

■ 論 文 ■

## 고속도로 합류 및 엇갈림구간에서의 차로변경 분포 분석에 관한 연구

Analysis of Lane-Changing Distribution within Merging and Weaving Sections of Freeways

김 영 춘

(한국교통연구원 도로교통연구실 연구원)

김 상 구

(전남대학교 교통물류학부 교수)

— 목 차 —

- |  |  |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구의 배경 및 목적</p> <p>2. 연구의 범위 및 방법</p> <p>II. 이론적 고찰</p> <p>1. 교통류 상태</p> <p>2. 차로변경 행태</p> <p>III. 자료수집 및 분석구간 정의</p> | <p>1. 자료수집 및 가공</p> <p>2. 분석구간 정의</p> <p>IV. 자료분석</p> <p>1. 교통류 특성</p> <p>2. 차로변경 특성 분석</p> <p>V. 결론 및 향후 연구방향</p> <p>참고문헌</p> |
|--|--|

Key Words : 반복정체구간, 차로변경, 교통와해, 안정류, 정체류  
 Recurrent Congestion Section, Lane-Changing, Breakdown, Stable Flow, Congested Flow

— 요 약 —

일반적으로 차로변경 형태는 선택적 차로변경과 강제적 차로변경 등의 두 가지 형태로 구분된다. 선택적 차로변경은 운전자가 원하는 운전상태를 유지하기 위해 선택적으로 차로를 변경하는 경우이며 강제적 차로변경은 운전자가 현재 차로에서 반드시 차로를 변경해야 하는 경우로 합류부 또는 분류부와 같은 반복정체 구간에서 발생하므로 연속류 도로의 교통상태에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 먼저 고속도로의 대표적인 반복정체 구간인 합류부와 엇갈림 구간에서 수집한 항공사진 개별차량 자료를 사용하여 교통량, 속도, 밀도 데이터와 차로변경 데이터를 생성하였다. 개별차량 속도 변화추이를 이용하여 각 분석구간에서 안정류와 정체류를 구분하였으며 30m 간격으로 분석구간을 구분하여 교통혼잡 전과 후의 차로변경 횟수와 차로변경지점의 변화를 차로변경 분포를 통하여 비교분석하였고 정체교통류를 대상으로 차로변경 분포를 이용하여 본선 차로간 전이과정에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구는 본선 차로간의 차로변경 분포와 본선과 연결로간의 차로변경 행태가 고속도로의 교통류 흐름에 따라 변화하는 영향을 분석하여 고속도로 반복정체구간의 차로변경 모형을 개발하는데 기초이론 제시를 목적으로 수행되었다.

The lane-change behavior usually consists of discretionary lane-change and mandatory lane-change types. For the first type, drivers change lanes selectively to maintain their own driving condition and the second type is the case that the drivers must change the current lane, which can occur in recurrent congestion sections like merging and weaving sections. The mandatory lane-change behavior have a great effect on the operation condition of freeway. In this paper, we first generate data such as traffic volumes, speeds, densities, and the number of lane-change within the merging and weaving sections using the data of individual vehicle collected from time-lapse aerial photography. And then, the data is divided into the stable and congested flow by analyzing the speed variation pattern of individual vehicles. In addition, the number of lane-changing from ramp to mainline within every 30-meter interval is investigated before and after traffic congestion at study sites and the distribution of lane-changing at each 30-meter point is analyzed to identify the variation of lane-changing ratio depending on the stable and congested flows. To recognize the effect of mainline flow influenced by ramp flow, this study also analyzes the characteristics of the lane-changing distributions within the lanes of mainline. The purpose of this paper is to present the basic theory to be used in developing a lane-changing model at the merging and weaving sections on freeways.

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D01298).

# I. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

일반적으로 도로상에서 발생하는 교통혼잡은 크게 반복적인 혼잡과 비반복적인 혼잡으로 분류할 수 있다. 반복적인 혼잡은 도로의 용량을 교통 수요가 초과하여 지체와 정체가 반복되는 혼잡을 의미하며 특정 시간, 특정 구간에 주기적으로 발생한다. 이와 같은 혼잡은 주로 고속도로 합류부, 분류부, 엇갈림, 차로폭감소, 오르막, 급커브 구간 등의 반복정체구간에서 발생하며, 이러한 반복정체구간에서 발생하는 교통혼잡이 고속도로 기본구간까지 전이되어 고속도로 전체의 서비스 수준을 떨어뜨리는 결과로 이어진다. 이러한 이유로 고속도로의 효율적인 교통관리를 위해서는 반복정체구간의 교통특성에 대한 연구가 필요하다.

반복정체구간의 교통특성은 주로 거시적인 관점에서 교통량, 속도, 밀도 등을 이용하여 해석되었으며, 미시적으로는 차로변경, 차량추종, 차두시간 등을 이용하여 해석되었다. 하지만 차로변경의 경우 주로 차량 간의 상호작용으로 인한 운전자의 의사결정 행태나 간격수락모형 등을 연구하기 위해서 차로변경 행태에 대한 분석을 하였으며 차로변경 행태가 고속도로 교통류 흐름에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 고속도로의 대표적인 반복정체구간인 합류부 구간과 엇갈림 구간의 실제 항공사진 자료를 이용하여 본선간의 차로변경 행태와 본선과 연결로간의 차로변경 행태가 고속도로의 교통류 흐름에 따라 변화하는 영향을 분석하여 효율적인 고속도로관리를 위한 기초이론 제시를 목적으로 한다.

## 2. 연구의 범위 및 방법

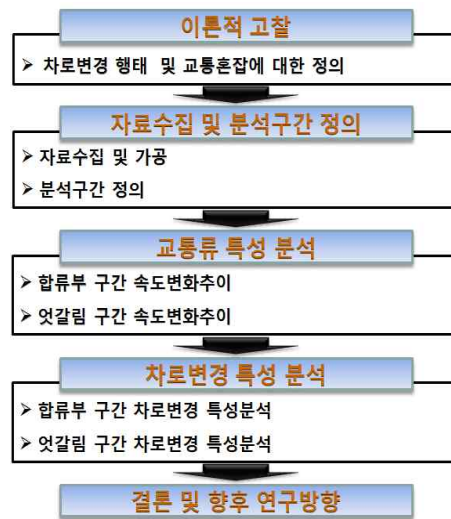
일반적으로 차로변경 형태는 선택적 차로변경과 강제적 차로변경 등의 두 가지 형태로 구분된다. 선택적 차로변경은 운전자가 원하는 서비스 상태(상대 거리 및 속도 등)를 유지하기 위하여 차로를 변경하는 경우이며 강제적 차로변경은 운전자가 목적지를 변경하기 위하여 반드시 차로를 변경해야 하는 경우로 특히, 합류부 또는 분류부와 같은 유출입구간에서 주로 발생하고 이구간은 주로 반복정체구간이므로 연속류 도로의 교통상태(서비스 수준)에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 교통

