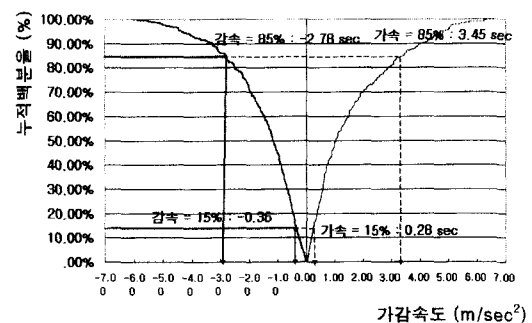


(b) 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 상대속도 누적분포

<표 4> 차로변경행태 특성 퍼센트 값

구분	MIN	5%	15%	MEAN	85%	95%	MAX
(1)	0.12	0.35	0.50	1.14	1.88	2.30	2.80
(2)	0.10	0.17	0.40	0.98	1.63	2.10	2.80
(3)	-11.67	-4.00	-2.09	0.70	3.55	5.54	13.50
(4)	-10.80	-3.11	-1.40	0.93	3.46	6.30	10.78
(5)	0.01	0.10	0.28	1.62	3.45	4.80	6.60
(6)	-0.01	-0.12	-0.36	-1.51	-2.78	-4.38	-6.09

- (1) 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간 (sec)
- (2) 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간 (sec)
- (3) 차로변경 종료차로 선두차량과의 상대속도 (m/sec)
- (4) 차로변경 종료차로 후미차량과의 상대속도 (m/sec)
- (5) 차로변경차량 가속도 (m/sec<sup>2</sup>)
- (6) 차로변경차량 감속도 (m/sec<sup>2</sup>)



(c) 차로변경차량의 가·감속도 누적분포

<그림 4> 차간시간, 상대속도, 가·감속도 누적분포

〈표 5〉 각 분포의 적합도 검정

항목	분포	검정통계량	K-S	$H_0$
차간 시간	(1) Erlang	0.03	$D_{0.05} = 0.05$	Reject
	(2) Weibull	0.05	$D_{0.05} = 0.07$	Reject
상대 속도	(3) Lognormal	0.05	$D_{0.05} = 0.05$	Reject
	(4) Lognormal	0.05	$D_{0.05} = 0.06$	Reject
가·감 속도	(5) Lognormal	0.04	$D_{0.05} = 0.05$	Reject
	(6) Normal	0.03	$D_{0.05} = 0.04$	Reject

- (1) 차로변경 종료차로의 선두차량과의 차간시간
- (2) 차로변경 종료차로의 후미차량과의 차간시간
- (3) 차로변경 종료차로의 선두차량과의 상대속도
- (4) 차로변경 종료차로의 후미차량과의 상대속도
- (5) 차로변경차량의 가속도
- (6) 차로변경차량의 감속도

2. 적합도 검정

차로변경행태에서 차간시간, 상대속도, 가·감속도가 따르는 분포를 검정하기 위해 적합도 검정을 실시하였으며, 검정하기 위한 가설은 다음과 같으며 검정결과는 〈표5〉에 정리하였다.

$H_0$  : 차간시간, 상대속도, 가·감속도는 추정분포를 따르지 않는다.

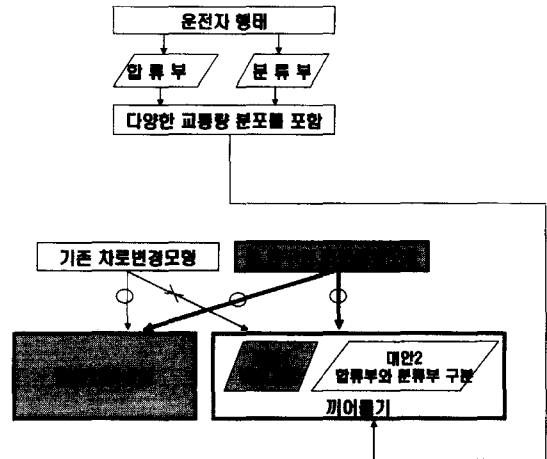
$H_1$  : 차간시간, 상대속도, 가·감속도는 추정분포를 따른다.