혼잡 발생에 따른 차로변경 행태를 분석하여 연속류 도로상에서 차로변경이 반복정체구간의 교통류 상태에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

본 연구에서는 먼저 고속도로의 대표적인 반복정체구간인 합류부 3개구간과 엇갈림 2개 구간에서 수집한 항공사진 개별차량 자료를 사용하여 1초와 30초 단위 교통량, 속도, 밀도 데이터와 차로변경 데이터 및 개별차량 가·감속 데이터를 생성하였다. 먼저 1초와 30초 단위 교통량, 속도, 밀도 데이터를 분석하여 반복정체구간의 교통류 특성을 분석하였고, 합류 및 엇갈림구간 내에서 30m 간격의 각 지점 및 차로별 가·감속 특성을 교통혼잡 발생 전과 후로 구분하여 분석하였다. 또한, 선택적 차로변경이 주로 발생하는 본선차로와 강제적 차로변경이 발생하는 가·감속차로에서의 차로변경에 대해서도 30m 간격으로 차로변경 횟수를 산출하여 교통혼잡 전과 후의 차로변경 횟수와 차로변경지점의 변화를 분석하였으며 차로변경 발생시 가·감속 패턴에 대해 비교분석을 수행하여 다양한 관점에서 연구를 수행하였다.

## II. 이론적 고찰

이 장에서는 연구를 수행하기에 앞서 기존 연구들을 통하여 교통혼잡에 대한 정의와 기준을 검토하고 각 교통상황에 있어서 차로변경에 대한 다양한 접근 방법과 연구내용에 대하여 살펴보았다.



<그림 1> 연구수행 흐름도

### 1. 교통류 상태

연속류 도로상의 교통류는 기본적으로 비혼잡과 혼잡 교통류로 구분되며 이러한 교통류에 대한 2개의 분류는 현재까지 여러 연구들에 사용되어져 왔다(Hall et al. 1992; Banks 2002). 비혼잡한 교통류인 안정류 상태의 차량 운전자들은 스스로 속도를 선택하여 운전하는 반면에 혼잡한 교통류인 불안정류 상태의 운전자들은 차량 속도의 범위를 선택하는데 제한적으로 운전하게 된다(Kockelman, 2001). Polus와 Pollatschek(2002)는 <그림 2>와 같이 속도-교통량 관계도를 이용하여 비혼잡과 혼잡한 교통류 사이에 추가적으로 안정된 밀집 교통류 상태(DCS flow)가 존재한다고 제안하였고 DCS 교통류에서 불안정류로 변화하는 상태를 교통와해 교통류로 정의하였고 높은 밀도와 차로변경 그리고 속도변화가 서로 연계되어 자연적으로 발생한다고 하였다.

이러한 안정된 밀집 교통류 상태(DCS flow)에서의 속도는 비혼잡한 상태에서의 속도보다 더 낮은 속도를 나타내지만 80km/hr 이하보다 낮은 속도를 나타내지는 않으며, 이 상태에서 가장 낮은 속도는 서비스 수준(LOS) E의 범위 내에 포함되는 것으로 나타났다(US TRB, 2000). 따라서, 안정된 밀집 교통류 상태(DCS flow)는 비혼잡(안정류)과 혼잡교통류(교통와해 교통류) 상태의 중간단계에 위치한 교통류 상태로 정의하였다(AASHTO, 2004).

US HCM(2000)에서는 병목구간 또는 교통와해 발생지점을 기준으로 상류부의 교통류 상태는 대기행렬이 뒤로 이어지는 상태이며 이 상태 동안 교통와해 발생지점 하류부의 교통상태에 대해 기술하였다. 즉, 대기행렬 풀림 교통류 상태(교통와해 발생지점의 하류부 지점으로

차량이 정체에서 풀리는 상태)는 속도에 의한 도로 서비스 수준이 E에서 F로 떨어지는 상태로써 설명하였다.

Banks (2002)는 교통와해와 병목구간 또는 도로의 불균형(이질성)은 서로 연관되어 있다고 하였으며 교통와해와 관련하여 다음과 같이 설명하였다.

- 거시적인 교통류 불안정성은 교통량의 진동과 속도 감소와 속도가 감소하는 지점에서의 밀도 변화 등으로 나타난다.
- 미시적인 교통류 불안정성은 차량추종과 차로변경 등의 차량간 상호작용 사이에 발생한다.
- 엇갈림, 차로감소, 합류 구간과 같은 기하구조는 차량의 이동에 영향을 주어 교통류의 불안을 가져온다.
- 차량고장이나 낮은 속도로 운전하는 운전자 또는 교통사고와 같은 돌발상황 발생시 교통와해가 발생한다.
- 자연적으로 발생하는 교통와해는 교통수요가 용량을 초과할 때 발생한다.

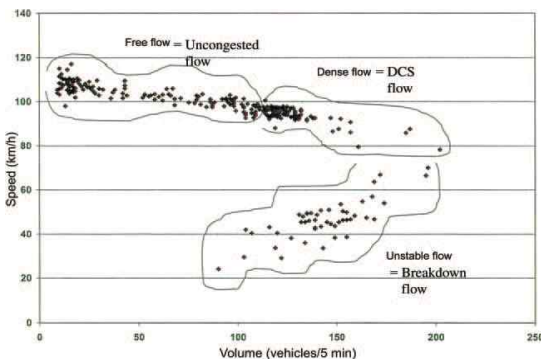
### 2. 차로변경 형태

Gazis(1961)는 연속모형에 의한 접근방법으로 차로변경에 대한 모형을 제시하였으며 차로변경이 발생할 모형을 연속방정식과 밀도의 진동원리에 기초하여 연속모형을 제시하였다. 또한, Gazis(1961)는 차로간의 이동을 완료하는데 필요한 상호작용 시간, 불연속적인 속도-밀도 관계, 평균도착율, 시간에 다른 도착률과 같은 현실적인 요소를 포함시켰으며 차로변경이 평형상태의 밀도와 차로간 밀도의 차이에 비례한다는 가정하에서 밀도에 의한 연속모형을 제시하였다.

Worrall(1971)은 확률론적인 접근방법으로 차로변경에 대한 모형을 제시하였으며 차로변경을 구성하는 요소를 차로변경의 발생빈도와 그 행태에 관한 것이라고 보았으며 차로변경이 모든 차량에 대해서 발생하는 확률이 서로 독립적이라는 가정을 바탕으로 차로변경이 발생할 확률모형을 교통량과 차로변경 발생빈도의 함수로 나타내었다.

Zhang et al.(1998)은 차로변경을 세 가지 형태로 구분하였다.

첫 번째 형태는 선택적 차로변경으로 운전자가 원하는 속도 및 운전상태를 유지하기 위하여 운전자의 선택



<그림 2> 교통류 상태 구분

에 의해 차로변경을 하게 되며 운전자의 공격성, 희망속도, 정상 및 최대 감·가속도, 인내 등의 운전자 특성과 차로변경차량과 선두차량과의 상대거리, 상대속도에 의해 차로변경이 이루어진다.

두 번째는 강제적 차로변경으로 합류부, 분류부, 차로감소, 잇갈림 구간에서 주로 발생하며 운전자의 진행경로상 연결로에서 본선으로 진입하거나 본선에서 연결로로 진출하기 위하여 반드시 차로변경을 하는 경우이다. 만약 후미차량의 상대적인 조작에 의해 간격수락을 이용할 수 없으면 속도를 낮춤으로서 간격을 만들어 차로변경을 하게 된다.

세 번째 형태는 예상되는 차로변경으로 진행 경로상 미리 정해진 차로를 주행하기 위하여 차로변경을 수행하는 형태이다. 이러한 차로변경은 유출 또는 회전하는 운전자가 감속차로로 진입하기 전에 미리 유출 또는 회전하는데 유리한 본선의 차로로 이동하기 위해 차로변경을 수행하게 된다.

정성봉 등(2002)은 차로별 속도차가 차로변경에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과 속도차가 0~2.0m/s 구간에서는 속도차가 증가할수록 차로변경율이 높아졌으나, 2~11.52m/s 구간에서는 차로변경율이 오히려 낮아지는 것으로 분석하였으며 분석결과를 토대로 속도차의 증감에 대해 운전자로 하여금 차로변경을 유도하는 요소와 함께 저항하게 하는 요소가 있다고 보았으며 2.0m/s 이상의 속도차에서 차로변경에 대한 저항이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 분석하였다.

김경희 등(2004)은 끼어들기 모형을 개발하기 위하여 연속교통류의 합류부와 분류부를 대상으로 차로변경행태를 분석한 결과 차간시간의 경우 차로변경차량과 차로변경종료차로 선두차량과의 차간시간은 Erlang(0.343, 3) 분포, 후미차량과의 차간시간은 Weibull(1.12, 1.81) 분포, 상대속도의 경우 차로변경차량과 차로변경종료차로 선두차량과의 상대속도는 Lognormal(11.8, 4.6) 분포, 후미차량과의 상대속도는 Lognormal(6.01, 4.27) 분포, 차로변경차량의 가속분포는 Lognormal(124, 2.5) 분포, 감속분포는 Normal(-1.51, 1.27) 분포를 따르는 것으로 분석하였다.

이승준 등(2005)은 수원IC와 신갈JC의 현장조사 자료를 이용하여 가속길이에 따른 합류행태 및 합류부 교통특성을 분석하였으며 그 결과 정체시 가속차로의 길이가 길수록 혼잡구간의 범위를 확장시키고 또한 혼잡의 강도를 심화시키는 결과를 초래한다고 분석하였다.

### III. 자료수집 및 분석구간 정의

#### 1. 자료수집 및 가공

본 연구에서는 다양한 교통류 수준에서 교통류 변수(교통량, 속도, 밀도) 특성을 파악할 수 있고, 연결로를 포함한 일정 구간길이 이상의 지점들을 선정하여 분석하였다. 분석자료 수집기준으로는 본 연구목적에 맞는 교통류의 미세한 행태분석을 위하여 연결로와 본선 개별차로 각각 개별차량 특성변수값(차량ID, 차종, 속도, 시각, 위치 등)을 포함하고 있어야 하고, 이를 위해 <표 1>과 같은 항공사진 자료를 수집하여 매우 짧은 시간간격 동안의 교통변수(교통량, 속도, 차로변경 횟수 등)로 가공하여 사용하였다.

본 연구에서는 고속도로의 대표적인 반복정체구간인 합류부구간의 교통류(교통량, 속도, 밀도) 수준에 따른 차로변경 행태를 분석하기 위하여 미국 FHWA(1985)에서 수행하였던 항공 촬영사진으로부터 개별 차량의 위치를 계수화(digitizing)한 자료를 본 연구의 목적에 맞게 일부 가공하여 사용하였다.

고속도로 교통자료가 수집된 18개 지점 중에서 본 연구의 관심구간인 연결로 합류부 3개 지점과 잇갈림 2개 지점을 대상으로 자료를 수집하였고 자료변환을 수행하였다.

원시자료 파일형식은 합류부와 잇갈림구간을 포함하는 일정거리의 연속적인 순서에 따른 차량을 포함한 1초 프레임(frame) 순으로 정리되어 있다. <그림 3>에서 보

<표 1> 자료수집 내용

자료내용	항공사진 자료
자료 출처	Federal Highway Administration(1985년)
자료 구성	원시 자료, 기하구조 도면
구간 형태	잇갈림 구간(7개 구간) 합류 구간(3개 구간) 분류 구간(2개 구간) 커브 구간(2개 구간) 차로폭감소 구간(2개 구간) 오르막 구간 (2개 구간)
자료 필드 구성	프레임번호, 차량ID, 차종, 차량길이, 속도, 시점부로 부터의 거리, 오른쪽 측면으로부터의 거리, 차량 색상, 차로
단위	프레임 : 1초 거리 : feet 속도 : mile/h
수집시간	1시간
가능한 분석	교통량, 속도, 밀도, 점유율, 차두시간, 차두간격, 차간간격, 차로변경, 가속도, 시공간도 등 미시적 데이터 분석 가능

주: 본 연구에서는 feet와 mile을 m와 km로 변환하여 연구를 수행하였음

파일(F)	편집(E)	서식(O)	보기(V)	도움말(H)				
203	3	1	17	57	1981	11	1	1
204	3	1	17	56	1463	10	1	1
205	3	1	17	57	1548	8	1	1
200	5	1	14	0	1080	9	1	1
201	5	1	14	48	1150	9	1	1
202	5	1	14	49	1223	8	1	1
203	5	1	14	48	1294	10	1	1
204	5	1	14	47	1363	10	1	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9

1: 프레임 번호	5: 속도(mile/hour)
2: 차량 ID	6: 시점으로부터의 거리(feet)
3: 차종 코드	7: 길이개부터의 거리(feet)
4: 차량 길이(feet)	8: 차량 색상 코드
	9: 차로 번호

<그림 3> 항공사진 원시자료 파일(예시)

는 바와 같이, 각 구간별 원시자료 파일은 계수화된 1시간(약 3,600프레임) 정도가 포함되어 있으며, 각 시간 프레임(초)별로 차량ID, 차종, 차량길이, 주행속도, 차로위치 등 1초 단위로 항공촬영 영역내 모든 차량들의 위치를 추적할 수 있는 매우 유용한 자료이다.