신뢰수준 95%로 검정한 결과 〈표 5〉와 같이  $H_0$ 를 모두 기각하여 (1) 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간은 Erlang(0.343, 3) 분포, (2) 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간은 Weibull(1.12, 1.81) 분포, (3) 차로변경 종료차로 선두차량과의 상대속도는 Lognormal (11.8, 4.6) 분포, (4) 차로변경 종료차로 후미차량과의 상대속도는 Lognormal (6.01, 4.27) 분포, (5) 차로변경차량의 가속 분포는 Lognormal (1.24, 2.5) 분포, (6) 차로변경차량의 감속 분포는 Normal (-1.51, 1.27) 분포를 따르는 것으로 분석되었다.

V. 모형개발

1. 모형개발 방법

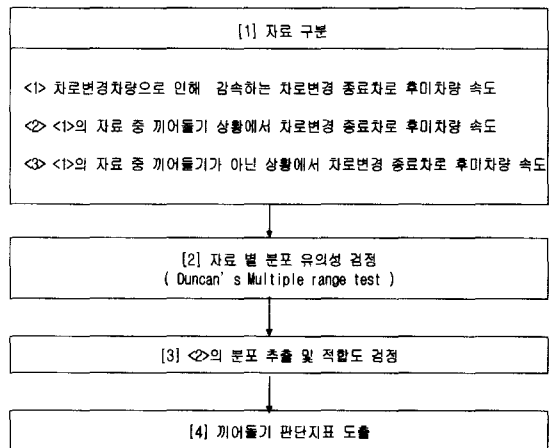
〈그림 5〉와 같이 본 연구의 차로변경모형에서는 대안1과 대안2중 합류부 및 분류부의 두 가지 분포를 동시에 고려하기 위해 대안1에 따라 합류부와 분류부를 구분하지 않고 모의실험용 모형을 개발하였다.



〈그림 5〉 모형 개발 방법

2. 끼어들기 판단지표 도출

일반적으로 현장조사를 통해 수집한 전체 차간시간 자료를 토대로 평균값이나 중앙값을 임계차간시간으로 이용하고 있으며, CORSIM의 경우 차로변경차량이 강제차로변경 시 차로변경 종료차로의 후미차량의 속도에 영향을 미치는 것으로 보고 후미차량의 속도만을 강제차로변경의 판단지표로 이용하였으며, 상대속도와 가·감속차로의 잔여거리는 지금까지의 연구에서도 운전자의 성향을 포함하고 있는 항목들로 보고 운전자의 성향을 설명해 줄 수 있는 파라미터의 필요성이 강조되어 왔으며 이에 대한 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 끼어들기 판단지표를 도출하기 위해 〈그림 6〉과 같이 고려하였고 상세 설명 항목은 하부단락에 제시하였다.



〈그림 6〉 끼어들기 판단지표 도출 방법

1) 자료구분

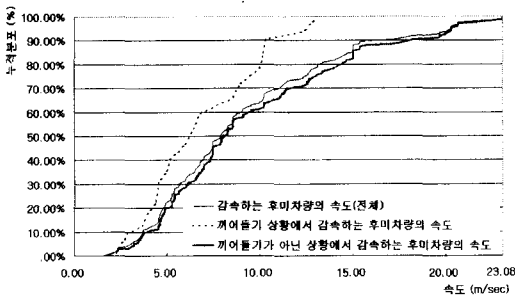
동영상 자료에서 자료 추출 시 차로변경차량이 차로 변경 종료차로 선두 및 후미차량간의 간격이 차로변경 하기에 충분하지 않아 능동적으로 간격을 만들어 차로 변경 하는 상황을 포함한 자료를 토대로 차로변경 종료 차로 후미차량이 차로변경 시작차로의 차로변경차량으로 인해 감속하게 되는 경우 차로변경 종료차로 후미차량의 속도자료를 다음과 같이 구분 하였으며, 각 자료에 대한 누적 분포는 <그림 7>과 같다.