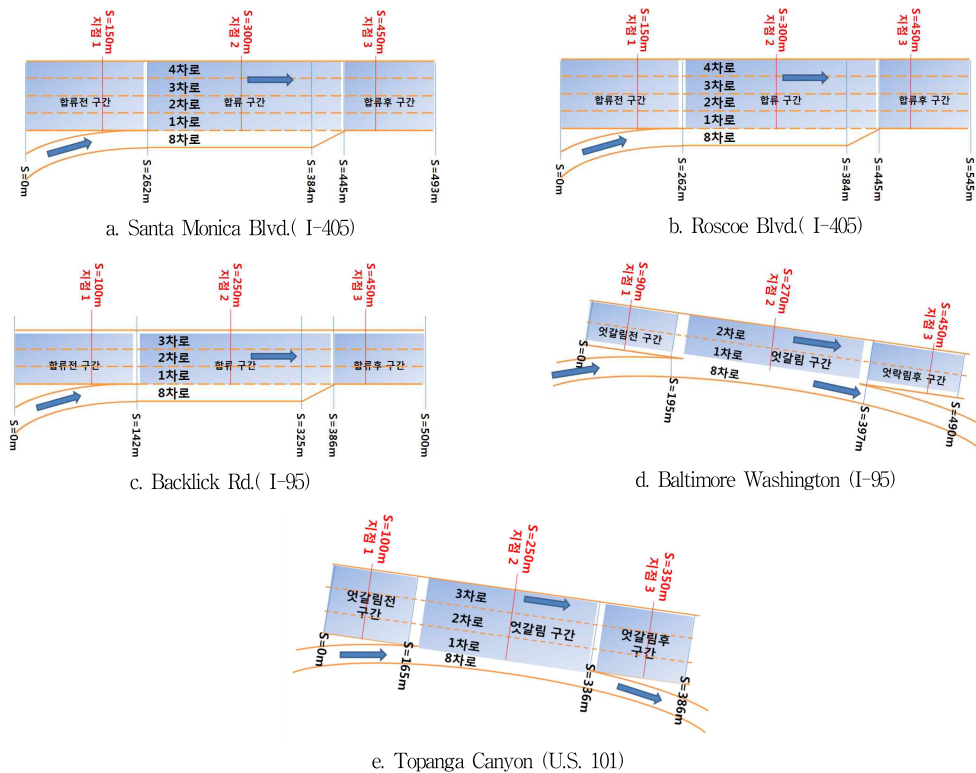
원시자료는 1초 단위로 해당공간내 차량위치와 관련된 자료를 제공하므로, 일반적으로 교통분석에서 사용하는 지점별 교통변수로 변환하는 작업이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 해당 고속도로 전체 구간 중 가속차로

길이구간에 해당하는 합류구간(또는 엇갈림 구간)을 일정간격(30m)과 수집간격(1초 또는 30초) 단위의 교통변수를 산출할 수 있는 프로그램을 작성하였으며 이를 이용하여 각 차로별 관측지점별 분석단위 동안 교통량, 속도, 밀도자료를 생성하였다. 또한, 교통류 수준과 차로 변경 행태와의 관계를 분석하고자 개별차량의 차로변경 시 지점 및 가감속도 자료도 생성하였다.

분석자료는 연속된 프레임간 동일차량의 위치변화의 차이를 이용하여 개별차량의 차로변경 지점/시점, 감가속도와 실제 고속도로에 설치된 루프검지기과 같은 형식으로 각각의 분석구간 대표지점에서 1초와 30초 간격으로 교통량, 평균속도 밀도자료를 생성하는 방법을 수행하였다.

## 2. 분석구간 정의

본 연구에서는 총 18개의 수집 구간의 속도자료를 검토한 결과, 교통혼잡이 발생한 1개의 엇갈림 구간과 3개의 합류 구간을 분석구간으로 설정하였으며 안정류 상태와 교통혼잡 상태를 비교하기 위하여 1개의 엇갈림 구간



e. Topanga Canyon (U.S. 101)  
<그림 4> 조사지점의 기하구조 및 분석구간

<표 2> 자료수집 지점 현황

구간		구간길이	선형	차로수
합류부	Santa Monica Blvd.(I-405)	493m	직선구간 +3%	4/1
	Roscoe Blvd. (I-405)	545m	직선구간 +0.38%	4/1
	Backlick Rd. (I-95)	500m	R=8,732m -0.4%	3/1
엇갈림	Baltimore Washington(I-95)	490m	R=1,746m +2%	2/1
	Topanga Canyon (U.S. 101)	386m	R=582m, 872m -3%	3/1

주 : 차로수는 본선/연결로 차로수입

을 추가 분석구간으로 선정하였다.

본 연구에서 사용한 합류구간 및 엇갈림구간 5개 대상지점의 기하구조 및 공간적 범위는 <그림 4>와 같고, 분석 대상지점을 세 구간(합류전, 합류, 합류후 또는 엇갈림전, 엇갈림, 엇갈림후)으로 다시 세분하고 각 구간의 대표지점을 선정하여(<그림 4> 참조) 1초와 30초의 수집 간격으로 각 관측지점별 분석단위 동안 교통량, 속도, 밀도자료를 생성하였다. 또한, 합류구간 및 엇갈림구간을 30m 간격으로 각 차로별 차로변경횟수를 산출하여 교통류 상태가 변화함에 따른 각 차로별 차로변경 행태 변화를 분석하였다. 본 연구에서 차로변경 횟수의 수집 간격을 30m 간격으로 선정할 이유는 1시간 동안의 안정류와 정체류의 차로변경 횟수를 15, 30, 45m 간격으로 차로변경 분포를 검토한 결과, 15m 간격은 간격별 차로변경 횟수가 작아 분포의 형태가 명확히 나타나지 않았으며 45m 간격은 간격계급의 수가 너무 적어 합류

또는 엇갈림 구간의 차로변경 분포를 분석하기가 어려울 것으로 판단하였으며 30m 간격은 차로변경 분포의 형태가 비교적 명확히 나타났기 때문이다.

본 연구에서는 미국 FHWA의 자료를 그대로 사용하여 미국 차로 구분기준에 따라 본선 외측차로부터 1차로로 시작되고, 연결로 가속차로는 8차로로 그대로 적용하였다.

#### IV. 자료 분석

##### 1. 교통류 특성

본 연구의 분석과정에서 분석지점별 30초와 15분 집계단위의 교통량, 속도, 밀도에 대한 분석을 수행하였으나 30초 집계단위의 교통량, 밀도 자료는 속도 자료에 비해 뚜렷한 특징을 찾을 수가 없었으며 15분 집계단위는 집계시간 및 분석구간에 따라 근소한 차이를 보이지만 미시적인 교통류 상태와 특성을 파악하기에는 어려움이 있는 것으로 판단하여 분석과정에서 교통량, 밀도에 대한 분석을 제외시켰으며 본 연구에서는 속도변수가 교통류 상태와 특성을 파악하는데 가장 명확하다고 판단되어 속도에 대한 분석만을 수행하였다.