<1> 차로변경차량으로 인해 감속하는 차로변경 종료 차로 후미차량의 속도

<2> <1>의 자료 중 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도

<3> <1>의 자료 중 끼어들기가 아닌 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도

차로변경차량으로 인해 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도 및 끼어들기가 아닌 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도는 1.62 ~ 23.08 m/sec 범위 내에서 차로변경이 이루어지는 것으로 분석 되었으며, 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도는 2.26 ~ 13.13 m/sec 범위 내에서 차로변경이 이루어지는 것으로 분석되었다.



<그림 7> 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도 누적 분포

2) 자료 별 분포 유의성 검정

[1]의 자료별 분포의 유의성을 검정하기 위해 신뢰 수준 95%로 Duncan's multiple range test를 실시 하였으며, 결과는 <표 6>과 같다.

분석 결과 차로변경차량으로 인해 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도분포와 끼어들기가 아닌 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도

<표 6> Duncan Test

구분	속도평균 (m/sec)	속도분산 (m/sec)	Duncan Grouping	
<2>	6.78	9.84	A	
<1>	9.15	25.89		B
<3>	9.59	27.70		B
유의수준			1.00	0.59

- <1> 차로변경차량으로 인해 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도
- <2> <1>의 자료 중 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도
- <3> <1>의 자료 중 끼어들기가 아닌 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도

분포는 유의수준 0.59로 같은 그룹으로 검증 되었으며, 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도는 유의수준 1.00과 평균 6.78m/sec, 분산 9.84m/sec로 B그룹과 2m/sec 이상의 차이로 같은 분포가 아님이 검증되었다.

따라서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도분포 중 속도분포가 다른 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도 자료를 끼어들기 판단지표 자료로 이용하였다.

3) 분포 추출 및 적합도 검정

<2>의 자료를 토대로 적합한 분포의 추정을 위해 다음과 같은 가설을 이용하였으며, <표 7>은 적합도 검정 결과이다.

$H_0$  : 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료 차로 후미차량의 속도는 추정분포를 따르지 않는다.

$H_1$  : 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료 차로 후미차량의 속도는 추정분포를 따른다.

<표 7> 적합도 검정

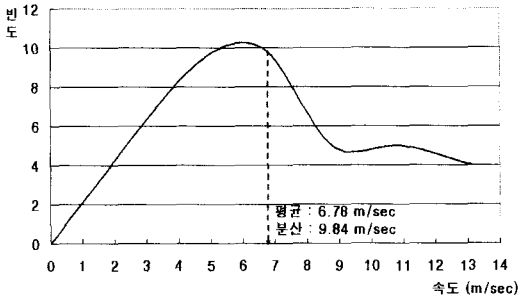
분포	검정통계량	K-S	$H_0$
Gamma	0.13	$D_{0.05} = 0.24$	Reject

<표 7>의 통계 검정에 따라 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도는 Gamma (2.74, 1.74)분포를 따르는 것으로 분석되었다.

4) 끼어들기 판단지표 도출

자료의 특성을 대표 할 수 있는 평균값을 토대로





〈그림 8〉 끼어들기 판단지표 도출 : Gamma(2.74, 1.74) 분포

끼어들기 < 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량 속도 분포 : Gamma분포( $\alpha=2.74, \beta=1.74$ ), 평균 = 6.78 m/sec, 분산 = 9.84 m/sec) < 일반차로변경

〈그림 8〉과 같이 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도 분포인 Gamma(2.74, 1.74)분포의 평균값 6.78m/sec, 분산 9.84m/sec 을 끼어들기 판단지표로 도출하였다.

### 3. 모형 프로그램 개발

현장관측 자료와 본 연구에서 개발한 끼어들기 모형의 검증을 위해 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 프로그램은 Microsoft Visual Basic 6.0 으로 구현하였으며, 〈표 8〉은 시뮬레이션 프로그램의 입·출력 항목이다

〈그림 9〉는 시뮬레이션이 수행되는 과정을 나타내며 시뮬레이션 초기화면 및 자료 입력화면은 〈그림 10〉과 같다.