본 연구에서는 속도를 기준으로 안정류와 정체류를 구분하기 위하여 30초 집계단위의 속도-교통량 관계도를 산출하여 임계교통량 일 때의 속도를 교통류 상태를 분류하는 기준 속도로 선정하였다. 전체 5개 분석구간 중 Backlick 구간은 시작지점에서 이미 정체가 발생된 상

<표 3> 분석구간 1차로 15분 간격 교통량, 밀도 자료

(단위: 대/15분, 대/km)

구간		0~15		15~30		30~45		45~60	
		교통량	밀도	교통량	밀도	교통량	밀도	교통량	밀도
Santa Monica Blvd.	합류전	375	41.71	361	46.64	363	51.49	357	55.89
	합류	435	48.69	428	55.2	422	55.33	433	59.07
	합류후	548	33.91	521	33.96	548	36.89	544	38.58
Roscoe Blvd.	합류전	269	13.87	337	19.22	309	16.78	318	17.2
	합류	294	10.24	410	20.2	389	16.18	408	16
	합류후	435	15.24	522	24.36	517	22.62	534	21.11
Backlick Rd.	합류전	249	14.84	296	19.87	297	17.36	281	16.53
	합류	377	17.87	452	29.31	451	23.97	411	21.42
	합류후	384	18.2	457	25.33	472	26.39	471	29.22
Baltimore Washington	엇갈림전	326	18.98	440	23.91	444	25.44	476	37.71
	엇갈림	199	8.07	267	11.11	296	12.42	306	14.96
	엇갈림후	228	6.71	310	11.4	312	10.02	364	12.22
Topanga Canyon	엇갈림전	407	18.53	437	20.47	464	21.6	468	21.53
	엇갈림	411	9.86	446	10.71	474	12.67	464	11.11
	엇갈림후	418	10.2	448	11.22	465	12.71	463	11.84

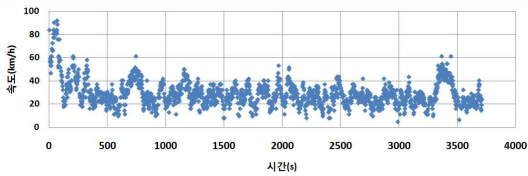


태로 판단되어 기준속도 선정을 제외시켰으며 Topanga Canyon 구간은 정체가 발생하지 않아 기준속도 선정을 제외하였다. 세 구간의 기준속도는 58km/h~63km/h 사이에 나타났으며, 본 연구에서는 분석대상구간의 속도-교통량 관계도와 시간별 속도변화 추이그래프에서 나타난 안정류 및 DSC 교통류, 대기행렬풀림 교통류 등 종합적으로 판단할 때 모든 구간의 교통혼잡의 속도기준을 60km/h로 설정하는 것이 가장 안정적으로 안정류와 정체류를 분류하는 것으로 판단하였다. 교통혼잡의 속도기준을 토대로 각 분석구간의 교통혼잡이 발생한 시간대를 확인한 후 안정류와 정체류로 구분하여 교통류 특성분석을 수행하였다.

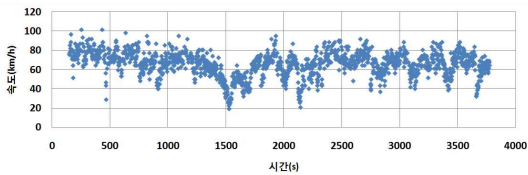
1) 합류부 구간

Santa Monica 1차로의 300m 지점의 개별차량 속도변화추이를 보면, 속도가 90초 후 60km/h 이하로 떨어진 후 회복되지 않았으므로 90초 후 지속적으로 교통혼잡이 발생한 것으로 판단된다.

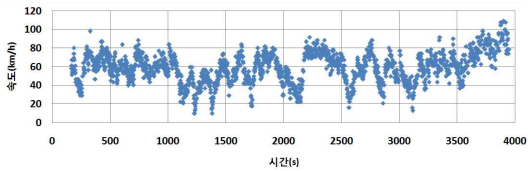
Roscoe 1차로의 300m 지점 개별차량 속도변화추이에서는 1,400초 이후 속도가 60km/h이하로 떨어졌다가 1,700초 후 60km/h 이상의 속도로 회복되었으며 1,700



a. Santa Monica 구간 300m 지점(1차로)



b. Roscoe 구간 300m 지점(1차로)



c. Backlick 구간 250m 지점(1차로)

<그림 5> 합류부 구간 속도변화추이(1초 집계간격)

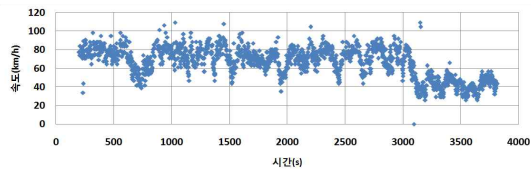
초 후에는 60km/h를 기준으로 진동하는 패턴을 보이며 불안정한 교통류 상태를 나타내었다.

Backlick 1차로 250m 지점의 개별차량 속도변화추이를 보면 1,080초까지 60km/h를 기준으로 진동하는 패턴을 보이며 불안정한 교통류 상태를 나타내었고 1,080초부터 1,450초까지 60km/h 이하의 속도를 나타내었으며 1,450초 이후 20km/h~90km/h 사이에 큰 폭으로 진동하다가 3,600초 이후 60km/h 이상의 속도를 나타내어 안정류로 회복된 것으로 분석된다.

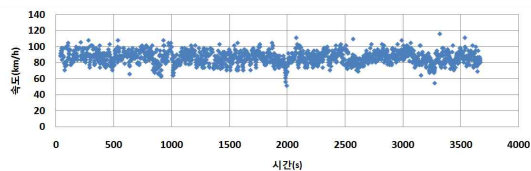
2) 엇갈림 구간

Baltimore Washington 구간의 90m 지점의 개별차량 속도변화추이를 보면 700초~830초 사이에 60km/h 이하로 속도가 떨어졌으며 830초 이후 평균 60km/h 이상의 속도를 유지하다가 3,100초 이후 60km/h 이하로 속도가 떨어져 교통 혼잡이 지속되는 것으로 나타났다.