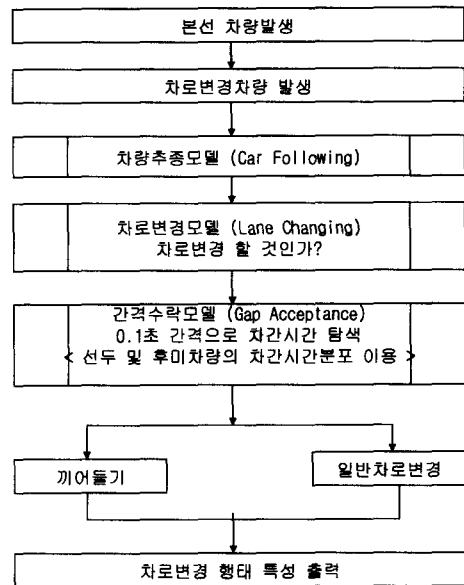
〈그림 10〉에서 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 최소차간시간과 차량속도는 현장자료 값을 이용하였으며, 차량발생분포는 지수분포(Exponential Distribution)함수를 적용하여 난수로 발생 시킨 후 차로변경 종료차로의 차간시간을 0.1초 간격으로 탐색하여 차로변경을 결정하게 되는데 차로변경 종료차로 후미차량 중 감속하는 차량의 속도가 끼어들기 판단기준인 Gamma분포( $\alpha=2.74, \beta=1.74$ ), 평균 = 6.78m/sec, 분산 = 9.84m/sec 이하인 경우와 이상인 경우로 구분하여, 현장관측 자료를 토대로 추출한 끼어들기 상황에서의 차간시간분포와 일반차로변경상황에서의 차간시간분포를 따르도록 하였으며, 모형에 이용된 차간시간분포는 〈표 9〉와 같다.

결과 값으로 차로변경차량의 속도, 가감속도, 차로변경 위치, 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량의 속도, 가감속도, 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간, 차간거리, 상대속도를 개별차량별로 출력하게 된다.

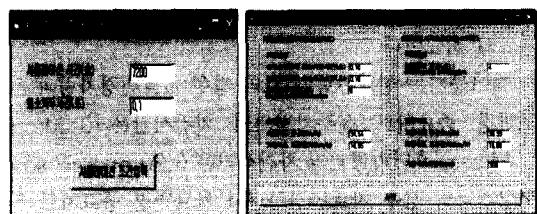
〈표 10〉은 모형을 검증하기 위한 현장관측 자료이다.

〈표 8〉 시뮬레이션 프로그램의 입·출력 항목

입력	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시뮬레이션 시간</li> <li>· 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량의 최소차간시간 (sec)</li> <li>· 차로변경 시작 및 종료차로의 차량 속도 평균, 표준편차 (km/h)</li> <li>· 차로변경 시작 및 종료차로 차량발생 분포의 평균 (sec)</li> <li>· 가·감속 차로 길이</li> </ul>
출력	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간</li> <li>· 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간거리</li> <li>· 차로변경 위치</li> <li>· 차로변경차량의 속도 및 가·감속도</li> <li>· 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량의 속도, 가·감속도</li> </ul>



〈그림 9〉 시뮬레이션의 순서도



〈그림 10〉 초기화면 및 자료입력화면

〈표 9〉 차간시간분포 모형

구분	모형
끼어들기	(1) $f_x(x) = \lambda m x^{m-1} e^{-\lambda x^m}, x \geq 0$ : 0.08+Weibull(0.63, 2.3)
	(2) $f_x(x) = \lambda m x^{m-1} e^{-\lambda x^m}, x \geq 0$ : Weibull(0.879, 1.77)
일반차로 변경	(3) $f(x) = \frac{(\lambda x)^{m-1} e^{-\lambda x}}{(m-1)!} \lambda, x \geq 0$ : Erlang(0.343, 3)
	(4) $f_x(x) = \lambda m x^{m-1} e^{-\lambda x^m}, x \geq 0$ : Weibull(1.1, 1.87)

- (1) 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간분포
- (2) 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간분포
- (3) 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간분포
- (4) 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간분포

〈표 10〉 현장관측 자료

구분	$\chi^2$	$\chi^{2*}$	$H_0$	
끼어들기	차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간	0.94	7.81	Reject
	차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간	0.75	7.81	Reject
일반차로변경	차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간	5.19	12.59	Reject
	차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간	8.19	12.59	Reject