Topanga Canyon 구간의 250m 지점의 개별차량 속도변화추이를 보면 조사된 모든 시간동안 60km/h 이상의 속도를 나타내어 교통혼잡이 없는 안정적인 교통상태를 보이는 것으로 판단된다.



a. Baltimore Washington 구간 90m 지점(1차로)



b. Topanga Canyon 구간 250m 지점(1차로)

<그림 6> 엇갈림 구간 속도변화추이(1초 집계간격)

2. 차로변경 특성 분석

교통류 특성 분석을 통하여 각각의 분석구간의 안정류 시간대와 정체류 시간대를 확인하였으며 이러한 결과를 토대로 안정류와 정체류 시간대의 차로변경 특성에 대하여 비교분석을 수행하였다.

<표 4> 안정류와 정체류 분석시간 간격

구간		안정류 시간대(초)	정체류 시간대(초)
합류부	Santa Monica Blvd. (I-405)	0~90	91~3,200
	Roscoe Blvd. (I-405)	0~1,400	1,401~1,700
	Backlick Rd. (I-95)	3,600~3,950	1,080~1,450
엇갈림	Baltimore Washington (I-95)	831~3,100	3,101~3,700
	Topanga Canyon (U.S. 101)	0~3,650	-

<표 4>는 안정류와 정체류의 차로변경 행태를 비교분석하기 위한 각각의 분석구간의 분석시간대를 나타낸 표로서 Topanga Canyon 구간의 경우 2,000초(s) 지점에서 60km/h 이하로 나타나는 지점이 있으나 매우 짧은 시간에 발생하였으므로 데이터의 연속성상 안정류로 판단하였으며 또한, 짧은 시간에 발생하였으므로 차로변경분포를 분석하기 위한 충분한 차로변경데이터를 확보할 수 없기 때문에 분석에서 제외하였다.

본 연구에서 사용하고 있는 차로변경데이터는 구체적으로 차로변경 횟수데이터와 차로변경 위치데이터를 의미한다.

1) 차로변경 분포

본 연구에서는 본선의 교통류 상태에 따라 차로변경 지점의 변화를 분석하기 위하여 전 구간을 30m로 분할하여 각각의 30m 간격 안에서 차로변경하는 횟수를 산출하여 차로변경 분포를 작성하였다.

Santa Monica구간의 30m 간격에 대한 차로변경 분포를 보면, 안정류 시간대에는 360m 지점에서 가장 많은 차로변경이 발생하였고 정체류 시간대에는 330m 지점에서 가장 많은 차로변경이 발생하였고 300m, 360m 순으로 차로변경이 많이 발생하였다. 안정류와 정체류를 비교해 보면, 안정류의 차로변경은 전반적으로 평균을 중심으로 좌우 대칭형의 분포형태를 나타내고 정체류의 차로변경 분포는 좌측으로 치우친 왜도가 있는 분포형태를 보인다. 이는 정체류의 차로변경 분포가 안정류의 차로변경 지점에 비해 합류구간 시점부에서 더 높은 분포를 나타내는 것을 의미한다. Santa Monica구간은 안정류 시간대가 짧은 관계로 차로변경 데이터가 매우 적어 제대로 된 분포형태가 나타났다고 판단하기 어렵다.

Roscoe 구간의 차로변경 행태를 보면, 안정류 상태에

서는 330m 지점에서 가장 많은 차로변경을 하였으며 가속차로내 시점부보다 종점부에서 더 많은 차로변경 행태가 나타났고 정체류 상태에서도 330m 지점에서 가장 많은 차로변경이 발생하였지만 안정류 상태와는 다르게 합류 시점부에서 차로변경의 비중이 안정류 상태보다 더 높게 나타난 것을 알 수 있다.

Backlick 구간의 차로변경 행태는 안정류 상태에서 240m 지점에서 가장 높은 차로변경 횟수를 보였으며 정체류 상태에서는 180m 지점에서 가장 높은 차로변경 횟수를 나타내고 이후 지점에서는 점점 감소하는 패턴을 보였다. Backlick 구간 역시 Santa Monica와 Backlick 합류부 구간과 비슷한 차로변경 행태를 나타내었는데 안정류 상태일 때는 합류구간 가운데를 중심으로 차로변경이 이루어지다가 교통류 상태가 안정류에서 정체류로 전이되면 합류시점부에서 차로변경 확률이 높아지는 것을 알 수 있다.

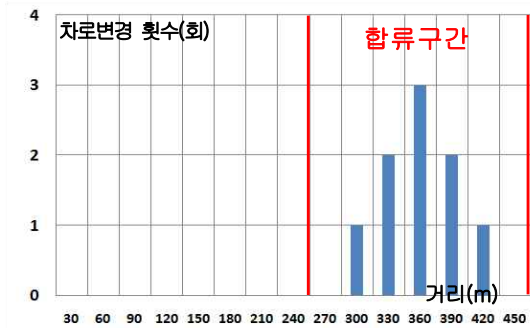
이러한 차로변경 행태는 안정류 상태에서는 본선 차량들의 속도가 높으므로 연결로에서 진입하는 차량들이 차로변경을 수행하기 위해서는 본선 차량들의 속도에 근접해야 하기 때문에 속도를 높일 수 있는 일정거리가 필요할 것이다. 하지만 정체류 상태에서는 본선 차량들의 속도가 낮으므로 연결로의 차량들이 본선의 속도에 도달하는데 필요한 거리가 짧아지기 때문에 정체류 상태에서는 합류시점부에서 차로변경이 많은 것으로 판단된다.

엇갈림 구간인 Baltimore Washington 구간의 차로변경 행태를 보면 안정류 상태에서는 300m 지점, 정체류에서는 270m 지점에서 가장 높은 차로변경 횟수를 보였으며 정체류 상태에서 합류시점의 차로변경비율이 안정류 상태에서 합류시점의 차로변경비율보다 더 높게 나타나 합류부 구간과 비슷한 차로변경 행태를 보였다.

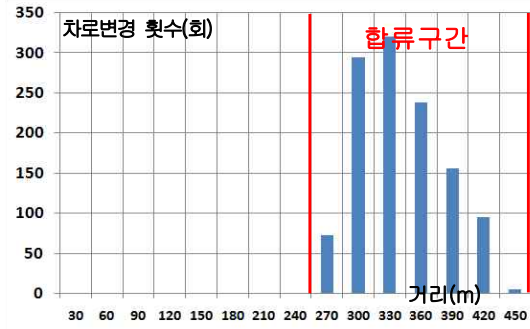
<표 5> 차로변경지점 분석결과(연결로→본선)

구간		차로변경		
		평균(m)	표준편차(m)	
합류부	Santa Monica Blvd. (I-405)	안정류	348.05	32.73
		정체류	325.71	40.44
	Roscoe Blvd. (I-405)	안정류	332.84	39.71
		정체류	329.62	49.08
	Backlick Rd. (I-95)	안정류	238.39	44.93
		정체류	226.44	55.93
엇갈림	Baltimore Washington (I-95)	안정류	281.22	43.70
		정체류	267.99	44.51
	Topanga Canyon (U.S. 101)	안정류	276.66	44.50
		정체류	-	-