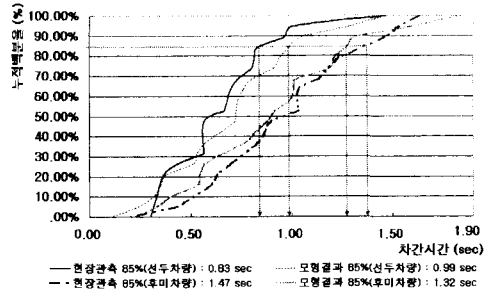
Ⅴ. 모형 평가

끼어들기와 일반차로변경에 대하여 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간과 차간거리에 대하여 평가하였으며, 세부평가 내용은 하 부단락에 제시하였다.

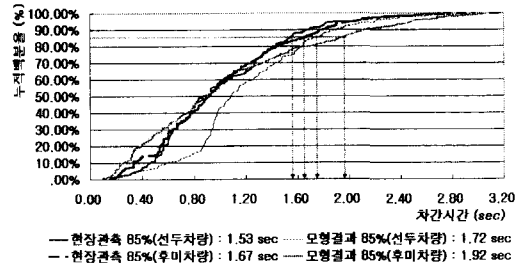
1. 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미 차량과의 차간시간

〈그림 11〉, 〈그림 12〉는 끼어들기와 일반차로변경에 대한 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간에 대한 현장관측 자료와 모형결과 자료의 비교이다.

끼어들기는 현장관측 자료의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간은 0.30 ~ 1.47 sec, 후미차량과의 차간시간은 0.20 ~ 1.63 sec, 모형결과의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간은 0.10 ~ 1.47 sec, 후미차량과



〈그림 11〉 끼어들기



〈그림 12〉 일반차로변경

〈표 11〉  $\chi^2$ -test의 결과

구분	차량속도평균	차량속도표준편차	차량발생분포
차로변경 시작차로	36.33 kph	16.69 kph	지수분포 m = 4 sec
차로변경 종료차로	34.54 kph	18.95 kph	지수분포 m = 6 sec
가·감속 차로길이	300 m		

의 차간시간은 0.22 ~ 1.83 sec 범위 내에서 이루어지는 것으로 나타났다.

85% 운전자를 기준으로 차간시간의 경우 끼어들기와 일반차로변경 모두 차로변경차량은 차로변경 종료차로 선두차량보다 차로변경 종료차로 후미차량과 더 큰 차간 시간을 이용하여 차로변경 하는 것으로 분석 되었다.

〈표 11〉은 현장관측 자료의 분포와 모형결과 분포와의 동일성 여부를 판단하기 위하여 신뢰수준 95%로  $\chi^2$ -test검정을 하였으며 검정하기 위한 가설은 다음과 같다.

$H_0$  : 모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따르지 않는다.

$H_1$  : 모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따른다.

검정결과  $H_0$ 를 기각하여 차로변경차량과 차로변경 종

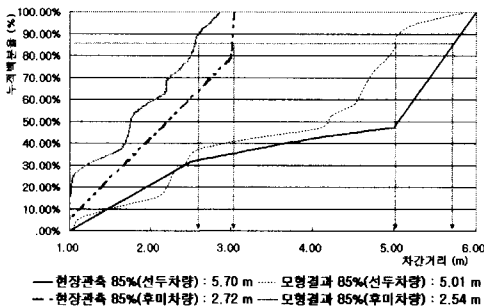
료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간은 '모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따른다.' 고 검증되었다.

## 2. 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미 차량과의 차간거리

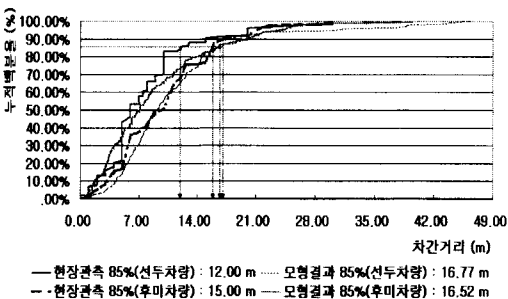
〈그림 13〉, 〈그림 14〉는 끼어들기와 일반차로변경에 대한 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간거리에 대한 현장관측 자료와 모형결과 자료의 비교이다.

끼어들기는 현장관측 자료의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간거리가 1.00 ~ 6.00 m, 후미차량과의 차간거리가 0.00 ~ 3.00 m, 모형결과의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간거리가 1.05 ~ 5.87 m, 후미차량과의 차간거리가 0.43 ~ 2.87 m 범위 내에서 이루어지는 것으로 나타났다.

85% 운전자를 기준으로 끼어들기를 할 경우 일반차로변경을 할 경우보다 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간거리 모두 작은 차간거리를 이용하는 것으로 나타났으며, 끼어들기 시 차로변경차량은 차로변경 종료차로 선두차량보다 차로변경 종료차로 후미차량



〈그림 13〉 끼어들기



〈그림 14〉 일반차로변경

〈표 12〉  $\chi^2$ -test의 결과

구분		$\chi^2$	$\chi^{2*}$	$H_0$
끼어들기	차로변경 종료차로 선두차량과의 차간거리	0.42	7.81	Reject
	차로변경 종료차로 후미차량과의 차간거리	0.94	7.81	Reject
일반차로변경	차로변경 종료차로 선두차량과의 차간거리	10.60	14.07	Reject
	차로변경 종료차로 후미차량과의 차간거리	11.14	12.59	Reject

과 더 작은 차간거리를 이용하는 것으로 나타났다.

〈표 12〉는 현장관측 자료의 분포와 모형결과 분포와의 동일성 여부를 판단하기 위하여 신뢰수준 95%로  $\chi^2$ -test검정을 실시하였으며 검증하기 위한 가설은 다음과 같다.

$H_0$ : 모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따르지 않는다.

$H_1$ : 모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따른다.

검정결과  $H_0$ 을 기각하여 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간은 '모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따른다' 고 검증되었다.

차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간 및 차간거리 분석 결과 끼어들기의 경우 차로변경차량은 차로변경 종료차로 선두차량보다 차로변경 종료차로 후미차량과 작은 차간거리를 큰 차간시간을 이용하여 차로변경 하는 것으로 분석되었는데 이 분석결과는 차로변경차량이 차로변경 종료차로 후미차량과의 안전성을 확보하기 위한 것으로 판단된다.

## Ⅶ. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 합류부와 분류부를 대상으로 (1) 차로변경행태 특성 분석 및 분포 검정을 하였으며, (2) 끼어들기 판단지표를 도출하여, (3) 끼어들기 모형을 개발하였다. 본 연구의 결과를 다음과 같이 정리하고, 연구의 향후과제를 제시하고자한다.

### 1. 결론

1) 합류부와 분류부의 현장관측 자료를 통합하여 분석한 차로변경행태 특성 및 적합도 검정 결과는 다음과 같다.

- 차간시간의 경우 85% 운전자를 기준으로 차로변경차량은 차로변경 종료차로 선두차량과 1.88 sec, 후미차량과 1.63 sec 의 차간시간을 갖는 것으로 나타났으며, 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 차간시간은 Erlang(0.343, 3) 분포, 차로변경차량과 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간시간은 Weibull (1.12, 1.81) 분포를 따르는 것으로 분석되었으며,

- 상대속도의 경우 85% 운전자를 기준으로 차로변경차량은 차로변경 종료차로 선두차량과 3.55 m/sec, 후미차량과 3.46 m/sec의 속도 차이가 있는 것으로 나타났으며, 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두차량과의 상대속도는 Lognormal (11.8, 4.6) 분포, 차로변경차량과 차로변경 종료차로 후미차량과의 상대속도는 Lognormal (6.01, 4.27) 분포를 따르는 것으로 분석되었으며,

- 차로변경을 수행하는 85% 운전자를 기준으로 가속도의 경우 3.45 m/sec<sup>2</sup>, 감속도의 경우 -2.78 m/sec<sup>2</sup> 의 가·감속을 하는 것으로 나타났으며, 차로변경차량의 가속 분포는 Lognormal (1.24, 2.5) 분포, 차로변경차량의 감속 분포는 Normal(-1.51, 1.27) 분포를 따르는 것으로 분석되었다.