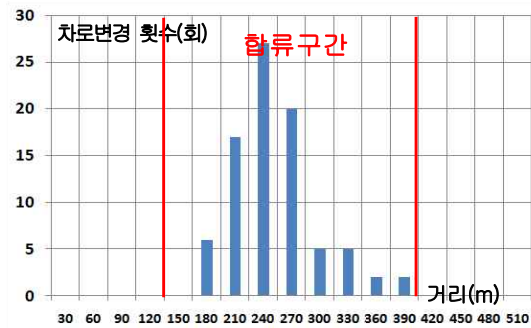


a. 안정류

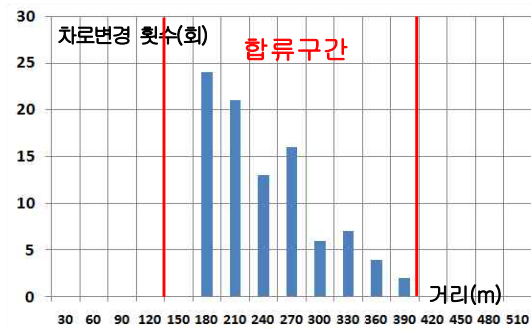


b. 정체류

<그림 7> Santa Monica 구간 30m간격별 차로변경 분포 (8차로→1차로)

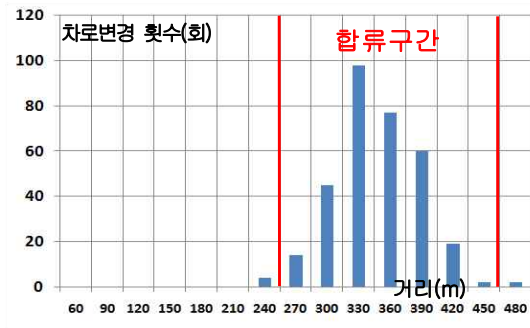


a. 안정류



b. 정체류

<그림 9> Backlick 구간 30m간격별 차로변경 분포 (8차로→1차로)

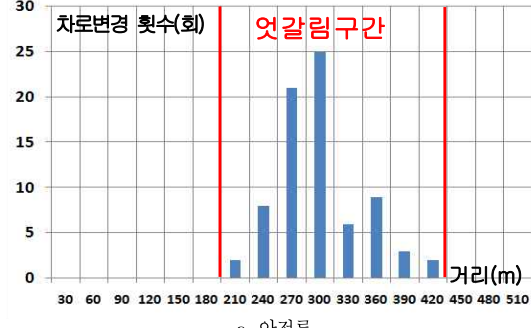


a. 안정류

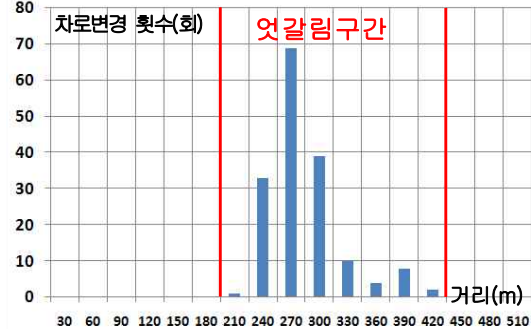


b. 정체류

<그림 8> Roscoe 구간 30m간격별 차로변경 분포 (8차로→1차로)



a. 안정류



b. 정체류

<그림 10> Baltimore Washington 구간 30m간격별 차로변경 분포(8차로→1차로)

안정류 상태의 차로변경 지점과 정체류 상태의 차로변경 지점의 평균을 살펴보면, 모든 분석구간에서 안정류 상태보다 정체류 상태에서 차로변경 지점이 적은 값을 나타내는 것으로 판단컨대 정체류 상태에서 좀 더 일찍 차로변경을 시도하는 것을 알 수 있고, 표준편차의 경우 오히려 정체류가 더 큰 값으로 분석되어 합류지점의 위치 변화가 안정류보다 더 큰 것을 알 수 있다.

2) 차로간 차로변경 전이과정

본 연구에서는 반복정체구간에 교통혼잡이 발생했을 때 차로간 차로변경 분포를 비교하여 연결로에서 본선으로 진

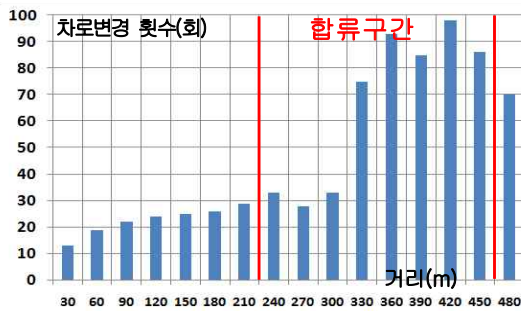
입하는 교통량으로 인해 본선차로에 미치는 영향차로를 분석하고 각 차로간 차로변경 전이과정을 분석하였다.

차로간 차로변경 전이과정에서는 교통외해가 명확히 발생한 합류부 구간의 Santa Monica구간에 대해서만 집중분석을 수행하였다.

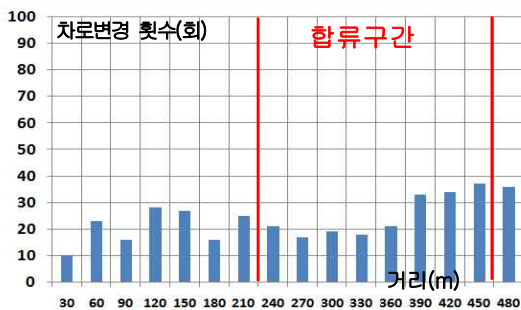
합류부 구간의 Santa Monica구간을 보면 연결로에서 330m 지점부터 차로변경이 집중되었으며(<그림 7(a)> 참조) 연결로의 진입 교통량의 영향으로 1차로에서 2차로로의 차로변경은 330m 지점부터 급격히 높아졌고, 2차로에서 3차로로의 차로변경은 360~390m 구간사이를 기준으로 상류부, 하류부 모두 차로변경 횟수가 많으나 하류부 차로변경 횟수가 약간 더 높은 패턴을 보인다. 이러한 차로변경 패턴은 3차로에서 4차로로의 차로변경 행태에서 지점별로 일정하게 분포되는 경향이 강해지면서 연결로에서 진입하는 차량으로 인한 본선 교통류의 영향은 약해지는 것으로 추측할 수 있다.