- 본선차로의 밀도가 높아짐에 따라 차간시간은 작은 차간시간을 이용하는 것으로 나타났으며, 상대속도도 작아지는 것으로 나타났으며, 차로변경시점은 밀도가 높아짐에 따라 차로변경 시점이 가·감속차로의 종점에 가까운 지점에서 나타날 것으로 예상하였으나, 85% 운전자를 기준으로 가·감속차로 길이가 300 m (100%)인 도로조건에서 밀도가 높아짐에 따라 차로변경차량 운전자는 가·감속차로 시점에서부터 126 m (42%)이내에서 차로변경이 이루어지는 것으로 분석되었다.

2) 끼어들기 상황에서 감속하는 차로변경 종료차로 후미차량의 속도 분포인 Gamma(2.74, 1.74)분포의 평균값 6.78m/sec, 분산 9.84m/sec<sup>2</sup> 을 끼어들기 판단지표로 도출하였다.

3) 끼어들기와 일반차로변경에 대하여 차로변경차량과 차로변경 종료차로 선두 및 후미차량과의 차간시간과 차간거리에 대한 현장관측 자료의 분포와 모형결과 분포의 동일성 여부를 판단하기 위해 신뢰수준 95%로  $\chi^2$ -test 검정을 실시 한 결과 "모형결과 분포는 현장관측 자료의 분포를 따른다." 고 검증되었다.

- 차간시간의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차

로 후미차량과의 차간시간이 현장관측은 0.20 ~ 1.63 sec, 모형결과는 0.22 ~ 1.83 sec 범위 내에서 끼어들기가 이루어지는 것으로 나타났으며,

- 차간거리의 경우 차로변경차량과 차로변경 종료차로 후미차량과의 차간거리가 현장관측은 0.00 ~ 3.00 m, 모형결과는 0.43 ~ 2.87 m 범위 내에서 끼어들기가 이루어지는 것으로 나타났다.

## 2. 향후 연구과제

본 연구의 결과를 기반으로 하여 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위한 향후 연구과제는 다음과 같다.

1) 본 연구의 범위를 연속류의 합류부와 분류부만을 대상으로 하였으나 기본구간을 포함한 연속류 전체구간에서의 차로변경 행태를 반영하는 모델을 개발하기 위해 향후 기본구간을 포함한 통합 모형 연구가 필요하다.

2) 본 연구에서의 현장관측 지점을 구배가 없는 직선구간을 대상으로 하였으나 향후에는 종단선형 및 구배 등의 도로조건을 고려하는 것이 필요하다.

3) 조사 지점수를 추가하여 모델 개발에 반영하면 모형에 대한 신뢰도를 향상 시킬 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. Ahmed, K.I., B.A. Moshe., and N. Haris (1996), "Modeling of freeway lane changing and gap acceptance behavioral", Transportation and Traffic Theory.
2. Drew, D. R., L.R. Lamotte, J.H. Buhr, and J.A. Wattle Worth(1967), "Gap acceptance in the freeway merging process" Texas Transportation Institute.
3. "HIGHWAY CAPACITY MANUAL"(2000), Transportation Research Board.
4. Kita, H.(1999), "A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis", Transportation Research Part A, Vol.33.
5. Mahmassani, H. and Y. Sheffi(1981), "Using gap sequences to estimate gap acceptance functions", Transportation Research, Part B

15B, pp.143~148.  
6. Yang, Q. and H.N., Koutsopoulos(1996), "A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems", Transportation Research C 4(3), pp.113~129.

7. Zhang, Y., L.E. Owen, and E.C. James (1998), "Multiregime Approach for Microscopic Traffic Simulation", Transportation Research Record 1644.  
8. 황순연(2002), "도시고속도로 합류부에서의 간격수락모형에 관한 연구", 서울대학교 석사학위논문.

✻ 주 작 성 자 : 김경희

✻ 논문투고일 : 2004. 8. 30

논문심사일 : 2004. 10. 21 (1차)

2004. 11. 8 (2차)

심사판정일 : 2004. 11. 8

✻ 반론접수기한 : 2005. 4. 30