고속도로 합류부의 본선 차로간 차로변경 행태는 합류부에서 연결로 차량의 진입위치에 따라 본선 접속차로(1차로)의 차로변경 행태는 결정되고 1차로에서 2차로의 차로변경은 연결로 차량의 합류지점 하류부에서 더 빈번하게 발생하다가 이러한 경향은 본선 내측차로로 전이되면서 점점 약해지면서 본선차량들은 연결로 차량의 진입영향을 회피하고자 상류부에서 미리 차로변경하는 행태를 보이기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

이러한 결과로 보아 연결로 진입 교통량으로 인한 합류부 본선구간의 영향은 1, 2, 3차로에서 발생된 것으로 분석되었으며 차로간 차로변경의 전이는 차로변경이 발생한 지점의 상류부 방향으로 전이되어 일반적인 차로변경 행태와 유사해지는 것으로 판단된다. 또한, 본선 각 차로간 차로변경 횟수는 1차로에서 3차로로 갈수록 약 50%씩 감소하여 차로변경에 대한 영향도 점점 감소하는 것으로 판단된다.



a. 1→2차로



b. 2→3차로



c. 3→4차로

<그림 11> Santa Monica 구간 차로별 30m간격별 차로변경 분포

V. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 개별차량에 대한 미시적인 분석이 가능한 고속도로의 실제 항공사진자료를 분석함으로써 고속도로의 대표적인 반복정체구간인 합류부 구간과 엇갈림 구간의 본선간의 차로변경 행태와 본선과 연결로간의 차로변경 행태가 고속도로의 교통류 상태에 따른 영향을 분석하여 효율적인 고속도로 운영관리를 위한 기초이론 제시를 위하여 수행하였다.

이를 위해 개별차량 교통량, 속도, 밀도 데이터를 생성하여 개별차량 속도변화추이를 통한 분석구간의 교통류 특성을 분석하였다. 그리고 교통혼잡에 따른 차로변경 행태를 분석하기 위하여 안정류와 정체류의 시간대를 찾아내고 차로변경 분포를 이용하여 차로변경 행태를 비교분석하였다. 또한, 정체류 상태에서 연결로에서 진입하는 교통량들이 차로변경을 수행함으로써 본선 교통류에 미치는 영향을 차로간 차로변경 분포를 이용하여 분석하였다.

차로변경 행태 분석 결과, 분석구간의 모든 반복정체 구간에서 정체류 상태가 안정류 상태보다 상류부에서 차로변경이 더 많이 발생하여 좀 더 일찍 차로변경을 시도하였으며 이는 정체류 상태가 안정류 상태보다 본선의 속도가 낮아 연결로에서 진입할 수 있는 속도확보가 많이 필요하지 않기 때문이고 이는 본선 교통류의 상태에 따라 속도가 연결로의 본선 차로변경 행태에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 또한, 각각의 차로별 차로변경 행태를 분석한 결과, 연결로 접속차로(1차로)에서 중앙차로(4차로)로 갈수록 차로변경을 시도하는 횟수가 감소하였으며 또한 중앙차로로 갈수록 높은 빈도수의 차로변경 지점이 상류부 방향으로 이동하는 것으로 나타났다. 그리고 연결로 차량의 합류로 인한 본선 교통류에 미치는 영향을 미시적인 차로변경 행태분석으로 살펴본 결과, 연결로의 합류로 인한 차로변경은 본선의 1, 2, 3차로까지 영향을 미치는 것으로 분석되어 기존 HCM 방법론에서 설명하고 있는 연결로 접속부의 영향권인 본선 바깥차로 1, 2차로의 영향권 분석결과와 다소 다른 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

향후에는 보다 다양한 반복정체구간을 추가로 분석하여 연구결과를 확인할 필요성이 있고 차로간 상호영향을 정량화하여 교통운영 상태를 결정할 수 있는 변수의 개발과 파라메타 선정 및 정산이 이루어져야 한다. 또한, 본 연구의 분석결과는 기존의 차로변경모형과 간격수락모형을 이용한 기존 모형의 검증 및 보완에 대한 연구수행이 필요하고 이를 통한 합류 및 엇갈림구간에서의 실시간 교통관리가 효율적으로 이루어질 수 있는 토대가 형성될 것으로 기대된다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제59회 학술발표회(2008. 10.24)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

### 참고문헌

1. 김경희·장명순·김진태·김응철(2004), “연속교통류에서의 끼어들기 행태 분석 및 모형 개발”, 대한교통학회지, 제22권 제6호, 대한교통학회, pp.145~157.
2. 김영춘·김상구(2008), “고속도로 반복정체구간의 차로변경 행태 분석에 관한 연구”, 제59회 학술발표회, 대한교통학회, pp.472~481.
3. 도로용량편람(2004), 대한교통학회.
4. 연지윤·장명순·김진태·손봉수(2002), “차로이용률을 유도하는 차로변경모형의 개발”, 대한교통학회지, 제20권 제5호, 대한교통학회, pp.99~111.
5. 이승준·박재범·강정규(2005), “가속차로 길이에 따른 합류행태 및 합류부 교통특성 분석”, 대한교통학회지, 제23권 제8호, 대한교통학회, pp.53~66.
6. 정성봉·박상조·박창호·전경수·엄문성(2002), “차로별 속도차가 차로변경에 미치는 영향”, 대한교통학회지, 제20권 제6호, 대한교통학회, pp.69~80.
7. AASHTO (2004), A policy of geometric design of highways and streets, Washington, DC, pp.75~81.
8. Adolf D.May (1990), “Traffic Flow Fundamentals”, Prentice Hall, p.14.
9. Banks, J.H. (2002), “Review of empirical research on congested freeway flow”, Transportation Research Record 1802, pp.225~232.
10. Drew, Donald R.(1968), “Traffic Flow Theory and Control”, McGraw-Hill.
11. FHWA(1985) “Freeway Data Collection for Studying Vehicle Interactions (Technical Report)” FHWA/RD-85/108.
12. Hall, F.L., Hurdle, V.F., and Banks, J.H. (1992), “Synthesis of research work on the nature of speed-flow, and flow-occupancy (or density) relationships on freeways”, Transportation Research Record 1365, pp.12~18.
13. Kockelman, K.M. (2001), “Modeling traffic’s flow density relation: accommodation of multiple flow regimes and traveler types”, Transportation 28, pp.363~374.
14. Polus, A., and Pollatschek, M. (2002), “Stochastic nature of freeway capacity and its esti-

- mation”, Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 29(6), pp.842~852.
15. TRB(2000), Highway Capacity Manual, Fourth Edition, U.S.A.
16. Zhang, Y., L.E. Owen, and E.C. James(1998), “Multiregime Approach for Microscopic Traffic Simulation”, Transportation Research Record 1644.

✉ 주 작성자 : 김영춘

✉ 교신저자 : 김상구

✉ 논문투고일 : 2008. 10. 24

✉ 논문심사일 : 2008. 11. 28 (1차)

2009. 5. 27 (2차)

2009. 6. 23 (3차)

✉ 심사판정일 : 2009. 6. 23

✉ 반론접수기한 : 2009. 12. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필